В. А. Королёв

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОКИБЕРНЕТИКА

Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

В.А. Королёв

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОКИБЕРНЕТИКА

Теория управления эколого-геологическими системами

Москва – 2020 г.

УДК 502/504:007
ББК 20.1

ISBN 978-5-00166-183-2

К68 **Королёв В.А. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОКИБЕРНЕТИКА: Теория управления эколого-геологическими системами** – М.: ООО Сам Полиграфист, 2020. - 440 с., ил., таб., библ.

В монографии излагается теория нового направления экологической геологии – экологической геокибернетики, отрасли научных знаний об управлении эколого-геологическими системами различных уровней организации, Одной из задач экологической геокибернетики является геологическое обоснование создания и управления искусственными эколого-геологическими системами с заданными характеристиками. Их разработка является альтернативой негативной экологической ситуации, складывающейся во многих современных городах. На базе положений экологической геокибернетики должно осуществляться проектирование искусственных эколого-геологических систем с характеристиками, отвечающими принципам их оптимизации, компенсации и гармонизации с окружающей средой.

Для специалистов в области охраны окружающей среды, геоэкологии, экологической геологии, промышленной экологии, а также студентов и аспирантов вузов.

Рецензенты

Зав. лабораторией охраны геологической среды и взаимосвязи поверхностных и подземных вод (ЛОГС) геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова, доктор г.-м. наук В.И. Сергеев

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова, доктор г.-м. наук, Е.Н. Самарин

© Королев В.А., 2020

ISBN 978-5-00166-183-2

Оглавление

Принятые обозначения и аббревиатуры ……7
Введение ……9

Часть I
ТЕОРИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ГЕОКИБЕРНЕТИКИ

Глава 1. ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КАК ОБЪЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ ……15
1.1. К истории управления человеком природными условиями……15
1.2. Основные понятия экологической геокибернетики ……32
1.2.1. История становления кибернетики ….……32
1.2.2. Понятие об экологической геокибернетике и её становление ……38
1.2.3. Понятие об управлении ……46
1.2.4. Управляемость эколого-геологической системы……...48
1.2.5. Объекты управления ……49
1.2.6. Структура системы управления ……...54
1.2.7. Проблема управления экосистемами ……..55
1.2.8. Цель, объект и предмет исследования экологической геокибернетики …… ……..58
1.3. Понятие о эколого-геологической системе….……65
1.3.1. Определение ЭГС……..……..65
1.3.2. Характеристика моделей ЭГС…….……72
1.3.3. Построение структурированных моделей ЭГС 77
1.3.4. Иерархия ЭГС ……82
1.3.5. Систематика ЭГС ……..88

Глава 2. ОПАСНОСТИ ДЛЯ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ..97
2.1. Понятие об опасности……..……97
2.2. Источники опасности для ЭГС……..……99
2.2.1. Подразделение источников опасности……..……99
2.2.2. Природные опасности……..……102
2.2.3. Техногенные опасности ……..107
2.3. Математическое описание опасностей и риска для ЭГС …….118
2.3.1. Общие положения ……...118
2.3.2. Распределение опасных явлений во времени……125
2.3.3. Пространственное распределение опасных явлений…128

Глава 3. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ…….132
3.1. Общие положения ……..132
3.1.1. Диагностирование и прогнозирование состояний однородных ЭГС ……..133

3.1.2. Диагностирование и прогнозирование состояний неоднородных ЭГС ……...138
3.1.3. Рекомендации по управлению состоянием ЭГС.....141
3.2. Описание природных эколого-геологических систем ……142
3.2.1. Описание ЭГС как системы ……142
3.2.2. Описание компонентов ЭГС ……...146
3.2.3. Оценка состояния литотопа ……148
3.2.4. Оценка состояния эдафотопа……...158
3.2.5. Оценка состояния микробоценоза ……..164
3.2.6. Оценка состояния фитоценоза……165
3.2.7. Оценка состояния зооценоза ……...168
3.3. Описание техно-природных, природно-технических и искусственных эколого-геологических систем ……..170

Глава 4. МЕТОДОЛОГИЯ, ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ГЕОКИБЕРНЕТИКИ……..176
4.1. Целевая функция и задачи управления ЭГС ……..176
4.2. Методология управления ЭГС ……179
4.3. Информационное обеспечение управления ……...185
4.4. Принципы экологической геокибернетики ……189
4.4.1. Принцип разомкнутого управления ……189
4.4.2. Принцип компенсации возмущения ……...190
4.4.3. Принцип обратной связи ……..193
4.4.4. Принцип адаптивного управления ……..198
4.5. Классификация систем управления ЭГС по типу сигнала……200
4.6. Особенности управления абиотическими и биотическими компонентами ЭГС ……205
4.7. Математические модели управления ЭГС.……209
4.7.1. Общие положения……..209
4.7.2. Математические модели среды ……...215
4.7.3. Математические модели ЭГС как многомерных систем ……216
4.7.4. Математические модели организмов в ЭГС……221
4.7.5. Математические модели взаимодействия ЭГС со средой ……224

Глава 5. УСТОЙЧИВОСТЬ И САМОВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ……227
5.1. Устойчивость эколого-геологических систем ……..227
5.1.1. Понятие устойчивости ……227
5.1.2. Теория устойчивости ЭГС ……..230
5.1.3. Пороги устойчивости ЭГС ……238
5.1.4. Законы оптимальности ЭГС……242
5.2. Механизмы самовосстановления ЭГС ……243
5.3. Круговые биогеохимические циклы в эколого-геологических системах ……247

5.4. Термодинамика самоорганизации, самовосстановления и саморегуляции ЭГС …….258
5.5. Вещественно-энергетический баланс в эколого-геологических системах ……261

Часть II
МЕТОДЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ГЕОКИБЕРНЕТИКИ

Глава 6. МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ АБИОТИЧЕСКИМИ КОМПОНЕНТАМИ ЭГС ……..270
6.1. Методы управления составом, строением, состоянием и свойствами грунтов ЭГС …….270
6.2. Методы очистки массивов грунтов от загрязнений …….277
6.2.1. Методы удаления загрязнений ……281
6.2.2. Методы деструкции (детоксикации) загрязнений…….287
6.2.3. Методы локализации загрязнений ……..297
6.3. Методы управления подземными и поверхностными водами ЭГС……305
6.3.1. Водопонижение в ЭГС …….305
6.3.2. Управление водостоком в ЭГС ……310
6.3.3. Методы очистки поверхностных сточных вод…312
6.3.4. Методы управления руслом рек ЭГС ……..313
6.4. Методы управления рельефом территории ЭГС ……..316
6.5. Методы управления геологическими и инженерно-геологическими процессами в ЭГС ……...317
6.5.1. Управление эндогенными процессами…….317
6.5.2. Методы управления гравитационными склоновыми процессами в ЭГС ……..320
6.5.3. Методы управления абразией в ЭГС ……327
6.5.4. Методы управления водной эрозией в ЭГС……..328
6.5.5. Управление речной эрозией …….330
6.5.6. Управление селями ……331
6.5.7. Управление наводнением и затоплением территорий ЭГС …….332
6.5.8. Управление карстом ……..333
6.5.9. Управление суффозией …….335
6.5.10. Управление заболачиванием и подтоплением…….335
6.5.11. Управление дефляцией и ветровой эрозией……337
6.5.12. Управление криогенными процессами в ЭГС……..339

6.6. Методы управления литотехническими системами ……342

Глава 7. МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭДАФОТОПОМ ЭГС ……346
7.1. Мелиоративные методы ……352
7.2. Агротехническая рекультивация ……356

Глава 8. МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ БИОТИЧЕСКИМИ КОМПОНЕНТАМИ ЭГС ……358
8.1. Общие положения ……358
8.2. Методы управления микробоценозом ЭГС ……361
8.3. Методы управления фитоценозом ЭГС ……369
8.4. Методы управления зооценозом ЭГС ……372

Глава 9. СОЗДАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ……380
9.1. Проектирование искусственных ЭГС ……380
9.2. Ландшафтный дизайн ……384
9.3. Искусственные водные эколого-геологические системы……387
9.3.1. Общие положения……387
9.3.2. Защитные и восстановительные мероприятия…….....391
9.4. Искусственные сухопутные эколого-геологические системы...399
9.4.1. Общие понятия……...399
9.4.2. Сельскохозяйственные эколого-геологические системы……...400
9.4.3. Городские эколого-геологические системы.....402
9.4.4. Промышленные эколого-геологические системы...412
9.4.5. Горнодобывающие эколого-геологические системы……...413
9.4.6. Рекреационные эколого-геологические системы…414

Заключение ……417
Список литературы ……418
Указатель имен ……433
Предметный указатель ……43

***

Принятые обозначения и аббревиатуры

A - матрица
a_{ti} – характеристика состояния системы
B,C,D,E,G – квадратная или прямоугольная матрица
e - отклонение управляемой переменной от заданного значения g или ошибка системы
f — возмущающее (внешнее) воздействие
F – функция распределения
$\tilde{F}$ – статистическая функция распределения
I – информация
I – целевая функция
I_m – импактное воздействие
L - квадратная или прямоугольная матрица управления
L - оператор процесса
l – пространственная координата
L – событие (явление)
M - квадратная или прямоугольная матрица управления
N – число наблюдений (событий)
P — вероятность события
$Q(\Delta t)$ - вероятность реализации события за интервал времени Δt
R - риск
s – площадь
S - энтропия
St – стабильность системы
$S_п$ – площадь зоны поражения
$S_т$ – площадь конкретной территории
t – время
U – случайная величина
u — управляющее воздействие (информационное)
U_s – устойчивость системы
U_{su} – резистентная устойчивость
U_{su} – упругая устойчивость
v – вектор переменных состояния
x – аргумент (переменная, вход) или координата
X – вектор обобщенных координат
Y – вектор регулируемой величины
y — управляемая переменная (выход объекта и системы)
Δt – интервал времени
λ — частота реализации события
$\lambda_о$ - повторяемость (частота) опасного природного явления
$\lambda_т$ - частота опасных событий на определённой территории
μ - управляющее воздействие (энергетическое)
ρ - плотность
φ_i – параметры нагрузок на ЭГС
φ_{ik} – критериальные параметры нагрузок на ЭГС
φ_{max} – амплитуда выбросов нагрузок, предельный уровень
A_{tk} – интегральный показатель состояния системы
АПДС – автоматизированная прогнозно-диагностическая система
АСУ – автоматизированная система управления
БГЦ - биогеоценоз
БД – база данных
ГИС – геоинформационная система
ИМ - исполнительный механизм
ИУ – исполнительное устройство
ИЭ - измерительный элемент
K – компенсирующее устройство (система)
$K_п$ – коэффициент пораженности территории опасными процессами
ЛТС – литотехническая система

МУ – метод управления
ОГП – опасные геологические процессы
ОДС – область допустимых состояний ЭГС
ОС – обратная связь
ОУ – объект управления
ПАВ – поверхностно-активные вещества
ПДК – предельно допустимая концентрация
ПДМ – постояннодействующая модель
ПДУ – предельно допустимы уровень
ПТС – природно-техническая система
р - давление
Р - регулятор
СУБД – система управления базой данных
УДК – условно-допустимая концентрация
УО - управляющий орган
УУ – управляющее устройство (система)
Ф - функция
Ф(х) – функция Лапласа
ЭГП – экзогенные геологические процессы
ЭГС – эколого-геологическая система
ЭГУ – эколого-геологические условия

***

Введение

«Мысли глобально, но действуй локально!»
Экологический лозунг

«Мы не можем ждать милостей от природы; взять их у нее - наша задача.»
И.В. Мичурин, 1934

Можно и нужно ли управлять окружающей природной средой? Ответ на этот вопрос даёт вся длительная история развития человеческой цивилизации, в ходе которой человек не только приспосабливался к условиям окружающей природной среды, но и активно изменял её с целью обеспечения своего более комфортного проживания.

В то же время, всё увеличивающиеся масштабы вмешательства человека в природную среду входят в противоречие с законами её естественного функционирования и часто вызывают необратимые отрицательные экологические изменения. Поэтому актуальная задача современности состоит в том, чтобы обеспечить и сохранение природной среды, и развитие техносферы. В её решении огромная роль отводится управлению природно-техническими и эколого-геологическими системами, которое и является предметом рассмотрения в настоящем издании.

В 2018 г. в России были приняты приоритетные национальные проекты, реализация которых запланирована к 2024 году. Среди них выделен национальный проект «Экология», в рамках которого необходимо организовать:

- эффективное обращение с отходами производства и потребления, включая *ликвидацию* всех выявленных на 1 января 2018 г. несанкционированных *свалок* в границах городов;

- кардинальное снижение уровня *загрязнения* атмосферного воздуха в крупных промышленных центрах, в том числе уменьшение не менее чем на 20 процентов совокупного объема выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в наиболее загрязненных городах;

- повышение качества питьевой воды, в том числе для жителей городов, не оборудованных современными системами централизованного водоснабжения;

- сохранение биологического разнообразия, в том числе посредством создания не менее 24 новых особо охраняемых природных территорий;

- *ликвидацию свалок и рекультивация территорий*, на которых они размещены, создание условий для вторичной переработки всех запрещенных к захоронению отходов;

- создание и эффективное функционирование во всех субъектах РФ системы общественного контроля, направленной на выявление и ликвидацию *несанкционированных свалок*;

- переселение редких видов животных;

- создание современной инфраструктуры по безопасному обращению с *отходами* I и II классов опасности;

- ликвидацию наиболее опасных объектов накопленного экологического вреда в России;

- модернизацию систем *водоснабжения* с использованием перспективных технологий *водоподготовки*, включая технологии, разработанные в оборонно-промышленном комплексе;

- реализацию проекта, направленного на сокращение в три раза доли *загрязненных сточных вод*, отводимых в реку Волгу, устойчивое функционирование водохозяйственного комплекса Нижней Волги и сохранение экосистемы Волго-Ахтубинской поймы;

- *очистку от мусора* берегов и прибрежной акватории озер Байкал, Телецкое, Ладожское, Онежское и рек Волги, Дона, Оби, Енисея, Амура, Урала, Печоры;

- создание инфраструктуры для экотуризма в национальных парках, воспроизводство лесов на всех участках вырубленных и погибших лесных насаждений.

Таким образом, в нацпроекте «Экология» важная роль отводится вопросам активного управления качеством окружающей среды и экосистем, очистки геологической среды, подземных вод от загрязнений, создания благоприятных экологических условий для человека. Среди негативных техногенных изменений геологической среды - её загрязнение и ухудшение экологического состояния территорий в результате большей частью не контролируемого накопления на поверхности и в недрах различных промышленных и бытовых отходов вызывает особую опасность. Чтобы процесс загрязнения верхних горизонтов литосферы не принял бы необратимого и катастрофического характера необходимы, с одной стороны, изменение стратегии природопользования, устранение путей и источников дальнейшего загрязнения геологической среды, а с другой - разработка и практическое внедрение способов, а также технологий

подавления токсичности и очистки различных элементов геологической среды от этих загрязнений.

Наиболее интенсивное ухудшение качества экосистем и геологической среды происходит на техногенно-нарушенных территориях, к которым, прежде всего, относятся: 1) урбанизированные территории крупных городских мегаполисов с интенсивно развитой и разнообразной промышленной инфраструктурой; 2) промзоны комбинатов, заводов, фабрик и др. предприятий разных видов промышленности; 3) территории горно-обогатительных комбинатов (ГОКов) и горно-добывающих предприятий (карьеров, шахт, отвалов пустой породы и т.п.); 4) территории добычи, транспортировки, переработки и хранения нефти и газа; 5) территории топливно-энергетических комплексов (ТЭК, тепловых электростанций, ГЭС, ГАЭС, АЭС и др.); 6) военные (испытательные) полигоны и др. На этих территориях происходит негативное изменение абиотических компонентов геологической среды: изменение состояния и свойств грунтов; накопление в геологической среде неблагоприятных техногенных грунтов, промышленных и коммунальных отходов, включая полигоны ТБО, подземных хранилищ токсичных производственных отходов и т.п.; преобразование (иногда коренное) гидрогеологических условий; активизация опасных и неблагоприятных инженерно-геологических процессов; значительное загрязнение всех компонентов геологической среды токсикантами; изменение (иногда также коренное) геокриологических условий. В связи с этим меняются упрощенные представления о геологической среде, как только о среде инженерно-хозяйственной деятельности человека.

В более общем, биоцентрическом смысле геологическая среда является частью «биосферы» - среды жизни на Земле и приобретает ноосферный смысл (Трофимов, Королев, 2014). В связи с этим под *геологической средой* следует понимать *область верхних горизонтов литосферы, находящуюся в прошлом, настоящем или будущем во взаимодействии с инженерно-хозяйственной деятельностью человека, качественно и количественно эволюционирующую во времени, являющуюся компонентом природных и природно-технических экосистем и возможным элементом геноогенеза* (Трофимов, Королев, 2014).

Поэтому мероприятия по управлению компонентами геологической среды, по восстановлению геологической среды на загрязненных и нарушенных территориях предусматривают проведение комплекса работ по рекультивации земель, направленных на восстановление продуктивности и народнохозяйственной ценности

нарушенных и загрязненных земель, а также на улучшение условий окружающей среды согласно ГОСТ 17.5.3.04-83. Вопросам геологического обоснования управления литотехническими системами и природно-техническими системами посвящено значительное число работ таких авторов как Г.К.Бондарик (1994, 2015), А.Н.Галкин (2012), Д.Г.Зилинг, Ю.М.Зинюков (2010), В.Г.Кондратьев (2010), В.А.Королев (2007, 2010, 2016а), Д.В.Мелконян и Е.А.Черкез (2010), В.В.Пендин (2010), В.Т.Трофимов (2002, 2010а), Н.Л.Шешеня (2010) и др.

На решение задач по управлению эколого-геологическими системами, по восстановлению техногенно-нарушенной геологической среды направлена ***геокибернетика*** — отрасль научных знаний об управлении природно-техническими системами различных уровней, об управлении окружающей средой (Бондарик, Ярг, 2015). Согласно Г.К.Бондарику (1994, 2015) разработка управляющих взаимодействий для природно-технических систем (ПТС) – актуальная проблема геокибернетики. Для эколого-геологических систем (ЭГС), являющихся частью ПТС, эта проблема также актуальна, т.к. её разработка позволяет оптимизировать функционирование ЭГС и обеспечить их коэволюционное развитие. Применительно к ЭГС раздел геокибернетики, рассматривающий вопросы управления эколого-геологическими системами называется ***экологической геокибернетикой*** (Королев, 2016).

Цель экологической геокибернетики – *управление эколого-геологическими системами для обеспечения устойчивого развития.* Конкретизация цели экологической геокибернетики рассматривается в разделе 1.2.7.

В практике работ по управлению эколого-геологическими или природно-техническими системами применяют различные группы методов управления – административно-правовые и экономические механизмы, научно-технические механизмы, международные положения и механизмы (Трофимов, Зилинг, 2002; Трофимов, 2010а). В рамках геокибернетики рассматриваются только научно-технические механизмы, реализуемые на практике теми или иными методами управления, рассматриваемыми ниже.

Методы экологической геокибернетики, относящиеся к научно-техническим механизмам, объединяют в себе различные способы воздействия (управления) на ЭГС. Они довольно многочисленны и включают в себя: 1) методы очистки геологической среды от загрязнений; 2) методы управления геологическими процессами; 3) методы рекультивации (восстановления, реабилитации) нарушенных территорий; 4) методы мелиорации (целенаправленного улучшения)

территорий, включающие: а) гидротехническую мелиорацию; б) агротехническую мелиорацию почв; в) биологическую мелиорацию; г) химическую мелиорацию; д) культурно-техническую мелиорацию; е) климатическую мелиорацию, а также: 5) методы управления биотическими компонентами ЭГС: микробоценозами, фитоценозами и зооценозами; 6) мониторинг, как комплексный метод в структуре управления эколого-геологическими системами; 7) комплексные схемы управления эколого-геологическими системами. Все эти методы рассматриваются в настоящей работе.

Общая *теория управления* эколого-геологическими системами (теория экологической геокибернетики) включает в себя: 1) цель и задачи управления; 2) информационное обеспечение управления; 3) принципы управления (принципы экологической геокибернетики), включающие: а) принцип программного управления; б) принцип управления по возмущениям; в) принцип обратной связи и др. (Королев, 2016).

Методика управления эколого-геологическими системами (методика экологической геокибернетики) строится на базе обоснования структуры управления эколого-геологическими системами и рассмотрения ЭГС как сложных адаптивных систем. Эта методика включает в себя методику адаптивного управления и методику системного управления и др.

Наконец, конечным этапом реализации возможностей экологической геокибернетики является обоснование создания *искусственных* эколого-геологических систем *с заданными характеристиками.* Их разработка является альтернативой вышеупомянутой негативной экологической ситуации в современных городах. На базе положений экологической геокибернетики должно осуществляться проектирование искусственных ЭГС с требуемыми характеристиками, отвечающими принципам их оптимизации, компенсации и гармонизации с окружающей средой. В рамках этого направления в настоящее время уже широко развивается ландшафтный дизайн, создание искусственных водных эколого-геологических систем и искусственных сухопутных эколого-геологических систем, создание гиперионов – искусственных агроэкосистем и других типов искусственных экосистем. Примерами искусственных экосистем являются реализуемые проекты искусственных островов в Дубае, примерами гиперионов являются проекты в Нью-Дели (Индия), Сингапуре и др.

В заключение необходимо отметить, что реализация стратегии устойчивого развития биосферы, безусловно, не сводится лишь к одним

только методам экологической геокибернетики. Это комплексная проблема, которая должна решаться комплексом различных методов, включая административные, правовые, экономические, политические, социокультурные и т.п. (Трофимов, 2002, 2010). Но среди них методы экологической геокибернетики являются одними из важнейших.

Таким образом, перед экологической геокибернетикой стоят очень сложные и амбициозные задачи, решение которых будет во многом определять будущий лик Земли и человеческого сообщества (Королев, 2016). На их решение и направлена настоящая книга.

Ваши отзывы и пожелания по монографии просьба направлять автору: 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, или по e-mail: va-korolev@bk.ru .

***

Глава 1

ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КАК ОБЪЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ

1.1.К истории управления человеком природными условиями

> «…антропогенный фактор ландшафто-образования за последние три тысячи лет приобрел и продолжает приобретать важное место в лике земной поверхности»
>
> *Л.Н. Гумилев* (2002, с. 198)

Связь развития цивилизаций, государств, этносов с природно-климатическими условиями была отмечена давно и в настоящее время никем не оспаривается (Ж.Боден, 1566,1576; Монтескье, 1748; Берг, 1922; Грумм-Гржимайло, 1933; Калесник, 1968; Гумилев, 2002). Именно в этой связи возникла концепция ***географического детерминизма***, согласно которой процесс общественного развития это не результат проявления объективных закономерностей развития общества, а следствие влияния природных сил. При этом климат, почва, растительность, животный мир и другие факторы становятся определяющими не только для характера общественного строя, но и для психотипа людей, их образа жизни, быта, способностей и т.п. Понятно, что сводить все сложные процессы эволюции общества только к этой концепции не верно. Но учитывать данный фактор, безусловно, необходимо.

Идеи близкие к географическому детерминизму высказывали еще Гиппократ, Аристотель и Полибий (Семёнов, 2003). Так, например, Гиппократ подчеркивал, что «формы людей и нравы отражают природу страны»[1].

А Аристотель писал еще более определённей: «Племена, обитающие в странах с холодным климатом, притом в Европе, преисполнены мужества, но недостаточно наделены умом и способностями к ремеслам. Поэтому они дольше сохраняют свою свободу, но не способны к государственной жизни и не могут господствовать над своими соседями. Населяющие же Азию в духовном отношении обладают умом и отличаются способностями к ремеслам, но

[1] *Гиппократ.* О воздухах, водах и местностях // Избр. книги. – М.: 1994, с. 304

им не хватают мужества; поэтому они живут в подчинении и рабском состоянии»[1].

Древнегреческий историк Полибий формирование разнообразия народов также определенно связывал с климатом: «..Природные свойства всех народов, — писал он, неизбежно складываются в зависимости от климата. По этой, а не по какой-либо иной причине народы представляют столь резкие отличия в характере, строении тела и в цвете кожи, а также в большинстве занятий»[2].

Однако более-менее обоснованная концепция географического детерминизма появилась лишь в XVI веке в трудах Жана Бодена - французского философа, политика и экономиста. По его мнению, главную роль среди природных факторов играет климат той или иной страны. Он выделил три основные климатические зоны: южную, умеренную и северную. Одновременно он ввёл также деление на Восток и Запад, приравнивая первый к югу, а второй — к северу. Помимо климата, по Ж.Бодену, оказывают влияние также и такие природные факторы, как характер местности: она может быть горной, болотистой или пустынной, ветренной и безветренной, и, наконец, качество почвы — ее плодородие или бесплодие. Но главным, по его мнению, является, конечно, климат (Семенов, 2003).

Жан Боден (1529-1596)

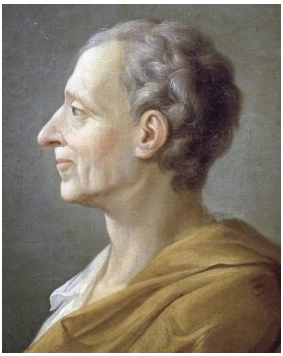
Вслед за Ж.Боденом идеи географического детерминизма развивали Ф.Бэкон (1561-1626), Уильям Темпл (1628-1699), Бернар ле Бовье де Фонтанель (1657-1757), Жан-Батист Дюбо (1670-1742) и др. Последний влиянием климата объяснял различие нравов и одаренности народов разных стран.

В эпоху Просвещения наиболее заметный вклад в концепцию географического детерминизма внес Шарль де Монтескье,

[1] *Аристотель*. Политика. // Соч. в 4-х т. Т. 4. М., 1983. С. 601.

[2] *Полибий*. Всеобщая история. I. СПБ., 1994. *С.* 363.

подчеркивавший значение климата, рельефа и почвы. Он писал (1748)[1]: «От различия в потребностях, порождаемого различием климатов, происходит различие в образе жизни, а от различия в образе жизни — различие законов».



Шарль де Монтескьё
(1689-1755)

Говоря о роли рельефа местности, Монтескье писал: «В Азии всегда были обширные империи; в Европе же они никогда не могли удержаться. Дело в том, что в известной нам Азии равнины гораздо обширнее и она разрезана горами и морями на более крупные области; а поскольку она расположена южнее, то ее источники скорее иссякают, горы менее покрыты снегом и не очень многоводные реки составляют более легкие преграды. Поэтому власть в Азии должна быть всегда деспотической, и если бы там не было такого крайнего рабства, то в ней очень скоро произошло бы разделение на более мелкие государства, несовместимое, однако, с естественным разделением страны»[2]

Одновременно с идеей географического детерминизма развивалась и иная концепция, которую мы называем концепцией ***преобразующего детерминизма***, согласно которому развитие цивилизаций подчиняло себе природные условия и изменяло их для собственного блага. Таким образом если в концепции географического детерминизма человек остается пассивной силой по отношению к природным условиям, то в концепции преобразующего детерминизма человек становится активной силой, преобразующей природные условия под свои потребности, т.е. создающей себе наилучшие экологические условия. Так появляются искусственные социально-экологические государственные системы.

Хотя до сих пор идут споры о том, насколько климат влияет на развитие государства или этноса, но на смену формаций географическая среда не влияет (Гумилев, 2002). Модификация ландшафтов (природная или техногенная) вызывала также и массовые миграции: если люди не справлялись с изменившимися природными условиями (засухами, наводнениями и т.п.) – начинались миграции.

---

[1] *Монтескье Ш.* О Духе законов // Избр. произведения. – М., Гослитиздат, 1955. С.366

[2] *Монтескье Ш.* О духе законов // Избранные произведения. М., 1955. С. 391.

Л.Н. Гумилев[1] считал, что «монотонный ландшафтный ареал стабилизирует обитающие в нем этносы, разнородный - стимулирует изменения, ведущие к появлению новых этнических образований» (Гумилев, 2002, с. 197).

Лев Николаевич Гумилёв
(1912-1992)

Человек (как и его предки неандертальцы и др.) всегда искал наиболее экологически благоприятные для своего проживания географические или природно-климатические условия. Когда же с ростом численности населения все «лучшие» земли были «заняты», пришлось либо осваивать менее благоприятные территории (идея демографического детерминизма), либо отвоевывать и захватывать более благоприятные земли. В первом случае здесь и понадобились умения строить оросительные системы, менять русла рек, менять рельеф, повышать плодородие бедных почв, возводить специальные инженерные сооружения (например, свайные поселения, известные в Европе с V по I тысячелетие до н.э., а также террасные поля и др.).

С древних времен человек обустраивал территорию своего проживания, с одной стороны, приспосабливаясь к её природным условиям, а с другой – стремясь подчинить её себе наилучшим образом.

Обе эти тенденции сохранились и в наше время. На современном языке эта деятельность человека рассматривается как направленная на создание более комфортных экологических условий проживания.

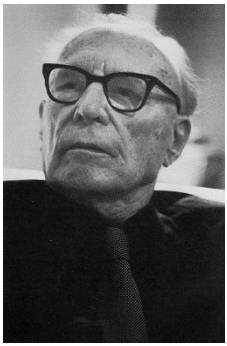
Можно привести массу примеров успешного преобразования природных условий и создания человеком искусственных экосистем. Уже в неолите, с появлением земледелия и скотоводства в древней Месопотамии, Древнем Египте, а также в Индии и Китае были созданы первые ирригационные сооружения в долинах крупных рек (Тигра и Ефрата, Нила, Ганга, Хуанхэ, соответственно) и возникли так называемые «ирригационные империи»[2], или «ирригационные

---

[1] *Гумилёв Лев Николаевич* (1912-1992) – советский и российский ученый, писатель, археолог, философ, востоковед и этнолог

[2] *Ирригационные цивилизации* (hydraulic state - термин введён К.Виттфогелем) — это компактные сообщества народов, существование которых полностью определялось коллективным трудом по созданию, расширению и поддержанию ирригационных сельскохозяйственных систем.

цивилизации», которые были самыми распространенными на Земле и доминировали в V-II тысячелетиях до нашей эры. Неолитическая революция позволила преодолеть экологический и демографический кризисы конца мезолита, создала условия для выживания и быстрого развития общества на новых началах, особенно в земледельческих районах.



Карл Август Виттфогель (1896-1988)

Эту деятельность ряд социологов связывает не только и не столько с проблемами экологии, сколько с становлением политических деспотических систем. Так, например, согласно К. Виттфогелю[1] (Witthofel, 1957), убеждённому антикоммунисту, имеется прямая причинно-следственная связь: «засушливый климат → ирригационное земледелие (=коллективная работа) → развитие бюрократии (=развитие восточной деспотии)». Согласно его точке зрения, ирригация требовала массового коллективно организованного труда, который мог быть реализован лишь в условиях деспотического государства: ирригационный способ земледелия является наиболее вероятным ответом доиндустриального общества на трудности ведения хозяйства в условиях засушливого климата. Связанная с этим способом хозяйства необходимость организованных коллективных работ приводит к развитию бюрократии и, как следствие, к усилению авторитаризма. Так возникает восточная деспотия, или «гидравлическое государство» — особый вид общественного устройства, отличающийся крайним антигуманизмом и неспособностью к прогрессу (власть блокирует развитие) (Галеев, 2011). К.Виттфогель связывает ирригационные государства с главной их ценностью – водой, как основного ресурса земледелия, владение которой обеспечивало и власть над людьми.

Теория К.Виттфогеля поддерживалась многими социологами, но у неё есть и немало критиков, подчеркивающих массу противоречий - его теории, в частности отмечавших тот факт, что в целом ряде и европейских государств существовали гигантские ирригационные системы (Крит, Римская империя и др.), но эти государства не были деспотическими. Характерный тому пример – Нидерланды, в которых ирригационные системы, по сути, создали эту страну, отвоевывавшую

[1] *Виттфогель, Карл Август* (1896-1988) – германо-американский социолог и синолог.

у моря территории благодаря польдерным системам[1] начиная с XIV-XV веков. Эти системы существуют в Нидерландах до сих пор и продолжают совершенствоваться с применением новых современных технологий дренажа и защиты от подтопления. При этом Нидерланды отнюдь не были и не являются деспотической страной. Обстоятельный разбор критики теории Виттфогеля, идеализировавшего Запад и демонизировавшего Восток, был дан К.Р.Галеевым (2011).

В последующие эпохи от II тысячелетия до н.э. до конца I тысячелетия н.э. в разных государствах так или иначе использовались различные способы подчинения природных условий и ресурсов для создания более благоприятных условий проживания. Наряду с ирригацией, это были методы террасного земледелия (Китай, государства Майя, империя инков, Ближний Восток и др.), образование городов – искусственных экосистем компактного проживания большого числа людей. В Древней Греции, в трудах Платона и Аристотеля, возникли первые представления об идеальных моделях города. Знаменитые «Висячие сады Семирамиды» - террасные многоуровневые (каскадные) сады древнего Вавилона, одно из Семи чудес света, - яркий пример создания искусственного ландшафта, или иными словами – ландшафтного дизайна.

Но человек подчинял себе не только ландшафты, но и растения и животных путём их постепенного одомашнивания. Первыми домашними животными были собака (одомашнена ок. 33 тыс. лет до н.э.), домашние овцы, свиньи и козы (11-9 тыс. лет до н.э.), корова (8 тыс. лет до н.э.), кошка (7,5 тыс. лет до н.э.), курица (6 тыс. лет до н.э.), лошадь (4 тыс. лет до н.э.) и др. Были одомашнены даже насекомые – тутовый шелкопряд и медоносная пчела (ок. 5 тыс. лет до н.э.). Однако общее число видов домашних животных не превышает двадцати пяти.

Одновременно шла доместикация растений: злаки (пшеница, ячмень, рис, просо и др.) начали возделывать 7,5-6,5 тыс. лет до н.э.[2], кукурузу, бобы, картофель и тыкву – 3,5 тыс. лет до н.э., подсолнечник – 2,5 тыс. лет до н.э. и т.д. Позднее всего развивалось плодоводство. Всего было одомашнено свыше 200 видов растений. Вместе с доместикацией растений совершенствовались виды земледелия: от мотыжного, подсечно-огневого и пахотного к мелиоративному и

[1] *Польдер* – низменный участок морского побережья, защищенный дамбами, осушенный и возделанный специальными способами.

[2] *Гончаров Н.П.* Доместикация растений // Вавиловский журнал генетики и селекции, том.17, 2013, № 4/2, с. 884-899.

орошаемому земледелию. Таким образом, первые антропогенные агроэкосистемы возникают около 7,5 тыс. лет до н.э.

Огромный вклад в исследование центров доместикации растений внес академик Н.И. Вавилов[1], который ввел в научный оборот термин «земледельческая культура». Земледельческая культура, согласно концепции Н.И. Вавилова, слагается из нескольких составляющих: 1) домашние растения с теми или иными конкретными методами их возделывания, особое соотношение полеводства с другими отраслями хозяйства, прежде всего животноводством; 2) факторы, охватывающие область социально-бытовых (этнографических) традиций; 3) географическая среда, представленная данными климатом, почвами и т. д., а также теми её элементами, которые созданы человеком; 4) демографические факторы, из которых основным является плотность населения (этот фактор имеет самостоятельное значение и его следует выделять особо).

Николай Иванович Вавилов
(1887-1943)

При этом практически все «ирригационные культуры» были земледельческими, но не все земледельческие культуры были ирригационными (например, богарное или подсечное земледелие не требовало ирригации).

Одновременно с этим шла конкуренция «ирригационных цивилизаций» и других, опиравшихся на адаптацию к существующим природным условиям за счет торговли (финикийцы), войн, скотоводства и кочевничества или специфических видов земледелия.

Конкуренция между «ирригационными цивилизациями» и иными была жесткой. В условиях изменения природно-климатических условий «ирригационные цивилизации» оказывались более устойчивыми, тогда как кочевые и «торговые» цивилизации были вынуждены менять регионы проживания, осваивать новые земли, покидая оскудевшие территории. Войны за лучшие земли сопровождали все эпохи развития человеческой цивилизации вплоть до наших дней…

Период от средних веков (с VI в.) до конца XVIII века характеризуется всё более активным использованием мелиорации для

[1] *Вавилов Николай Иванович* (1887-1943) – советский ученый-генетик, ботаник, общественный деятель, академик АН СССР

преобразования окружающей природной среды в государствах Европы и Азии. С совершенствованием методов архитектуры и строительства создаются все более благоприятные условия проживания людей в урбоэкосистемах, в результате чего происходит постоянный рост числа городских жителей.

Свою древнюю историю создание искусственных экосистем имеет и Россия. Одни земли осушались под освоение, другие орошались под земледелие. Жители древней Руси вели осушительные работы на относительно небольших участках местности в Великом Новгороде уже в XI веке, на Валааме в XII веке, на Соловецких островах в XVI веке, в Москве в XVII веке и ряде других городищ.

Андрей Тимофеевич Болотов (1738-1833)

С XVIII в. в результате промышленной, а затем научно-технической революций на смену доиндустриальной эпохе приходит индустриальная, вместе с которой происходит увеличение масштабов и видов техногенного воздействия на природную среду.

В России масштабные мелиоративные работы начались в эпоху Петра I и затем продолжились в течение всего XVIII и XIX веков. Одним из первых российских ученых, занимавшихся созданием агросистем, был А.Т.Болотов[1], оставивший труды по агрономии, агротехнике, лесоразведению, помологии и ботанике.

Позже происходит увеличение объема и разнообразия мелиоративных работ и способов их осуществления. Появляется закрытый дренаж, лесомелиорация, строительство дамб в Голландии (польдерные системы), отводных каналов в Полесье. Мелиоративные приемы использовались и в градостроительстве (например, Санкт-Петербург был построен на заболоченной низине).

Но в это же время появляются и ряд экологических просчетов и экологических проблем при мелиоративном преобразовании природы. В ряде мест уничтожались торфяные болота, выполняющие функции регулятора влаги в ландшафте. Многие пойменные земли были переосушены, а почвы в пустынных и степных ландшафтах засолены.

[1] *Болотов, Андрей Тимофеевич* (1738-1833) – русский писатель, философ, ботаник и лесовод, один из основателей агрономии и помологии в России

Тем самым приобретался первый опыт управления экологическими условиями проживания человека.

Получивший после работ Ш. Монтескье широкое распространение географический детерминизм имел значительно число сторонников и в XIX в. Из них можно упомянуть Генри Томаса Бокля (1821 —1862) с его необычайно популярной в свое время «Историей цивилизации в Англии» (1857 — 1861; русск. переводы: Т. 1—2. СПб. 1862-1865; 1896; 1906; Т. 1. М., 2000; Т. 2. 2002 и др.).

Согласно его взглядам, важнейшие факторы развития общества — это климат, пища, почва и ландшафт (картина природы). Плодородная почва, обеспечивая избыток пищи, ведет к перенаселению, нищете работников и чудовищному богатству властителей. Ландшафт действует на «накопление и распределение умственного капитала»[1]. Существуют ландшафты, которые возбуждают воображение, и ландшафты, способствующие развитию логической деятельности ума. К их числу относятся природные условия Европы. Поэтому, согласно Боклю, для понимания истории Европы нужно главное внимание уделять не физическим факторам, а умственному развитию. Умственный фактор в этом случае истинный двигатель. «...Умственное начало, — пишет Т. Бокль, — начало проявлять такую деятельность и такую способность все охватывать, которая совершенно достаточно объясняет необыкновенные успехи, сделанные Европой в продолжение нескольких столетий»[2].Так Т. Бокль в поисках движущих сил истории от географического детерминизма переходит к концепции решающей роли человеческого разума и эклектически соединяет Монтескье с Сен-Симоном (Семёнов, 2003).

Генри Томас Бокль (1821-1862)

Из российских ученых XIX века заметный вклад в географический детерминизм внес Л.И.Мечников (1831-1888). В своем труде «Цивилизация и великие исторические реки (Географическая теория прогресса и социального развития)» (1-е изд. на французском языке, 1889; русск. изд.: СПб., 1898; М., 1924; 1995) он сформулировал закон

[1] *Бокль Г.Т.* История цивилизации в Англии.- СПб., 1896. С. 45.

[2] Там же, с. 71

«трех фазисов исторического развития». Первые цивилизации, согласно Л.И.Мечникову, возникли в долинах крупных рек: египетская, как выражался Геродот, была «даром» Нила, ассиро-вавилонская возникла на берегах Тигра и Евфрата, китайская — в бассейнах Хуанхэ и Янцзы, индийская — Инда и Ганга. Это были древние века, или *речная эпоха*.

«По прошествии многих веков, — писал Л.И. Мечников, — поток цивилизации спустился по берегам рек к морю и распространился по его побережью. Так наступила вторая эпоха в истории развития цивилизации, которую можно назвать *морской эпохой*, или *средиземноморской*, так как цивилизация охватила главным образом берега этого внутреннего морского бассейна, расположенного между Африкой, Азией и Европой»[1]. Средние века, или средиземноморский период, охватывал двадцать пять веков — время с основания Карфагена до Карла Великого (Семёнов, 2003).

Лев Ильич Мечников (1838-1888)

Г.В.Плеханов создал своеобразный гибрид исторического материализма и географического детерминизма, в качестве решающей силы исторического развития им стала рассматриваться не географическая среда сама по себе, а взаимодействие между ней и обществом. В XIX-начале XX в идеи географического детерминизма развивали также западные геополитики Ф.Ратцель (1844-1904), Эллен Семпл (1863-1932), Х.Дж.Маккиндер (1861-1947), а в России – Е.Н.Трубецкой (1874-1930), В.П.Семёновым-Тян-Шанским (1870-1942) и др.

В последующем от географического детерминизма отпочковался т.н. ***экологический детерминизм*** или *инвайронментализм* (энвайронментализм) (от англ. *environment*— среда). В его основе лежат понятия экологии. Каждый социоисторический организм выступал в качестве компонента той или иной экосистемы, а совокупность всех остальных ее элементов представала как среда его обитания. Чтобы существовать, социоисторический организм должен приспособиться к среде, сбалансировать свои отношения со всеми остальными ее компонентами, прежде всего с теми, которые имеют жизненно важное

[1] *Мечников Л.* Цивилизация и великие исторические реки. М., 1924. С. 133-134.

для него и его членов значение. Если равновесие со средой по тем или иным причинам нарушается, то возникает кризис, который ставит под угрозу существование как социора, так и его членов. Чтобы продолжать нормальное существование, члены социоисторического организма должны принять меры к разрешению кризиса, восстановить, причем теперь на новой основе, его баланс со средой. Средство восстановления нарушенного равновесия — изменение культуры, прежде всего техники и технологии, а также и форм хозяйства. В довольно абстрактной форме подобного рода идеи излагались в работах К. Каутского и Н.И. Бухарина (Семенов, 2003). Экологический детерминизм в разных формах разрабатывали Дж.Стюард, М.Харрис, С.А.Маретина, Э. Ле Руа Ладюри, Э.С.Кульпин, Д.Б.Прусаков и др.

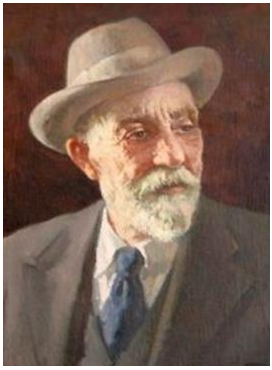
Подобных экологических концепций, согласно Ю.И.Семенову (2003), существует множество. В одних главный упор делается на среду. Основная их идея заключается в том, что в основе изменения общества лежат изменения окружающей среды, прежде всего природной. Такие концепции характеризуются обычно как экологический детерминизм или средовой детерминизм.

Во многих других концепциях природная среда и технология (или природная среда и хозяйство) в целом выступают как во многом равноправные факторы, взаимодействие которых и обеспечивает развитие общества. Еще в ряде концепций в качестве решающей силы выступает технология или даже хозяйство либо экономика в целом. Но всегда при этом и технология, и хозяйство или экономика в целом рассматриваются как способы приспособления к среде.

Иногда в некоторых концепциях ко всем названным выше факторам добавляется и демографический, и ему тогда нередко отводится ведущая роль. Рост населения требует увеличения количества энергии и ресурсов, поступающих в общество из внешней среды, ведет к нарушению равновесия между ним и средой. Чтобы обеспечить такой приток и восстановить равновесие, необходимо развитие техники, изменение системы хозяйства, а нередко и всей социальной организации. В результате рост населения дает толчок к развитию общества.

Таким образом, преобразование человеком природных условий для собственного, экологически комфортного проживания – неотъемлемая сторона развития человеческой цивилизации. Но, вот тут-то и начинается борьба идей за линию поведения человека: можно ли бесконтрольно подчинять себе природу? Если да, то до каких пределов и есть ли они? Не приведет ли это к гибели цивилизации?

Как писал И.В. Мичурин (1934)[1]: «Мы не можем ждать милостей от природы, взять их у неё – наша задача». Именно эта фраза ставилась впоследствии ему в вину, как подход хищнического отношения к природе, забывая при этом о продолжении этой фразы: «Человек может и должен создавать новые формы растений лучше природы». То же самое можно сказать и о создании человеком искусственной комфортной среды проживания, которая не входила бы в противоречие с естественными природными условиями.



Иван Владимирович Мичурин (1855-1935)

При этом необходимо отметить, что преобразование природы не сводится только к ирригации или мелиорации земель. Комфортность экологических условий проживания затрагивает всё более широкий круг проблем, связанных, в том числе, с сохранением и восполнением природных ресурсов (энергетических полезных ископаемых, питьевых, почвенных и т.д.), борьбой с проявлением опасных природных, в том числе геологических, процессов, разработкой способов повышения устойчивости искусственных экосистем, в том числе, урбоэкосистем и т.п.

В настоящее время 56% населения Земли проживает в городах, и доля сельского населения продолжает снижаться. Уробоэкосистемы становятся всё более крупными, охватывающими всё новые и новые территории, а также осваивающими и более глубокое подземное пространство. Формирующиеся при этом искусственные городские эколого-геологические системы кардинально меняют природные компоннеты. Возникло специальное направление экологии – *урбоэкология*, или экология города, занимающееся вопросами функционирования городских экосистем и урболандшафтов.

Взаимосвязь экологии и экономики государств была отмечена давно многими учеными. Возник даже термин «эколого-экономическая система», в рамках которой ученые пытаются выявить закономерности этой взаимосвязи.

[1] *Мичурин И.В*. Итоги шестидесятилетних трудов по выведению новых сортов плодовых растений, изд. 3-е. - М.: 1934.

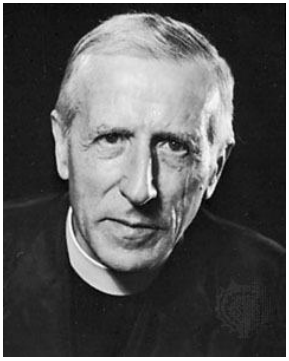
В конце XX и начале XXI в. проблема создания благоприятных экологических условий для проживания людей получила новое продолжение в связи с обострением глобального экологического кризиса. Сейчас вопрос стоит уже не в освоении природных пространств для проживания или адаптации к новым природным условиям, а в сохранении человеческой цивилизации в ухудшающихся экологических условиях, имеющих техногенный характер в результате загрязнения окружающей среды, потепления климата, увеличения количества опасных отходов, снижения качества и ресурсов пресных вод, деградации земельных ресурсов, опустынивания, обезлесивания, снижения биологического разнообразия, загрязнения Мирового океана и др.

Эдуар Леруа (1870-1954)

В начале XX в. возникает учение о **ноосфере** - сфере разумной человеческой деятельности. Ноосфера — это новое эволюционное состояние биосферы, при котором разумная деятельность человека становится решающим фактором ее развития. Термин «ноосфера» был введен французским учеными Эдуардом Леруа[1] и Тейяром де Шарденом[2] (1927).

Тейяр де Шарден выделил три последовательные, качественно различные ступени эволюции жизни на Земле: «преджизнь» (когда сформировалась литосфера), «жизнь» (формирование биосферы) и «феномен человека» (формирование ноосферы).

Эволюция, по его мнению, не закончилась на человеке как индивидууме, она продолжается по мере того, как человечество объединяется в



Пьер Тейяр де Шарден
(1881-1955)

[1] *Леруа, Эдуар* (1870-1954) – французский философ, последователь А.Бергсона, модернист, математик, ввёл в 1920-х годах понятие «ноосфера»

[2] *Тейяр де Шарден, Пьер* (1881-1955) – французский философ, теолог, палеонтолог, антрополог, один из создателей теории ноосферы

сообщества с возрастающей дифференциацией индивидуальных функций и соответственно увеличивающейся степенью взаимосвязи. Человечество все более плотно заселяет ограниченное пространство Земли, появляются все новые и новые средства связи. Дивергенция «*уступает место… конвергенции, при которой расы, народы и нации консолидируются и совершенствуются путём взаимооплодотворения*» ("Феномен человека"). От клеток (эмбрионального мыслящего покрова), опоясавших земную поверхность, через человека, активизировавшего мыслительные возможности вещества и реализовавшего возможность самовоспроизводства мыслящего слоя, сфера разума переходит в охватывающие всю планету «*пласты ноосферы*». Этот «*тангенциальный мегасинтез*», эта «*суперкомбинация*» ведут к рывку «*радиальных сил по главной оси эволюции*», ибо большей сложности соответствует большее сознание. Концентрация мышления в масштабе планеты тесно связана со слиянием воедино человеческого духа, которое в результате дальнейшей эволюции приведет к возникновению духа Земли. Но это — не последний этап.

Владимир Иванович Вернадский (1863-1945)

Центральной темой учения о ноосфере является единство биосферы и человечества. В.И.Вернадский[1] в своих работах раскрыл корни этого единства, значение организованности биосферы в развитии человечества. Это позволяет понять место и роль исторического развития человечества в эволюции биосферы, закономерности ее перехода в ноосферу.

Одной из ключевых идей, лежащих в основе теории В.И. Вернадского о ноосфере, является то, что человек не является самодостаточным живым существом, живущим отдельно по своим законам, он сосуществует внутри природы и является частью ее. Эволюция видов сама превратилась в геологический процесс, так как в процессе эволюции появилась новая геологическая сила. В.И.Вернадский писал: «Эволюция видов переходит в эволюцию

[1] *Вернадский, Владимир Иванович* (1863-1945) – русский, советский ученый, философ, геолог, геохимик, историк науки, академик СПб АН, АН СССР.

биосферы». Геологической силой является, собственно, вовсе не *Homo sapiens*, а его разум, научная мысль социального человечества.

В «Философских мыслях натуралиста» В.И. Вернадский писал: «Мы как раз переживаем яркое вхождение в геологическую историю планеты. Под влиянием научной мысли и человеческого труда биосфера переходит в новое состояние - в ноосферу». В.И. Вернадский видел неизбежность ноосферы, которая обусловлена эволюцией биосферы и историческим развитием человечества.

Однако, рассматривая деятельность человека как новую геологическую силу, В.И.Вернадский не осознавал всей её сложности и опасности. В этой связи на передний план выступают работы по организации ***разумной человеческой деятельности,*** которая была бы направлена на рациональное управление биосферой и её компонентами, в том числе эколого-геологическими системами. Именно на решение этой проблемы и направлена экологическая геокибернетика, рассматриваемая ниже. Новое, ноосферное представление об окружающей, в том числе – геологической среде, разрабатывалось в трудах В.Т.Трофимова и В.А.Королева (Трофимов, Королев, 2014).

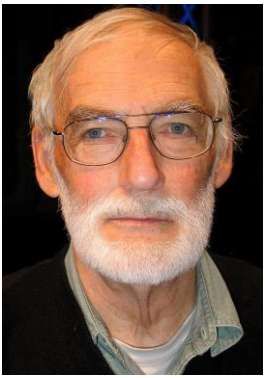
Первой математической работой, относящейся к проблемам ноосферы, была книга В.А. Костицына[1] – соратника и последователя В.И. Вернадского. Дальнейшее развитие человеческой цивилизации, которую нельзя отделить от развития самой Земли, и прежде всего ее биосферы должно быть целенаправленным, однако целенаправленное развитие – это развитие управляемое. А любое управление сводится в конечном счете к принятию того или иного решения. Выбор решений в свою очередь основывается на информации о состоянии управляемого объекта и знании его свойств.

На современном этапе развития теории ноосферы основная проблема – формирование доктрины, позволяющей придать количественное выражение тем параметрам биосферы, которые необходимо обеспечить. В качестве измерительного комплекса для этих параметров выступают службы мониторинга (Щепетова, 2015).

Каков же на сегодняшний день итог исторического развития общества и его взаимоотношения с природой? Согласно Ю.И.Семёнову (2003), капиталистическое рыночное хозяйство, стимул которого — погоня за прибылью, сыграло необычайно прогрессивную роль в истории человечества. Только оно смогло вызвать к жизни производительные силы, способные обеспечить все человечество всем

[1] *Костицын В.А*. Математическая биология. – 1937 (англ. перевод, 1939, London, G.G.Harpap & Co LTD)

необходимым для достойного существования. Но эти же мощные силы, оказались способными разрушить среду существования человека и самого человека. В 1972 г. появился первый доклад Римскому клубу «Пределы роста». К его двадцатилетию было проведено повторное исследование, результаты которого были изложены в работе Донеллы Медоуз, Денниса Медоуза[1] и Йоргена Рандерса «За пределами: Глобальная катастрофа или стабильное будущее?» (1992; русск. перевод: За пределами роста: Предотвратить глобальную катастрофу, обеспечить устойчивое будущее. - М., 1994).



Деннис Л.Медоуз (р.1942)

Выводы этого доклада крайне неутешительны: почти ничего не изменилось в лучшую сторону, зато многое — в худшую. В результате Д. Медоуз делает, к сожалению, достаточно аргументированный вывод, что человечество уже сейчас находится за пределами роста и мир приближается к глобальной катастрофе.

Нарастает загрязнение среды, в результате которого Земля, если не принять срочных мер, в самом недалеком будущем станет непригодной для жизни людей. Нарастание престижного потребления в странах центра ускоряет процесс исчерпания источников энергии. Если рынок будет продолжать господствовать, то, если даже ограничиться отношением людей только к природе, отвлекаясь от отношений между людьми, человечеству грозит гибель.

Меры по уменьшению загрязнения и очистке среды могут быть только нерыночными. Их может предпринять лишь общество в целом в лице государства. Кое-какие меры уже принимались в эпоху позднего *ортокапитализма*[2], но это всего лишь паллиативы. А с переходом к позднейшему ортокапитализму с его анархическим глобальным рынком капитала борьба с загрязнением окружающей среды практически прекратилась (Семёнов, 2003).

---

[1] *Медоуз, Деннис Л.* (р. 1942) – американский системолог, заслуженный профессор, вместе с супругой Донеллой Медоуз (1941-2001) разрабатывал проблемы глобальных угроз человечеству, член Римского клуба

[2] *Ортокапитализм* – капиталистический строй, сформировавшийся в рамках национального государства.

Технологический оптимизм проявлялся на западе в основном начиная с 1830-х годов и выражался в ослаблении управления природными ресурсами. Несколько позже, с 1945 года, а в особенности с 1970-х годов, экологические проблемы стали главными в сознании людей (Mitchell, 1997).

Все эти обострившиеся в последнее время проблемы повышают актуальность научных исследований в области взаимодействия человека и природы, в области разработки эффективных способов управления природной средой и её компонентами с целью обеспечения устойчивого развития цивилизации. Хотя понятно, что одних лишь методов управления окружающей средой недостаточно – необходимо разумно управлять и самой техносферой, переводя её в ноосферу, что в период ортокапитализма осуществить не так-то просто.

Таким образом, на протяжении веков человек в процессе своей жизнедеятельности безоговорочно, а иногда и безвозвратно, и хищнически, воздействовал на окружающую природную среду, изменяя её в собственных нуждах.

Концепция управления окружающей средой приобретает всё большую значимость и является источником широко распространенной осведомленности о воздействии человека на окружающую среду, использование деятельности и ресурсов для воздействия на окружающий мир. Многие организации разрабатывают планы или системы управления для реализации, управления и поддержания экологических различных целей. В странах запада это реализуется в рамках так называемого «*экологического менеджмента*», под которым понимается деятельность, затрагивающая широкий круг вопросов от оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) и экологического аудита, до создания систем мониторинга окружающей среды и разработки рекомендаций по её охране (Sankar, 2015). Это направление начинает складываться и в России.

Менеджеры по природным ресурсам на западе, как правило, подготавливаются из узкого круга дисциплин, характерных для ограниченного социологического и экологического уровня (Theodore M.K., Theodore L., 2009; Encyclopedia…, 2012; Skinner G. et al., 2017). Тем не менее, во многих странах Запада уже сейчас в высших учебных заведениях готовят специалистов не только по экологическому менеджменту, но и по *геоинженерии*, рассматриваемой как междисциплинарная область наук, в которой принципы наук о Земле используются для решения инженерных и экологических проблем. По мнению западных специалистов она должна соединять геологию, гражданское строительство и другие научные сферы (например,

горнодобывающие науки, географию, лесное хозяйство, климатологию и т.п.), чтобы обеспечить универсальный набор навыков, применимых к широкому спектру современных, в том числе экологических, проблем. Экологическое управление — это способ достичь экологического равновесия, которое консолидирует экологию, разработку политики, планирование и социальное развитие стран.

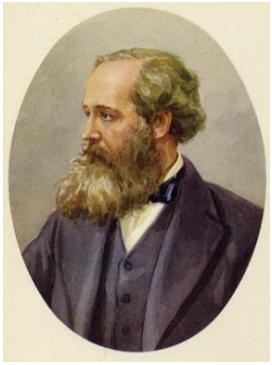
1.2.Основные понятия экологической геокибернетики

«Природу побеждают, только повинуясь ее законам»

Фрэнсис Бэкон

1.2.1. История становления кибернетики. До настоящего времени нет единого понимания термина «геокибернетика». Но сначала поясним, что же представляет собой собственно «кибернетика».

Кибернетика (от др.-греч. *κυβερνητική* - «*искусство управления*») — наука об общих закономерностях процессов управления и передачи информации в различных системах, будь то машины, живые организмы или общество. Термин стал широко известен после его использования в своей работе Н.Винером[1] в 1948 году, который понимал под кибернетикой «науку о связи, управлении и контроле в машинах и живых организмах…» (Wiener, 1948).



Д.К.Максвелл (1831-1879)

В более общей форме под кибернетикой сейчас понимают науку об общих закономерностях процессов управления, получения, хранения, преобразования и передачи информации в сложных управляемых системах – машинах, живых организмах или обществе. Именно в таком смысле Н.Винер понимал кибернетику.

[1] *Норберт Винер* (1894-1964) – американский математик и философ, основоположник кибернетики и теории искусственного интеллекта, профессор Массачусетского технологического университета (США).

Норберт Винер (1894-1964)

Сам же термин «кибернетика» был впервые введен в научный оборот А.М.Ампером в 1834-1843 годах, под которой он понимал «науку управления государством» с целью получения гражданами разнообразных благ. Но одна из первых работ по теории управления была выполнена Д.К.Максвеллом[1] в 1868 году, в которой он также анализировал понятие устойчивости.

В «докибернетический» период теория управления как теория автоматического регулирования вначале развивалась как ветвь механики, тесно связанная с теорией колебаний. Затем, с усложнением систем управления, все большую роль в их исследовании стали играть случайные процессы — в работах А.Н.Колмогорова[2] и др. была развита теория сглаживания и экстраполяции.

Андрей Николаевич Колмогоров (1903-1987)

После фундаментальных работ Н.Винера 1940-х годов по кибернетике появились иные трактовки термина «кибернетика». В частности, Л.Куффиньяль понимал под ней «искусство обеспечения эффективности действия» (Couffignal, 1956). Кибернетика не является синонимом «теории управления», она включает в себя эту теорию. При этом теория управления – как наука о принципах и методах управления различными системами, процессами и объектами, сама базируется на достижениях кибернетики и теории информации. Таким образом в современном понимании кибернетика включает в себя теорию управления, теорию информации, теорию систем и является для них

[1] *Максвелл, Джеймс Клерк* (1831-1879) – шотландский физик, математик и механик

[2] *Андрей Николаевич Колмогоров* (1903-1987) – советский математик, академик АН СССР, Герой Социалистического труда, выпускник МГУ, основоположник теории вероятностей

объединительной. Поэтому иногда её называют «философией управления».

Объектом кибернетики являются любые системы, поддающиеся управлению, называемые «кибернетическими системами». В их качестве могут выступать ЭВМ, автоматические регуляторы в машинах, биологическая популяция, экосистема, человеческое общество и т.д. Поэтому сфера применения кибернетики чрезвычайно широка в различных областях знаний и актуальных проблемах современности. Это и искусственный интеллект, системы управления, сложные системы, эмерджентность. В биологии это биологическая кибернетика (биокибернетика), биоинженерия, биоинформатика и т.п., в вычислительной математике — это робототехника, клеточные автоматы, компьютерное зрение и т.п., в инженерии – это эргономика, адаптивные системы и т.п.

Юджин Одум (1894-1964)

В любом случае кибернетика имеет дело с *системами*, определение которым дать не так-то просто. Д.Бордмэн и Б.Сосер, определяя системы, писали: «Мы полагаем, что сущность системы – это целостность, соединение вместе различных частей и связей, которые они образуют для получения нового целого…» (Boardman, Sauser, 2008). Любая система обладает структурой и поведением. Эмерджентность – фундаментальное свойство систем, характеризующее появление у них новых качеств, которых не было у компонентов (частей) системы. Как писал П.Чекланд: «Целые сущности проявляют свойства, которые имеют смысл только применительно к целому, а не к его частям…» (Checkland, 1999).

Кроме этого, система обладает системной топологией, обеспечивающей ее целостность, в качестве которой рассматривают иерархическую топологию и сетевую топологию. Иерархия системы раскрывает её структуру, а сетевая топология – информационные взаимосвязи в системе. Рассмотрение экологических объектов, в том числе эколого-геологических систем (ЭГС), как систем требует привлечения системного анализа, как одного из основных методов исследований экологической геокибернетики.

Уже Ю.Одум[1] в своих ранних работах по экологии 1953 года рассматривал кибернетическую природу и стабильность экосистем, указывая, что экосистема помимо потоков энергии и массы характеризуется наличием информационных потоков или развитых информационных сетей, связывающих все части системы и управляющих (или регулирующих) ею как одним целым. Позже он писал более определенно, что «экосистемы имеют кибернетическую природу» (Одум, 1986, т.1, с.60). Он первым применил системный анализ в экологии, и не просто его применил, а поставил во главу угла, создав экосистемную экологию.

К.Л. фон Берталанфи (1901-1972)

В частности, он отмечал, что экосистема не эквивалентна организму, поскольку обладает собственными качественно новыми свойствами. Другими словами, экосистема — это надорганизменный уровень организации, а не сверхорганизм; не похожа она и на промышленный комплекс (например, завод). И все же у нее есть одна общая с этими системами черта: кибернетическое поведение.

У.Р.Эшби (1903-1972)

Кибернетический период развития теории управления, начало которому положено книгой Н.Винера, характеризуется существенным усложнением систем управления и значительно большей общностью и абстрактностью подхода к их анализу и синтезу. Кроме этих двух особенностей, кибернетический период отличается также подчеркиванием информационного (сигнального) характера управления, а также тесной связью управления с процессом оптимизации (Поплавский, 1981).

[1] *Юджин Одум* (1913-2002) американский биолог, эколог, доктор философии, создатель экосистемной экологии. Начинал работать с братом – экологом Говардом Т. Одумом, написав с ним в 1953 г. учебник «Основы экологии».

Кибернетику определяют также как науку о способах восприятия, передачи, хранения, переработки и использования информации. Современная кибернетика состоит из ряда разделов, представляющих собой самостоятельные научные направления. Теоретическое ядро кибернетики составляют теория информации, теория алгоритмов, теория автоматов, исследование операций, теория автоматического управления, теория распознавания образов (Артамонов и др., 2003).

В.Н.Садовский (1934-2012)

Во второй половине XX века появилась масса работ по кибернетике, которая рассматривалась с разных точек зрения: математической, физической, термодинамичекой и др. Широта и общность вопросов, рассматриваемых кибернетикой, послужила причиной её успешного применения в различных областях, а не только в механике, но практичечски во всех тех сферах, где так или иначе применяется управление какими-либо объектами или процессами – физическими (материальными или энергетическими) или информационными.

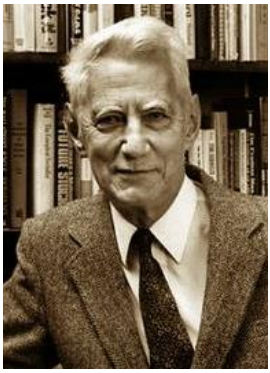
Г.П.Щедровицкий (1929-1994)

От управления процессами в живой клетке организма до управления популяциями организмов, от управления мышлением индивидума до управления обществом, от управления микроэкосистемой до управления биосферой Земли, от управления первичной информацией до управления гигантскими потоками информации в суперкомпъютерах, от управления торговлей до управления экономикой, наконец, от ручного управления производством до автоматизированного – везде используется кибернетика.

Кибернетика тесно связана с системным анализом и *общей теорией систем*, в разработку которых

внесли большой вклад как зарубежные (Л.Берталанфи, У.Р.Эшби[1], М.Месарович, О.Ланге и др.), так и отечественные ученые – В.В.Артюхов, В.Н.Садовский[2], А.И.Уёмов, Г.П.Щедровицкий[3], Ю.А.Урманцев и др. Кроме того, она связана с теорией информации, основателем которой является

К.Э.Шеннон[4], внесший огромный вклад в кибернетику путем разработки теории систем управления, теории игр, теории автоматов и т.п.



К.Шеннон (1916-2001)

Л.Берталанфи[5] - один из основоположников общей теории систем, в 20-е годы прошлого века начал с анализа организма как системы, но вскоре пришел к более широким обобщениям и создал общую теорию открытых систем, применимую к различным объектам окружающего мира, в том числе к системам организационно-административного управления и производственным организациям. Согласно его воззрениям, жизненный процесс организмов предполагает наличие входящего из окружающей среды потока материи, тип и объем которого определяется в соответствии с системными характеристиками организма. Так же осуществляется выход из системы в окружающую среду материи, как результата функционирования системы. Таким образом организмы обеспечивают себе дополнительную энергию, которая позволяет достигать «негэнтропии», а также обеспечивает устойчивость системы по отношению к среде.

Вскоре после этого теория систем распространилась на иные дисциплины, стали появляться новые «системные» направления, в

---

[1] *Уильям Росс Эшби* (1903-1972) – английский психиатр, специалист в области кибернетики, профессор, ввел понятие самоорганизации.

[2] *Вадим Николаевич Садовский* (1934-2012) – российский философ, доктор философских наук, профессор, выпускник МГУ, один из разработчиков общей теории систем.

[3] *Георгий Петрович Щедровицкий* (1929-1994) – российский философ, методолог, выпускник МГУ, создатель теории методологии системного анализа.

[4] *Клод Элвуд Шеннон* (1916-2001) – американский инженер, математик, специалист по кибернетике и информатике, один из отцов «информационного века», лауреат Нобелевской премии, ввел понятие негэнтропии.

[5] *Карл Людвиг фон Берталанфи* (1901-19732) – австрийский биолог, доктор философии (1926), основатель общей теории систем.

частности – системное мышление, вклад в которое внес наш соотечественник Г.П.Щедровицкий, а также системная инженерия (Лоусон, 2014). Системное мышление основано на наблюдении и описании целостного поведения множества систем и их элементов.

1.2.2. Понятие об экологической геокибернетике и её становление. В геологии, географии и геополитике термин «кибернетика» стали использовать с приставкой «гео-» в виде так называемой «*геокибернетики*», понимаемой, однако, в разных науках по-разному.

Так в географии под геокибернетикой понимают науку об управлении географическими системами – ландшафтами и т.п.

В геологии под геокибернетикой понимают науку об управлении геологическими системами, как природными, так и природно-техническими (ПТС). В инженерную геологию этот термин ввёл Г.К.Бондарик[1] (1994, 2012), который под геокибернетикой понимал «раздел общей теории ПТС (и компонент кибернетики) о закономерностях процессов управления и передачи информации в неоднородных системах. Она содержит научные положения о:

Генрих Кондратьевич Бондарик (1925-2018)

• характеристиках состояния и приемах представления информации о состояниях неоднородных систем;

• пространстве состояний систем и способах отражения движения системы в различных моделях пространства состояний;

• приемах диагностики и прогнозирования состояния систем;

• особенностях разработки рекомендаций по управлению неоднородными системами;

• характерных чертах технологии процесса управления системами».

[1] *Генрих Кондратьевич Бондарик* (1925-2018) – российский инженер-геолог, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной геологии МГРИ, автор работ по общей теории инженерной геологии и геокибернетике.

К сожалению, Г.К.Бондарик не успел в полной мере разработать все эти вопросы, многие из которых остаются актуальными и по сей день.

Наконец, в *геополитике* под геокибернетикой понимают междисциплинарную науку о закономерностях управления процессами геополитического региона и передачи информации, как внутри такого региона, так и при его взаимодействии с другими регионами, для обеспечения достижения целей развития этого региона. Она формируется на стыке геополитики, экономики, философии, культурологии, системного анализа и синтеза, географии, математики, кибернетики, информатики, теории вероятности. Если геокибернетику (в понимании Г.К.Бондарика) рассматривать применительно к экосистемам и эколого-геологическим системам (ЭГС), то её, по нашему мнению, целесообразно именовать как «*экологическая геокибернетика*».

Вито Вольтерра (1860-1940)

Таким образом, ***экологическая геокибернетика*** *– это раздел общей теории природно-технических систем о закономерностях управления и передачи в них информации, рассматривающий их с позиций экологии и экологической геологии в рамках концепции ноосферы и коэволюции*.

Кроме того, развивая положения Г.К.Бондарика можно заключить, что в рамках экологической геокибернетики рассматриваются следующие вопросы:

- характеристика состояния и приемы представления информации о состояниях ЭГС;
- пространство состояний ЭГС и способы отражения изменения ЭГС в различных моделях пространства состояний;
- приемы диагностики и прогнозирования состояния ЭГС;
- рекомендации по управлению неоднородными ЭГС;
- характерные черты технологии и методики процесса управления ЭГС.

Становление экологической геокибернетики происходит на наших глазах. Начиная с появления этого термина в 2012 году, в последнее время появляется всё больше и больше работ так или иначе связанных с экологической геокибернетикой, работ, посвященных

вопросам управления различными экосистемами, а также работ, рассматривающих вопросы моделирования экосистем.

Последнее обстоятельство является особенно важным, поскольку управление любым объектом предполагает его рассмотрение в виде некоторой модели, позволяющей оценить различные сценарии функционирования объекта. В эпоху интенсивного воздействия человека на природную среду описательный подход в науках о ней не может быть применим как ранее, поскольку он не способен в должной мере выявить динамику функционирования природных систем и тем самым служить основой целенаправленной человеческой деятельности.

Моделирование эколого-геологических систем должно опираться на опыт моделирования экосистем, который стал формироваться с 20-х годов XX века благодаря работам А.Лотки, В.Вольтерра[1] и В.А.Костицына по математическому моделированию популяций в экосистемах. В настоящее время уравнения, описывающие взаимодействие популяций и ставшие классическими, называют «уравнениями Лотки – Вольтерры» (Щепетова, 2015).

Ценность экологических моделей В.Вольтерра заключается в том, что они были основой, на которой быстрыми темпами начала развиваться математическая экология. Появилось большое число исследований различных модификаций системы «хищник – жертва», где были построены более общие модели, учитывающие в той или иной степени реальную ситуацию в природе.

Такая общая математическая модель, позволяющая учитывать реальное поведение популяций и в месте с тем проводить качественный анализ ее решений, была предложена в 1936 г. академиком Андреем Николаевичем Колмогоровым (1903–1987).

Небольшой набор разных математических моделей, составивший в 20–40-х годах XX в. основу «экологической теории», относился не ко всей экологии, а только к популяционному подходу – распределению организмов в пространстве-времени. Другая традиция в экологии – системный подход, базирующийся на изучении роли организмов в процессах трансформации вещества и энергии в природе. Необходимо отметить публикацию статьи американского исследователя Раймонда Линдемана (1915–1942) «Трофодинамический аспект экологии», получившей широкую известность. Он определил экосистему как «совокупность физико-химико-биологических процессов, протекающих в любых масштабах пространства и времени». В этом

[1] *Вольтерра, Вито* (1860-1940) – итальянский математик и физик, почетный член АН СССР, разработчик приложений математики в биологии и экологии

кратком определении рассматривается возможность разномасштабного выделения экосистем в зависимости от конкретных особенностей круговорота вещества и энергии, функциональная, а не структурная основа экосистемы, подчеркивается теснейшее взаимодействие физических, химических и биологических процессов (Щепетова, 2015).

В 1960-1970-е годы Дж.Форрестер[1] и Д.Медоуз создали первые математические модели глобальных процессов биосферы с учетом различных, в том числе экологических факторов[2]. В нашей стране это направление разрабатывалось в трудах Н.Н.Моисеева[3] и его школы, в том числе в связи с концепцией о коэволюции человека и биосферы.

Джей Форрестер (1918-2016)

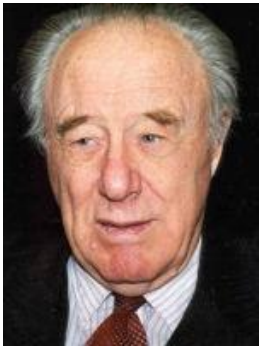
В 1980-е годы появились математические модели глобальных процессов биосферы, разработанные Г.А.Александровым, А.Д.Армандом, А.М.Тарко, В.Н.Новохацким, Ю.М.Свирежевым и многими др. Позже А.М.Тарко были разработаны математические модели круговоротов различных веществ в экосистемах (1995, 2005). С внедрением компьютерных технологий и возможностей Интернета разработка математических моделей в экологии усилилась в разы. С середины 1970-х годов количество и качество собранных экоданных значительно возросло, благодаря совершенствованию методов сбора, обработки и использования экоданных, необходимых для принятия организационно-управленческих и инженерно-технологических решений по управлению охраной окружающей среды. Появилась «экоинформатика» – теоретико-методологическое направление о сборе, обработке и хранении экологической информации. Собранные экологические данные хранятся в специализированных базах данных, которые с 1980-х годов стали реализовываться в виде геоинформационных систем (ГИС). Современные экологические ГИС

[1] *Форрестер, Джей Райт* (1918-2016) – американский ученый, инженер, системолог, автор теории системной динамики

[2] *Форрестер Дж.* Мировая динамика. – М.: Наука, 1978.

[3] *Моисеев, Никита Николаевич* (1917-2000) – советский и российский ученый, математик, системолог, академик АН СССР и РАН, разработчик учения о биосфере и ноосфере

позволяют не только хранить экоданные, но и строить различные, в том числе картографические, модели.



Никита Николаевич Моисеев (1917-2000)

Спецификой экосистем является огромное количество внутренних взаимосвязей между подсистемами и компонентами, а также их динамичность. В этой связи они характеризуются большой степенью неопределенности исходной информации. Поэтому при исследовании экосистема должна быть декомпозирована и представлена в виде отдельных подсистем; информационная структура сложных экосистем рассматривается на нескольких иерархических уровнях.

Одна из главных задач математической экологии — проблема устойчивости экосистем. Экосистема «устойчива» или «стабильна», если относительная численность представителей различных видов в течение достаточно длительного времени либо остается неизменной, либо регулярно возвращается к одному и тому же соотношению.

С устойчивостью экосистем тесно связаны вопросы управления этими системами, так как вмешательство человека в функционирование биологических сообществ должно проходить таким образом, чтобы воздействие на экосистему осуществлялось с учетом сохранения устойчивости равновесных состояний системы. При этом возникает задача управления системой в целях перевода ее из одного устойчивого состояния в другое. Поэтому наряду с вопросами устойчивости в математической экологии рассматривают оптимизационные задачи управления экосистемами.

В конце XX-начале XXI в. появляется всё больше работ по математическому моделированию в экологии. Среди них можно назвать работы В.В.Алексеева, А.Н.Баранова, Б.Г.Богатырёва, О.Б.Бутусова, А.Г.Гнаука, В.Г.Горшкова, Н.Н.Гребенкина, Г.Б.Зинюхина, А.П.Кириленко, А.В.Колотвина (2003), А.П.Кузьмина, В.П.Мешалкина (2016), Н.Ф.Писаренко, Н.Н.Роевой, Н.А.Рустамова, Дж.Смита, А.М.Тарко (2005), П.Хаггета, Р.Чорли, В.А.Щепетовой (2015) и многих др. При этом расширяется спектр изучаемых моделей, моделируются сложные нелинейные процессы внешнего воздействия на экосистемы, их реакция на различные техногенные воздействия.

Разработка математических моделей и компьютерное моделирование экосистем, использование которых позволяет исследователю, или лицу, принимающему решения, разработать, спланировать и реализовать организационно-управленческие решения по воздействию на функционирование экосистем и получать инструменты для контроля состояния экосистем. Именно поэтому в экологической геокибернетике моделирование играет первостепенную роль.

За рубежом в настоящее время понятию «экологическая геокибернетика» близки такие понятия и направления как «экологический менеджмент» («ecological management») или «управление окружающей средой» («environmental management») (Grumbine R.E., 1994; Kessler J.J. et al., 2001; Pallister J., 2006; Burger J., 2008; Encyclopedia…, 2012; Krishna I.V.M., Manickam V., 2017; Krishnamoorthy B., 2012; Sankar, 2015; Sulphey M.M., Safeer M.M., 2017; Skinner G. et al., 2017).

Экологический менеджмент вовлекает в разработку множество заинтересованных сторон и требует междисциплинарных исследований, свойственных геоэкологии в целом. Он включает в себя множество пространственных масштабных уровней рассмотрения проблем от локальных до глобальных. Он также включает в себя множество разнообразных целей, в том числе - стремление контролировать направление и темпы развития, оптимизировать использование природных ресурсов, минимизировать деградацию окружающей среды и избежать экологической катастрофы (Арнольд В.И. 1990; Мазур, 1999; Burger J., 2008; Theodore M.K., Theodore L., 2009; Encyclopedia…, 2012). При этом значительное число зарубежных авторов рассматривает экологический менеджмент с антропоцентрических позиций.

В настоящее время экологический менеджмент практически реализуется как отдельными лицами, так и группами, часто придерживающимися противоречивых - и даже прямо противоположных - взглядов, как это может быть в случае, когда экологические менеджеры, нанятые крупными транснациональными корпорациями, вступают в конфликт с 333экологическими менеджерами, представляющими общественные организации. Ему свойственны противоречия и парадоксы, отличающие и современную геоэкологию (Трофимов, 2020).

Экологический менеджмент за рубежом часто определяют и как межотраслевую дисциплину с обязанностями как в государственном, так и в частном секторах. В широком смысле его можно определить как

деятельность, осуществляемую конкретным обществом с целью защиты окружающей среды или как «управление окружающей средой - процесс, в котором (формальные и неформальные, государственные и частные) организации применяют механизмы для разработки и реализации ряда экономически эффективных приоритетных действий на основе четко сформулированных социальных предпочтений и целей для поддержания или улучшения качества окружающей среды; предоставления связанных с окружающей средой услуг, обусловленных производством; и/или сохранение, поддержание и улучшение природных ресурсов и экосистем» (Lovei, Weiss, 1998). Как видим, это понятие значительно шире, чем понятие «экологическая геокибернетика».

За рубежом весьма близко к этому понятию и такое направление как «управление экосистемами» или «*экосистемный менеджмент*» («ecosystem management») - это новый целостный подход к управлению природными ресурсами. Он объединяет научные знания об экологических взаимосвязях и сложную социально-экономическую и политическую систему ценностей с целью обеспечения долгосрочной устойчивости региона, то есть экосистемы (Grumbine R.E., 1994; Pavlikakis G.E., Tsihrintzis V.A., 2000; Pallister J., 2006; Burger J., 2008; Encyclopedia…, 2012; Skinner G. et al., 2017). Он включает в себя человеческие, биологические и природные аспекты и может регулировать внутренние структуры и функции экосистем, а также входы и выходы из нее, так что решения проблем развития и защиты могут быть достигнуты и быть социально приемлемыми.

Этому направлению уделяют особое внимание с конца 1980 - начала 1990-х годов, главным образом в США, где существующая правовая база легла в основу экосистемного менеджмента. Прежний опыт программ, основанных на традиционных методах управления с целью обеспечения устойчивого развития, заявленного многими правительственными, государственными или частными учреждениями, и появление научных знаний, позволили разработать теоретическую основу для экосистемного менеджмента.

В 1988 году была представлена первая книга по управлению экосистемами (Agee J.K., Johnson D.R., 1988), где была описана теоретическая основа этого направления. Поскольку устойчивость экосистем стала четко заявленной целью многих правительственных, государственных или частных агентств по управлению ресурсами, экосистемный менеджмент возник как новый подход, ориентированный на устойчивое развитие в целом (Axelrad D.M., 1994; Grumbine R.E., 1994; Haeuber R., Franklin J., 1996; Neace M.B., 1999). По сути, это

новый способ регионального управления окружающей средой, который объединяет человеческие, биологические и природные аспекты, нацеленный на долгосрочную защиту экосистемы. Сегодня в США и странах Евросоюза создано и реализуется значительное количество программ экосистемного менеджмента (Pavlikakis G.E., Tsihrintzis V.A., 2000).

Вопросы геологического обоснования управления эколого-геологическими системами впервые поднимались В.Т.Трофимовым в 2002 г. и анализировался позже (Трофимов, 2010). При этом подчеркивалась огромная роль и значение геологической составляющей в процессе управления.

Одновременно с этим разрабатывались теоретические вопросы управления природно-техническими системами (ПТС) и литотехническими системами (ЛТС) в целом. В большинстве своем они затрагивают вопросы создания систем управления функционированием отдельных типов ЛТС (ПТС) — урбанизированных территорий (Г.А. Голодковская, Е.С. Дзекцер, Г.Л. Кофф, В.И. Осипов, А.Л. Рагозин, Л. Чан Мань и др.), памятников архитектуры (В.Л. Невечеря, В.О. Подборская и др.), полигонов ТБО (О.М. Гуман, С.Н. Костарев и др.), объектов нефтегазового (В.Г. Аковецкий, В.В. Пендин и др.), горнодобывающего (В.Н. Попов, Е.А. Федорова и др.), железнодорожного (А.П. Камышев и др.) и автотранспортного (В.Н. Луканин, Ю.В. Трофименко и др.) комплексов, промышленного и гражданского строительства (М.В. Графкина, А.Д. Потапов и др.) и ряда других.

Теоретические и методологические аспекты управления функционированием ЛТС в целом наиболее полно отражены в работах Г.К. Бондарика (1994, 2004, 2018), В.А. Королева (1995, 2007) и А.Н.Галкина (2012). В этих работах с позиций теории управления геологической средой (по В.А. Королеву) или геокибернетики (по Г.К. Бондарику) были достаточно подробно рассмотрены функциональная сущность управления литотехническими системами, его цели, задачи, существующие возможности и ограничения, а также ряд научных положений и принципов, определяющих научно обоснованные подходы к управлению ЛТС.

Существенный вклад в разработку вопросов геологического обоснования управления ЛТС внёс А.Н.Галкин (2012). Под управлением литотехнической системой он понимал процесс обеспечения оптимального режима ее функционирования на каждой ступени ее «жизненного цикла» с использованием всех имеющихся ресурсов (информационных, вычислительных, интеллектуальных,

технических, технологических, административных, экономических и др.) при соблюдении множества ограничений. Его цель — при заданных параметрах состояния ЛТС с учетом их изменений в какой-либо момент времени обеспечивать требуемый режим работы системы при максимальном использовании различных ресурсов и ограничений и минимальных экономических затратах на это. В соответствии с указанной целью основными задачами управления литотехнической системой (в зависимости от этапов ее существования) являются: (1) сбор и обработка информации об ЛТС; (2) оценка и анализ состояния и функционирования ЛТС; (3) установление и диагностика проблем в состоянии и функционировании ЛТС; (4) выявление ресурсов и ограничений, необходимых для управления ЛТС; (5) выработка и обоснование управленческих решений для оптимизации работы ЛТС.

В отношении задач инженерной геологии приведенное выше определение управления ЛТС автор представляет следующим образом. Управление литотехнической системой — это процесс достижения такого состояния ее геологической подсистемы (по Г.К. Бондарику, сферы взаимодействий литосферы с технической подсистемой, или СВЛ), которое способно обеспечить оптимальный режим работы всей системы в целом на каждом этапе ее существования, с использованием всех имеющихся ресурсов (информационных, вычислительных, интеллектуальных, технических, технологических, административных, экономических и др.) при соблюдении множества ограничений (Галкин, 2012). При этом в качестве цели управления ЛТС выступает минимизация неблагоприятных последствий изменений СВЛ и ее компонентов в какой-либо момент времени при максимальном использовании различных ресурсов и ограничений и минимизации экономических затрат на создание или поддержание ее устойчивых состояний, благоприятных для нормального функционирования ЛТС. Соответственно в задачи управления ЛТС входят: 1) сбор и обработка информации о СВЛ; 2) оценка и анализ состояния СВЛ; 3) установление и диагностика проблем в состоянии СВЛ; 4) выявление ресурсов и ограничений, необходимых для управления СВЛ; 5) выработка геологически обоснованных управленческих решений для оптимизации работы всей ЛТС.

1.2.3. Понятие об управлении. Что же понимать под «*управлением*»? В теории управления, как части кибернетики, под «управлением» понимается процесс прогнозирования, планирования, организации, мотивации, координации и контроля действий,

необходимый для того, чтобы сформулировать и достичь определенную цель.

Если формулировать более кратко, то под *управлением понимается совокупность операций по организации некоторого процесса для достижения определенных целей* (Теория автоматического .., 2003). Согласно В.Т.Трофимову «под управлением следует понимать целенаправленное воздействие на любую систему, обеспечивающее получение необходимых результатов и её нормальное функционирование, сохранение или планируемое развитие этой системы» (Трофимов, 2010а, с. 235).

Следовательно, говоря об управлении в структурном плане необходимо выделить: *субъект* и *объект управления*, а также *средства управления*. В содержательном плане необходимо выделить: цель управления, критерии достижения цели.

Управление присуще лишь системным объектам, для которых характерно понижение энтропии, направленность на последующее упорядочение системы.

Процесс управления делится на несколько этапов:

1. Сбор и обработка первичной информации.
2. Анализ, систематизация и синтез информации.
3. Постановка на этой основе цели (целей) управления.
4. Обоснование метода управления и прогнозных оценок.
5. Реализация (внедрение) выбранного метода управления.
6. Оценка эффективности управления (обратная связь).

Здесь первые три и последняя операции отражают информационный, четвертая – алгоритмический, а пятая – энергетический аспекты управления. Если перечисленные операции выполняет человек (коллектив), то это – *ручное управление*; если же управление осуществляет специально созданная система (машина, ЭВМ и т.п.), то это – *автоматическое* или механизированное *управление*.

В экологической геокибернетике нас будет интересовать, прежде всего, автоматическое управление. Ручное управление эколого-геологическими системами, конечно, возможно и широко применяется в настоящее время, но оно не эффективно по сравнению с автоматическим. Более того, достижения кибернетики порой и не нужны для ручного управления, чего нельзя сказать об автоматическом управлении, тем более такими сложными системами как эколого-геологические.

Автоматическое управление осуществляется без непосредственного участия человека. При этом не только

энергетические, но также информационные и алгоритмические операции управления передаются автоматам. Операции автоматического управления реализуются в следующих основных функциональных элементах: объекте управления, измерительных элементах, управляющем устройстве и исполнительном механизме.

Совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов образует систему управления, если она способна к достижению цели. Системы управления представляют собой класс динамических систем, отличающихся наличием цели и специальной организации, позволяющей достичь эту цель. Подобные системы функционируют в живой и неживой природе, в самых различных областях техники, экономики, биологии. Однако, независимо от области функционирования, их объединяет в особый класс ряд системных свойств и признаков (Теория автоматического…, 2003).

1.2.4. Управляемость эколого-геологической системы. Не все системы, в том числе и ЭГС, поддаются управлению, поэтому важно проанализировать их потенциальную управляемость. Согласно Д.В.Артамонову и А.Д.Семёнову (2003), понятие управляемости связано с переводом системы посредством управления из одного состояния в другое.

Пусть в пространстве состояний $\boldsymbol{X}$ заданы два подмножества $\mathbf{\Gamma}_1 \subset \mathbf{X}$ и $\mathbf{\Gamma}_2 \subset \mathbf{X}$. Рассматриваемая эколого-геологическая система будет управляемой, если существует такое управление $\mathbf{U}(t)=(U_1, U_2,...U_k)^T$, определенное на конечном интервале времени $0 \le t \le T$, которое переводит данную ЭГС в пространстве $\boldsymbol{X}$ из подмножества $\mathbf{\Gamma}_1$ в подмножество $\mathbf{\Gamma}_2$.

Возможны частные случаи управляемости ЭГС когда:

1. Пространство состояний $\boldsymbol{X}$ ограничено замкнутой областью;

2. В процессе управления осуществляется переход из подмножества $\mathbf{\Gamma}_1$ в заданную точку пространства состояний;

3. В процессе управления осуществляется переход из заданной точки пространства состояний в заданное подмножество $\mathbf{\Gamma}_1$;

4. В процессе управления осуществляется переход из окрестности одной точки пространства состояния в окрестность другой точки.

В случае неполной управляемости размерности подобласти $\mathbf{\Gamma}_1$ меньше размерности пространства состояния.

Кроме этого, управление данной ЭГС может происходить при ограничениях, накладываемых на управляющие и управляемые переменные, что усложняет определение управляемости. В общем случае задача управляемости не разрешена до настоящего времени.

Критерии управляемости разработаны только для частных случаев управления линейными системами (Артамонов, Семёнов, 2003).

Для линейной стационарной эколого-геологической системы можно записать:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, \tag{1.1}$$

где матрицы **A** и **B** постоянны; t - время.

При отсутствии ограничений в пространстве состояний и пространстве управлений, управляемость зависит только от коэффициентов матриц **A** и **B**.

Для управляемой системы справедливо следующее определение. Если для произвольно заданных $\mathbf{x}_0$ и $\mathbf{x}_1$, существует управление $\mathbf{u}(t)$, переводящее систему (1.1) за некоторое время t_1-t_0 из состояния $\mathbf{x}(t_0)$ в состояние $\mathbf{x}(t_1)$=$\mathbf{x}_1$, то система называется вполне управляемой.

Пусть решение уравнения (1.1) задано в виде суммы общего решения однородного уравнения $x_{\text{св}}$ и частного решения $x_в$ неоднородного уравнения

$$x = x_{св} + x_в. \tag{1.2}$$

Для управляемости системы необходимо чтобы решение уравнения (1.1) было устойчивым, что будет выполняться в том случае если:

$$\lim_{t\to\infty} x_{\text{св}} = 0. \tag{1.3}$$

Следовательно, для оценки управляемости системы можно ограничится рассмотрением статических режимов. В этом случае исходная система уравнений (1.1) преобразуется к виду:

$$Ax + Bu = 0. \tag{1.4}$$

1.2.5. Объекты управления. В теории управления объект (ОУ) рассматривается как некий преобразователь переменных *входа* $f(t)$ в переменные *выхода* $y(t)$, как это показано на рис. 1.2. При этом цель управления, в первую очередь, определяет ограничения на переменную выхода объекта $y(t)$. Неконтролируемые воздействия среды $f(t)$, называемые *возмущениями*, вызывают нежелательные отклонения выхода объекта от исходного состояния. Для уменьшения отклонений

на объект оказывают соответствующие *управляющие воздействия* $u(t)$, в чем и заключается основной смысл управления.

Если переменные входа и выхода объекта являются векторами, то объект называют многомерным. Например, задача управления оползнем на склоне связана с рассмотрением в качестве управляемых переменных не только коэффициента устойчивости склона, но также углов внутреннего трения, влажности пород, гидродинамического давления и иных факторов.

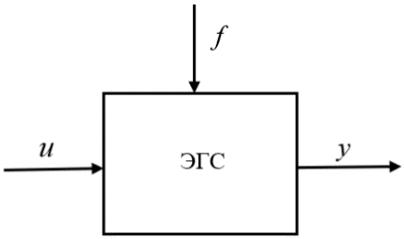


Рис. 1.2. Структура ЭГС как объекта управления (ОУ): *y* — управляемая переменная ЭГС (информационный «выход» или отклик объекта и системы); *u* — управляющее воздействие (информационное) на ЭГС; *f* — внешнее возмущающее воздействие окружающей среды на ЭГС, включая и техногенное

Теория управления изучает общие закономерности, присущие системам управления независимо от их природы. Объекты управления могут быть геологическими, техническими, экологическими, инженерно-геологическими, биологическими и др. (Теория автоматического…, 2003).

В качестве геологических объектов управления могут выступать массивы горных пород (или грунтовые толщи), полезные ископаемые, а также геологические и инженерно-геологические процессы, оказывающие влияние на ЭГС.

В качестве технических ОУ могут выступать любые объекты техносферы, оказывающие воздействие на ЭГС или окружающую среду.

В качестве экологических ОУ могут рассматриваться природные экосистемы или их компоненты, в том числе эколого-геологические системы (ЭГС).

Как пример инженерно-геологических ОУ могут выступать литотехнические системы (ЛТС), системы инженерной защиты и др.

Наконец примерами биологических ОУ могут являться любые живые объекты: от микроорганизмов и растений до животных. Живые

системы — от простейших клеток до сложных организмов — поддерживают свою жизнедеятельность благодаря действию в них механизма управления. Процессы управления в живом организме регулируют ритм сердца и дыхания, температуру тела и т. д. В живой природе механизмы управления настолько органично встроены в объекты, что не всегда можно выделить такие функциональные элементы, присущие техническим системам, как объект управления (ОУ), измерительные элементы, управляющие устройства и исполнительные механизмы. Однако и здесь методы теории управления помогают исследователю глубже понять эти процессы (Винер, 1983).

Для экологов, экогеологов, геоэкологов и других специалистов большой практический интерес представляют ***модели управления***, рассматриваемые ниже и объясняющие механизмы изменения численности биологических популяций (саморегуляция). Такие модели могут оказаться полезными и для принятия решений в области биологического управления, например, обосновать целесообразность использования при борьбе с насекомыми-вредителями ядохимикатов или безопасных мер биологического характера (с помощью естественных врагов) (Теория автоматического…, 2003).

Управление ЭГС может осуществляться однократно или многократно, в том числе автоматически или «в ручном режиме». **Однократное управление** представляет собой разовое воздействие на систему, обеспечивающее требуемое её качество и параметры состояния. Например, защита ЭГС, развитой на склоне, от оползневой опасности предполагает разовое создание соответствующей системы инженерно-экологической защиты рассматриваемого оползневого склона, а дальнейшее управление этой системой по сути представляет собой систему мониторинга за её состоянием и работоспособностью. Однократное управление может реализовываться в «ручном режиме» и не требовать создания дорогостоящих автоматических систем управления.

Многократное управление представляет собой автоматическое управление системой в постоянном режиме: как только параметры системы отклоняются от заданных значений, автоматически включается система управления и приводит ЭГС в исходное или требуемое состояние.

В настоящее время теория автоматического управления наиболее хорошо разработана применительно к техническим системам. Именно на это была изначально нацелена кибернетика, объекты которой наиболее хорошо изучены. В меньшей мере теория автоматического

управления разработана применительно к экосистемам и биоте, на решение этой задачи и направлена геокибернетика.

Поведение во времени ОУ показано на рис. 1.3.

Если переменные входа и выхода объекта являются векторами, то объект называют многомерным. Например, задача управления оползнем на склоне связана с рассмотрением в качестве управляемых переменных не только коэффициента устойчивости склона, но также углов внутреннего трения, влажности пород, гидродинамического давления и иных факторов.

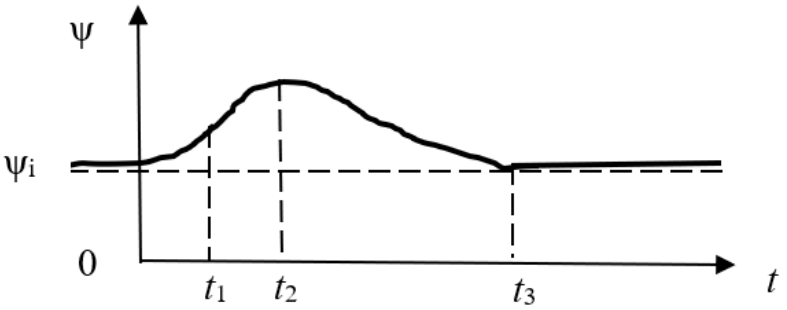


Рис.1.3. Поведение объекта управления (ОУ) во времени

Здесь показатель ψ является параметром, отражающим какое-либо управляемое состояние объекта. В оптимальном (нормальном) состоянии система характеризуется его некоторой величиной ψ_i, а в аномальном состоянии (например, при воздействии на ОУ внешних факторов в момент времени t=0) величина ψ начинает расти – отклоняться от нормального значения в сторону увеличения. Поскольку система управляема, то на интервале времени $0 < t < t_1$ это отклонение обнаруживается и включается система управления, которая к моменту времени $t = t_2$ прекращает дальнейшее отклонение ОУ, достигшее своего максимума, а затем к моменту $t = t_3$ возвращает ОУ к прежнему (нормальному) состоянию, характеризуемому параметром ψ_i.

Ключевым моментом в этом процессе, иллюстрируемом на рис.3, является обнаружение отклонения в системе в интервале времени $0 < t < t_1$. Это реализуется с помощью специального устройства, позволяющего получить данную информацию и работающего по принципу обратной связи (рис. 1.4). Принцип обратной связи применяется и при взаимодействии человека с ЭГС (рис. 1.4*а*), и при его взаимодействии с техническими системами (рис. 1.4*б*), в том числе системами управления (АСУ и т.п.).

Управление эколого-геологическими системами является *сознательным управлением*, т.е. воздействие на систему определяется заранее поставленной целью, которую необходимо добиться в процессе управления. Сознательное или планомерное управление рассматривается как иерархическое управление, когда цель функционирования объекта управления задается её надсистемой (в нашем случае – концепцией устойчивого развития биосферы).

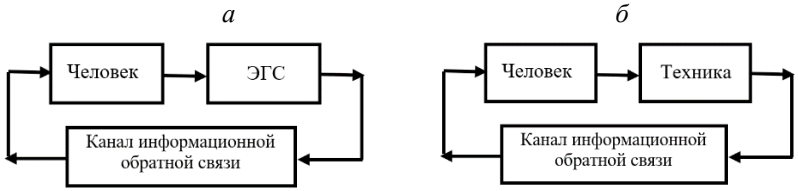


Рис. 1.4. Обратная связь в системе «человек-ЭГС» (*а*) и в системе «человек-техника» (*б*)

В настоящее время сложилось несколько подходов к теории управления:

- **Процессный** подход основывается на идее существования некоторых универсальных функций управления, применимых к любым объектам управления.
- **Системный** подход сложился на базе общей теории систем: система — это некая целостность, состоящая из взаимозависимых подсистем, каждая из которых вносит свой вклад в функционирование целого; управляя частями системы, можно управлять всей системой в целом.
- **Ситуационный** подход рассматривает любой объект управления как открытую систему, постоянно взаимодействующую с внешней средой, следовательно, и главные причины того, что происходит внутри этого объекта, следует искать вне её, то есть в той ситуации, в которой она реально функционирует.
- **Универсальный** подход сложился на базе научной школы универсологии, теории универсального управления, теории переходных процессов, теории относительности сознания, и рассматривает любую систему в совокупности её вертикальных и горизонтальных связей. С другой стороны, в бюллетене «В защиту науки», издаваемом Комиссией по борьбе с лженаукой

и фальсификацией научных исследований при Президиуме РАН, универсология охарактеризована как лженаука.

- **Субстратный** подход, основанный на структурной оптимизации стратегии и принимаемых решений посредством выявления субстратов (ключевых моментов оптимизации) в значимых классах информационного контекста управленческой ситуации. Процесс построения такой структурно-субстратно-оптимальной стратегии называют структурной оптимизацией.

1.2.6. Структура системы управления. Обобщенная структура системы управления ЭГС показана на рис. 1.5.

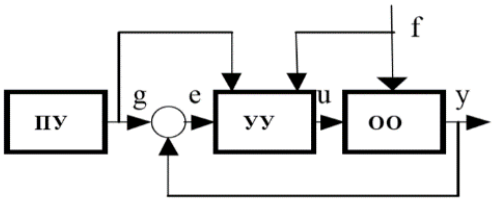


Рис.1.5. Обобщенная структура системы управления ЭГС

На этой структурной схеме приняты следующие обозначения: ПУ - программное (задающее) устройство; УУ - устройство управления (регулятор); ОО - обобщенный объект (ЭГС); f – внешнее воздействие на ЭГС; u – управляющее воздействие (вход); y – регулируемый параметр (выход).

Для такой обобщенной структуры задачу управления можно сформулировать следующим образом.

Для заданной математической модели объекта найти закон управления, удовлетворяющий заранее заданным критериям (показателям) качества, для всех $x \in X$ и $u \in U$.

Под законом управления понимается функциональная взаимосвязь между обобщенными координатами системы x и управляющим воздействием u:

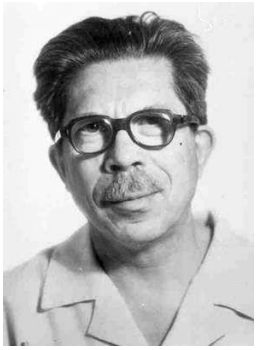
$$u = F(x,a) \qquad (1.5)$$

где F – нелинейная функция; a – постоянные параметра закона управления.

При этом предполагается, что объект управления полностью управляем и наблюдаем, что позволяет достичь за конечное время любого $x \in X$, используя для управления $u \in U$, а также восстановить вектор обобщенных координат x по измеренным значениям вектора регулируемых величин y.

1.2.7. Проблема управления экосистемами - это варианты заранее продуманных и рассчитанных действий, нацеленных одновременно на повышение продуктивности природных экосистем и на повышение их устойчивости к негативным воздействиям естественных и антропогенных факторов (Симонова-Лобанок, 2016).

В последние десятилетия в специальной литературе все чаще говорится о необходимости «управления» теми или иными ресурсами, экосистемами (биогеоценозами) и даже об ***управлении биосферой***. Ставится задача разработки соответствующей теории.



Николай Фёдорович Реймерс (1931-1993)

Ни у кого не вызывает сомнений необходимость управления сельскохозяйственными ЭГС, а также городскими, промышленными, горнодобывающими и др. Но мнения расходятся в отношении ЭГС заповедников и других природоохранных зон. С одних позиций «управление охраняемыми экосистемами» (в том числе экосистемами заповедников) считается частью общей концепции «управления биосферой», с других отрицается возможность и необходимость управления экосистемами заповедников (Дёжкин, 1986).

Н.Ф.Реймерс[1] сформулировал важное и принципиальное положение о том, что регуляция должна быть направлена на сохранение участка, а применяемые для этого методы оказывать экологическое воздействие, аналогичное тем влияниям, под давлением которых сложилась данная экосистема (Реймерс, Штильмарк; 1978).

[1] *Реймерс, Николай Фёдорович* (1931-1993) – советский зоолог, эколог, доктор биологических наук, профессор, председатель Экологического союза СССР (1988), декан экологического факультета МНЭПУ

А.М.Краснитский (1983), приверженец невмешательства в течение естественных процессов на заповедных территориях, считал в то же время, что в условиях прямого или косвенного антропогенного воздействия на природные процессы необходимы «научно обоснованный контроль и активные меры по биотехнической регуляции компонентов биоценоза». Степень охраны заповедной природы, по мнению этого ученого, должна вытекать из задач и основных функций заповедников. Близких взглядов придерживался и К. П. Филонов (1983, 1984), который большое внимание уделял связи регуляционных мероприятий со степенью автономности (площадью) заповедников.

Однако, прежде чем говорить о проблемах управления ЭГС, необходимо обсудить вопрос о возможности и необходимости управления экосистемами в целом. На этот счет имеются различные, порой противоположные точки зрения. Так, например, в работах В.Г.Горшкова[1] (1980, 1995, 2004) обосновывается идея о том, что устойчивость биосферы Земли поддерживается сугубо природными биологическими процессами, любое вмешательство в которые может нарушить этот механизм.

Согласно его представлениям как только естественный биотический механизм управления окружающей средой оказывается разрушенным, окружающая среда как в локальном, так и в глобальном масштабах быстро (за времена порядка сотни лет) деградирует до непригодного для жизни состояния даже в том случае, когда прямое воздействие человека на окружающую среду (типа индустриальных загрязнений) отсутствует. При этом технологический аналог биотической регуляции невозможен, т.е. технологически управлять биосферой нельзя.

Виктор Георгиевич Горшков (1936-2019)

Соглашаясь в целом с концепцией В.Г.Горшкова о роли биотической регуляции устойчивости биосферы, все же следует сказать, что в условиях современного экологического кризиса вмешательство человека в природу, управление отдельными процессами в экосистемах

[1] *Горшков, Виктор Георгиевич* (1936-2019) – советский и российский физик, эколог, профессор, доктор физико-математических наук, автор концепции биотической регуляции окружающей среды

и ЭГС необходимо именно для того, чтобы «помочь» биотической регуляции. Однако оно (вмешательство, управление) не должно быть безоглядным и не обоснованным, идти в разрез с механизмами и законами природной биотической регуляции.

Критический анализ концепции В.Г.Горшкова был дан в работах В.А.Алексеенко[1] (1999) и др. ученых.

При изучении технических, социальных и других сложных систем используется термин «управление», а не «регулирование». Термин «регулирование» означает повышение эффективности одного или двух параметров. Тогда как термин «управление» подразумевает учет всей совокупности параметров системы, всего многообразия последствий направленного воздействия для самой системы (Симонова-Лобанок, 2016).

Владимир Алексеевич Алексеенко (р.1939)

При решении такой задачи, необходимо изучить устройство и принцип действия самого объекта управления — механизм функционирования экосистем и ЭГС, возможные реакции этого механизма на воздействие внешних факторов, пределы критических изменений параметров экосистем, за которыми начинаются нарушения их структуры и функций. Необходимо учитывать следующие факторы, обусловленные особенностями ЭГС (Pavlikakis G.E., Tsihrintzis V.A., 2000; Pallister J., 2006): 1) экосистемы подвергаются постоянному изменению в пространстве и времени; 2) возможен значительный дисбаланс ЭГС по определенной причине, экологические последствия могут быть близки к критическим или далеки от них; 3) ЭГС могут иметь несколько уровней стабильности: когда ЭГС нарушаются человеком или по другой причине, она может трансформироваться в новую систему и стабилизироваться на одном или нескольких уровнях; 4) между различными частями ЭГС существуют организованные отношения, но не все они связаны со всеми остальными. Кроме того, нет необходимости знать все отношения в ЭГС, хотя знание наиболее важных из них необходимо.

[1] *Алексеенко, Владимир Алексеевич* (р.1939) – советский и российский геохимик, эколог, доктор г.-м. наук, профессор, основатель НИИ геохимии биосферы РГУ (ныне ЮФУ)

Механизм функционирования природной экосистемы с точки зрения массообмена в общем виде представляет собой последовательное превращение биомассы в некромассу, некромассы в минеральную массу, минеральной массы в биомассу с помощью процессов анаболизма, некроболизма и катаболизма. Разнообразные организмы с различными временами онтогенеза, разной ритмикой и продолжительностью жизни создают сложную, многослойную, цикличную и однонаправленную систему непрерывного процесса метаболизма экосистемы — ее главной функции (Одум, 1986; Горшков, 1980; Grumbine R.E., 1994; Pallister J., 2006; Симонова-Лобанок, 2016).

Природные системы, даже самые простые, неизмеримо сложнее машин. Живая клетка по сложности функционирования вполне сравнима с большим учреждением (социальной организацией). Современный уровень знаний не всегда позволяет достаточно точно и детально описать структуру и функции природных систем. Особенно, если учесть низкую точность измерений и информативность параметров. Информативных характеристик должно быть минимально, но достаточно полно отражающих существо процесса функционирования изучаемых систем. Интегральные характеристики должны обеспечить высокую точность экспериментальных определений, чтобы снизить до минимума ошибки вычислений и не исказить смысл экспериментов.

Сложный и длительный процесс разработки теории управления функциями природных экосистем можно значительно ускорить и облегчить за счет использования опыта, накопленного наукой в области управления сложными техническими и социальными системами. Метод технико-биологических аналогий дает практическую возможность изучать природные системы как объекты управления. В этом случае природные объекты могут быть представлены как «процессно-модульные системы» (Симонова-Лобанок, 2016).

1.2.8. Цель, объект и предмет исследования экологической геокибернетики. Исходя из вышеприведённого определения экологической геокибернетики, можно определить цель, объект и предмет её научных исследований.

Цель управления эколого-геологическими системами- важнейший вопрос. Простого ответа на вопрос, что считать целью управления ЭГС не существует.

Так, например, если рассматривать цель экологической геокибернетики в самом *широком смысле*, то она может быть сформулирована как – поддержание функционирования биосферы или

ЭГС в оптимальном состоянии, соответствующем наилучшим экологическим условиям или обеспечение устойчивости данной ЭГС. Согласно В.Т.Трофимову «*конечной* ***целью*** *управления эколого-геологическими системами следует считать минимизацию неблагоприятных экологических последствий в этих системах и поддержание в них режима, благоприятного для жизнедеятельности людей и существования биоты на основе рационального использования и охраны природы, в том числе литосферы*» (Трофимов, 2010а, с. 235-236).

В *узком смысле* цель экологической геокибернетики – управление параметрами ЭГС для обеспечения её оптимального функционирования в некоторых заданных пределах. При этом «пределы» могут быть самыми разными, они конкретизируются как для каждого компонента ЭГС (подсистемы ЭГС), так и для всей ЭГС в целом.

Цель управления процессом или объектом в узком смысле — конечный технический или экономический результат, который может быть достигнут системой управления на определенном временном интервале ее нормального функционирования.

Цель управления формулируют не специалисты по кибернетике, а в нашем случае экологи, экогеологи, экономисты, биологи, т. е. специалисты в той области, в которой необходимо применить управление. Основная задача специалистов по управлению состоит в том, чтобы создать систему для сбора информации, необходимой для осуществления цели управления, передачи, представления или преобразования ее в удобную форму, переработки и, наконец, принятия решения о том, как использовать эту информацию, чтобы обеспечить выполнение цели объектом управления. Техническое решение этой задачи связано с применением различных аппаратных и программных средств (Теория автоматического…, 1993).

Однако вопрос о формулировании цели экологической геокибернетики упирается в более общий и глобальный вопрос: каков механизм обеспечения устойчивости жизни на Земле? От ответа на этот вопрос зависит стратегия выживания человечества и стратегия всей его «экологической деятельности».

Пока же четкого ответа на этот вопрос нет. Более того, существуют диаметрально противоположные концепции устойчивого развития, основывающиеся на разных, порой противоположных, представлениях (табл.1.1).

Кроме того, цель экологической геокибернетики вытекает из анализа современных *концепций устойчивого развития* или концепций устойчивости биосферы, представленных нами в табл.1.1. Здесь

выделяется три типа концепций, каждая из которых характеризуется определенными условиями.

Таблица 1.1

Современные концепции устойчивого развития

Тип концепции	1. **Антропоцентризм**		2. **Коэволюция и ноосферная концепция**	3. **Биоцентризм**	
	Радикальный антропоцентризм	*Умеренный антропоцентризм*		*Умеренный биоцентризм*	*Радикальный биоцентризм*
Характеристика концепции	Возможность полностью управлять природой	Возможность частично управлять природой	Разумное регулирование отношений природы и общества	Минимальное вмешательство в природу	Биотическое (природное) управление окружающей средой
Основной принцип концепции	Неограниченное потребление	Умеренное потребление	Компенсация потерь	Ограниченное потребление	«Назад к природе»
Характер экономики	Глобальная экономика потребления (постиндустриальная)	Экономика умеренного потребления	Экономика компенсированного (сбалансированного) потребления	Экономика контролируемого потребления	Ограниченная экономика
Допустимый % нарушенных земель	>90	90-60	60-40	40-10	<10
Народонаселение	Неограниченный рост народонаселения	Ограничен-ный рост народонаселения	Контроль роста народонаселения	Самоограничение народонаселения	Сокращение народонаселения

Термин "устойчивое развитие" вошёл в обиход учёных и политиков чуть больше в конце XX в и был положен в основу мероприятий по охране окружающей среды в конце этого столетия. В докладе Международной комиссии по окружающей среде и развитию (1984-1987) под устойчивым понимается такое развитие, которое удовлетворяет потребности настоящего времени, не подрывая способности будущих поколений удовлетворять свои потребности. Однако доминирующая парадигма современного человеческого

общества - антропоцентризм - не допускала других толкований развития, кроме как увеличения благосостояния населения и роста экономики (Пегов, 2007).

К настоящему времени вопрос об обосновании концепции устойчивого развития пока окончательно не решен, и существует несколько подходов к ее оценке, порой прямо противоположных: от крайнего (радикального) антропоцентризма до радикального биоцентризма.

Очевидно, что истина где-то посередине и реальная концепция устойчивого развития должна строиться на базе теории коэволюции, ноосферы и компенсационном принципе природопользования. Согласно Н.Ф.Реймерсу (1994) единственный способ сохранить продуктивность планеты и среду жизни для людей — экологическая территориальная оптимизация.

Согласно концепции коэволюции для того, чтобы избежать катастрофы и устойчиво развиваться, общество должно придерживаться трёх принципов, образующих концепцию устойчивого развития биосферы (Моисеев, 1988; Реймерс, 1994; Grumbine R.E., 1994; Тарко, 1995, 2005; Голубев, 2001; Гальперин, 2003):

• скорость восстановления возобновимых ресурсов должна быть не ниже скорости их потребления;

• потребление невозобновимых ресурсов не должно превышать скорости отыскания их замены;

• интенсивность выбросов загрязняющих веществ не должна превышать скорости их разложения или ассимиляции природной средой или их очистки.

Пока что ни один из этих принципов не удается реализовать в полной мере.

Кроме того, как видно, эта концепция предполагает активное участие человека в природоохранной деятельности и восстановлении окружающей среды. Согласно работам В.С. Голубева (2001), А.М. Тарко (1995, 2005) компенсационный принцип рассчитан на значительную «помощь» человека природе. Он реализуется, во-первых, путем управления возобновимыми ресурсами биосферы (включая вещественно-энергетические ресурсы литосферы) и во-вторых - управления её загрязнением, которое должно быть сведено к минимуму до уровней, с которыми может справиться биосфера естественным путём самоочищения. Оба эти пути предполагают активное влияние человека на эколого-геологические системы (ЭГС). Это и определяет ***цель экологической геокибернетики*** *– управление эколого-геологическими системами для обеспечения устойчивого развития.*

Под влиянием достижений научно-технического прогресса человек создал ложное представление о познаваемости природных процессов и их управляемости. В действительности биосфера и её экосистемы более сложные и более развитые образования, чем наша цивилизация. По оценкам специалистов, поток информации в биоте на 20 порядков превышает поток информации, который способны переработать все имеющиеся сейчас на Земле компьютеры (Горшков, 1995; Пегов, 2007).

В последние годы наблюдается определенный переход от антропоцентрического подхода к биоцентрическому, когда мы говорим об устойчивом развитии. Однако и при этом подходе акценты также высказываются порой прямо противоположные: от способности человека всё контролировать и управлять биосферой, до повторения призывов Ж.Ж.Руссо «назад к природе» (радикальный биоцентризм, см. табл.1.1).

Согласно С.А.Пегову (2007), у*стойчивым следует считать развитие, не выходящее за пределы ёмкости биосферы, сохраняющее её функции как самоорганизованной и саморегулирующейся системы,* А это в первую очередь означает, что если социально-экономическое развитие приводит к разбалансировке механизмов стабильности базовых биосферных параметров (тех же биогеохимических циклов), необходимо определить новые приоритеты в социально-экономической сфере, развитии науки и техники, разработать механизмы их реализации, оптимизировать процессы управления инновационными технологиями. В противном случае человек как вид начнёт довольно быстро деградировать в условиях мощного нарастания неблагоприятных природных изменений.

С точки зрения С.А.Пегова (2007), для достижения устойчивого развития России необходимо решить следующие основные задачи:

1) сохранение природно-ресурсного и экологического потенциала;
2) сохранение демографического потенциала;
3) постоянное качественное совершенствование технологий.

Согласно некоторым воззрениям (Горшков, 1995; Пегов, 2007) законы развития общества должны быть подчинены законам развития биосферы. Однако на самом деле можно привести массу примеров противоречий этих законов. Так, например, исследования показывают, что биосфера, будь то тундра, тропический лес или степь, тратит на это до 35-40% своей энергетики, в то время как расходы человечества на эти же цели не превышают 5% (Пегов, 2007).

В.Г.Горшков (1980, 1995, 2004) в своих работах высказывает крайнюю точку зрения на устойчивое развитие: нет никаких оснований

для надежд на построение искусственных сообществ, обеспечивающих стабилизацию окружающей среды с той же степенью точности, что и естественные сообщества. Поэтому сокращение естественной биоты, превышающее допустимое пороговое значение, лишает устойчивости окружающую среду, которая не может быть восстановлена за счет создания очистных сооружений и перехода к безотходному производству.

Величина этого порогового значения была определена В.Г.Горшковым (1995) на основе нескольких независимых эмпирических результатов. Во-первых, показано, что доля потребления крупных животных во всех известных естественных сообществах не превосходит 1% естественной биологической продукции. Во-вторых, то же значение 1% найдено из независимого анализа диффузии экскретов передвигающихся животных. Далее, в-третьих, на основе анализа данных круговорота углерода показано, что нарушение стабилизации окружающей среды наземной биотой произошло после начала промышленной революции, когда антропогенная доля потребления продукции биосферы превысила 1%. Оставшаяся до этого времени невозмущенной часть биосферы в течение тысяч лет компенсировала все возмущения, вносимые деятельностью людей, преобразовавших естественные сообщества практически всей Европы и части Азии.

Таким образом, существуют веские основания полагать, что биосфера (состоящая из возникшей в процессе эволюции естественной биоты и взаимодействующей с ней внешней и окружающей среды) представляет собой единственную систему, обеспечивающую устойчивость среды обитания при любых возникающих возмущениях.

Ссылки на катастрофы в истории Земли, более разрушительные для естественной биоты, чем ее современное антропогенное возмущение, не могут служить успокоением. До сих пор нет эмпирических доказательств существования катастроф, сопровождающихся потерей биотического контроля окружающей среды в глобальном масштабе. Все данные о катастрофах получены, главным образом, на палеонтологическом материале о крупных передвигающихся животных, которые, как было показано, составляют лишь тонкую настройку естественной биоты. Вымирание этих животных практически не нарушило нормального функционирования биоты и ее способность к стабилизации окружающей среды (Горшков, 1995).

Поэтому сохранение природных сообществ и существующих видов живых организмов в объеме, способном обеспечивать выполнение принципа Ле Шателье по отношению к глобальным

возмущениям окружающей среды, представляет собой главное условие продолжения жизни человечества. Для этого необходимо сохранение естественной природы на большей части поверхности Земли, а не консервация биоразнообразия в генных банках и ничтожных по своей площади резерватах, заповедниках и зоопарках (Горшков, 1995).

Согласно спутниковым данным современная освоенная часть суши составляет 60%, а неосвоенная — 40% (Горшков, 1995). Для обеспечения устойчивого развития биосферы это соотношение должно быть обратным. Если не рассматривать здесь вопросы, связанные с регулированием численности населения, вопросов его потребления и т.п., то цель устойчивого развития можно определить как обеспечение условий для восстановления техногенно-нарушенных территорий и природных экосистем. Эта цель и должна являться определяющей для экологической геокибернетики, направленной на «помощь» биосфере в ее саморегуляции и обеспечение устойчивости.

Таким образом, если под устойчивым развитием биосферы понимать сохранение её гомеостазиса, то цель экологической геокибернетики может быть достигнута путем реализации следующих взаимосвязанных ***задач управления***:

- поддержание гомеостазиса ЭГС путем обеспечения ее климаксового состояния (экологического равновесия или экологического баланса для саморегуляции и самосохранения ЭГС);
- обеспечение компенсационных механизмов в ЭГС;
- поддержание ЭГС в рамках допустимых уровней внешних воздействий.

Объектом экологической геокибернетики являются *природно-технические системы (ПТС), рассматриваемые как экосистемы или как их часть - эколого-геологические системы*. Они являются управляемыми и поэтому попадают в сферу интересов и кибернетики, и геокибернетики (см. рис.1.2).

Таким образом, объект экологической геокибернетики чрезвычайно широк, он такой же, как и объект исследования экологии или экологической геологии, т.е. любые природные экосистемы или эколого-геологические системы, а также их аналоги при наличии техногенных воздействий – природно-технические экосистемы или природно-технические эколого-геологические системы, могут рассматриваться в качестве объектов изучения экологической геокибернетики.

Общность объекта исследования геокибернетики с экологией, геоэкологией и экологической геологией позволяет установить взаимосвязь этих наук с данным научным направлением исследований,

а также с другими науками, исследующими природно-технические системы.

Предметом исследования экологической геокибернетики являются *знания о закономерностях, способах и методах управления природно-техническими системами, в том числе экосистемами и эколого-геологическими системами, с позиций теории экологии и экологической геологии*.

Исходя из этого следует, что предмет исследований экологической геокибернетики специфический, - он нацелен на управление состоянием и функционированием ПТС, включая экосистемы и ЭГС. Никакие иные смежные науки и научные направления, изучающие ПТС, экосистемы или эколого-геологические системы, не ставят во главу угла изучение закономерностей управления ими.

1.3.Понятие об эколого-геологической системе

Владимир Николаевич Сукачев (1880-1967)

1.3.1. Определение ЭГС. Если под *природными экосистемами* понимаются природно-территориальные комплексы, состоящие из двух основных частей: абиотической среды и биоты, в которой совершается внешний и внутренний круговорот вещества и энергии (Tansley, 1935), то под *эколого-геологической системой* (ЭГС) понимают открытую динамическую систему, включающую три подсистемных блока - литосферный абиотический, биотический и источников природных и техногенных воздействий, тесно связанных прямыми и обратными причинно-следственными связями, обусловливающими ее структурно-функциональное единство (Теория..., 1997).

Понятие ЭГС близко к понятию «биогеоценоз», введенному В.Н.Сукачевым[1] (1942), который писал, что «биогеоценоз можно определить как участок земной поверхности, где на известном протяжении биоценоз и отвечающие ему части атмосферы, литосферы,

[1] *Сукачев, Владимир Николаевич* (1880-1967) – российский, советский геоботаник, эколог, леесовод, палеонтолог, академик АН СССР

гидросферы и педосферы, остаются однородными и в совокупности образующими единый внутренне взаимообусловленный комплекс».

Понятие об ЭГС разрабатывалось В.Т.Трофимовым[1] и Д.Г.Зилингом[2] в связи с *концепцией экологических функций литосферы*, согласно которой литосфера и её компоненты выполняет ряд функций, обеспечивающих экологические условия для биоты. Этими экологическими функциями являются: ресурсная, геодинамическая, геохимическая и геофизическая.

Виктор Титович Трофимов (р.1937)

В практическом плане ЭГС - это определенный объем литосферы с находящейся в ней и на ней биотой, включая человека и социум, на которые воздействуют природные и техногенные факторы, под влиянием которых развиваются современные геологические процессы в названной системе, влияющие на условия жизни биоты в ее рамках. Эта система исследуется как многокомпонентная система, включающая породы, подземные воды, нефть и газы, геохимические и геофизические поля и протекающие современные геологические процессы, влияющая на существование и развитие биоты, в том числе и человеческого сообщества (Базовые…, 20012). Вопросы геологического обоснования управления эколого-геологическими системами впервые были подняты В.Т.Трофимовым (2010).

Современное состояние таких систем сформировалось и трансформируется под влиянием трех групп причин: 1) закономерностей геологического развития в прошлом и современного тектонического режима, 2) современного климата, 3) а на освоенных территориях - и антропогенных (техногенных) воздействий. Первая группа причин обуславливает формирование так называемых региональных геологических факторов эколого-геологических условий, а первая и вторая вместе (особенно вторая) -зональных геологических

---

[1] *Трофимов, Виктор Титович* (р. 1937) – советский, российский инженергеолог, экогеолог, доктор г.-м. наук, профессор, зав. кафедрой инженерной и экологической геологии МГУ им. М.В.Ломоносова, автор концепции экологических функций литосферы

[2] *Зилинг, Дмитрий Генрихович* (1927-2009) – советский, российский инженергеолог, географ, экогеолог, кандидат географических наук

факторов. Поскольку природные эколого-геологические условия определяются естественным для данного времени сочетанием этих двух групп факторов, то необходимо в равной степени изучать причинные закономерности их формирования и пространственного распределения.

Только на основе такого анализа можно познать основные закономерности формирования, пространственного распределения и изменения самих эколого-геологических условий. Решение этой задачи проводится при изучении любых природных объектов. На освоенных территориях возникает необходимость анализа влияния антропогенных воздействий на трансформацию природных эколого-геологических условий (Базовые…, 2012).

Дмитрий Генрихович Зилинг (1927-2009)

В соответствии с этим при эколого-геологических работах исследуются системы «литосфера-биота», «техногенно-измененная литосфера-биота», прямые и обратные связи между абиотическими и биотическими подсистемами, а, в конечном счете, чаще всего воздействие «неживого» на «живое»; в перспективе возможно взаимодействие литосферы и живого. В такой конструкции системы техногенные источники взаимодействия учитываются и опосредованно, через техногенные изменения литосферы.

Экологическая геология исследует четыре типа эколого-геологических систем: 1) природная эколого-геологическая система реальная; 2) природная эколого-геологическая система идеальная; 3) природно-техническая эколого-геологическая система идеальная; 4) природно-техническая эколого-геологическая система реальная (Трофимов, Зилинг, 2002).

Структура эколого-геологической системы и ее положение в объеме экосистемы согласно В.Т.Трофимову показано на рис. 1.6.

Эта схема составлена с учетом изменения содержания экологии, выходом ее за границы биоэкологи, изучающей взаимодействия биотического и абиотического компонентов внутри экосистемы, и превращением в науку, исследующую систему природа-человек-общество, а также в связи с необходимостью устранения принципиальной ошибки прежних схем, в которых геологические факторы в системе биотопа не учитывались совсем или, если и учитывались, то в «усеченном» виде.

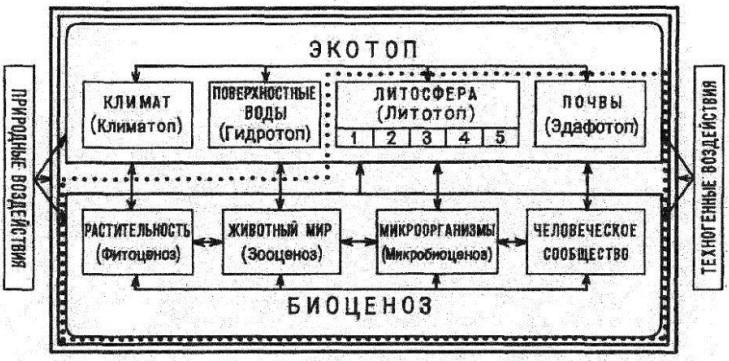


Рис. 1.6. Схема структуры экосистемы с учетом геологической составляющей и классов воздействий на нее. Точками выделены границы эколого-геологической системы: 1-5 - параметры литосферы: 1 - состав, строение и рельеф; 2 - подземные воды; 3 - геохимические поля; 4 - геофизические поля; 5 - современные эндо- и экзогенные процессы (по В.Т.Трофимову, 2009)

На рисунке четко видно, что эколого-геологическая система представляет собой лишь часть экосистемы, входит в ее состав. В то же время он свидетельствует, что без анализа роли геологических факторов изучать экосистемы невозможно (Базовые…, 2012).

С точки зрения экологической геокибернетики показанная на рис. 1.6 схема строения ЭГС важна ещё и потому, что на её основе выделяются компоненты – составляющие ЭГС, которые подлежат управлению – абиотические (литотоп, эдафотоп), и биотические - фитоценоз, зооценоз, микробоценоз и человеческое сообщество (социум), а также внешние природные и техногенные воздействия.

При этом биотические компоненты ЭГС имеют свои отличительные особенности от абиотических компонентов. К ним относятся: 1) *открытость систем*, обеспечивающая обмен веществ и энергии с окружающей средой (метаболизм); 2) *самоуправляемость* и *саморегулируемость* систем, обусловленная способностью обмениваться со средой информацией и обработкой этой информации; 3) *самовоспроизводимость* систем.

Важнейшей особенностью биотических подсистем, включая отдельный организм, является снабжение подсистем и органов организмов энергией. Структура биотической подсистемы состоит из двух компонент – энергетической и управляющей (информационной), она показана на рис. 1.7.

Все части организма потребляют метаболическую энергию, поставляемую метаболическую систему.

Управление такими системами, понимаемое как воздействие на управляемую систему с целью обеспечения требуемого ее поведения, может затрагивать каждый из шести параметров ее модели или компонентов.

Важнейшей особенностью биотических подсистем, включая отдельный организм, является снабжение подсистем и органов организмов энергией. Структура биотической подсистемы состоит из двух компонент – энергетической и управляющей (информационной), она показана на рис. 1.7.

Все части организма потребляют метаболическую энергию, поставляемую метаболическую систему.

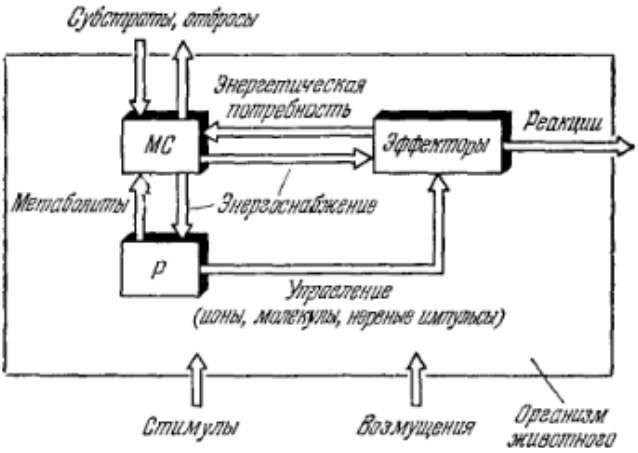


Рис. 1.7. Схема потоков энергии и информации в организме: МС — метаболическая система. *Р* — регуляторные механизмы, включающие элементы генетического и физиологического управления (по В.Н.Новосельцеву, 1978)

Управление такими системами, понимаемое как воздействие на управляемую систему с целью обеспечения требуемого ее поведения, может затрагивать каждый из шести параметров ее модели или компонентов.

Основываясь на представлениях Г.Лоусона (2014) о системном анализе, определим конкретные принципы, которые устанавливают

некоторые следующие ***системные правила*** (истины), которые следует учитывать при работе с системами:

- Все системы состоят из одного или нескольких элементов, которые вместе образуют единое целое.
- Системы состоят из структурных элементов или функциональных элементов.
- Определенные элементы и связи могут быть абстрактными, физическими или видами человеческой деятельности.
- Системы организуются в виде иерархии или сети.
- Границы систем по отношению к представлениям определяются целевой системой в узком смысле, связанной с ней целевой системой в широком смысле, их окружением в узком смысле и окружением в широком смысле.
- Сложность может быть уменьшена посредством определения существенных факторов (концепций и принципов).
- Сложность определяется уполномоченной организацией при описании сложного поведения.
- Сложность возрастает при дезорганизации систем, результатом чего является беспорядочное поведение.
- Люди воспринимают сложность по-разному и, кроме того, люди в принципе могут быть частью системы, что приводит к увеличению сложности.
- Ситуационные системы возникают в ответ на проблемы или возможности или в результате определения целей в форме конечных состояний.
- Реагирующие системы разрабатываются и используются для обращения с ситуационными системами.
- Системные активы постоянного применения вводятся в строй и используются в реагирующих системах.
- Один из элементов реагирующей системы должен осуществлять управление.

Рассмотрим ЭГС с точки зрения **системного анализа**. Для того, чтобы рассматривать ЭГС как систему, необходимо убедиться, что она обладает признаками системы, или *признаками системного объекта* (Щедровицкий, 1964; Садовский, 1974; Урманцев, 2014; Лоусон, 2014).

Таких признаков несколько:

1) наличие границ объекта, рассматриваемого как система;
2) наличие компонентов у системы (или подсистем);
3) существование структуры у системы и закона композиции её описывающего;

4) наличие эмерджентных свойств.

Что касается границы у ЭГС, то её выделение не так-то просто. Одни предлагают границы ЭГС выделять по границам литотопа, эдафотопа, границам распространения популяций организмов или границам иных подсистем. Чаще всего границы ЭГС совпадают с границами растительности или фитоценозов. Но как правило границы разных подсистем в ЭГС не совпадают друг с другом. Поэтому часто граница ЭГС выделяется условно, но это не мешает системному анализу. Главное – чтобы граница была так или иначе определена.

Изучаемые ЭГС имеют подсистемы, состоящие из различных компонентов (см. рис.1.6). Так что это признак безусловно, соблюдается.

Все ЭГС обладают структурой, которая, в зависимости от вида ЭГС, может быть как очень простой, так и весьма сложной. Структура ЭГС характеризуется как набором и взаимоотношением составляющих ее подсистем (литотопа, эдафотопа, микробоценоза и т.п.), так и законом их композиции, описывающим то, как построена эта система. Выявление закона композиции структуры ЭГС также не простая задача.

Наконец, последний необходимый признак системы – наличие у нее эмерджентности, у рассматриваемых ЭГС также присутствует. Более того, особенности любого биогеоценоза в целом и есть проявление его эмерджентных свойств. К ним можно отнести его гомеостаз, устойчивость, самовоспроизводство, саморегуляцию и др. признаки, которые, в том числе, обеспечиваются его массо- и энергообменом с окружающей средой, а также круговыми процессами.

Как отмечал Ю.Одум (1986, т.1, с.15) «Важное следствие иерархической организации состоит в том, что по мере объединения компонентов, или подмножеств, в более крупные функциональные единицы, у этих новых единиц возникают новые свойства, отсутствовавшие па предыдущем уровне. Такие качественно новые, эмерджентные свойства экологического уровня или экологической единицы нельзя предсказать, исходя из свойств компонентов, составляющих этот уровень или единицу». Каждый уровень биосистемы характеризуется собственными, присущими только ему свойствами, а кроме того, обладает суммой свойств входящих в него подсистем-компонентов. Хорошо известный принцип несводимости свойств целого к сумме свойств его частей – эмерджентность, должен служить первой рабочей заповедью экологов (Одум, 1986).

Таким образом мы выяснили, что все необходимые признаки системы у ЭГС присутствуют. Следовательно, они могут рассматриваться как объекты геокибернетики или объекты управления.

1.3.2. Характеристика моделей ЭГС. Как охарактеризовать модель конкретной ЭГС?

Для этого необходимо иметь ввиду, что, любая система (ПТС, ЛТС, ЭГС) задается перечислением (конкретизацией) ее состава, структуры и выполняемых ею функций. Такую модель наглядно удобно представлять в виде блоковой схемы (рис. 1.8).

Моделирование обычно начинают с построения схемы, или графической модели, часто представляющей собой блок-схему (рис. 4) На рис.1.8 буквами P_1 и P_2 обозначены два свойства, которые при взаимодействии (L) дают некое третье свойство P_3 (или влияют на него), когда система получает энергию от источника E. Обозначены также 5 направлений потоков вещества и энергии (F_i), из которых F_1 - вход, а F_6 - выход для системы как целого.

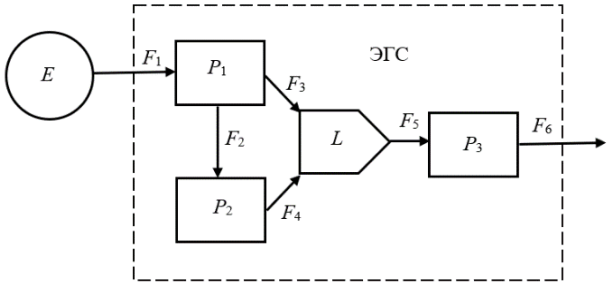


Рис.1.8. Блоковая схема, на которой показаны четыре основных компонента, которые должны учитываться при моделировании экологических систем: E - движущая сила; *P* - свойства; *F* потоки; *L* – взаимодействие (по Ю.Одуму, 1986)

Таким образом, в работающей модели экологической ситуации имеется как минимум четыре ингредиента или компонента, а именно: 1) источник энергии или другая внешняя движущая сила; 2) свойства, которые системоаналитикп называют переменными состояний; 3) направления потоков, связывающих свойства между собой и с действующими силами через потоки энергии и вещества; и 4) взаимодействия или функции взаимодействий там, где взаимодействуют между собой силы и свойства изменяя, усиливая или контролируя перемещения веществ и энергии или создавая эмерджентные свойства (Одум, 1986).

Для обоснования управления эколого-геологической системой необходимо её представить в виде некоторой ***модели ЭГС***. Типы таких моделей могут быть разными (рис. 1.9).

Так, например, модель типа «черного ящика» (рис. 1.8,а) применяется, когда не известны данные о составе и структуре ЭГС, но известны «входы» - внешние воздействия на неё (x_i) и «выходы» - её отклик (y_i) на эти воздействия. Это так называемый холистический подход к изучению и пониманию ЭГС (Садовский, 1974; Одум, 1986). При этом поведение ЭГС при рассматриваемых воздействиях может быть описано функцией $y_i = f(x_i)$, где i =1, 2, 3…n – виды воздействий. После этого исследуют энергетические и прочие входы и выходы (см. рис. 1.9а) и оценивают основные функциональные процессы внутри системы. Следуя принципу бережливости (экономии усилий), изучают затем операционально значимые популяции, компоненты и факторы ЭГС, которые определены посредством наблюдений, моделирования и возмущений самой ЭГС. При таком подходе детали популяционных компонентов внутри «ящика» анализируют только постольку, поскольку это необходимо для понимания или управления экосистемой как целым.

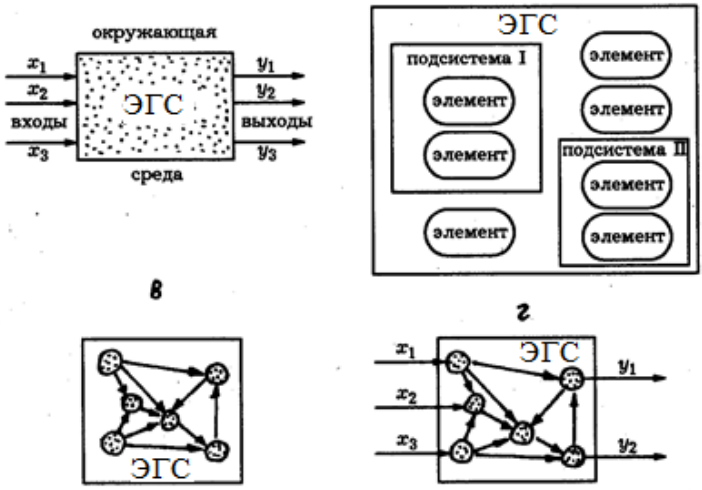


Рис. 1.9. Типы моделей ЭГС: *а* – модель типа «черного ящика»; *б* – модель состава; *в* – модель структуры; *г* – общая модель ЭГС; x_i – внешние воздействия на ЭГС; y_i – отклик ЭГС на воздействия

Входы и выходы могут быть либо информационными, либо вещественно-энергетическими, либо смешанными. В соответствии с этим можно говорить об *информационных, вещественно-энергетических* или *смешанных* моделях ЭГС. Наличие входов и

выходов в рассматриваемых ЭГС говорит о том, что данные системы рассматриваются с точки зрения термодинамики как *открытые*, что согласуется с реальными ЭГС.

Если известен компонентный состав ЭГС, то может быть построена *модель её состава* (рис. 1.9,б), которая отражает подсистемы данной ЭГС (литотоп, эдафотоп и т.д.) и их компонентный состав.

Если известна структура ЭГС, то может быть составлена *модель структуры* этой системы (рис. 1.9,в), на которой отражаются внутренние взаимосвязи между структурными компонентами данной ЭГС. Условные знаки для взаимосвязей могут отражать их значимость, интенсивность и т.п. Для этой цели может быть использована теория графов. Графы – математическое выражение структуры любого объекта, включая и структуру ЭГС, и являются универсальным средством описания структуры систем. При небольшом числе элементов и связей весьма наглядны диаграммы графов, т.е. их геометрические образы. В зависимости от элементов множеств рассматриваются различные типы графов. Графы, приведенные на рис. 5в, отражают типовые структуры причинно-следственных отношений основных элементов систем управления и, по существу, представляют собой ориентированные графы. Заметим, что даже без конкретизации вершин и дуг, т.е. только по топологии, можно сделать ряд важнейших выводов о свойствах системы, которые сохраняются при дальнейшем раскрытии неопределенности—уточнении структур операторов и конкретизации значений параметров.

В зависимости от подхода к моделированию, от конкретного содержания элементов исходного множества и элементов отношения модели ЭГС с раскрытой структурой могут быть представлены структурными схемами, сигнальными графами, системами дифференциальных уравнений в причинно-следственной форме и некоторыми другими формами.

Наилучшая структурная модель должна отражать также внутреннюю композицию системы и закон этой композиции.

Наконец, соединением модели состава и структуры можно построить *общую модель* ЭГС, отражающую и её состав, и строение, и функционирование (рис.1.9г). Эта модель, по сути, является моделью «белого» ящика, а её поведение также может быть описано функцией вида $y_i = f(x_i)$.

Эколого-геологические системы не статичны во времени: они развиваются и эволюционируют. Системы, в которых происходят какие-либо изменения во времени называются динамическими, а модели их отражающие - *динамическими моделями систем*. Реальные

природно-технические системы, включая и ЭГС, реальные объекты геологической среды представляют собой динамические системы, изменяющиеся во времени. Такие системы являются основным предметом моделирования в системе мониторинга, поскольку позволяют решать прогнозно-временные задачи и задачи по управлению системами (Королев, 2007, 2015). Развитие разработки динамических моделей ЭГС происходит примерно в той же последовательности, как это излагалось выше: от «черного ящика» к «белому».

Уже на этапе «черного ящика» различают два типа динамики системы: ее *функционирование* и *развитие*.

Под *функционированием ЭГС* понимают те процессы, которые происходят в ЭГС (и окружающей ее среде), стабильно реализующей фиксированную цель.

Развитием же *ЭГС* называют то, что происходит с этой системой при изменении её целей. Развитие ПТС и ЭГС осуществляется человеком при модернизации производства, смене технологий на более совершенные и т. п. Характерной чертой развития является тот факт, что существующая структура перестает соответствовать новой цели, и для обеспечения новой функции приходится изменять структуру, а иногда и состав системы, перестраивать всю систему. В ЭГС одна подсистема может функционировать, а другая - развиваться, возможны и различные сложные комбинации.

Типы динамических моделей ЭГС такие же, как и статических, только элементы этих моделей имеют временной характер. Таким образом, динамическим аналогом модели «черного ящика» будет задание на входе какого-либо начального состояния системы (при данном уровне и виде техногенного воздействия, а на выходе - получение конечного (желаемого) состояния системы (ее отклика, измененности) через то или иное время (рис. 1.10).

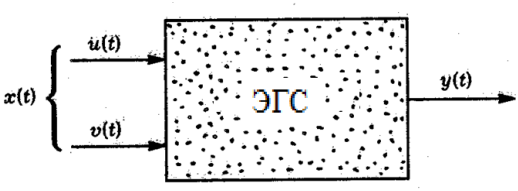


Рис. 1.10. Динамическая модель ЭГС типа «черного ящика»

Для динамической модели состава определяющим будет перечень действий, необходимых для перевода начального состояния состава системы в конечное. Для динамической модели структуры - последовательность действий и продолжительность каждого действия между связями и отношениями.

Поведение динамической модели ЭГС может быть описано функцией вида $y_i = f(x_i, t)$, где t - время.

При математическом моделировании некоторого процесса его конкретная реализация описывается в виде соответствия между элементами множества X возможных «значений» x и элементов упорядоченного множества T «моментов времени» t, т. е. в виде отображения:

$$T \rightarrow X : x(t) \in X^t, \qquad t \in T. \tag{1.6}$$

Рассматривая выход $y(t)$ системы (это может быть вектор) как ее реакцию на управляемые $u(t)$ и неуправляемые $v(t)$ входы

$$x(t) = \{u(t), v(t)\}, \tag{1.7}$$

можно динамическую модель «черного ящика» (рис. 4) выразить как совокупности двух процессов:

$$X^t = \{x(t)\} \quad \text{и} \quad Y^t = \{y(t)\}, \quad t \in T. \tag{1.8}$$

Все указанные выше типы моделей ЭГС являются ***формальными***, относящимися к любым системам геологической среды, и, следовательно, не относящимися ни к одной конкретной системе (Садовский, 1974). Чтобы получить модель заданной системы, нужно придать формальной модели конкретное содержание, т. е. решить какие аспекты реальной системы включить в элементы модели избранного типа, а какие - нет, считая их несущественными. Этот процесс обычно не формализуем, поскольку признаки существенности или несущественности в очень редких случаях удается формализовать.

Рассмотренные модели ЭГС могут различаться количеством анализируемых видов воздействий (входов) и откликов на них (выходов): $i = 1, 2, 3 \ldots n$ – виды воздействий. При этом могут существовать различные варианты этих соотношений, показанные на рис.1.11. Наиболее сложны многомерно-многомерные модели ЭГС (рис.1.11,г).

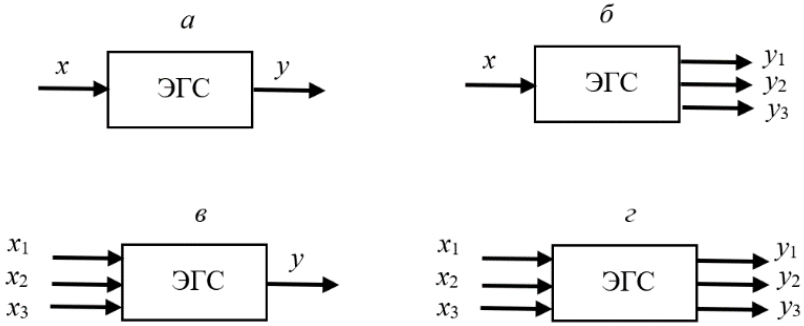


Рис.1.11. Структурные схемы различных моделей ЭГС типа «черного ящика»: а – одномерно-одномерные, $y=f(x)$; б – одномерно-многомерные, $y_i=f(x)$; в – многомерно-одномерные, $y=f(x_1, x_2, x_3)$; г - многомерно-многомерные, $y_i=f(x_i)$

1.3.3. Построение структурированных моделей ЭГС. Изображение системы управления в виде совокупности динамических звеньев с указаний связей между ними носит название структурной схемы. Основными элементами структурных схем являются (рис.1.12): детектирующее звено; линия (информационной) связи; узел (разветвление) и сумматор.

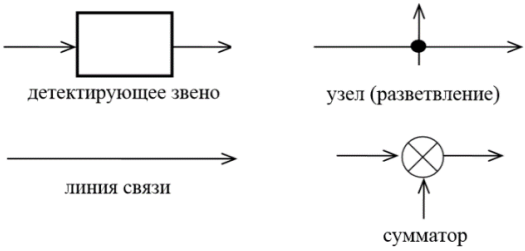


Рис. 1.12. Элементы структурных схем

Любая структурная схема может быть изображена с помощью трех типов соединения звеньев: последовательного соединения; параллельного соединения; соединения с обратной связью.

Рассмотрим далее, согласно Д.В.Артамонову и А.Д.Семёнову (2003), структурные схемы таких соединений и найдем соотношения между передаточной функцией $W(p)$ полученной системы и передаточными функциями отдельных звеньев $X(p)$ и $Y(p)$, из которых эта система состоит. Принимается, что все звенья являются

детектирующими. Передаточная функция системы находится из отношения:

$$W(p) = Y(p)/X(p). \qquad (1.9)$$

1. *Последовательное соединение* (рис.1.13). При таком соединении выход предыдущего звена включается на вход последующего.

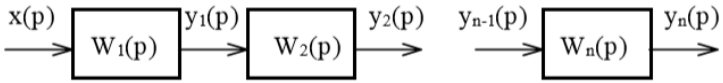


Рис.1.13. Структурная схема последовательного соединения звеньев

Уравнения отдельных звеньев в символической форме будут выглядеть так:

$$\begin{gathered} Y_1(p) = W_1(p)X(p); \\ Y_2(p) = W_2(p)Y_1(p); \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ Y(p) = W_n(p)Y_{n-1}(p); \end{gathered} \qquad (1.10)$$

Последовательно исключая в уравнении (4.36) промежуточные переменные, получим:

$$Y(p) = W_1(p)\, W_2(p) \ldots .\, W_n(p)X(p); \qquad (1.11)$$

Откуда следует, что передаточная функция последовательного соединения звеньев равна произведению передаточных функций отдельных звеньев, входящих в соединение.

$$W_{\text{пос}}(P) = \prod_{i=1}^{n} W_i(P) \qquad (1.12)$$

где П – знак произведения.

2. *Параллельное соединение* (рис.1.14). При таком соединении входные сигналы всех звеньев одинаковы и равны общему входному сигналу, а выходной сигнал соединения равен алгебраической сумме выходных сигналов.

3.

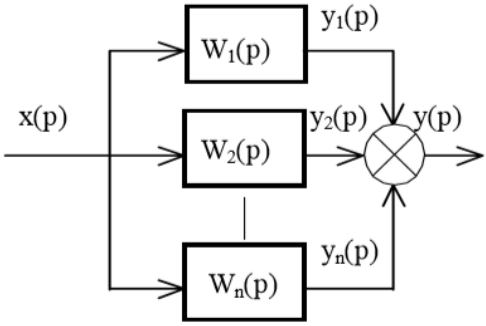


Рис.1.14. Структурная схема параллельного соединения звеньев

Аналогично, как и в случае последовательного соединения, запишем уравнения для выходных сигналов звеньев:

$$\begin{gathered} Y_1(p) = W_1(p)X(p); \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ Y(p) = W_n(p)X(p); \\ Y(p) = Y_1(p) + Y_2(p) + \ldots + Y_n(p); \end{gathered} \qquad (1.13)$$

Подставляя выражения для $Y_i(P)$ в последнее уравнение, получим:

$$Y(p) = [W_1(p) + W_2(p) + \ldots + W_n(p)]X(p). \qquad (1.14)$$

Откуда следует, что передаточная функция параллельного соединения звеньев равна сумме передаточных функций отдельных звеньев:

$$W_{\text{пар}}(P) = \sum_{i=1}^{n} W_i(P). \qquad (1.15)$$

4. *Соединение звеньев с обратной связью* (рис.1.15). Здесь знак плюс соответствует положительной обратной связи, знак минус - отрицательной.

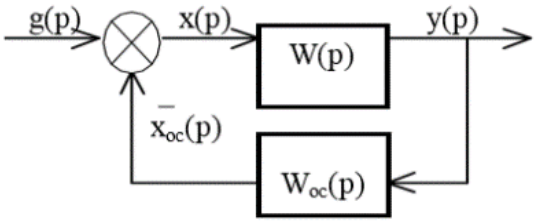


Рис.1.15. Структурная схема соединения звеньев с обратной связью

Для такого соединения звеньев справедливы следующие соотношения между переменными:

$$\begin{aligned} X(p) &= g(p) \pm X_{oc}(p); \\ Y(p) &= W(p)X(p); \\ X_{oc}(p) &= W_0(p)Y(p). \end{aligned} \qquad (1.16)$$

Разрешая эту систему уравнений относительно $X(p)$ и $Y(p)$, получим:

$$Y(p)[1 \pm W(p)W_0(p)] = W(p)X(p). \qquad (1.17)$$

Знак минус относится к положительной обратной связи, знак плюс - к отрицательной. Откуда выражение передаточной функции для соединения с обратной связью будет выглядеть так:

$$W_3(p) = \frac{W(p)}{1 \pm W(p)W_{oc}(p).} \qquad (1.18)$$

Следует обратить внимание на то, что, имея структурную схему, можно однозначно с использованием правил преобразования структурных схем, получить выражение для передаточной функции и дифференциального уравнения системы. Обратное утверждение будет неверным, т.е. одной и той же передаточной функцией системы может соответствовать несколько структурных схем (Артамонов, Семёнов, 2003).

Рассмотрим далее, согласно В.Б.Яковлеву и др. (Теория автоматического …, 2003), математические модели, описывающие

взаимодействия ЭГС с внешними факторами и факторами окружающей среды.

Структурная схема ЭГС представляет собой причинно-следственную связь звеньев. Линейное звено (рис. 1.16,а) в общем случае имеет любое число входов; оно преобразует сумму входов в единственную переменную выхода по некоторому оператору w_i (рис. 1.16,б).

$$x_i = w_i\left(\sum_j x_j\right) = \sum_j w_i\left(x_j\right). \tag{1.19}$$

В частном случае оператора тождественного преобразования звено выступает как сумматор.

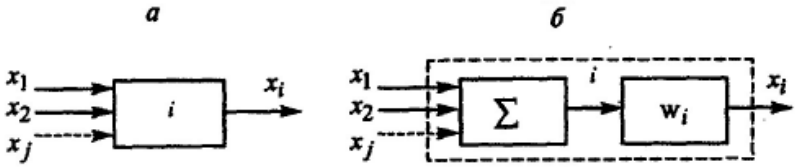


Рис.1.16. Линейное звено структуры ЭГС

Структурная схема является ориентированным графом и состоит из множества вершин W= {w_j.... w_N} и множества дуг X= {(w_i, w_j)} — упорядоченных пар вершин. Дугам графа соответствуют переменные x_i; i = 1,…,N, а вершинам — звенья. Для того чтобы отличать рассматриваемый граф от сигнальных графов других типов, его называют *С*-графом.

На языке теории бинарных отношений С-граф определяется как пара множеств

$$C = <W,X>, \tag{1.20}$$

а структурная схема — геометрический образ — называется также диаграммой графа (рис. 1.17). Вершина *С*-графа — звено общего вида, по определению суммирует переменные заходящих дуг. Это позволяет отбиваться от специального элемента суммирования, что отличает *С*-графы от классических структурных схем (Теория автоматического .., 2003).

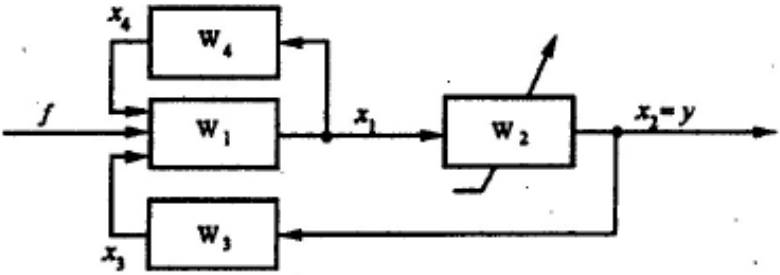


Рис. 1.17. Структурная схема (С-граф)

В рассмотренных схемах строения ЭГС не проводилось разделение входов на разные типы. Между тем такое деление весьма важно, т.к. оно определяет требования, которые ЭГС должна выполнять.

Поэтому в ЭГС будем различать два типа входных сигналов — возмущающие и задающие. *Задающие сигналы* определяют некоторые требования, которые ЭГС должна выполнить. Остальные входные сигналы, в том числе определяющие условия, в которых функционирует система, относятся к возмущающим. На рис. 1.18 задающие входные сигналы обозначены через $x_1, x_2, \ldots x_n$, возмущающие — через $f_1, f_2, \ldots f_n$. Символами $y_1, y_2, \ldots y_n$ обозначены выходные переменные. Стрелки обозначают направление передачи сигналов: простые стрелки – индивидуальные сигналы; толстые стрелки – комплекс сигналов.

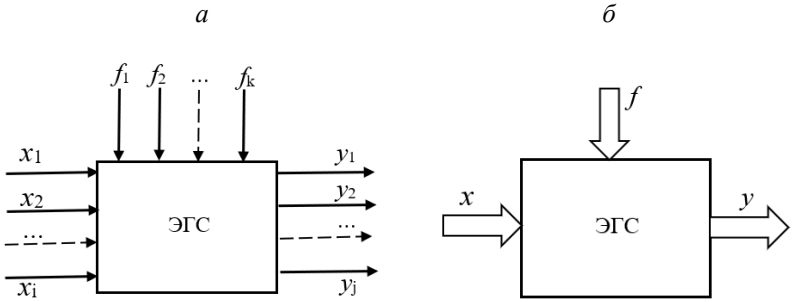


Рис.1.18. Входные и выходные сигналы в ЭГС

1.3.4. Иерархия ЭГС. Эколого-геологические системы (как и экосистемы в целом) представляют собой иерархические структуры. Иерархия природных объектов Земли – её неотъемлемое свойство.

Иерархия систем, как фундаментальная топология, обеспечивает их целостность.

Практически иерархия выявляется путем анализа (деления целого на части) и синтеза (составление целого из частей) с использованием дедуктивного и индуктивного способов мышления.

Как отмечал Ю.Одум (1986, т.1, с.15) «Иерархический подход дает удобную основу для подразделения и изучения сложных ситуаций или широких градиентов. Как указывал Новиков (Novikoff, 1945), эволюция Вселенной характеризуется и непрерывностью, и дискретностью. Развитие можно рассматривать как процесс непрерывный, поскольку оно состоит в нескончаемом изменении, по вместе с тем этот процесс дискретен, поскольку развитие проходит через ряд отдельных уровней организации…. Организованность жизни поддерживается постоянным, но ступенчатым потоком энергии. Таким образом, деление ступенчатого ряда, или иерархии, на компоненты во многих случаях искусственно, но иногда такое деление может быть основано па естественных разрывах. Так как каждый уровень в спектре биосистемы «интегрирован», т. е. взаимосвязан с другими уровнями, здесь нельзя найти резких границ или разрывов в функциональном смысле. Их нет даже между организмом и популяцией. Например, организм, изолированный от популяции, не в состоянии жить долго, точно так же, как изолированный орган не может длительное время сохраняться как самоподдерживающаяся единица без своего организма. Подобным же образом сообщество не может существовать, если в нем не происходит круговорот веществ и в него не поступает энергия. Тот же аргумент можно привлечь для опровержения уже упоминавшегося неверного представления о том, будто бы человеческая цивилизация может существовать независимо от мира природы».

В то же время наряду с концепцией иерархичности систем (развиваемой в работах М.Месаровича, Д.Мако, И.Такахары, Ю.Одума, Г.Пэтти и др.) высказывается иная точка зрения об иерархичности. Так, например, Ю.А.Урманцев (2014) считает, что литосфера хотя и состоит из сходных иерархических рядов естественных геологических тел вида «минерал $\subset$ порода $\subset$ геоформация $\subset$ геокомплекс $\subset$ ... литосфера» (где $\subset$ - знак включения), тем не менее, не является иерархической системой, потому что в литосфере реализованы не только отношения иерархичности по ходу каждого ее ряда, но и отношения неиерархичности (механических, физико-химических пространственно-временных и др.) – между любыми телами различных иерархических рядов. Причем, как он считает, таких неиерархических отношений намного порядков больше, чем иерархических. Поэтому по

представлению Ю.А.Урманцева (2014), литосфера – это *неиерархически организованная система иерархических подсистем*, что и делает ее целостным, единым объектом-системой. Это утверждение по мнению автора справедливо и по отношению к биосфере, ноосфере и др. аналогичным системам.

Существуют различные подходы к выделению иерархических категорий (или уровней организации) ЭГС. Одни из них основываются на поиске закона иерархичности ЭГС разного уровня и масштаба исследования, другие строят систему иерархии на основе каких-либо формальных критериев.

Первый из этих двух подходов предпочтительнее, однако выявление закона иерархии сложно построенных ЭГС – не простая задача. Она однозначно не решена и для компонентов ЭГС: литотопов, эдафотопов, фитоценозов и т.д., которые тоже представляют собой иерархические системы.

На основе современных исследований систематики экосистем (Одум, 1986; Экоситемы.., 1995) можно построить и иерархическую систематику ЭГС.

Сначала рассмотрим природные ЭГС. Так, к низшему уровню *элементарных ЭГС*, или моноэкогеосистем, можно отнести те, которые наблюдаются и выделяются в природе без применения каких-либо специальных приборов, т.е. при наземных исследованиях визуально. Этот уровень ЭГС примерно соответствует биогеоценозу в понимании В.Н. Сукачева. Экосистемы в таком же объеме отнесены Ю.Г.Евстифеевым и др. (1986) к I уровню; изучение их обычно осуществляется при стационарных или маршрутных исследованиях. Б.В. Виноградов (1984) относит структуру таких экосистем к *элементарному* уровню.

Практически выделение таких природных ЭГС можно проводить по признакам единства почвы и растительного сообщества (эдафотопа и фитоценоза), сформировавшегося на элементарном (или монопородном) массиве (грунтовой толще) в пределах элементарной формы рельефа, где сохраняются одни и те же основные экологические условия жизнедеятельности биоты (условия водного и минерального питания). Однако даже в пределах элементарных форм рельефа в ряде случаев могут наблюдаться изменения некоторых экологических условий, чаще всего условий увлажнения и засоления почв. В таких случаях можно говорить о *сложных моноэкогеосистемах*, в отличие от *простых*, растительность которых представлена одним фитоценозом.

Пространственное распределение мезоформ рельефа, различающихся не только по характеру увлажнения, но и по ряду

других экологических условий местообитания биоты (состав поверхностных отложений, освещенность, величина инсоляции и пр.), а также по виду и динамике экзогенных процессов, приводит к различным сочетаниям простых и сложных моноэкогеосистем (Экосистемы…, 1995).

Эти сочетания ЭГС, или *мезоэкогеосистемы*, отнесены Ю.Г. Евстифеевым с соавторами (1986) ко II уровню, что соответствует, по Б.В. Виноградову (1984), *локальному* уровню организации экосистем.

В горных сооружениях со значительными изменениями климатических параметров в зависимости от абсолютной высоты выявляется высотная поясность распределения мезоэкогеосистем. На равнинах, занимающих значительные по широте, т.е. с севера на юг, пространства, мезоэкогеосистемы подчиняются широтной зональности. Эти закономерности распределения экосистем учитываются при разработках типологической классификации мезоэкосистем (Экосистемы…, 1995).

Изучение ЭГС II уровня возможно путем непосредственного контактного исследования, но целесообразно использовать также и дистанционные методы (аэрокосмическая информация, аэровизуальные наблюдения), которые дают возможность сразу рассмотреть всю мезоэкогеосистему. Этот уровень ЭГС находит отражение преимущественно на среднемасштабных картах, при эколого-географических и эколого-геологических исследованиях крупных регионов, в то время как моноэкогеосистемы служат основным объектом детальных биологических исследований и находят отражение только на крупномасштабных картах.

Более сложные сочетания экогеосистем, которые формируются в условиях макрорельефа, например в горах, где абсолютная высота, расположение хребтов, крутизна и расчлененность их склонов и пр. предопределяют комплекс экологических условий существования биоты, можно рассматривать как более высокий ранг экосистемной организации, характерный для крупных регионов. Это *макроэкогеосистемы*, представляющие собой определенные сочетания мезоэкосистем в пределах крупных форм рельефа (III уровень или региональный).

Охарактеризовать этот уровень экосистем можно лишь путем обобщения конкретных наблюдений с широким использованием материалов дистанционных исследований в первую очередь космических фотоснимков. Дальнейшее изучение характера распределения и сочетаний макроэкогеосистем дает основание для осуществления ландшафтно-экологического, или экосистемного, районирования (Экосистемы…, 1995).

Исходя из вышеизложенного нами предлагается следующая иерархия природных ЭГС (табл.1.2).

Таблица 1.2

Иерархические уровни организации эколого-геологических систем

Уровень иерархии	Иерархические типы ЭГС	Критерии выделения ЭГС				
		Геологическое строение (литотоп)	Эдафотоп	Рельеф	Фитоценоз	Зооценоз
I. Элементарный	МоноЭГС	Массив I-го порядка (однородная грунтовая толща)	Элементарный эдафотоп (почва одного подтипа, сочетание родов, видов и разновидностей почв)	Элементарная форма рельефа	Однородный фитоценоз (монофитоценоз, растительная ассоциация)	Однородный зооценоз
II. Локальный	МезоЭГС	Массив II-го порядка (сложные грунтовые толщи)	Локальный эдафопот (почва одного типа)	Гетерогенные мезоформы рельефа	Сочетания фитоценозов (мезофитоценоз – группы ассоциаций)	Сочетания зооценозов
III. Региональный	МакроЭГС	Массив III-го порядка	Региональный эдафотоп (сочетание типов почв)	Макроформы рельефа, сочетания мезоформ	Комплексы фитоценозов (макрофитоценоз - формации)	Комплексы зооценозов, биофилотические области
IV. Надрегиональный	Надрегиональные ЭГС	Геологические формации	Надрегиональный эдафотоп (сочетание отделов и стволов почв)	Рельеф континентов и океанов	Группы, классы и тип растительной формации	Биофилотические царства
V. Глобальный	Биосфера	Литосфера Земли	Глобальный почвенный покров	Глобальный рельеф Земли	Глобальный фитоценоз	Глобальный зооценоз

В этой классификации учтена иерархия всех компонентов ЭГС, как абиотических, так и биотических. При этом важно подчеркнуть, что подобная классификация может служить основой для картографирования ЭГС разного масштаба. При этом отметим, что в представленной классификации пока не учтены микробоценозы и социум как составляющие ЭГС ввиду слабой разработанности этих компонентов.

Необходимо также подчеркнуть, что для макро-ЭГС, а также ЭГС надрегионального уровня должны учитываться и климатические условия их существования. Именно в системах этих уровней будет проявляться климатическая зональность, как широтная, так и высотная.

Важно отметить, что сложность изучения и описания природных ЭГС в значительной мере усугубляется различием при антропогенном воздействии на них, в результате которого формируются иные – техногенно измененные или техногенно-созданные ЭГС: техно-природные ЭГС, природно-техногенные и антропогенные.

В связи с этим, как правило, в описании ЭГС приводят характеристики экогеосистем не только природных, но и антропогенно измененных или антропогенно созданных. Ведущим признаком выделения антропогенных модификаций экогеосистем выступает также растительный покров, с одной стороны, как наиболее визуально легко изучаемый, а, с другой, как наиболее чутко и быстро реагирующий на любые техногенные воздействия, что является главным при оценке степени измененности исходной природной экосистемы (Экосистемы…, 1995).

Изучение и оценка состояния ЭГС разных уровней, находящихся в крайне неблагоприятных условиях природной среды, которые формируются в результате сочетания как природных, так и антропогенных факторов, представляет в настоящее время наибольший интерес с точки зрения геокибернетики и наибольшую сложность при анализе.

Иерархия различных ЭГС зависит (а возможно и определяется) от параметров внешней среды, что можно проиллюстрировать графически на рис. 1.19.

Здесь показано фазовое пространство существования ЭГС разных иерархических уровней, характеризуемое двумя независимыми переменными окружающей среды x_1 и x_2. ЭГС низшего иерархического ранга ($ЭГС_1$, например, элементарные или моно-ЭГС) характеризуются наименьшей областью существования в рассматриваемом фазовом пространстве (заштрихованная часть).

С ростом иерархии ЭГС их область существования увеличивается и ЭГС более высокого иерархического уровня организации (например, мезо- и макро-ЭГС) занимают в фазовой области наибольшее пространство.

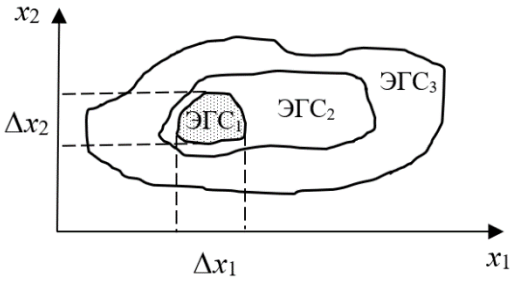


Рис. 1.19. Иерархия ЭГС в фазовом пространстве параметров окружающей среды

Из этой схемы следует и другое важное свойство иерархических ЭГС: при изменении внешних условий окружающей среды в первую очередь могут исчезать и разрушаться ЭГС низшего иерархического уровня – моно-ЭГС, характеризующиеся меньшей областью существования ((Δx_1, Δx_2). Следовательно, с ростом сложности и иерархии ЭГС возрастает и их устойчивость, и область существования.

Согласно Н.Ф.Реймерсу (1994), чем выше иерархический уровень нарушаемой природной системы, тем это нарушение пагубнее для человечества. Поэтому учет иерархичности ЭГС является необходимым элементом при разработке комплексов управления ЭГС разного уровня.

1.3.5. Систематика ЭГС. Вопрос о систематике ЭГС во многом до сих пор остается открытым, несмотря на имеющиеся работы по этой проблеме. Сложность разработки их систематики во многом обусловливается сложностью этих систем.

Рассмотрим подходы к систематике ЭГС, которые базируются на различных критериях.

Выше мы рассмотрели систематику *природных* ЭГС, построенную на основе учета их *иерархии*. Очевидно, аналогичным образом может быть построена иерархическая классификация и искусственных ЭГС.

Согласно Н.Ф.Реймерсу (1994) биосфера в настоящее время состоит из экосистем трёх типов: а) *естественно-природных* самовосстанавливающихся образований или систем, поддерживающих экологический баланс (гомеостаз) на планете и в её регионах и обеспечивающих существование человечества как генетически обусловленного социально-биологического существа; б) *природно-антропогенных* образований или систем типа сельскохозяйственных полей, других культурных ландшафтов, не обладающих свойством длительного самоподдержания (квазиприродных систем); в) чисто

антропогенных конструкций или систем населенных мест и промышленно-хозяйственных объектов (артеприродной среды), не обладающих устойчивостью и быстро разрушающихся без поддержки человека.

В соответствии с этим и с учетом соотношения природного и антропогенного факторов формирования ЭГС можно говорить о подразделении ЭГС по крайней мере на четыре типа: 1) *природные* ЭГС; 2) *техно-природные* ЭГС; 3) *природно-техногенные* и 4) *техногенные* (антропогенные) ЭГС. Первые формируются под действием только природных факторов независимо от человека. Пока это самые распространенные ЭГС на Земле. Вторые и третьи[1] представляют собой изначально природные системы, которые затем были видоизменены под влиянием техногенеза, т.е. это техногенно преобразованные ЭГС. К техно-природным относятся ЭГС, в составе которых техногенные компоненты занимают менее половины, а к природно-техногенным – ЭГС, в которых техногенные компоненты преобладают над природными. К таким системам относятся ЭГС, формирующиеся на техногенно освоенных и техногенно нарушенных территориях. Их количество постоянно увеличивается на Земле.

Четвертый тип ЭГС представляет собой искусственные системы, которые полностью были созданы человеком. К таковым относятся антропогенные ЭГС на территориях, занятых сельским хозяйством (сельскохозяйственные поля, тепличные комплексы, садоводческие комплексы и т.п.), а также рекреационные зоны на урбанизированных территориях, созданные в результате ландшафтного дизайна (искусственные газоны, скверы, парки и т.п.).

В системном анализе часто системы, созданные или преобразованные человеком, называют *физическими системами* (Лоусон, 2008), противопоставляя их природным системам. Таким образом, рассмотренные выше ЭГС, сформированные под влиянием антропогенных факторов, - относятся к физическим (реальным) системам.

Наряду с этим в системном анализе выделяют и *абстрактные системы* – не содержащие физических элементов, а представляют собой некоторую идеализацию, как продукт деятельности человеческого сознания. К ним можно отнести абстрактные или *идеальные ЭГС*.

[1] Отметим, что названия «техно-природные» и «природно-техногенные» строятся по правилам русского языка: на первом месте стоит второстепенный признак, на втором – главный.

Дальнейшее подразделение ЭГС по происхождению или факторам формирования может осуществляться по иерархическим уровням в соответствии с классификацией, показанной в табл.1.3.

Таблица 1.3

Классификация ЭГС по факторам формирования (составил В.А.Королёв)

Эколого-геологические системы													
Природные					Техно-природные			Природно-техногенные			Техногенные (антропогенные или искусственные)		
1	2	3	4	5	1	2	3	1	2	3	1	2	3

Примечание: 1 – моно-ЭГС; 2 – мезо-ЭГС; 3 – макро-ЭГС; 4 – надрегиональные ЭГС; 5 - биосфера

Следует добавить, что управляемыми природные ЭГС в строгом смысле быть не могут, поскольку, как только в природной ЭГС появляется система управления (т.е. техническая система), такая система уже будет являться техно-природной или природно-техногенной.

Далее, по полноте компонентов, составляющих данную ЭГС, они могут подразделяться на 1) *полные* ЭГС; и 2) *неполные* ЭГС (рис. 1.20,а и 1.20,б, соответственно). В полных ЭГС имеются все составляющие их подсистемы: для природных ЭГС — это литотоп, эдафотоп, микробоценоз, фитоценоз и зооценоз; для не природных ЭГС – это те же компоненты с прибавкой социума и объектов техносферы. В не полных ЭГС один или несколько компонентов могут отсутствовать. При этом такое деление может проявляться на разных иерархических уровнях.

Например, природными неполными ЭГС являются однородные эколого-геологические системы пустынь или полупустынь (рис. 1.21), в которых могут отсутствовать почвы (эдафотопы) и фитоценозы, придающие им безжизненный вид. Неполные ЭГС широко распространены в горноскладчатых областях, на территориях, где отсутствует почвенный покров (эдафопот) и фитоценозы. Классический пример неполной ЭГС – пустыня Атакама в Чили, где отсутствие влаги привело к тому, что в некоторых её районах можно говорить лишь о наличии литотопа; все остальные компоненты ЭГС, такие как эдафотоп, микробоценоз, фитоценоз и зооценоз, здесь полностью отсутствуют. Поскольку в такой системе нет биоты, то её нельзя в строгом смысле

считать экосистемой или ЭГС. Большинство территории Антарктиды тоже видимо представляют собой неполные ЭГС.

а *б*

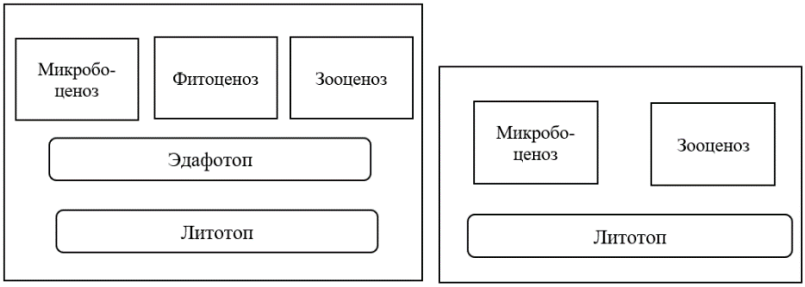


Рис.1.20. Примеры структур полной (*а*) и неполной (*б*) природной ЭГС

а *б*

Рис.1.21. Неполные природные ЭГС: *а* - пустыни (Сахара); *б* - «лунных гор» (Туркмения)

Также неполными являются многие искусственные ЭГС, например, тепличные ЭГС (парниковые), в которых может отсутствовать литотоп, заменяемый искусственным основанием (гидропоника), и зооценоз.

Наряду с этим, ЭГС могут подразделяться по видам компонентов в них участвующих, например, по типам почв, по типам пород литотопа – массива горных пород, на которых формируется система, их генезису и т.д. Классификация искусственных моно- и мезо-ЭГС антропогенных массивов, учитывающая генетические особенности (происхождение) техногенных массивов пород, показана в табл.1.4.

Таблица 1.4

Классификация искусственных ЭГС антропогенных массивов

(составил В.А.Королёв)

Тип массива	Подтип массива	ЭГС
Намывной	Песчаный Глинистый	Намывного массива
Насыпной	Крупнообломочный Песчаный Глинистый	Насыпного массива
Отвальный	Сухой и мокрый Выделяются по составу отвала	Отвала
Хвостохранилищный	Выделяются по составу «хвостов» (шлама)	Хвостохранилища
Полигон ТБО	Выделяется по возрасту	Свалочная
Сельскохозяйственный	Выделяется по агротехнике	Сельскохозяйственная
Рекреационный	Технозёмный	Ландшафтно-дизайнерская

По природным условиям формирования ЭГС они могут быть двух типов: 1) *сухопутные* ЭГС и 2) *водные* (или аквальные) ЭГС моно-, мезо- и макроуровня (см. табл.1.5).

Кроме того, моно- и мезо-ЭГС можно подразделять по типам их основных подсистем (компонентов). Так, например, по геологическим *особенностям литотопа* и поверхностным отложениям, слагающим верхнюю часть геологического массива *сухопутных* систем, на которой может формироваться эдафотоп, можно выделять следующие типы ЭГС: 1) ЭГС массивов скальных пород (а - магматических; б – метаморфических; в – осадочных сцементированных); 2) ЭГС массивов дисперсных пород (а – крупнообломочных; б – песчаных; в – лёссовых (пылеватых); г – глинистых; д – торфяных и т.п.); 3) ЭГС массивов мёрзлых пород (а -морозных; б – мерзлых и т.п.).

В качестве примера природных ЭГС на песчаных массивах в табл. 1.5 приводится их классификация (Трофимов, Королев, 2018).

Аналогично для *водных* (аквальных) моно- и мезо-систем можно выделить следующие типы ЭГС: 1) аквальные ЭГС массивов скальных пород (а - магматических; б – метаморфических; в – осадочных сцементированных: абиогенных и биогенных, включая строматолиты, биогермы, коралловые рифы и пр.); 2) аквальные ЭГС массивов дисперсных пород (а – крупнообломочных; б – песчаных; в – лёссовых (пылеватых); г – глинистых; д – торфяных и т.п.); 3) аквальные ЭГС массивов мёрзлых пород (в том числе, содержащие газогидраты и т.п.).

Таблица 1.5

Типы природных эколого-геологических систем песчаных

Тип ЭГСП	Тип литотопа песчаного	Гидротоп песчаный	Атмотоп песчаный	Эдафотоп песчаный	Преобладающий биоценоз песчаный
Сухопутный	Речных террас	а) подземных вод; б) зоны аэрации	Зональной тепло-влагообеспеченности	Развитый	Сухопутный псаммофитоценоз
	Морских террас			Развитый	То же
	Флювиогляциальных толщ			Развитый	То же
	Эоловых толщ пустынь и полупустынь		Низкоой влаго- и высокой тепло-обеспеченности	Отсутствует или слабо развитый	Сухопутный псаммозооценоз
	Кор выветривания		Зональной тепло-влагообеспеченности	Отсутствует или слабо развитый	Сухопутный псаммофитоценоз
	Прибрежных пляжей			Отсутствует	Сухопутный псаммомикробиоценоз
	Вулканогенно-осадочных толщ			Отсутствует или слабо развитый	Сухопутный псаммофитоценоз
Аквальный (подводный)	Донных аллювиальных толщ	Полного водонасыщения	Зональной тепло-обеспеченности	Отсутствует	Пресноводный псаммомикробиоценоз, псаммофито- и зооценозы
	Донных озерных толщ				Пресноводный псаммомикробиоценоз, псаммофито- и зооценозы
	Донных морских толщ				Морской подводный псаммомикробиоценоз, псаммофито- и зооценозы

Для водных мезо-ЭГС также важно учитывать проточность водоёма и его соленость. Поэтому среди них можно выделять: 1) транзитные мезо-ЭГС (рек и постоянных водотоков); 2) аккумулятивно-

транзитные мезо-ЭГС (проточных озёр); и 3) аккумулятивные (озёрные) мезо-ЭГС.

Классификация техно-природных ЭГС должна строиться с учетом вида инженерно-хозяйственного воздействия на литотоп, степени его преобразования, загрязнений и т.п., а также с учетом техногенного воздействия на другие компоненты ЭГС: рельеф, почвы, фито- и зооценозы.

Классификации ЭГС по преобладающим типам почв или по типам эдафотопа может быть построена с учетом различий и особенностей почв, формирующихся на вышерассмотренных литотопах.

Не менее важное подразделение ЭГС может быть построено на базе учета рельефа её территории. Например, в табл. 1.6 приведена систематика типов и подтипов рельефа, используемая при выделении экосистем на территории Монголии (Экосистемы…, 1995).

Наконец ЭГС могут выделяться на базе учета особенностей фитоценозов и зооценозов. При этом в экологии в целом, и в биоценологии в частности, считается (Второв, Дроздов, 2001), что систематику биоценозов целесообразнее строить на основе фитоценологии, поскольку именно растительность выступает наиболее удобным индикатором всего биотического сообщества рассматриваемой ЭГС.

Таблица 1.6

Типы н подтипы рельефа Монголии, учитываемые при выделении мезоэкосистем и их картографировании (Экосистемы…, 1995)

Тип	**Подтип**
Горы	
Высокогорья	Альпинотипные, сильно и глубоко расчлененные, крутосклонные; округловершинные, расчлененные, со склонами различной крутизны; поверхности выравнивания, холмисто-бугристые, слабо расчлененные
Среднегорья	Сильно расчлененные, крутосклонные; слабо- и среднерасчлененные, со склонами различной крутизны; поверхности выравнивания, холмистые, слабо расчлененные
Низкогорья	Сильно расчлененные, крутосклонные; слабо расчлененные, со склонами средней крутизны;
Мелкосопочник	Высокий, скалистый, со склонами различной крутизны; низкий, холмистый, расчлененный со скалистыми выходами
Внутригорные впадины	Холмисто-волнистые, слабо расчлененные

Плато	Холмисто-бугристые (на вулканических породах) с каменистыми выходами; плоско-волнистые, слабо или почти не расчлененные
Равнины	
Возвышенные (денудационные)	Плоские, местами расчлененные; холмистые, полого-холмистые, расчлененные
Наклонные (подгорные)	Возвышенные, сильно расчлененные, часто крутонаклонные; пологонаклонные, сглаженно слабо расчлененные; веерообразно расчлененные, различно наклонные (конусы выноса);
Песчаные массивы	Бугристые, бугристо-грядовые, барханные (с эоловой переработкой)
Пониженные (часто замкнутые)	Плоские, почти не расчлененные (древнеаллювиальные);плоские, по периферии полого-наклонные, замкнутые, иногда долинообразные (аллювиально-озерные); пониженные, плоские, почти не расчлененные (аллювиальные); плоские, полого-наклонные по периферии, замкнутые, иногда полипообразные, часто засоленные (тойримы); плоские, замкнутые (озерные), местами засоленные.
Долины	С постоянными водотоками, их поймы и низкие террасы; с сухими руслами, в том числе временно обводняемыми

Кроме того, ЭГС можно классифицировать с точки зрения их однородности или неоднородности параметров (независимых переменных), их характеризующих. Г.К.Бондарик (2012) на основе критерия однородности выделял два типа ПТС: однородные и неоднородные. Аналогичным образом можно выделять и два типа ЭГС: *однородные и неоднородные* (рис.1.22).

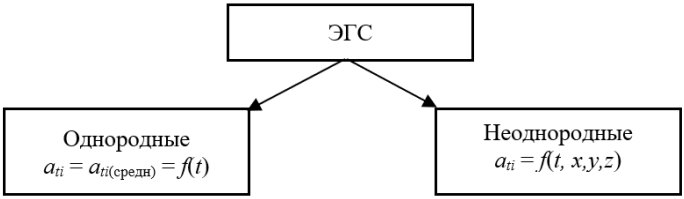


Рис.1.22. Систематика ЭГС по однородности параметров состояния

Первые характеризуются тем, что её независимые переменные состояния (a_{ti}) в любой заданный момент времени (t) можно представить в виде оценки среднего значения - $a_{ti(\text{средн})}$, т.е. - в виде однородного поля этих параметров. Состояние такой однородной ЭГС в некоторый момент времени представляют набором координат –

независимых переменных, значения которых изменяются в физическом времени.

Вторые, или неоднородные ЭГС, характеризуются неоднородными полями состояния, их нельзя представить средними значениями независимых переменных состояния, напротив они являются и функциями времени (t), и функциями пространственных координат (x,y,z) в этой системе, т.е. $a_{ti} = f(t, x,y,z)$.

***

Глава 2

ОПАСНОСТИ ДЛЯ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

2.1. Понятие об опасности

Нормальное функционирование ЭГС зависит от того, подвергается ли она каким-либо опасностям, влияющим на ее состав, строение, состояние и гомеостаз[1]. Кроме того, одна из целей управления ЭГС представляет собой создание условий для снижения или полной ликвидации опасностей.

При этом под ***опасностью*** *для ЭГС понимается возможность возникновения таких обстоятельств, при которых состояние данной ЭГС будет ухудшаться, а сама система не сможет существовать или функционировать*. Если говорить более кратко: опасность для ЭГС – это возможность причинения ей вреда вплоть до полного её разрушения (исчезновения).

Различают опасности территорий и видов деятельности, как их свойство, состоящее в возможности возникновения некоторой совокупности негативных факторов, воздействие которых может причинить вред людям и этим социальным системам (Вишняков, Радаев, 2008).

Под ***опасностью территории*** понимают присущее ей свойство, характеризуемое наличием на ней источников техногенной, социальной, экономической и политической опасностей, которые при определенных условиях могут причинять вред человеку, элементам антропосферы, социальным системам и природной среде, включая экосистемы и ЭГС. Источниками опасности на территории могут быть области возможного возникновения опасных природных явлений (например, сейсмоопасные области, зоны затоплений, вулканизма и т.п.), места захоронения отходов, промышленные площадки и производственные корпуса, промышленные зоны и селитебные

[1] *Гомеостаз* (гр. то же состояние) – способность биологических систем к саморегуляции при изменении условий окружающей среды; для организма сохранение постоянства внутренней среды организма и устойчивость основных физиологических функций при изменении внешних условий: для экосистемы – постоянство и устойчивость её компонентов и функционирования. Поддержание гомеостаза – непременное условие существования как отдельных клеток и организмов, так и целых биологических сообществ, и экосистем.

территории в целом, зоны военных действий или активной террористической деятельности, районы размещения потенциально опасных объектов (Ларионов, Рябышенков, 2013).

Опасность вида (сферы) ***деятельности*** — это свойство, обусловленное наличием у данного вида деятельности источников опасности техногенного, социального, экономического и политического характера, которые при определенных условиях могут причинить вред перечисленным ранее объектам, воспрепятствовать выполнению различных проектов и достижению прогнозируемых результатов деятельности (Вишняков, Радаев, 2008).

Опасности можно классифицировать по различным признакам (рис. 2.1): источнику возникновения, масштабу, распределённости в пространстве, виду (механизму негативного влияния), продолжительности действия и др.

Рис. 2.1. Виды опасностей (по Я.Д.Вишнякову и Н.Н. Радаеву, 2008)

Так, например, ***по распределенности в пространстве*** опасности для ЭГС в зависимости от их проявления на площади или в трехмерном пространстве могут быть сосредоточенными (или точечными) и распределенными (линейными и площадными).

По продолжительности действия различают кратковременно действующие (опасные явления) и продолжительно действующие

(вредные объекты при нормальном функционировании, неблагоприятные условия, загрязнение среды, нестабильность условий экономической деятельности) опасности.

По регулярности во времени различают опасности: а) *регулярные*, т. е. постоянно или периодически действующие (например, загрязнение геологической среды, вредные факторы, сопровождающие нормальную эксплуатацию объектов, весеннее половодье, циклические экономические кризисы и др.); б) *случайные* - возникающие в случайный момент (случайные события, например, форс-мажор, пожар и т.п.).

2.2. Источники опасности для ЭГС

> «Экология стала самым громким словом на земле, громче войны и стихии. Оно характеризует собой одно и то же понятие вселенской беды, никогда прежде не существовавшей перед человечеством»
>
> *В.Г.Распутин*

2.2.1. Подразделение источников опасности. *Источник опасности* для ЭГС— это ограниченный в некоторой области пространства процесс, деятельность или состояние определенного объема среды, окружающей рассматриваемую ЭГС, в котором возможна реализация опасности в какой-либо форме и причинение вреда рассматриваемой ЭГС. Опасности для ЭГС можно систематизировать по различным признакам (см. выше рис.2.1).

Опасные явления по мере изучения механизмов их возникновения из разряда нерегулярно действующих (случайных явлений) переходят в разряд детерминированно действующих и, следовательно, предсказуемых. Источники постоянно проявляющихся опасностей считаются вредными (для персонала) объектами, вредными и неблагоприятными для жизнедеятельности населения районами, вредными для компонентов ЭГС. Источники реализующихся в случайный момент опасностей+ считаются потенциально опасными объектами или районами.

По регулярности в пространстве или неопределенности местоположения различают источники опасности с известными координатами (например, стационарный объект, вулкан, зона затопления, конкурент) и неизвестными координатами (случайными в пределах области возможного возникновения), например, место разрыва трубопровода, железнодорожной аварии, террористического акта, эпицентр землетрясения и т.п. (Вишняков, Радаев, 2008).

Природные, техногенные, социальные (в частности, террористическая) и политические (в частности, военная) опасности в случае реализации могут привести к разрушению экосистем, к ущербу для жизни и здоровья человека либо непосредственно, либо опосредованно через ухудшение качества его жизни в связи с причинением ущерба социально-экономической системе (в масштабе государства, организации, семьи), включающей человека.

Опасность может проявляться как для всей ЭГС в целом, так и для отдельных её компонентов. Поэтому ***по компоненту ЭГС*** (или мишени опасности) выделяются опасности для: I – абиотических компонентов; II – биотических (живых) компонентов, включая и человеческий социум.

Среди *абиотических компонентов* ЭГС, выступающих в качестве мишени для опасных внешних воздействий на них, выделяются опасности для компонентов литотопа:

1) грунтов (как природных, так и техногенных);
2) подземных вод;
3) рельефа;
4) геохимических полей;
5) геофизических полей;
6) геологических и инженерно-геологических процессов;

а также для эдафотопа (почв).

Среди *биотических компонентов* ЭГС, также потенциально выступающих в качестве мишени для опасных внешних воздействий на них, выделяются опасности для:

1) микробоценоза;
2) фитоценоза;
3) зооценоза;
4) социума.

При этом биотические компоненты ЭГС могут подвергаться опасности как в целом (например, весь фитоценоз), так и по отдельным их подсистемам (например, отдельным популяциям фитоценоза, отдельным жизненным формам растений, облигатным литофитам и т.п.) (Афанасьева, Березина, 2011).

Наиболее важны общие опасности, затрагивающие всю ЭГС. Однако и локальные опасности, влияющие сосредоточенно лишь на один какой-либо компонент ЭГС или даже его подсистему, могут привести к существенным неблагоприятным изменениям в ЭГС. Например, гибель в результате проявления опасности какого-либо одного вида растений в фитоценозе, может по пищевым цепям

негативно отразиться на консументах первых порядков, а также редуцентов и привести к гибели всей экосистемы.

По масштабу проявления выделяются следующие виды опасностей для ЭГС:

1) локальные, т.е. проявляющиеся в пределах однородных ЭГС (для отдельных популяций организмов, эдафотопа, групп людей или отдельных объектов техносферы в пределах данной ЭГС и т.п.);
2) региональные – проявляющиеся в мезо- и макро-ЭГС и надрегиональных ЭГС;
3) глобальные – проявляющиеся для природной среды (биосферы) и человечества в целом (например, парниковый эффект, мировая война и т.п.).

Источниками опасности для ЭГС могут быть внешние или внутренние факторы, кроме того, они могут быть естественными (или природными) или техногенными (антропогенными), а также носить комбинированный характер.

На рис. 2.2, согласно Я.Д.Вишнякову и Н.Н.Радаеву (2008) показано, что внешняя среда является источником опасности для объекта 1 (или ЭГС-1). Например, реализация этой опасности способна вызвать разрушения на объекте 1 и причинить ему ущерб. Внешняя среда является источником опасности и для других объектов или эколого-геологических систем. В связи с особенностями указанных объектов и их размещением эти опасности могут различаться, хотя для однотипных объектов (или ЭГС), размещенных в сходных условиях, виды опасностей могут и совпадать.

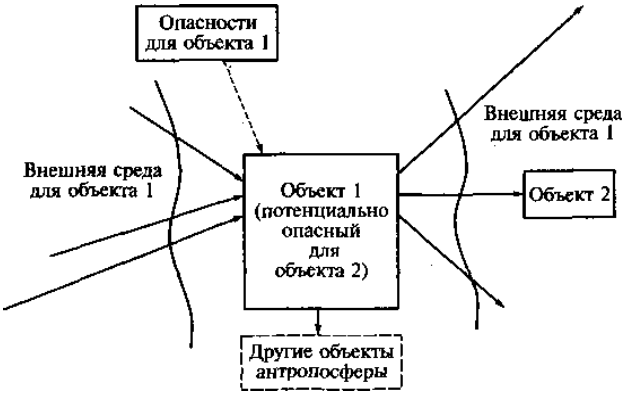


Рис. 2.2. Опасности для объекта (для ЭГС) и от объекта

С другой стороны, объект 1 (ЭГС-1) сам является одним из источников опасности для окружающей среды, в частности, для объекта 2 (или ЭГС-2). Например, если в качестве объекта 2 рассматривать биоценоз территории, прилегающей к объекту 1, то разрушение на последнем может причинить ущерб популяциям этой территории. В этом случае объект 1 (ЭГС-1) считается потенциально опасным для окружающей его среды. Таким образом ЭГС-1 в качестве объекта 1 может рассматриваться и как «жертва», и как «злодей». Вопрос о взаимном влиянии ЭГС друг на друга чрезвычайно сложный, его анализ необходимо проводить с учетом иерархии эколого-геологических систем (см. выше).

Как следует из схемы, показанной на рис.5, на ЭГС и ее отдельные компоненты могут оказываться различные типы природных и техногенных воздействий, вызывающие нарушения ЭГС и отдельных её составляющих.

2.2.2. Природные опасности. Источниками *природных воздействий* на ЭГС являются различные природные процессы, происходящие в геосферах Земли: литосфере (геологические процессы), гидросфере (гидрогеологические и гидрологические процессы) и атмосфере (климатические процессы) в границах биосферы. Не все природные воздействия на ЭГС являются опасными: к большинству геологических, гидрогеологических, гидрологических и климатических процессов экосистемы адаптировались за длительную эволюцию и длительную историю своего существования. Поэтому в экологической геологии природные процессы рассматривают и как неблагоприятные (опасные), и как благоприятные для экосистем (биоты, социума). Один и тот же процесс геологический процесс может быть и благоприятным, и неблагоприятным (опасным). Например, процесс оврагообразования (линейной эрозии) для человека является неблагоприятным, а в ряде случаев и опасным (если растущий овраг угрожает инфраструктуре), но для биоты этот процесс обычно благоприятен и не опасен, т.к. способствует увеличению биоразнообразия на территории за счет увеличения разнообразия жизненного пространства и для растений, и для животных. Аналогичных примеров можно привести множество.

Поэтому к ***опасному природному явлению*** относят такие, *которые по силе, масштабу распространения и продолжительности могут оказать негативное воздействие на биоту, жизнедеятельность людей и объекты экономики.*

В экологической геологии систематику природных процессов с учетом их опасности и экологическим последствиям осуществляют на основе учения о геодинамической экологической функции литосферы (Трофимов, Зилинг, 2002; Эколого-геол. условия…, т.1, 2015).

Д.Г.Зилингом и М.А.Харькиной (1999) выделяется четыре типа природных процессов от катастрофических до благоприятных (рис.2.3).

Катастрофические геологические процессы представляют непосредственную угрозу жизни и характеризуются неопределенностью момента возникновения и высокой интенсивностью проявления. К ним относят землетрясения, извержения вулканов, цунами, нагоны, наводнения, оползни, сели, обвалы, провалы и др. Непосредственная угроза жизни человека возникает только при определенной интенсивности проявления процесса (скорости, амплитуде, высоте подъема, радиусе действия и др.) (Эколого-геол. условия…, т.1, 2015). На 34% территории России периодически происходят землетрясения силой в 6 баллов и более, приводя к значительным ущербам при поражении ими городов и других поселений.

Опасные процессы (засуха, опустынивание, эрозия, карст и др.) оказывают непосредственное воздействие (механическое, химическое и др.) на абиотическую составляющую экосистемы и только опосредованно, через ее изменение или разрушение, на флору, живые организмы и человека. Они угрожают жизни, но их проявление растянуто во времени и сопоставимо с человеческой жизнью.

Неблагоприятные геологические процессы (заболачивание, суффозия, пучение, наледеобразование, морозобойное растрескивание и др.), не представляющие непосредственной угрозы для жизни, негативно воздействуют на условия жизнедеятельности человека через деформацию и осложнение эксплуатации инженерных сооружений и влияют на существование биоты через деградацию почв. Это процессы длительного действия, с продолжительным периодом подготовки, с отдаленными и опосредованными экологическими последствиями как для человека, так и всего живого.

Благоприятные процессы (выветривание, аккумуляция, увлажнение, осушение) позитивно влияющие на условия существования биоты и опосредовано на комфортность проживания человека за счет увеличения ресурса геологического пространства или его качества (Эколого-геол. условия…, т.1, 2015).

Оценка тяжести экологических последствий проявления геологических процессов требует дифференцированного подхода к

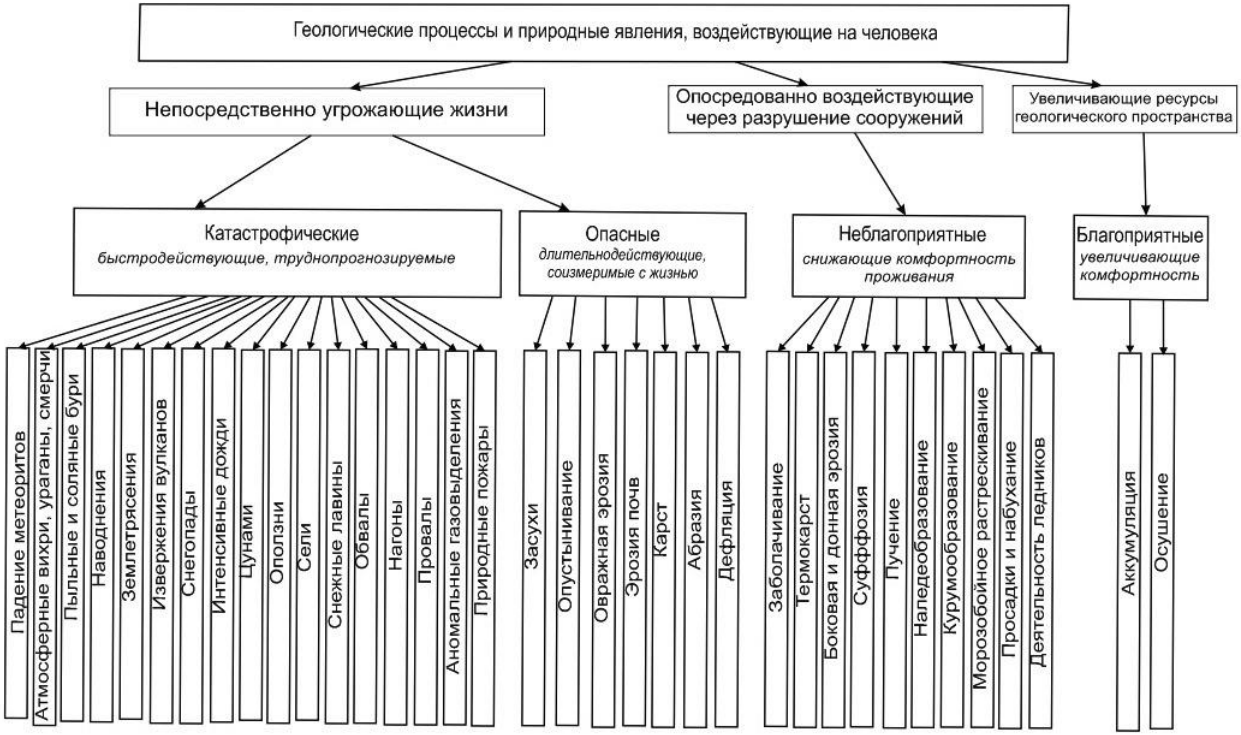


Рис.2.3. Систематика природных процессов по характеру их воздействия на человека (по Д.Г.Зилингу, М.А.Харькиной, 1999)

Рис.2.4. Систематика природных процессов по характеру их воздействия на фито- и зооценозы (по М.А.Харькиной, 2001)

компонентам ЭГС – микробоценозу, фито- и зооценозу, социуму. Эколого-геологически ориентированная систематика геологических процессов, приведенная на рис. 2.3, имеет антропоцентрический уклон. Одним из основных признаков выделения катастрофических, опасных и неблагоприятных геологических процессов в них являются человеческие жертвы и комфортность проживания людей. При эколого-геологической оценке процессов, влияющих на состояние эдафотопа, фито- и зооценозов, как компонентов ЭГС, главным критерием является сохранность почв и почвообразующих пород, поскольку именно они служат источником питательных соединений для растительности, обеспечивающей кормовую базу большинства наземных животных.

При систематике геологических процессов по характеру воздействия на растения и животных М.А. Харькина (2001) подразделила их на три группы: протекающие с уничтожением почвы, приводящие к ее частичной деградации и способствующие ее образованию (рис. 2.4). Процессы, протекающие по первому сценарию, по экологическим последствиям подразделяются на катастрофические и опасные. Первые – *катастрофические* – представляют непосредственную угрозу существованию биоты. Эти процессы характеризуются неопределенностью момента возникновения, высокой скоростью протекания и локальностью проявления. Отнесение в эту группу цунами и наводнений условное, поскольку они хотя и угрожают существованию растений и животных, но протекают не только с уничтожением, но и захоронением почвы (Эколого-геол. условия…, т.1, 2015).

Опасные для ЭГС *геологические процессы* отличаются региональным характером проявления и более растянуты во времени. Они не несут прямой и быстрой угрозы для биоты, но могут привести к полной деградации природной экосистемы, кардинально изменив структуру и условия существования биоты, вплоть до ее гибели. К ним можно отнести такие природные процессы как опустынивание, вторичное засоление, дефляция, термокарст.

Неблагоприятные для ЭГС геологические *процессы* связаны с деградацией почвы. К ним относятся эрозия, подтопление, заболачивание, карст, землетрясения, а также с некоторой долей условности суффозия, пучение и некоторые другие.

К *благоприятным* для ЭГС геологическим процессам относится выветривание, аккумуляция, увлажнение, осушение. В процессе воздействия на горные породы воды, воздуха, температур и микроорганизмов образуется элювий, тесно связанный с образованием почвы. Унаследованные от горных пород почвенные минералы

содержат элементы биофильного ряда, жизненно необходимые организмам. Процессы орошения (или осушения) позитивно воздействуют на формирование почвы, но только до определенных пределов (Эколого-геол. условия…, т.1, 2015).

2.2.3. Техногенные опасности обусловлены антропогенными ***воздействиями*** на природные условия и эколого-геологические системы. Они чрезвычайно разнообразны.

Под ***техногенным*** *(антропогенным)* ***воздействием*** понимают *различные по своей природе, механизму, длительности и интенсивности нагрузки, оказываемые на природные среды, включая литосферу и биоту, производственно-хозяйственной деятельностью человека* (Трофимов, Зилинг, 2002).

Воздействие человека на природные условия и ЭГС можно классифицировать различным образом. Например, разделить на разрушительное, стабилизирующее и конструктивное; прямое и косвенное; преднамеренное и непреднамеренное; длительное и кратковременное; статическое и динамическое; площадное и точечное; глубинное и приповерхностное; глобальное, региональное и локальное; механическое, физическое, химическое и биологическое и т.д.

Разрушительное (деструктивное) воздействие – это человеческая деятельность, ведущая к утрате природной средой своих полезных человеку качеств. Например, сведение дождевых лесов под пастбища или плантации, в результате чего нарушается биогеохимический круговорот веществ, и почва за два-три года теряет свое плодородие.

Стабилизирующее воздействие – это человеческая деятельность, направленная на замедление деструкции (разрушения) природной среды в результате, как хозяйственной деятельности человека, так и природных процессов. Например, почвозащитные мероприятия, направленные на уменьшение эрозии почв.

Конструктивное воздействие – это человеческая деятельность, направленная на восстановление природной среды, нарушенной в результате хозяйственной деятельности человека или природных процессов. Например, очистка грунтов от загрязнений, рекультивация ландшафтов, восстановление биоразнообразия животных и растений и т.д. (Caliman F.A. et al., 2011; Королев В.А., 2001, 2019а).

Прямое (непосредственное) воздействие – это изменение природных условий или ЭГС в результате прямого воздействия хозяйственной деятельности человека на различные природные объекты и явления.

Косвенное (опосредованное) воздействие – это изменение природных условий или ЭГС в результате каскадных процессов или вторичных явлений, связанных с хозяйственной деятельностью человека.

Непреднамеренное воздействие является неосознанным, когда человек не предполагает последствий своей деятельности. Это один из опасных видов воздействий, т.к. непредсказуемость последствий тех или иных непреднамеренных воздействий может в ряде случаев оказаться весьма серьезной и привести в конечном итоге к катастрофическим экологическим последствиям. Непреднамеренность часто связана с непознанностью экологических последствий хозяйственной деятельности на данный момент.

Преднамеренное воздействие является осознанным, когда человек ожидает определенные результаты своей деятельности.

Источниками *техногенных воздействий* на ЭГС являются материальные тела и энергетические системы техносферы, созданные и используемые человеком в процессе своей разнообразной хозяйственной и иной деятельности, в том числе военной.

Можно выделить следующие типы человеческой деятельности, оказывающие наибольшее влияние на природные условия и ЭГС:

1) *Горнотехническая деятельность* – т.е. разведка, добыча и переработка полезных ископаемых - руд, топлива, подземных вод и т.д. Приводит к изъятию из земных недр минеральных масс, проседанию грунта, формированию отвалов, изменению уровня грунтовых вод и т.д.

2) *Инженерно-строительная деятельность* – это строительство любых инженерных сооружений: водохранилищ, плотин, ГЭС, ТЭС, АЭС, ирригационных и осушительных каналов, коммуникаций, железных дорог, промышленных комплексов, городов, населенных пунктов и т.д. Заключается в дополнительной нагрузке на земные массы, изменениях в горных породах при мощных технических взрывах, влиянии на речные долины, прибрежные районы озер и морей, рельеф местности.

3) *Сельскохозяйственная деятельность* – это земледелие, орошение, осушение, обводнение земель, распашка целины, вырубка лесов, применение удобрений и пестицидов и т.д. Приводит к усилению водной и ветровой эрозии, загрязнению почв и т.д.

4) *Военная деятельность* – в мирное время: воздействие на природную среду на военных полигонах, местах изготовления и испытаний новых видов вооружений; в военное время: воздействие на территории в ходе военных действий.

Техногенная опасность территории обусловлена совокупностью размещенных на ней объектов техносферы, а степень опасности для жизнедеятельности населения и биоты характеризуется видами размещенных на ней потенциально опасных и вредных объектов, их числом, накопленным потенциалом опасности, аварийностью, объемом ежедневных (ежегодных) выбросов и сбросов загрязняющих веществ, продолжительностью функционирования, пространственным размещением по отношению к местам расселения людей, зонами действия негативных факторов в случае опасных техногенных явлений с учетом среднегодового (среднесезонного, среднесуточного) распределения направления и скорости ветра и другими факторами.

Техногенные опасности по механизму причинения вреда для жизнедеятельности человека обычно подразделяют на две группы: 1) *техногенное химическое загрязнение* окружающей природной среды; 2) опасные техногенные процессы и явления, включая заражения в результате возможных аварий (Калыгин, 2004).

Показателем опасности ***химических*** отравляющих веществ (ХОО) является количество населения, которое проживает в зоне возможного химического заражения в случае аварии. Данный показатель взят за основу существующей классификации объектов, располагающих запасами аварийно-химически опасных веществ (АХОВ), по химической опасности (табл. 2.1), где зона возможного химического заражения АХОВ - это площадь круга с радиусом, равным глубине зоны заражения.

Таблица 2.1.

Классификация химически опасных объектов

Степень химической опасности			
I	II	III	IV
В зону возможного химического заражения АХОВ попадает более 75 тыс. человек.	В зону возможного химического заражения АХОВ попадает от 40 до 75 тыс. человек.	В зону возможного химического заражения АХОВ попадает менее 40 тыс. человек.	Зона возможного химического заражения АХОВ не выходит за пределы ХОО или его СЗЗ.

По имеющимся данным, в РФ 12 % ХОО относится к I степени опасности, 7 % - ко II степени, к III степени - 73 % и к IV степени - 8 % (Мешалкин и др., 2016).

Данные о приоритетных химических загрязняющих веществах в рамках Евросюза (по Caliman F.A. et al., 2011), представлены на рис. 2.5.

Рис.2.5. Приоритетные загрязняющие вещества, влияющие на грунты и подземные воды в странах Евросоюза (ранжирование загрязняющих веществ рассчитывается на основе частоты, согласно которой конкретное загрязнение считается наиболее важным на исследуемых участках) (по Caliman F.A. et al., 2011)

Возможный выход облака заражённого воздуха за пределы территории ХОО, в случае аварии на нём, обусловливает химическую опасность для промышленного региона (ПР), где такой объект расположен. В основу классификации ПР (городского и сельского района, города, области, края, республики без областного деления) также положена опасность поражения населения АХОВ.

Критерием отнесения промышленного региона к той или иной степени опасности в этом случае является процент населения, проживающего в зоне возможного заражения в случае аварии на ХОО (табл. 2.2).

Построение математически информационных моделей объектов при анализе воздействия аварийно-химически опасных веществ описано в ряде пособий (Мешалкин и др., 2016).

Источниками техногенных опасностей являются различные технические объекты – инженерные сооружения техносферы. Считается что любое техническое устройство может быть

потенциальным источником опасности. Однако потенциал опасности у разных технических объектов разный. Систематика опасных промышленных объектов приведена на рис.2.5.

Таблица 2.2

Классификация городов, городских и сельских районов, областей по степеням химической опасности (по Мешалкину и др., 2016)

Степень химической опасности	Количество населения (в %), проживающего в зоне возможного заражения
I	более 50 %
II	от 30 до 50 %
III	от 10 до 30 %
IV	до 10 %

Рис.2.5. Классификация опасных промышленных объектов (по Я.Д.Вишнякову и Н.Н.Радаеву, 2008)

Техногенное нарушение геологической среды (литотопа и эдафотопа), а также других компонентов ЭГС может быть обусловлено

разными по природе видами воздействий: механическим, гидродинамическим, термическим, электромагнитным и т.п. Разработка методов восстановления геологической среды на техногенно нарушенных территориях должна базироваться на систематизации техногенных воздействий и нарушений.

Классификация техногенных воздействий на компоненты ЭГС с учетом их экологических последствий, дополненная и переработанная В.А.Королевым, представлена в табл. 2.1. В ней кроме классов, типов и видов воздействий, выделяемых по их природе, представлены рецепторы – компоненты геологической среды, на которые передаются те или иные воздействия, а также указаны их эффекторы – т.е. источники воздействий.

Таблица 2.1

Классификация техногенных воздействий на эколого-геологические системы

Класс, подкласс		Тип воздействия	Вид воздействия	Компоненты ЭГС* (рецептор)						Источники воздействия (эффектор)	Экологические последствия воздействия
				П	Г	И	В	Р	Д		
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Физическое воздействие	Механическое воздействие	Уплотнение	Статическое гравитационное	П	Г	И			Д	Здания, сооружения	Снижение комфортности проживания, вынужденная миграция ряда животных, трансформация биоценозов
			Виброуплотнение	П	Г	И			Д	Вибромеханизмы	
			Укатывание	П	Г	И			Д	Автотранспорт, катки	
			Трамбование	П	Г	И			Д		
			Взрывоуплотнение	П	Г	И			Д	Взрывы	
		Разуплотнение	Статическая разгрузка		Г	И		Р	Д	Шахты, полости, Котлованы Взрывы	Изменение качества ресурса геологического пространства, снижение комфортности проживания
			Динамическая разгрузка		Г	И		Р	Д		

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Внутреннее разрушение массива	Бурение Дробление Фрезерование Откалывание Рытье, экскавация Взрывное разрушение Распахивание, культивация	П П П П	Г Г Г Г Г Г	И И И И И И	В	 Р Р Р	Д Д Д Д	Буровые скважины Горные комбайны Горные выработки Карьеры, разрезы Шахты, штольни Взрывы Агротехни-ческая деятельнос-ть	Снижение комфортности проживания, трансформа-ция природных экосистем, изменение качества ресурса геологического пространства Снижение минерально-сырьевого ресурса территории, трансформа-ция плодородия почв
		«Аккумуляция» рельефа	Отсыпка терриконов Отвалообразование Создание насыпей Создание дамб			И И И И	В В В В	Р Р Р Р	Д Д Д Д	Шахты, рудники, ТЭС, ТЭЦ, ГРЭС Комбинаты обогати-тельные Строитель-ство ГОКи	
		Планировка рельефа	Строительная планировка Дорожная планировка Рекультивация Террасирование склонов	П П П П	Г Г Г Г	И И И	 В В В	Р Р Р Р	Д Д Д Д	Строитель ство Объекты рекульти-вации Объекты мелиора-ции	Улучшение качества ресурса геологического пространства и комфортности проживания
		«Эрозия» рельефа	Формирование выемок Рытье каналов, котлованов, разрезов Подрезка склонов Образование мульд проседания и опускания	П П П	Г Г Г Г	И И И	В В	Р Р Р Р	Д Д Д Д	Карьеры, разрезы Котлованы, каналы Дорожное строитель-ство Шахты, рудники, ГОКи	Снижение качества и потеря ресурса геологического пространства, комфортности проживания, деградация растительнос-ти

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Гидромеханическое воздействие	Гидроаккумуляция	Гидронамыв дамб, плотин Намыв золоотвалов Намыв насыпей, массивов			И И И	В В В	Р Р Р	Д Д Д	Строительство ТЭЦ, ТЭС Хвостохранилища Шламонакопители	Снижение и потеря ресурса геологического пространства
		Гидроэрозия рельефа	Гидроразмыв массивов Просадочно-суффозионное воздействие	П	Г Г	И И	В В	Р Р	Д Д	Карьеры, разрезы, драги водозаборы, подземное выщелачивание	Снижение и потеря ресурса геологического пространства, комфортности проживания, деградация ландшафта
Физическое воздействие	Гидро- и аэродинамическое воздействие	Повышение напора (давления флюида)	Нагнетание, инъекция Подтопление Орошение	П	Г Г	И И	В В В		Д Д	Закачки, сбросы Утечки, промстоки С/х поливы, гидромелиорация	Изменение качества ресурса геологического пространства, изменение условий питьевого водоснабжения, трансформация растительного покрова
		Снижение напора	Откачки воды, нефти, газа Дренирование Осушение	П П П	Г Г Г	И И И	В В В	Р	Д Д Д	Водозаборы месторождения нефти и газа Объекты мелиорации	Изменение качества ресурса геологического пространства и комфортности проживания

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Термическое воздействие	Нагревание	Кондуктивное (до 100 °С) Конвективное (до 100 °С) Обжиг (более 100 °С) Плавление Термическое упрочнение Биохимическое нагревание (самовозгорание)	П П П П	Г Г Г Г Г Г	И И И И И И	В В В 		Д Д Д Д 	Домны, ТЭЦ, АЭС, ТЭС, ГРЭС, горячие цеха. Подземная выплавка серы, газификация углей Объекты технической мелиорации Полигоны ТБО	Снижение комфортности проживания, трансформация биоценозов, потеря ресурса геологического пространства. Изменение качества геологического пространства
		Охлаждение	Кондуктивное Конвективное Замораживание	 П	Г Г Г	И И И	В В В		 Д	Холодильники Закачки растворов Объекты технической мелиорации	Изменение качества геологического пространства
	Электромагнитное воздействие	Стихийное	Наводка электрических полей	П	Г	И	В			ЛЭП, линии железных дорог, метрополи-тен, линии трамваев, троллей-бусов, электросети	Нарушение функций головного мозга и психики людей, разрушение их иммунной системы. Прямое воздействие на здоровье человека
		Целенаправленное	Электрообработка Электроосмос Электролиз Электросиликатизация	П П П 	Г Г Г Г	И И И И	В В В В		Д Д Д	Объекты Технической Мелиорации	Изменение качества ресурса геологического пространства

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Радиационное воздействие	Загрязнение	Короткоживущее радионуклидное Долгоживущее радионуклидное	П П	Г Г	И И	В В			Ядерные взрывы, выбросы АЭС, склады радиоактивных веществ, АЭС, заводы по переработке радиоактивных веществ	Лучевая болезнь, онкология, трансформация биоценозов, изменение качества, длительная потеря ресурса геологического пространства
		Очистка (дезактивации	Химическая Электрохимическая Биологическая Механическая	П П П П	Г Г Г Г	И И И И	В В В В			Объекты дезактивации и рекультива-ции	Улучшение качества ресурса геологического пространства
Физико-химическое воздействие		Гидратное	Капиллярная конденсация Дегидратация (сушка)	П П	Г Г	И И	В В			Асфальтовые покрытия Дренажные системы	Изменение качества ресурса геологического пространства
		Кольматирование	Физическое Физико-химическое	П П	Г Г	И И	В		Д	Объекты технической Мелиорации	Улучшение качества ресурса геологического пространства
Физико-химическое воздействие		Выщелачивание	Прямое Диффузное	П П	Г Г	И И	В В			Объекты Выщелачи-вания	Изменение качества ресурса геологического пространства, снижение минерально-сырьевого ресурса
		Ионообменное	Солонцевание Собственно ионно-обменное	П П	Г Г	И И	В В		Д	Мелиорация и рекультива-ция земель	Улучшение качества ресурса геологического пространства

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Химическое воздействие	Загрязнение	Фенольное, хлорфенольное	П	Г	И	В			Химические фабрики	Повышение заболеваемости населения ноозологическими видами болезней. Деградация, возможная гибель живых организмов и флоры, потеря качества ресурса геологического пространства
		Нитратное	П	Г	И	В			Фермы, поля орошения	
		Пестицидное	П	Г	И	В			Склады отходов, С/х деятельность	
		Гербицидное	П	Г	И	В				
		Тяжелыми металлами	П	Г	И	В			Транспорт, выбросы АЗС	
		Углеводородное	П	Г	И	В			Нефтехранилища	
		Кислотное	П	Г	И	В			Кислотные дожди	
		Щелочное	П	Г	И	В		Д	Предприятия, стоки	
		Засоление							Внесение удобрений	
									Нефтепроводы	
	Очистка	Нейтрализация	П	Г	И	В			Мелиорация и рекультивация земель	Улучшение качества ресурса геологического пространства
		Рассоление	П	Г	И	В		Д		
		Разбавление	П	Г	И	В				
		Выщелачивание	П	Г	И	В				
	Закрепление массивов	Цементация		Г	И			Д	Объекты Технической Мелиорации	Изменение качества ресурса геологического пространства
		Силикатизация		Г	И			Д		
		Битумизация		Г	И			Д		
		Смолизация		Г	И			Д		
		Известкование и др.	П	Г	И			Д		
Биологическое воздействие	Загрязнение	Бактериологическое	П	Г	И	В			Свалки ТБО С/х фермы, склады Силосные ямы Канализация	Дискомфортность проживания населения, желудочные инфекционные заболевания, долговременные потери качества ресурса геологического пространства
		Микробиологическое	П	Г	И	В				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Очистка	Стерилизация Биопоглощение Биодеградация	П П П	Г Г Г	И И И	В В В			Объекты очистки	Улучшение качества ресурса геологического пространства

Примечание: буквами указаны рецепторы - компоненты геологической среды, на которые потенциально может передаваться данный вид техногенного воздействия: П – почвы; Г – горные породы; и – искусственные грунты; В – подземные воды; Р – рельеф; Д – геодинамические процессы.

Необходимо подчеркнуть, что в приведенной классификации рассмотрены лишь исходные «первичные» техногенные воздействия, без учета каскадного эффекта, который оценивается по другим критериям, главным образом, связанным с геологической средой (породы, рельеф, подземные воды и др.). С экологических позиций важно, что в рассматриваемой классификации таксоны и признаки их выделения не зависят от иерархии геологических тел и масштабного уровня исследования. Это позволяет по единому признаку оценивать экологические последствия техногенных воздействий в пределах геологических тел и литотехнических систем от локального до планетарного уровня.

Наиболее серьезные техногенные нарушения геологической среды происходят при добыче полезных ископаемых открытым способом.

2.3. Математическое описание опасностей и риска для ЭГС

2.3.1. Общие положения. Рассмотрим порядок математического описания опасностей для ЭГС согласно представлениям Я.Д.Вишнякова и Н.Н.Радаева (2008) для общих опасностей. Степень природной, техногенной и социальной опасностей для ЭГС, а также экономических опасностей территории или сферы деятельности определяется видами опасных явлений и их количественными характеристиками (параметрами, обозначаемыми, например, как φ_i): *энергетическими*, т.е. распределением по силе — встречаемостью; *временными* — временным распределением (частотой реализации или повторяемостью опасных явлений, их цикличностью и прогнозируемыми сроками возникновения); *пространственными* — пространственным распределением (областями развития

неблагоприятных явлений или возможного возникновения опасных явлений заданной силы и повторяемости; площадями зон действия их негативных факторов).

Уровни негативных факторов (действующие нагрузки) описываются параметрами φ_i, определяющими их негативное (поражающее, истощающее, блокирующее) действие на ЭГС. Так как сила опасных явлений различна (причем слабые явления случаются чаще, чем сильные), относительное положение очага опасного явления и объекта воздействия его негативных факторов являются неопределенными, представим действующую на рассматриваемый объект нагрузку случайной величиной U. Она описывается характерной для рассматриваемой территории и размещения объектов на ней (с учетом ослабления силы негативного фактора при удалении от возможного очага опасного явления) функцией распределения негативных факторов, формируемых при реализации опасности, по силе вида:

$$F(\varphi_i) = P(U < \varphi_i), \qquad (2.1)$$

где P — вероятность[1] того, что случайная величина U примет значение, меньшее φ_i. Известны, например, функции распределения максимальной скорости ветра для городов России, силы землетрясений, уровней подъема воды в реках и др.

В зависимости от полноты исходной информации вероятностные распределения опасных явлений по силе могут быть определены следующими способами по статистическим данным о силе опасного явления; из анализа измеренной достаточно протяженной реализации опасного процесса, в основном природного, и др. (Вишняков, Радаев, 2008).

По статистическим данным определяется статистическая функция распределения:

$$\tilde{F}(\varphi_i) = P(\tilde{U} < \varphi_i), \qquad (2.2)$$

которая при числе наблюдений $N \to \infty$ приближается к истинной $F(\varphi_i) = P(U < \varphi_i)$. Для использования в задачах оценки и прогноза статистическую функцию распределения целесообразно заменить подходящей теоретической. Так как число n опасных явлений за интервал наблюдения Δt ограничено, то необходимо решать задачу

[1] Напомним, что вероятностью события A называется отношение числа исходов m_A, благоприятствующих событию A к общему числу исходов m в длинной серии экспериментов (или испытаний): $P(A) = m_A/m$.

выравнивания (сглаживания) статистического ряда. Для этого вначале из физических соображений или вида статистического распределения выбирают тип теоретического распределения (в дальнейшем используют методы проверки статистических гипотез о согласии статистического распределения с теоретическим). Затем задача сводится к рациональному выбору его параметров, при которых соответствие между статистическим и теоретическим распределениями — наилучшее. Для этого может быть использован метод моментов, согласно которому параметры теоретического распределения выбирают с таким расчетом, чтобы несколько важнейших числовых характеристик (моментов) теоретического распределения были равны соответствующим статистическим характеристикам. Если вид теоретического распределения заранее неизвестен, то для его выбора при $N > 200$ можно воспользоваться системой кривых Пирсона.

Идентификация распределений редких событий, лежащих на хвосте распределения (распределений с «тяжелыми хвостами»), требует подходов, отличных от применяемых в случае обычных распределений. Например, для них практически бесполезной характеристикой является математическое ожидание, а для описания крупных событий уместно использовать другую характеристику, называемую масштабом.

В течение существенного промежутка времени суммарный эффект всех зарегистрированных событий оказывается соизмеримым с максимальным из них (как это имеет место для устойчивых законов распределения). При этом сам процесс субъективно воспринимается как нестационарный. Лишь по мере накопления значительной статистики эта иллюзия пропадает. Однако увеличение интервала наблюдения Δt сопровождается изменением условий реализации соответствующих случайных величин и, следовательно, их распределений. Одним из рекомендуемых подходов является визуализация эмпирического распределения (применение вероятностных графических методов) (Вишняков, Радаев, 2008).

Рассмотрим на примере процесса подтопления застроенной территории анализ этой опасности и оценку вероятности ущерба от этого процесса (Дзекцер, 1995).

Процесс подтопления является техно-природным процессом. Поэтому источник опасности F (водонесущие коммуникации, различные технологические накопители, водоемы и пр.) действует (рис.2.6) сначала на геологическую среду (в данном случае грунтовые воды), а уже реакция последней — на объект опасности (участки застроенной территории). Причем импактное воздействие (I_m)

грунтовых вод реализуется в виде их опасного уровня (А) и/или в виде наведенных (спровоцированных) подтоплением других опасных инженерно-геологических процессов (оползни, карст, осадки, просадки, набухания, загрязнение подземных вод и пр.). При техногенном и природном процессах происходит непосредственное (прямое, а не через геологическую среду) воздействие соответственно технического объекта и среды на объект опасности.

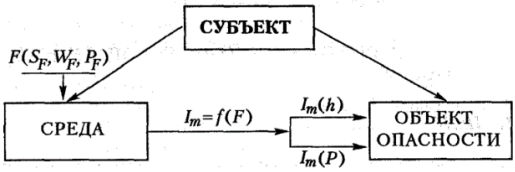


Рис.2.6. Схема опасных воздействий при формировании природно-техногенного процесса подтопления (по Е.С.Дзекцеру, 1995)

Риск ущерба от подтопления (R) принимается в виде произведения вероятности (P_L) неблагоприятного последствия (аварии), вызванного подтоплением, на величину ущерба (материального, социального, экологического) от реализации этого события (L). При этом возможный риск для рассматриваемой ситуации не должен превышать приемлемого риска (R_a), т. е. имеем:

$$R = P_L \cdot L \quad \text{и} \quad R \leq R_a \qquad (2.3)$$

Источник опасности возникает вследствие различных аварий технических систем, возможные схемы поведения которого строятся на основе разрабатываемых сценариев (S_F) по правилу "если это, то будет то". Он характеризуется интенсивностью W_F (в данном случае интенсивностью инфильтрации утечек) и частотой реализации (P_F), т. е. имеет место некое множество F $(S_F; W_F; P_F)$,

Для снижения вероятности реализации ущерба в вышеприведенном уравнении необходимо рассмотреть состав ее составляющих. Величину P_L из уравнения (2.3) записывают в виде:

$$P_L = P_{Im} \cdot P_v \cdot P_m \cdot P_s, \qquad (2.4)$$

где P_{Im} — вероятность проявления опасного воздействия I_m, зависящего от F, в той или иной точке области (поля) опасности; P_v — вероятность проявления неблагоприятной реакции объекта опасности

на соответствующее опасное воздействие (отказ объекта опасности — характеристика уязвимости); P_m — вероятность "встречи" (пересечения) данного опасного воздействия с рассматриваемым объектом опасности, т. е. вероятность трансляции (переноса) опасного воздействия непосредственно на объект опасности; $P_s = 1 - P_U$ — вероятность поведения субъекта риска ("хозяина территории" или ЛПР), P_U — вероятность принятия субъектом риска адекватного организационно-управленческого решения и реализации соответствующего воздействия по снижению значения риска до приемлемого.

Отсюда видно против кого и как необходимо направить превентивные мероприятия по управлению данной системой: снизить ли частоту проявления F и Im, повысить ли надежность объекта опасности, изменить ли размещение объекта опасности или откорректировать ли поведение субъекта риска.

Аналогичным образом могут оцениваться опасности, проявляющиеся в ЭГС от других неблагоприятных процессов.

При реализации любого вида деятельности и принятии управляющих решений, как показывает практика, ***риски*** неизбежны, но риск можно уменьшить до приемлемых значений. Может быть установлена величина допустимого риска как мера безопасности или мера устойчивости геосистемы (Burger J. et al., 2004; Burger J., 2008; Вишняков, Радаев, 2008). Величина допустимого или приемлемого экологического риска определяется экспертным путем или на основе имитационных прогнозов. Возможный риск R не должен превышать приемлемого риска $R_{прием}$:

$$R < R_{прием}. \qquad (2.5)$$

Оценка экономической эффективности мероприятий и выбор эффективного планово-проектного решения по развитию орошения осуществляется на основе оптимизационных эколого-экономических моделей. Величина приемлемого риска при оценке состояния ЭГС представлена в табл. 2.2 (Метод. рекомендации…, 2005).

На основе собранной информации об ЭГС оцениваются экологические риски и разрабатываются способы управления ими (рис. 2.7). Представленная на рис.2.7 схема может являться основой для создания автоматизированной системы управления рисками.

На сельскохозяйственных территориях и агрокомплексах проводится ***оценка природоохранной организации территории***. Для этого рассчитывают экологические показатели до землеустройства: коэффициент экологической стабильности территории; индекс экологического разнообразия территории;

индекс продуктивности агроландшафтов; коэффициент антропогенной нагрузки; длина экотонов в расчете на 1 га пашни; лесистость территории; число и средняя площадь агроэкологически однородных участков на пашне; другие показатели, характеризующие экологическое разнообразие и стабильность территории (площади микрозаповедников, экологических ниш, протяженность миграционных коридоров, защищенная лесополосами площадь).

Таблица 2.2

Оценка состояния геосистем с учетом возможного экологического риска (в долях единицы)

Иерархический уровень геосистемы	Экологические риски	Величина приемлемого риска Rприем	Состояние геосистемы с учетом величин экологического риска		
			Экологически безопасное (устойчивое) R< Rприем	Экологически опасное (неустойчивое) R≥ Rприем	Экологически кризисное R>> Rприем
Региональный	Риск площадного развития опасных экологических процессов	0,05	<0,05	0,05-0,2	>0,2
Локальный	Риск площадного развития подтопления	0,1	<0,1	0,1-0,3	>0,3
	Риск площадного развития процессов вторичного засоления	0,05	<0,05	0,05-0,25	> 0,25
	Риск площадного развития осолонцевания (слабоосолонцованных почв)	0,15	<0,15	0,15-0,30	>0,30
	Риск площадной деградации почв (по физическим свойствам и содержанию гумуса)	0,02	<0,02	0,02-0,20	>0,20

Для оценки влияния состава угодий на экологическую стабильность территории, устойчивость которой падает при повышении сельскохозяйственной освоенности земель, распашке и интенсивном использовании угодий, проведении культуротехнических работ, застройке территории, необходимо вычислить коэффициенты экологической стабильности территории.

Для оценки степени ***экологической устойчивости ландшафта*** использован известный метод определения коэффициента экологической стабилизации ландшафта ($K_{эст}$), основанный на соотношении площадей,

занятых различными элементами ландшафта, положительного или отрицательного воздействующих их на природную среду.

Рис. 2.7. Парадигма оценки и управления экологическими рисками, разработанная Министерством энергетики США (по Burger and Gochfeld, 1997). **Пунктирная линия указывает на формальную фазу оценки риска**

Коэффициент экологической стабилизации выражается соотношением:

$$K_{эсл} = \sum_{i=1}^{n} F_{ст} / \sum_{i=1}^{m} F_{нст}, \quad (2.6)$$

где $F_{ст}$– площади, оказывающими положительное влияние на ландшафт); $F_{нст}$– площади, занимаемые деградированными элементами ландшафта. С помощью рассчитанных значений $K_{эсл}$, оценку устойчивости ландшафта можно производить по следующей шкале: нестабильный, с ярко выраженной нестабильностью ($K_{эсл} \leq 0.50$); нестабильный ($K_{эсл}$=0.51-1.00); устойчиво стабильный ($K_{эсл}$=1.01-3.00); стабильный ($K_{эсл}$=3.01-4.50); стабильный, с ярко выраженной стабильностью ($K_{эсл} \geq 4.50$)[4].

Для оценки экологической устойчивости ландшафта можно также использовать коэффициент экологической устойчивости ($K_{эу}$), учитывающий структуры биотических и абиотических элементов ландшафтов, их экологическую значимость определяется по формуле:

$$K_{эу} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^{n} f_i \cdot K_{эз} \cdot K_{гм}, \quad (2.7)$$

где F – площадь природных и техноприродных систем (водосбора); fi – площадь i-того угодья; $K_{эз}$ – коэффициент, характеризующий экологическое значение отдельных биотехнических элементов, $K_{гм}$ -коэффициент геолого-морфологической устойчивости рельефа (принимается равным 1.0 для стабильного и 0.70 – для нестабильного рельефа).

Урбанизированные территории резко уменьшают экологическую стабильность водосбора, поэтому для них коэффициент стабильности принимается отрицательным и ориентировочно равным (– 1.00). С помощью полученного таким способом значения можно оценить устойчивость исследуемого ландшафта по следующей классификации: «нестабильная территория ($K_{эу} \leq 0.33$); мало стабильная ($K_{эу}$=0.34-0.50); средне стабильная ($K_{эу}$=0.51-0.66); стабильная территория ($K_{эу} \geq 0.66$).

2.3.2. Распределение опасных явлений во времени. Математическое описание распределения опасных явлений во времени основано на их рассмотрении как потока случайных событий (Вишняков, Радаев, 2008).

Природные, техногенные и социальные процессы разворачиваются во времени и пространстве и описываются некоторыми параметрами φ_i**.** Проанализируем их на примере природных процессов.

Природные процессы и явления в конкретных пунктах на некоторой территории в общем случае следует рассматривать как реализацию многомерного случайного процесса. Будем рассматривать их как реализацию некоторого одномерного (функция одного параметра природного процесса) квазистационарного эргодического случайного процесса $U(t/x)$ (Вишняков, Радаев, 2008). Выбросы этого процесса представляют собой опасные природные явления, в качестве критерия наступления которых будем рассматривать условие

$$\varphi_i > \varphi_{ik}, \tag{2.8}$$

где φ_{ik} — некоторое критериальное значение (например, ПДК загрязнителя, ОДК, ПДУ и т.п.).

Тогда опасные природные явления образуют поток случайных событий — выбросов случайного процесса за уровень φ_{ik}.

Негативное действие опасных явлений на элементы антропосферы характеризуют, как правило, амплитудные значения их параметров. Поэтому в качестве φ_i обычно рассматривают амплитуды выбросов φ_{max} (например, максимальную скорость ветра при ураганах, максимальный подъем уровня воды при наводнениях, максимальное ускорение грунта при землетрясениях, т.е. их предельные уровни, которые могут оцениваться для ЭГС в виде ПДК, ОДК, ПДУ и т.д.). Описание опасных явлений в этом случае должно включать: а) во времени — поток опасных явлений; б) по силе — распределение опасных явлений по амплитуде выбросов.

Амплитуда выбросов представляет собой случайную величину U_{max} действующей на элементы антропосферы нагрузки, описываемую распределением (Вишняков, Радаев, 2008)

$$F_{max}(\varphi_i) = P(U_{max} < \varphi_i). \tag{2.9}$$

Допустим, поток опасных явлений обладает свойствами ординарности (за достаточно малый промежуток времени происходит не более одной реализации), отсутствия последействия (после очередной реализации их частота не изменяется, хотя, разумеется, меры по предупреждению опасных явлений, особенно в техносфере и социальной сфере, и снижению их последствий принимаются после каждой реализации) и стационарности (частота реализаций $\lambda(t) = \text{const}$). При этих условиях поток реализаций опасного события является простейшим пуассоновским, для которого случайное число ξ реализаций, происходящих в течение времени Δt, распределено по закону Пуассона:

$$F(n) = P(\xi \le n) = \sum_{k=0}^{n} P(k)\,,\ \ n = 1,2,\ldots \tag{2.10}$$

где

$$P(k) = \frac{1}{k!}a(\Delta t)^k \exp\left[-a(\Delta t)\right] \tag{2.11}$$

— вероятность k реализаций в течение интервала времени Δt, $a(\Delta t) = \lambda\Delta t$ — параметр распределения Пуассона (среднее число $a(\Delta t) = M|\xi|$ реализаций в течение интервала времени Δt,; λ — частота реализации (среднее число реализаций за единичный и достаточно малый интервал времени, (ед. времени)$^{-1}$), которая является основным количественным показателем потока опасных явлений (Вишняков, Радаев, 2008).

Редкие события почти всегда распределены во времени по закону Пуассона. Для пуассоновского потока время t между событиями подчиняется экспоненциальному закону, т. е. вероятность хотя бы одной реализации за интервал времени Δt в соответствии с вышеприведенным уравнением вычисляют по формуле

$$Q(\Delta t) = 1 - P(0) = 1 - \exp(-\lambda\Delta t). \tag{2.12}$$

Это соотношение используют для определения частоты наступления невосполнимого ущерба для конкретного объекта, например, индивидуальной вероятности смерти для человека, популяции и т.п. (Вишняков, Радаев, 2008).

С увеличением λ или Δt возрастает и число событий. Когда $a(\Delta t) \to\infty$, распределение Пуассона приближается к нормальному с параметрами $M|\xi| = a(\Delta t)$ и $D[\xi] = a(\Delta t)$. В этом случае приближенно в качестве основного уравнения распределения Пуассона можно применять уравнение

$$F(n) = \Phi\left(\frac{n - M|\xi|}{\sqrt{D|\xi|}}\right), \tag{2.13}$$

где $\Phi(\cdot)$ — функция Лапласа[1].

[1] Функция Лапласа (или интеграл вероятности) определяется как

Практически нормальным приближением пользуются при $a(\Delta t) > 100$. Оно полезно для получения гарантированных оценок риска методами доверительного оценивания, оценок точности (Вишняков, Радаев, 2008).

Для редких событий (например, тяжелых радиационных аварий типа Чернобыльской), когда $a(\Delta t) \ll 1$ (практически при $a(\Delta t) < 0{,}1$), приближенно можно считать, что

$$Q(t) = a(\Delta t) = \lambda \Delta t. \qquad (2.14)$$

2.3.3. Пространственное распределение опасных явлений. Такое распределение опасных явлений удобно изображать на карте (Вишняков, Радаев, 2008). Например, зоны возможного затопления по информации о прогнозируемом уровне подъема воды при наводнении удобно строить на трехмерной электронной карте местности. Электронные карты лежат в основе использования для анализа риска ГИС-технологий (ГИС — геологическая информационная система).

Пространственное распределение (области возможного возникновения) опасных природных явлений на картографической основе целесообразно отражать изолиниями их повторяемости и (или) силы. *Повторяемость опасных природных явлений* λ_o (рис. 2.8) определяется для точек — центров квадратов фиксированной площади S_0, равной, например, для торнадо 10 000 км^2.

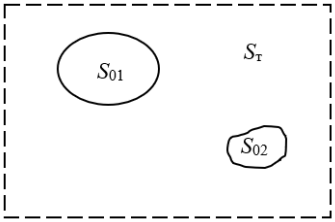


Рис. 2.8. Определение пораженности территории опасными процессами (пояснения в тексте) (по Вишнякову, Радаеву, 2008)

Величина $S_0 = S_п = \sum S_i$ определяется размерами суммарной области возможного возникновения опасного природного явления, градиентом изменения его повторяемости и площадью зоны поражения

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

,

где x – значение аргумента функции. Эта функция табулирована.

($S_п$). Для ситуации, показанной на рис.5, $S_0 = S_{01} + S_{02}$. В предположении, что $\lambda_о$ для всей территории постоянна, частоту λ, опасных явлений на определенной территории (в административно-территориальном образовании) площадью $S_т$ вычисляют по формуле (Вишняков, Радаев, 2008):

$$\lambda_т = \frac{S_т}{S_0}\lambda_0 \quad . \tag{2.15}$$

Величина отношения $S_т/S_0$, измеряемая в долях единицы или в %, аналогична *коэффициенту пораженности территории* опасными процессами $K_п = S_п/S_т = S_о/S_т$, применяемому в инженерной геодинамике. Следовательно, повторяемость опасных природных процессов на изучаемой территории может быть выражена и через коэффициент пораженности по формуле

$$\lambda_т = \frac{\lambda_0}{K_п}. \tag{2.16}$$

Если территория рассматриваемого административно-территориального образования размещена в зонах с различной частотой опасных природных явлений, то средняя частота природного явления на ней составит

$$S_т = \frac{1}{S_0}\sum_j \lambda_{0j} S_{тj}, \tag{2.17}$$

где $S_{тj}$. – площадь части территории

$$\left(\sum_j S_{тj} = S_т\right), \tag{2.18}$$

на которой опасные природные явления происходят с частотой $\lambda_{тj}$.

Допустим, при отображении опасности на карте за основу взяты изолинии повторяемости $\lambda_о = var$ опасных природных явлений с силой $\varphi > \varphi_0$. Для определения повторяемости природных явлений с силой $\varphi > \varphi_1$ дополнительно рассмотрим распределение реализаций опасного природного явления по силе $F(\varphi)$. В качестве критериальных значений φ_0 и

φ_1 может, в частности, рассматриваться расчетная стойкость размещенных на территории типов объектов.

Предположим (Вишняков, Радаев, 2008), что вид и параметры распределения $F(\varphi)$. известны. Например, известно распределение торнадо по скорости ветра. В США торнадо с категорией интенсивности Ф3 встречается менее чем в 5 % случаев, Ф4 — 3 **%,** Ф5 — 1 %. В близких пропорциях отмечается встречаемость разных категорий торнадо и в других районах мира. Тогда если — известная частота реализаций опасного природного явления с силой $\varphi \geq \varphi_0$, то частоту его реализаций, превышающих некоторый уровень φ_1 можно определить по формуле:

$$\lambda_1 = \frac{1 - F(\varphi_1)}{1 - F(\varphi_0)} \lambda_0. \tag{2.19}$$

Пусть, согласно Я.Д.Вишнякову и Н.Н.Радаеву (2008), φ - это параметр, характеризующий поражающее действие негативных факторов от некоторого источника опасности на объект, а $\varphi_{кр}$ — критическое значение, начиная с которого объект разрушается. Тогда разрушение объектов данного типа происходит на расстоянии $r < R_п$ источника опасности (рис. 2.9).

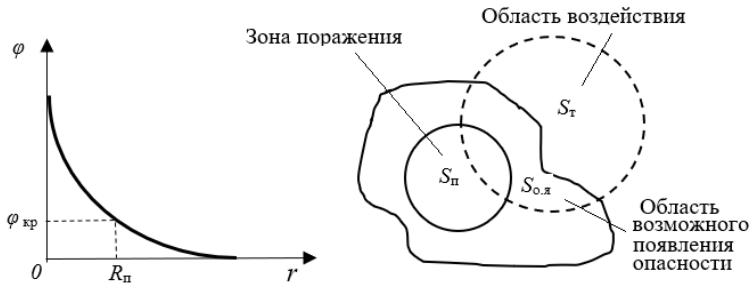


Рис.2.9. Пространственное распределение источника опасности и объекта воздействия (пояснения в тексте) (Вишняков, Радаев, 2008),

Если зона поражения — круг, то площадь ***зоны поражения*** негативными факторами рассматриваемого источника опасности $S_п = \pi R_п^2$. Радиус зоны поражения $R_п$ определяется из условия

разрушения объекта негативным фактором $\varphi(r) > \varphi_{кр}$ при замене неравенства на равенство.

Площадь $S_п$ зоны поражения (действия негативных факторов) зависит от силы опасного природного явления, стойкости застройки к воздействию негативных и других факторов. Она оценивается по статистическим данным или с помощью теоретических моделей. Так, для условий России площадь зоны поражения составляет; 7-балльная зона для землетрясений при магнитуде M= 5-300 км^2, M = 8-6000 км^2; цунами — до 50 км^2 (прибрежная полоса шириной в сотни метров и длиной до 500 км); ураганов — до $0{,}2 \cdot 10^6$ км^2 (полоса со скоростью ветра более 20 м/с шириной до сотен километров и длиной до 1000 км); тайфунов — до $0{,}2 \cdot 10^6$ км^2 (полоса ветра шириной до 400 и длиной до 500 км); смерчей — до 40 км^2, средняя — 1 км^2 (полоса шириной до 20 м и длиной до 50 км); лесных пожаров — 1 км^2 (Вишняков, Радаев, 2008).

На техногенно освоенных территориях пространственные области проявления опасных и вредных факторов производственной среды обитания называются *опасными зонами*. Они характеризуются увеличенным риском возникновения происшествия (несчастного случая). Однако даже если человек находится в опасной зоне, но правильно организует свою деятельность, соблюдает условия безопасности, следит за исправностью технических систем, то несчастный случай не возникает. Часто несчастные случаи являются следствием нарушения мер безопасности в момент нахождения человека в опасной зоне.

Методика оценки показателей качества окружающей среды в районах потенциально опасных производственных предприятий (например, металлургических), составление соответствующей базы данных и управления вычислительными процедурами описана в различных руководствах (см., например, Мешалкин и др., 2016).

***

Глава 3

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

3.1. Общие положения

Оценка состояния окружающей среды и её отдельных компонентов – важнейшая проблема геоэкологии (Трофимов, 2020). Эта многоплановая проблема решается разными способами, в том числе с использованием нормативов качества окружающей среды, опирающиеся на ПДК и ПДУ, а также нормативов допустимого воздействия на окружающую среду (ри.3.1).

Рис.3.1. Схема нормативов в области охраны окружающей среды (Хомич, 2002)

В этом разделе приведем диагностирование состояния ЭГС с точки зрения теории систем, выполним ее *диагностирование, прогнозирование состояний* и *функциональный анализ*, необходимые для целей управления ими. Но предварительно сделаем некоторые замечания.

За рубежом вопросам диагностирования состояния экосистем и ЭГС уделяется большое внимание в последние тридцать лет. Для этого применяются различные индикаторы состояния и устойчивости ЭГС (Burger J., 2008). Чтобы быть действительно устойчивой, экосистема должна иметь свои собственные петли обратной связи и устойчивость (способную восстанавливаться после стихийных бедствий или возмущений), не требуя чистого вклада (или экспорта) воздействий извне системы.

В России впервые с точки зрения геокибернетики диагностирование и прогнозирование состояний ПТС выполнил Г.К.Бондарик (2012), рассматривая однородные и неоднородные ПТС с целью управления ими. Поскольку ЭГС можно рассматривать как часть (компонент) ПТС, то к кибернетическому анализу ЭГС вполне применим аппарат, предложенный Г.К.Бондарирком для ПТС. В соответствии с этим далее мы и рассмотрим диагностирование, прогнозирование состояний и функциональный анализ ЭГС на основе подхода, развитого Г.К.Бондариком.

3.1.1. Диагностирование и прогнозирование состояний однородных ЭГС. Выше (см. гл. 1.3) было дано определение однородной ЭГС. Следуя представлениям Г.К.Бондарика (2012), помимо координат ЭГС характеризуют инварианты – параметры, изменения которых возможны только в масштабах геологического или исторического времени. Они отражают условия и причины развития геологического процесса, в том числе и процесса, развивающегося под влиянием управляющих взаимодействий.

Согласно Г.К.Бондарику (2012), с теоретической точки зрения, диагностирование состояния однородной системы заключается в оценке положения изображающей точки в фазовом пространстве состояний относительно границ устойчивой области и ***области допустимых состояний*** системы (ОДС). Задача диагностирования состояний системы состоит в том, чтобы определить, где в пространстве состояний в какой-либо момент времени t_i находится представляющая точка a_{ti}.

Операции диагностирования состояния однородной ЭГС ведут, согласно Г.К.Бондарику (2012), в следующей последовательности:

− проводят статистическую проверку однородности совокупности значений координаты φ_i, полученных в момент времени t_k и в случае положительных результатов (однородное поле) подсчитывают среднее значение поля и его экстремальные значения;

− полученные оценки поля φ_{itk} сравнивают с предельно допустимыми значениями координаты φ_i, определяя положение поля относительно границы ОДС, операции повторяют для каждой из координат ЭГС;

- по набору координат, отвечающих моменту времени t_k, устанавливают положение изображающей точки a_{tk} и достраивают до нее траекторию движения ЭГС.

Если изображающая точка находится внутри границ устойчивой области (координаты изменяются в заданных пределах), состояние ЭГС оценивают положительно. Если же установлена тенденция возможного выхода траектории за границы устойчивой области, выясняют за счет изменений каких координат происходит изменение траектории, и соответственно какие взаимодействия (процессы) на входах в ЭГС обусловливают эти негативные изменения.

Для описания координат можно использовать модель фазового пространства состояний. Такой анализ позволяет оперативно принимать необходимые управляющие решения в отношении функционирования подсистем ЭГС, представленных в базе данных соответствующими координатами (координатой).

Для установления траектории движения ЭГС можно воспользоваться моделью, показанной на рис 3.2. Ее координатами являются координаты пространства состояний φ_i (i = 1...n, где n – порядок системы) и ось времени (t).

Для построения модели “пространство состояний – время” из некоторой точки плоскости проводят оси координат (по числу координат системы). Каждая из осей соответствует одной переменной. Нормально к этой плоскости в той же точке проводят ось времени. Состояние системы в некоторый момент времени на графике выразит *представляющий многоугольник,* число углов которого равно числу независимых переменных (область а на рис. 3.2).

Область допустимых состояний будет многоугольником с таким же числом углов, отстроенным по предельно допустимым значениям координат. Устойчивая область в этой модели представляет собой цилиндр с таким диаметром, при котором обеспечивается условие – никакой представляющий многоугольник не может пересечь боковую поверхность цилиндра.

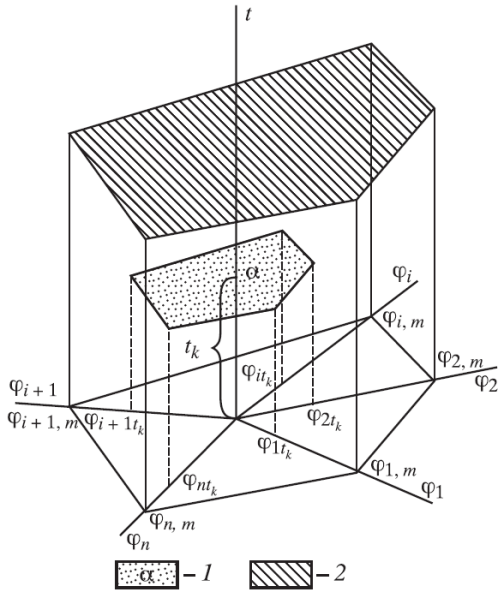


Рис.3.2. Модель «пространство состояний система-время»: 1 – состояние системы в момент времени t_k; 2 – сечение области допустимых состояний (по Г.К.Бондарику, 2012)

Состояние системы можно представить в численном виде как площадь представляющего многоугольника (или длину отрезка прямой для систем второго порядка):

$$f = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} \varphi_{i+1}\varphi_i sin\frac{360}{n}, \tag{3.1}$$

где φ_i, φ_{i+1} – координаты системы, n – число координат (порядок) системы.

Отмечая значения координат, соответствующие разным моментам времени, можно получить график, отображающий процесс движения системы, оценить скорость движения системы и скорости, обусловленные изменениями отдельных координат. Сравнительный анализ представляющих многоугольников, соотнесенных к разным моментам времени, позволяет оценивать процесс движения системы и своевременно реагировать на его опасные тенденции.

Для диагностирования и прогнозирования состояний ЭГС удобно использовать модель, представленную на рис. 3.3. В ней значения фазовых координат заменены их обобщенной оценкой.

В этой модели состояние системы есть функция обобщенных координат a′ и времени *t*:

$$\alpha' = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \varphi_i^1 \tag{3.2}$$

где n – порядок системы (число координат), α_i – весовой коэффициент i-й координаты; φ_i^1 – нормированная величина i-й координаты; $\varphi_i^1 = \varphi_i : \varphi_{im}$.

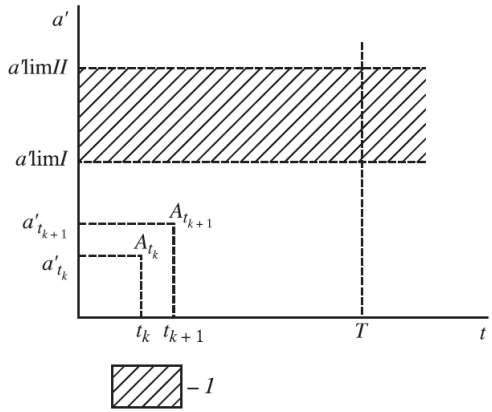


Рис.3.3. Модель «пространство обобщенных состояний системы»: 1 – зона риска; *α'$_{tk}$* и *α'$_{tk+1}$* - обобщенные состояния системы в моменты времени t_k и t_{k+1}; A_{tk}, A_{tk+1} – представляющие точки (по Г.К.Бондарику, 2012)

Поскольку координаты системы – независимые переменные, то можно предположить, что вклад каждой из них в состояние системы скорее всего равноценен. Следовательно, α_i = 1/n, где n – число координат (Бондарик, 2012).

«Устойчивая область в этой модели представляет собой круг (замкнутую траекторию) с радиусом *α'$_{tk}$*. Область допустимых состояний ограничена справа временем, соответствующим периоду амортизации системы (*T*), а параллельно оси времени – линией с

ординатой $\alpha'_{\lim II}$… Она соответствует условию, когда какая-либо координата достигает своего предельно допустимого значения. Вероятность подобного утверждения равна 1.

В этой модели можно выделить зону риска, заключенную между ординатами… $\alpha'_{\lim I}$ и $\alpha'_{\lim II}$. Нижняя граница зоны риска ($\alpha'_{\lim I}$) отвечает ситуации, когда предельно допустимая величина может быть достигнута координатой, у которой она наименьшая. Однако вероятность такой ситуации не равна 1, так как соответствующее значение текущей обобщенной координаты может быть обусловлено вкладом других координат, величина которых далека от предельно допустимых значений» (Бондарик, 2012, с. 367).

Пересечение траекторией нижней границы зоны риска указывает на необходимость анализа конкретных координат ЭГС для установления причин неустойчивого функционирования ЭГС и принятия адекватных управляющих решений по его оптимизации.

Преимущество рассматриваемой модели Г.К.Бондарика состоит в том, что она фиксирует процесс функционирования системы и позволяет решать задачи прогнозирования ее будущих состояний. Недостаток модели − в некоторой потере информации об изменениях конкретных координат ЭГС.

Задача прогнозирования состояний однородной ЭГС состоит в оценке будущей траектории ЭГС и в своевременном выявлении тенденции ее приближения к границам области допустимых состояний (ОДС) данной ЭГС. Прогноз осуществляется чаще всего методами экстраполяции (прогноз будущего состояния системы на основе тенденции ее прошлого движения). Для его реализации на основе режимных наблюдений строят графики изменения координат во времени, т.е. траекторию движения системы от начала наблюдений до настоящего времени. Затем экстраполируют полученные кривые (продлевают траекторию) на прогнозируемый период времени, исходя из неизменности режима функционирования ЭГС за этот период. Для этой цели целесообразно использовать модели пространства состояний, рассмотренные выше. С их помощью можно рассчитать скорость приближения траектории к границам ОДС, определить время возможного пересечения траекторией этой границы, выяснить за счет каких координат следует ожидать негативных изменений состояний ЭГС в прогнозируемый период времени. Для прогнозирования используют вероятностно-статистические методы экстраполяции случайных последовательностей оценок показателей состояний ЭГС с заданной точностью, доверительным уровнем и величиной упреждения.

«Могут быть использованы методы динамического программирования (Бондарик, 2002; 2004). Степень достоверности прогнозов зависит от длительности наблюдений и возрастает по мере корректировки системы пунктов получения информации и реализации программ управления» (Бондарик, 2012, с. 367).

3.1.2. Диагностирование и прогнозирование состояний неоднородных ЭГС. Определение неоднородных ЭГС было дано выше (см. гл. 1.2). Далее, следуя представлениям Г.К.Бондарика (2012), развитых для ПТС, применим этот же подход для диагностирования состояний неоднородных ЭГС.

Операции диагностирования и прогнозирования состояний ЭГС, координаты которых есть функция не только времени, но и метрического пространства, требуют применения определенных процедур преобразования координат. Ниже, согласно Г.К.Бондарику (2012), предлагаются несколько способов преобразования данных о состояниях неоднородных систем. Все они базируются на теории поля геологического параметра и предполагают анализ структур полей координат ЭГС, построенных методами математического моделирования поля (Бондарик, 1981). Программы моделирования входят в стандартный пакет программного обеспечения.

1. Если в соответствии с обоснованными критериями разделить поле некоторой координаты на квазиоднородные участки, то для каждого из них возможно получить оценку среднего значения координаты и ее среднее квадратическое отклонение. Набор средних оценок координат, подсчитанных для участка, можно использовать для характеристики его состояний в пространстве состояний. Число таких пространств соответствует числу квазиоднородных участков. Оценку состояния проводят для каждой квазиоднородной области в отдельности. Для этого подсчитывают ширину этих областей и устанавливают их границы. Дальнейшие операции проводят аналогично операциям с однородной системой. Наиболее ответственными, естественно, являются результаты диагностики и прогнозирования состояний тех квазиоднородных участков системы, в пределах которых ее траектория быстрее приближается к границам области допустимых состояний.

2. Еще один способ оценки состояний неоднородной системы заключается в анализе структур полей координат системы. Состояние некоторой области взаимодействия ПТС в момент времени t_k... можно представить в виде набора полей координат φ_1,…. φ_i…… φ_n…Располагая предельно допустимыми значениями координат (φ_{im}),

возможно оценить расстояния значений отдельных координат от их предельно допустимых значений. Это позволяет представить состояние ЭГС в виде набора расстояний от границ ОДС … φ_{im} –… φ_{imax}, где φ_{imax} … – максимально неблагоприятное для движения ЭГС значение координаты φ_i…. Располагая набором моделей полей координат, можно установить местоположение аномалий поля, областей максимумов и минимумов координаты. Результатами анализа структуры поля некоторой координаты являются: а) выявление наиболее опасных в отношении близости к границам области допустимых состояний участков пространства неоднородной системы; б) разработка рекомендаций, относящихся к особенностям режимных наблюдений и к характеру процесса функционирования опасного участка ЭГС.

3. Принципиально иной способ диагностики и прогнозирования состояния неоднородной системы – способ оценки ее состояния по полю изображающей точки. Подобное поле представляет собой композицию значений интегрального показателя состояния системы A_{tk} на момент времени t_k. Его подсчитывают как сумму нормированных и взвешенных по величине вклада в состояние системы координат. Для построения поля A_{tk} для всех координат системы φ_1,…. φ_i…… φ_n…составляют экспериментальные основы. Координаты при этом нормируют: φ'_i,…= ... φ_i/…φ_{im}, где … φ_{im}... – предельно допустимое значение координаты, отвечающее границе ОДС, φ_i – измеренное значение в точке экспериментальной основы.

Для получения интегрального показателя требуется весовой коэффициент. Наиболее простой, но не вполне корректный способ его получения – допущение о равных “весах” каждой координаты системы. Фактически координаты изменяются во времени по-разному и их вклад в движение (или изменение) ЭГС также различен. Рационально определять весовые коэффициенты по скорости приближения координаты к границе ОДС. Скорость приближения к границам ОДС координаты φ_i определяет величина (Бондарик, 2012):

$$\mathrm{tg}\alpha_i = \frac{\varphi_{i,t_{k+1}} - \varphi_{i,t_k}}{t_{k+1} - t_k}. \tag{3.3}$$

Состояние системы в какой угодно точке ее пространства в момент времени t_k определяет выражение:

$$A_{tk}.. = \Sigma\, \mathrm{tg}\alpha_i \cdot \varphi'_{itk}, \tag{3.4}$$

где φ'_{itk} – нормированное значение координаты φ_{itk}…..

Для каждой точки экспериментальной основы подсчитывают значения A_{tk} и строят поле интегрального показателя, представленного в виде изолиний показателя. Анализ структуры поля позволяет выделить области аномалий, имеющие максимальные (наиболее неблагоприятные) значения показателя состояния ЭГС. Сравнение этих значений с предельно допустимыми значениями координат позволяет дать оценку состояния ЭГС в пространственном отношении. Она, естественно, будет различной для разных областей поля состояний и соответственно для разных областей ЭГС должны быть выработаны различные управляющие решения.

Качество диагностики состояния любой ЭГС зависит от того, насколько обоснованно установлена граница ОДС, т.е. насколько верно найдены (приняты, вычислены) предельно допустимые значения каждой из координат ЭГС, входящих в набор. При этом принципиально важно, чтобы граница ОДС (предельно допустимые величины координат) была задана с учетом критерия эффективности функционирования ЭГС, с учетом его социального и экологического аспектов, а затем только технического и экономического аспектов.

Для прогнозирования состояний неоднородных систем можно опираться на результаты анализа семейства моделей полей некоторой координаты, отвечающей различным моментам времени. Анализ изменения структуры поля координаты в течение промежуточного времени, отвечающего начальному и конечному моментам времени исследуемых моделей, позволяет осуществить прогнозирование структуры поля на заданное время. При использовании поля интегрального показателя A_{tk} для всех точек экспериментальной основы подсчитывают значения его разностей:

$$\Delta A = A_{tk} - A_{tk-1}. \qquad (3.5)$$

Затем строят поле ΔA и анализируют его структуру. Определяют места размещения аномалий поля и величины экстремальных значений интегрального показателя. Положительные аномалии поля отвечают областям наибольших скоростей изменения состояния ЭГС за интервал времени t_{k-1}.- t_k. Их размещение в пространстве позволяет разработать способы управления ЭГС, учитывающие “пространственный аспект” скорости изменения состояний системы.

После принятия и реализации управляющих решений операции диагностирования и прогнозирования состояний системы повторяют с учетом произведенных изменений в структуре и (или) режиме движения

ПТС, изменений отдельных компонентов ЭГС, а также с учетом возмущающих взаимодействий, влияющих на ее движение (Бондарик, 2012).

3.1.3. Рекомендации по управлению состоянием ЭГС. На основе вышеописанных прогнозных оценок состояний однородных или неоднородных ЭГС разрабатывают *рекомендации по управлению ЭГС*. Согласно Г.К.Бондарику (2012), в одних случаях при их разработке можно ограничиться данными о прогнозных оценках состояния отдельных участков территории, занимаемой ЭГС, наиболее интенсивно изменяющихся во времени. В других случаях потребуются решения, касающиеся функционирования всей ЭГС. Учитывая сложность структуры ЭГС и ее свойств, использование формальных приемов разработки рекомендаций по управлению (реализуются в рамках блока АСУ) может быть эффективным только в отдельных случаях.

Согласно Г.К.Бондарику (2012), рекомендации должны быть ориентированы на корректировку управляющих взаимодействий в наиболее неблагоприятных областях ЭГС высших уровней и в пределах наиболее опасных для устойчивости сооружений зонах элементарных ЭГС. Они должны содержать:

− результаты диагностирования текущего состояния ЭГС;

− оценку предполагаемой скорости движения ЭГС, приближения ее траектории к границам ОДС при существующем характере управления ЭГС;

− прогнозы времени выхода траектории ЭГС за границу ОДС;

− сведения о процессе, свойства которого рекомендуется откорректировать в ходе управления (причины процесса, условия развития, проявления, интенсивность, режим).

При необходимости в них должны быть указаны предложения по корректировке подсистемы слежения мониторинга в пространственном аспекте, а также в отношении режима ее функционирования и способов измерения координат ЭГС.

На основе рекомендаций по управлению принимаются и реализуются управляющие решения, выполняется выработка критериев эффективности функционирования ЭГС и стратегии оптимального управления, а также дается оценка эффективности принятых ранее управляющих решений и предложения по их корректировке, если решения оказались неэффективными. Подобное наиболее вероятно в том случае, когда прогноз состояния ЭГС показывает, что резервы ЭГС

к адаптации исчерпаны – представляющая точка в ближайший прогнозируемый момент времени может выйти за пределы ОДС.

После принятия и реализации управляющих решений операции диагностирования и прогнозирования состояний системы продолжают с учетом произведенных изменений в структуре и (или) режиме движения ПТС, изменений отдельных компонентов ЭГС, а также с учетом возмущающих взаимодействий, влияющих на движение ЭГС.

3.2. Описание природных эколого-геологических систем

3.2.1. Описание ЭГС как системы. С позиций системного анализа описание природных ЭГС заключается в характеристике их состава, структуры, состояния и свойств – т.е. в построении её *концептуальной модели* и комплексной оценке (Заиканов, Минакова, 2008).

Разработка концептуальной модели ЭГС является начальным этапом в процедуре математического моделирования экосистем. Концептуальная или содержательно-смысловая модель включает перечень основных переменных и параметров экосистемы. Концептуальная модель является инструментом содержательного описания ЭГС в рамках конкретных целей моделирования. Для каждой экосистемы или ЭГС можно разработать достаточно широкий спектр концептуальных моделей, которые учитывают различные компоненты экосистемы и связи между ними. Невозможно дать общие рекомендации относительно разработки того или иного вида концептуальной модели. Это зависит от задачи моделирования, типа ЭГС, класса модели и в некоторой степени также от индивидуальных предпочтений разработчика математической модели экосистемы.

Процедуру разработки математической модели ЭГС необходимо начать с создания её концептуальной модели, иллюстрирующей основные представления разработчика об экосистеме (Мешалкин и др., 2016).

В общем случае хорошее знание предметной области и целей математического моделирования способствуют разработке правильной концептуальной модели ЭГС. При разработке концептуальных моделей ЭГС необходимо ответить на следующие вопросы:

• Какие элементы и процессы в реальной ЭГС являются важными для целей математического моделирования?

• Что должно быть результатом математического моделирования?

• Какие математические соотношения или математические операторы следует использовать для разработки математической модели рассматриваемой ЭГС?

Чаще всего концептуальная модель ЭГС реализуется в виде блок-схемы. При составлении блок-схем используется понятие «черного ящика», когда уравнения модели формулируются в терминах «вход – выход». Сами передаточные функции черных ящиков не известны и не используются разработчиком модели. Такие модели могут быть использованы только для известных математических соотношений между входом и выходом. Для других наборов данных будут использоваться другие соотношения между входом и выходом. «Белый ящик» учитывает конкретный вид передаточных функций отдельных блоков. На практике в большинстве случаев используются смешанные «серые ящики». Среди них выделяют следующие (Мешалкин и др., 2016):

1. Модели ЭГС типа «вход - выход». Эти модели лишь слегка отличаются от блок-схем указанием конкретных численных данных на входах и выходах модельных блоков.

2. Матричные модели ЭГС. Матричные модели описывают перекрестные связи между компонентами ЭГС. При наличии связи между *i*-м и *j*-м компонентами системы элемент матрицы $a,j = 1$.

3. Взвешенные, ориентированные (направленные) графы, аналогичные схемам информационных потоков, используемых в программировании.

4. Двудольные графы. Знаки плюс и минус в двудольных графах используются для обозначения положительных и отрицательных воздействий компонентов экосистемы друг на друга.

5. Энергетические цепи или энергетические графы экосистем. Они предназначены для описания термодинамических переменных, обратных связей и потоков энергии в системе.

В соответствии с этим, для изучаемой ЭГС можно выделить множество независимых переменных состава (a_{ki}), строения (a_{kj}), состояния (a_{ks}) и свойств (a_{kc}) ЭГС, которые в полной мере её характеризуют:

$$\text{ЭГС} = f(a_{ki}, a_{kj}, a_{ks}, a_{kc}). \qquad (3.6)$$

Рассмотрим эти переменные. В любом случае представление независимых переменных состава, строения, состояния и свойств ЭГС предполагает использование некоей идеализации данной ЭГС, или её модели. Конкретизация модели состава природной сухопутной

(континентальной) эколого-геологической системы показана на рис. 3.4.

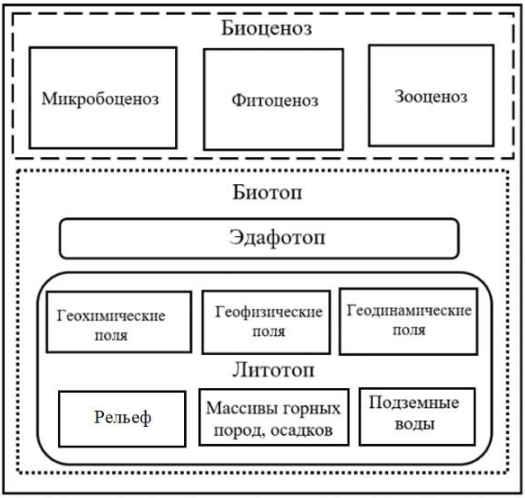


Рис. 3.4. Модель состава природной сухопутной (континентальной) эколого-геологической системы

Здесь, в отличие от схемы В.Т.Трофимова (см. выше рис. 1.5), введены геодинамические поля, обусловливающие те или иные геологические процессы и явления, а также исключены внешние воздействия на ЭГС.

Рельеф же в обычном понимании представляет собой формы поверхности, т.е. является скорее геометрическим понятием, а не вещественным или энергетическим. В то же время в геоморфологии существуют понятия «энергия рельефа» или «энергетический потенциал рельефа территории»; под энергией рельефа понимают потенциальную энергию, запасённую в формах рельефа, которая используется в дальнейшем для развития и обеспечения динамики процессов рельефообразования. По сути, эта энергия является энергией геодинамических экзогенных процессов, которая учитывается в характеристике геодинамических полей ЭГС. Поэтому на наш взгляд её не следует выделять отдельно.

Таким образом литотоп в ЭГС состоит из пяти вещественно-энергетических компонентов: массивов горных пород,

распространенных в них геохимических, геофизических и геодинамических полей, а также подземных вод.

Как видно из схемы на рис.3.3. континентальная природная ЭГС состоит из двух крупных подсистем – биотопа и биоценоза. Биотоп в свою очередь состоит из эдафотопа и литотопа, а биоценоз – из микробо-, фито- и зооценоза. Человеческий социум выведен из состава природной ЭГС, потому что как только он появляется, возникают техногенные составляющие и техногенные подсистемы; при этом ЭГС перестает быть собственно природной.

Наряду с этим, ЭГС как система обладает и системными свойствами, проявляющимися в её эмерджентности и относящимися к интегральным характеристикам ЭГС. Оценка эмерджентности ЭГС – важнейшая, но не простая задача. Эмерджентность ЭГС, как и экосистемы в целом, проявляется прежде всего в наличии у ЭГС гомеостаза - способности этой системы к саморегуляции при изменении условий окружающей среды или внешних воздействиях, обеспечивающей ее равновесие и функционирование (см. гл. 1.4). Исходя из этого эмерджентные свойства ЭГС могут характеризоваться различными показателями стабильности (*St*) или равновесности эколого-геологической системы, а также параметрами её устойчивости (резистентной U_{sr} или упругой U_{su}).

Таким образом, математическое описание свойств ЭГС представляет собой набор частных (a_{kc}) и интегральных (St, U_{sr}, U_{su}) характеристик.

В итоге для математического количественного описания ЭГС необходимо располагать массивом данных (M), отражающих состав, строение, состояние и свойства ЭГС:

$$M \in \{a_{ki}, a_{kj}, a_{ki,t}, a_{kj,t}, a_{kc}, St, U_{sr}, U_{su}\}, \qquad (3.7)$$

где a_{ki}, a_{kj}, $a_{ki,t}$, $a_{kj,t}$, a_{kc}, – переменные (показатели) состава, строения, состояния, свойств, соответственно; St, U_{sr}, U_{su} - параметры эмерджентных характеристик (стабильности, резистентной и упругой устойчивости), соответственно.

Анализ экспериментальных данных, характеризующих изучаемую ЭГС, позволяет определить или идентифицировать данную ЭГС с целью построения ее математической модели. Идентификация экосистем — это научно-исследовательская операция разработки оптимальной в определенном смысле математической модели реальной экосистемы по экспериментальным экоданным о ее входных и

выходных переменных. Идентификация экосистемы предусматривает решение следующих основных задач (Мешалкин и др., 2016):

1) выбор класса математических моделей (статические, динамические, детерминированные, вероятностные, непрерывные, дискретные);

2) выбор вида математического отображения (конечные линейные, нелинейные, дифференциальные и другие уравнения);

3) выбор класса и типа входных переменных при идентификационных экспериментах на реальных экосистемах;

4) выбор критериев соответствия или адекватности математической модели реальной экосистеме;

5) выбор типа задачи идентификации (параметрическая, непараметрическая или функциональная идентификация) и разработка соответствующего алгоритма оптимального решения задачи идентификации.

3.2.2. Описание компонентов ЭГС включает в себя характеристику всех компонентов данной ЭГС, т.е. их состав, структуру, состояние и свойства.

Описание состава ЭГС предполагает количественную характеристику компонентов, отражающих состав системы: для литотопа – это химико-минеральный состав пород (в %); для эдафотопа – химико-минеральный состав почв (в %); для микробоценоза – видовой состав микроорганизмов и их количественное содержание (в %); для фито- и зооценозов – соответствующий видовой состав растений или животных и их количественное содержание в пределах данной ЭГС (в %).

Математически это реализуется в виде базы данных состава ЭГС, в которой содержатся переменные ее состава a_{ki}, где индекс k обозначает компонент ЭГС (фитоценоз, литотоп и т.д.), а индекс i обозначает количественный показатель состава данного компонента.

Описание структуры ЭГС предполагает количественную характеристику строения и структуры ЭГС как единой системы, отражающую: 1) её структурные особенности как единого целого (системообразующие связи); 2) структуру отдельных компонентов ЭГС. Графическое представление строения ЭГС может быть реализовано на основе теории графов – каждому виду графа может соответствовать свой вид связи и её «удельный вес».

Описание системообразующих структурных связей ЭГС представляет собой наиболее сложную задачу (рис.3.5). Так, например, модель структуры природной континентальной ЭГС, показанная на рис.

3.5, предполагает знание множества структурных взаимосвязей между отдельными компонентами ЭГС, которые в целом и определяют её структурные особенности. Между пятью компонентами ЭГС существует не менее десяти типов таких связей. При этом, наряду с указанием этих общих взаимосвязей, необходима и количественная информация об этих взаимосвязях, а также общем «удельном» их весе в системе в целом.

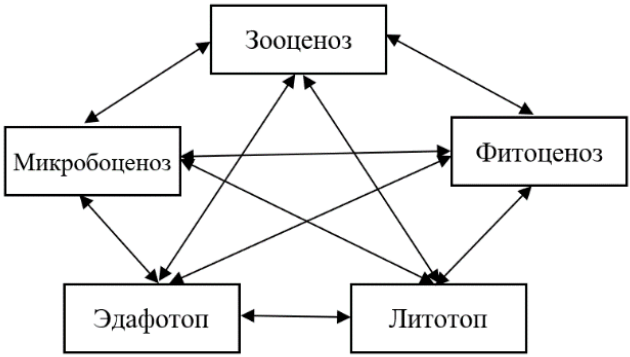


Рис. 3.5. Модель структуры природной ЭГС. Стрелки обозначают структурные взаимосвязи между подсистемами ЭГС.

Кроме этого необходимо определить строение и структуру отдельных компонентов ЭГС: для природного литотопа – это строение и структурные связи в горных породах и осадках (преобладающий вид в %, прочность связи и т.п.); для эдафотопа – строение почвы и структурные связи в ней (преобладающий вид в %, прочность связи); для микробоценоза – строение микробоценоза (пространственное распространение сообществ в %); для фито- и зооценозов – их пространственное строение – распределение популяций в пределах пространства данной ЭГС (в %).

Математически описание строения и структуры ЭГС реализуется в виде базы данных параметров ее строения, в которой содержатся переменные ее строения a_{kj}, где индекс k обозначает компонент ЭГС (фитоценоз, литотоп и т.д.), а индекс j обозначает количественный показатель строения данного компонента.

Описание состояния ЭГС. Под состоянием системы понимается её характеристика на данный момент её *функционирования*. Поскольку система описывается определенным комплексом существенных

переменных и параметров, то для того, чтобы выразить состояние системы, нужно определить значения, принимаемые ими в рассматриваемый момент времени (t). Для характеристики состояния природной ЭГС необходимо установить количественные значения основных параметров, которые и будут отражать её состояние на данный момент времени (t).

Таким образом, характеристиками состояния ЭГС будут являться все вышеперечисленные переменные и параметры состава (a_{ki}) и строения (a_{kj}) ЭГС на данный момент времени (t) т.е. $a_{ki,t}$ и $a_{kj,t}$.

Описание свойств ЭГС. Свойства ЭГС проявляются в её взаимодействиях с другими системами и с внешней средой. Поскольку природа этих взаимодействий может быть самой разной (механической, физической, химической, биологической и т.п.), то и свойства ЭГС можно подразделять по их природе. Кроме того, для ЭГС можно говорить об интегральных свойствах, отражающих особенности системы в целом, и об дифференциальных или частных свойствах, отражающих свойства какого-либо одного компонента ЭГС, например, свойства почв или свойства фитоценоза.

Математически описание частных свойств ЭГС реализуется в виде базы данных свойств ЭГС или её компонентов, в которой содержатся переменные ее свойств a_{kc}, где индекс k обозначает компонент ЭГС (фитоценоз, литотоп и т.д.), а индекс c обозначает количественный показатель свойств данного компонента. При этом свойства системы в целом не сводятся к сумме свойств её компонентов.

3.2.3. Оценка состояния литотопа данной ЭГС сводится к характеристике: 1) геоморфологических условий; 2) состава и строения грунтового массива; 3) природных и техногенных геологических процессов; 4) гидрогеологических условий; 5) геокриологических условий. Рассмотрим подробнее какими показателями проводится эта оценка.

1. ***Геоморфологические условия литотопа.*** Оценивается абсолютная высота над уровнем моря, а также классификационный тип рельефа: макро-, мезо- и микрорельеф (Метод. рекомендации…, 2005).

Разнообразие сочетаний форм ***макрорельефа*** сводится к четырем морфолого-генетические типам: - горный, или структурно-тектонический (подтипы высокогорный, альпийский, среднегорный, низкогорный, сельговый (в понижениях, занятых болотами и озёрами));

- структурный, или пластовый (подтипы – плоскогорья, плато, куэсты); - скульптурный, или эрозионный тип рельефа включает равнины, образованные линейной речной эрозией, плоскостным

смывом, абразией; - аккумулятивный, или насыпной. По высотным уровням равнины делят на низменности (ниже 200 м) и плато (выше 200 м).

Мезорельеф – средние формы земной поверхности, занимающие площади в сотни и тысячи м^2 с колебаниями относительных высот 1…100 м (иногда более). Мезорельеф является фактором перераспределения агроклиматических ресурсов и формирования микроклимата; каркасом геохимического ландшафта, определяющим направленность и интенсивность геохимических процессов.

При расчленении территорий в системе междуречий выделяются следующие элементы мезорельефа: водоразделы, склоны, подошвы склонов, шлейфы склонов, днища межсклоновых западин, днища оврагов и балок, террасы, уступы и склоны террас. Среди мезоформ выделяют:

Плато – равнинные поверхности, ограниченные более или менее глубокими выемками гидрографической сети.

Террасы – ровные поверхности, с одной стороны граничащие с более повышенными элементами рельефа, с другой – более или менее резко ограниченные понижением (речной долиной, балкой, озерной впадиной и т.д.).

Депрессионные равнины – вогнутые ровные участки, окруженные поверхностями боле высокого уровня (днища котловин, приморские и приозерные береговые равнины, подгорные шлейфы и др.).

Холм – возвышенность округлых очертаний, не выше 200 м относительной высоты, с округлым основанием, и склонами, обращенными на все стороны.

Увал – вытянутое в одном направлении мысообразное возвышение высотой до 200 м, большей частью присоединенное к более крупной форме рельефа или образующее с несколькими другими увалами при смыкании наиболее высоких частей общий водораздельный узел.

Гряды, валы – узкие, длинные возвышения, чаще всего ориентированные в одном направлении, параллельные друг другу.

Крупные барханы – песчаные навеянные ветром холмы полулунной формы (в плане).

Крупные дюны – песчаные холмы, навеянные ветром, располагающиеся параллельно берегу реки ли моря.

Гора – возвышенность, превышающая 200 м относительной высоты, резко выступающая на местности и со сравнительно небольшим основанием.

Котловины – замкнутые или почти замкнутые пониженные участки земной поверхности. Впадины – обширные по площади

участки поверхности, пониженные относительно окружающей территории.

Долины – сильно вытянутые в длину сравнительно узкие углубления в рельефе, иногда прямые, большей частью извилистые, открытые в одном конце и обладающие общим наклоном ложа в этом направлении.

Микрорельеф – мелкие формы земной поверхности, занимающие незначительные площади в ЭГС (единицы – сотни м^2) с колебаниями относительных высот до 1 (иногда до 1,5) м. Разграничение форм микрорельефа от мезорельефа не всегда достаточно отчетливо и проводится с некоторой условностью. Микрорельеф ЭГС перераспределяет тепло и влагу на небольших расстояниях, является основным фактором дифференциации почвенного покрова на уровне микроЭГС, поэтому с видом микрорельефа и степенью его выраженности связаны многие вопросы управления ЭГС. Классификация микрорельефа ЭГМ представлена в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Классификация микрорельефа (Метод. рекомендации…, 2005)

Вид микрорельефа	Фактор образования	Основные формы
Просадочный	Суффозионный Термокарстовый	Мелкие плоские понижения на равнинах: блюдца, западины, конические воронки, просадочные трещины
Развевания (выдувания)	Эоловый	Чаши, котловины, ямы выдувания и др.
Насаженный	Зоогенный Эоловый Криогенный	Муравейники, термитники, кротовины, сурчины Валки, гривки Полигоны
Выпучивания	Криогенный Солифлюкционный	Бугры Солифлюкционные террасы
Фитогенный	Фитогенный Ветровальный	Кочки, прикорневые повышения, седловины Бугры, ямы
Эрозионный	Эрозионный Оползневый	Струйчатые размывы, ложбины, лывины Чаши, бугры

Кроме того, всегда выделяются *гидрографические* характеристики рельефа (водоразделы, склоны, гидрографическая сеть).

Наряду с этим проводится оценка ***расчлененности*** рельефа территории в пределах ЭГС (табл.3.3).

Количественными показателями расчлененности рельефа являются:

Коэффициент расчлененности территории К характеризует горизонтальное расчленение рельефа: $K = L / S$, где L – длина долинной и балочной сети (км), S – площадь территории (км^2). Этот показатель неприменим для районов с нелинейным расчленением.

Таблица 3.3

Ступени шкалы относительных высот для карт расчлененности рельефа (Метод. рекомендации…, 2005)

Ступень	Относительная высота, м	Ступень	Относительная высота, м
1	<5	5	50-100
2	5-10	6	100-200
3	10-25	7	200-300
4	25-50	8	300-500

Ширина водосборного бассейна a (среднее расстояние между соседними тальвегами) эрозионной сети определяется по обратной формуле: $a = S/L$. Для районов с преобладанием нелинейного расчленения (озерного, холмистого, бугристого, западинного и др.) используют формулу: $a = S / k$, где k – общее число понижений (озер, западин и др.)

С коэффициентом расчлененности территории и шириной водосборного бассейна связана *средняя длина склонов l*: $l = 2K = 0{,}5a$.

Классификация склонов по крутизне указана в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Классификация склонов по крутизне (Метод. рекомендации…, 2005)

Категория поверхностей		Крутизна ската (α)	Уклон (tg α)
Плоские поверхности		до 1°	Менее 0,0175
Склоны	Очень пологие	1…2°	0,0175…0,0349
	Пологие	2…3°	0,0349…0,0524
	Слабопокатые	3…5°	0,0524…0,0875
	Покатые	5…8°	0,0875…0,1405
	Сильнопокатые	8…10°	0,1405…0,1763
	Крутые	10…15°	0,1763…0,2679
	Очень крутые	15…20(30)°	0,2679…0,3640 (0,5774)
	Чрезвычайно крутые	20(30)…45°	0,3640 (0,5774)…1,000
	Обрывистые	45…70°	1,000…2,7475
	Отвесные	70…90°	Более 2,7475

В целом каждая ЭГС в системе эколого-геологической оценки рельефа должна получить следующие характеристики: приуроченность

к форме мезорельефа (увал, холм, лощина и т.д.); приуроченность к элементу мезорельефа (вершина, склон, днище и т. Д.); приуроченность к определенной части склона и его форме (нижняя, средняя или верхняя часть прямого, выпуклого или вогнутого склона); крутизна склона; форма в плане (характер водосбора: рассеивающий, собирающий, прямой); экспозиция (теплая, холодная, нейтральная); расстояние от водораздела; микрорельеф.

Для всей оцениваемой территории ЭГС устанавливается следующий комплекс показателей оценки: морфолого-генетический тип макрорельефа; комплекс типов мезорельефа (по происхождению); категория типов мезорельефа (по особенностям рельефа и литологии); горизонтальная расчлененность территории (коэффициент расчлененности, средняя ширина водосбора, средняя длина склонов); вертикальная расчлененность; тип линейного расчленения по составу гидрографической сети и глубине вертикального расчленения.

2. ***Состав и строение грунтового массива*** характеризуется литолого-петрографическим и химико-минеральным составом грунтов и геологическим строением.

Для загрязненных литотопов важнейшими характеристиками являются различные *эколого-геохимические показатели*: содержание токсикантов (тяжелых металлов, бензапирена, радионуклидов и т.п.), суммарный показатель загрязнения (Z_c), ПДК, ОДК и т.п.

Состав грунтов указывается в соответствии с классификацией ГОСТ 25100-2011.

Строение массива характеризуется мощностью грунтов, условиями их залегания, трещиноватостью (блочностью) и иными характеристиками, оцениваемыми для массивов грунтов.

3. ***Природные и техногенные геологические процессы*** в пределах данной ЭГС предполагают оценку наличия ЭГП и их характеристику.

Оценка ***линейной эрозии***: Степень повреждения территории современными формами линейной эрозии характеризуется коэффициентами расчлененности территории оврагами, овражности и плотностью оврагов.

Коэффициент расчлененности территории оврагами – суммарная протяженность оврагов на 1 км2 площади. По этому показателю различаются слабая (менее 0,25 км/км2), средняя (0,25-0,50), сильная (0,50-0,75) и очень сильная (более 0,75) степени развития эрозии. Расчлененность овражной сетью определяется также по среднему расстоянию между соседними оврагами (по средней ширине

водосборного овражного бассейна): более 1000 м – слабая, 1000…500 м – средняя, 500…250 м – сильная, менее 250 м – очень сильная.

Коэффициенты овражности – отношение площади оврагов к общей площади территории (га/км2). Плотность оврагов – число оврагов на 1 км^2.

Плотность оврагов менее 0,25 шт./км2 соответствует слабой степени развития линейной эрозии, 0,25…0,5 – средней, 0,5…0,75 – сильной, более 0,75 – очень сильной.

Глубину расчленения и стадии развития процессов линейной эрозии (реликтовые и/или современные формы) характеризует тип линейного расчленения. По глубине расчленения различают слабоврезанные (5…10 м), средневрезанные (10…25 м) и глубоковрезанные (25…50 м) эрозионные системы; по составу элементов – ложбинно-лощинные, ложбинно-лощиннобалочные, лощинно-балочные, овражно-лощинно-балочные и др.

Оценка ***ветровой эрозии*** почв в пределах данной ЭГС рассчитывается по каждому массиву (полю) с помощью уравнения ветровой эрозии почв, предложенного Е.И. Шиятым:

$$E = \frac{0{,}72 Q_{ks} D U^3 t}{Q_k H B} \tag{3.7}$$

где: E – потенциальная опасность ветровой эрозии почв, т/га в год; Q_{ks} – эродируемость почвы при определенных значениях комковатости и количества стерни на поверхности (г); Q_k – эродируемость почвы при определенном значении комковатости без стерни на поверхности почвы (г), см. ниже; D – дистанция эрозионного пробега воздушного потока, м; U – средняя скорость ветра во время пыльных бурь на высоте флюгера, м/с; t – средняя продолжительность пыльных бурь за год, ч; H – расстояние от наветренной стороны массива (поля), на котором концентрация мелкозема в пылевоздушном потоке достигает максимума при определенном значении скорости ветра, м; B – ширина массива (поля, рабочего участка) при ориентации поперек господствующего направления ветра, м. Величины U и t определяются по метеорологическим справочникам для региона.

Каждый показатель уравнения ветровой эрозии почв предварительно рассчитывается по следующей методике.

1. *Эродируемость* (Q_{ks}, г) почв ветром зависит от комковатости верхнего слоя и количества растительных остатков на

поверхности почвы. Так, например, для полей зерновых культур величина Q_{ks} рассчитывается по формуле:

$$Q_{ks} = 10^{(a-bk-cS)}, \quad (3.8)$$

где: k – процентное содержание в слое 0-5 см сухих фракций крупнее 1 мм в диаметре (комковатость); S – количество пожнивных остатков пшеницы, шт/м^2; a, b, c – коэффициенты, значения которых зависят от гранулометрического состава почв (табл. 3.5). Величина Q_k определяется по этой же формуле при S=0.

Таблица 3.5

Коэффициенты эродируемости почв ветром (Метод. рекомендации…, 2005)

Гранулометрический состав почв	Коэффициенты эродируемости		
	a	*b*	*c*
Глины и тяжелые суглинки	3,6349	0,0319	0,0039
Средние суглинки	3,3895	0,0294	0,0030
Легкие суглинки и супеси	3,3087	0,0285	0,0039

2. *Комковатость* (k) в зависимости от основной обработки почвы (пар, зябь) определяется по результатам анализа гранулометрического состава почв. Используя показатели гранулометрического состава почв, можно определить расчетную связность почвенного комка по уравнению:

$$Z = 34,7+0,9X1-0,3X_2-0,4X_3, \quad (3.9)$$

где Z – связность почвенного комка, %; X_1 – содержание глинистой фракции (<0,001мм), %; X_2 – содержание песка мелкого (0,05-0,25 мм), %; X_3 – содержание песка крупного (0,25-3 мм), %.

По показателю связности почвенного комка Z и агрофона системы обработки почвы определяется расчетная комковатость (k) почвы (табл. 3.6).

3. Дистанция ветроэрозионного пробега воздушного потока D определяется по уравнению:

$$D = \frac{B \cdot cos\beta}{n} - 10 \cdot h, \quad (3.10)$$

Таблица 3.6

Показатели комковатости почв в зависимости от связности почвенного комка (Метод. рекомендации…, 2005)

Агрофон обработки почвы	Связность (Z), %						
	10	20	30	40	50	60	70
	Комковатость (k), %						
Пар	8	16	24	31	40	47	50
Зябь	11	21	30	40	50	60	70

где: B – ширина массива (поля) при ориентации его длины поперек господствующего направления ветра (при ориентации поля вдоль направления ветра параметр «В» равен длине поля); β - угол отклонения господствующего эрозионноопасного ветра от перпендикулярного к направлению длины массива (поля). Господствующее направление ветроэрозионных ветров определяется по метеорологическим справочникам, данным местных метеорологических станций; n – число ветроломных барьеров на массиве (поле) – кулис, лесных полос или полос сельскохозяйственных культур при полосном их размещении; h – высота кулис, лесных полос или стерни (при полосном размещении культур), метры.

4. Расстояние от наветренной стороны массива (поля) на котором концентрация мелкозема в пылевоздушном потоке достигает максимума (Н, м) вычисляется по уравнению:

$$H = \frac{10(Q_{ks} - 11160)}{I}, \tag{3.11}$$

где: Q_{ks} – эродируемость почвы; I – темп нарастания величины переноса мелкозема с дистанцией пробега воздушного потока (г/м) определяется по уравнению:

$$I = 10^{(m-ek-fS)}, \tag{3.12}$$

где: k – комковатость, %; S – количество пожнивных остатков, шт/м^2; m, e, f – коэффициенты, значения которых зависят от гранулометрического состава почвы (табл. 3.7).

Таблица 3.7

Значения коэффициентов *m,e,f* (Метод. рекомендации…, 2005)

Группы механического состава	Параметры		
	m	***e***	***f***
Глины, тяжелые и средние суглинки	3,0409	0,0272	0,0036
Легкие суглинки, супеси	3,1334	0,0214	–

4. Развитие процессов ***заболачивания и подтопления оценивается*** с помощью комплекса количественных параметров, принятых в инженерной геодинамике.

На заболачиваемых и подапливаемы территориях формируются гидроморфные почвы и торфа. Выделяют три группы и шесть степеней гидроморфизма почв. 1. Автоморфные: а) собственно автоморфные; б) автоморфные оглеенные внизу или на контакте с породой. 2. Полугидроморфные (периодически испытывающие анаэробиозис): в) слабоглееватые; г) глееватые; д) глеевые (с отчетливо выраженным глеевым горизонтом). 3. Гидроморфные (постоянно переувлажненные): е) болотные (Метод. рекомендации…, 2005).

Степень подтопления эдафотопов с учетом климатических условий территорий ЭГС указана в табл. 3.8.

5. ***Гидрогеологические условия*** в пределах данной ЭГС включает принадлежность к гидрогеологическому бассейну, модуль подземного стока, химизм грунтовых вод, водоносные горизонты, их мощность, дебит, общую оценку многолетней динамики этих показателей.

Для каждого ЭАА оцениваются следующие показатели.

Глубина залегания грунтовых вод оказывает влияние на почвообразование, водный режим и влагообеспеченность почв: более 6 м – автоморфные условия, 3…6 м – полугидроморфные условия, менее 3 м – гидроморфные условия, в т. Ч. Менее 1,5 м – сильногидроморфные условия.

Залегание пресных грунтовых вод выше 80 см неблагоприятно для всех полевых культур и большинства трав, на уровне 80…100 см – благоприятно для большинства трав, некоторых плодовых кустарников (смородины, малины), овса, гороха, льна, но исключает возделывание плодовых культур; 100…120 см – оптимальна для большинства полевых культур, но неблагоприятна для плодовых насаждений; 120…140 см – оптимальна для косточковых плодовых культур,

винограда; 140…200 см – оптимальна для семечковых плодовых, теплолюбивых косточковых (абрикоса, персика).

Таблица 3.8

Степень подтопления земель с учетом типов режимов почвообразования зональных почв (Метод. рекомендации…, 2005)

Природные типы гидрогеологического режима	Степень подтопления при глубинах грунтовых вод, м				
	неподтопленные	слабое	среднее	сильное	очень-сильное
Лесостепная зона – черноземы выщелоченные выщелоченные и оподзоленные					
Автоморфный	6-7	5-6	4-5	3-4	2-3
Субавтоморфный	5-6	4-5	3-4	2-3	1-2
Автоморфно-гидроморфный	4-5	3-4	2-3	2	1-2
	Лугово-черноземные почвы				
Субгидроморфный	3	2-3	1-2	1	1
Степная зона - черноземы и темнокаштановые почвы					
Автоморфный	9-10	8-9	7-8	6-7	5-6
Субавтоморфный	8-9	7-8	6-7	5-6	4-5
Автоморфно-гидроморфный	6-7	5-6	4-5	3-4	2-3
	Черноземно-луговые почвы				
Субгидроморфный	4-6	3-4	3	2	1
	Лугово-черноземные почвы				
	3-4	2-3	1-2	1	1
Сухостепная зона – каштановые почвы					
Автоморфный	8-9	7-8	6-7	5-6	4-5
Субавтоморфный	7-8	6-7	5-6	4-5	3-4
Автоморфно-гидроморфный	6-7	5-6	4-5	3-4	2-3
	Каштановые луговые почвы				
Субгидроморфный	4-6	3-4	3	2	21
	Лугово-каштановые почвы				
Гидроморфный	3-4	2-3	1-2	1	> 1
Полупустынная зона - светлокаштановые, комплексные солонцеватые почвы					
Автоморфный	7-8	6,5-7	6-6,5	5,5-6	5-5,5
Субавтоморфный	6-7	5,5-6	5-5,5	4,5-5	4-4,5
Автоморфно-гидроморфный	5-6	5-5,5	4,5-5	4-4,5	3,5-4
Субгидроморфный	4-5	4-4,5	3,5-4	3-3,5	2,5-3
Гидроморфный	3-4	3-3,5	2,5-3	2-2,5	1-2
Пустынная зона –бурые почвы					
Автоморфный	7-8	6-7	5-6	4-5	3-4
Субавтоморфный	6-7	5-6	4-5	3-4	2-3
Автоморфно-гидроморфный	5-6	4-5	3-4	2-3	1-2
	Солонцеватые				
Субгидроморфный	4-5	3-4	2-3	1-2	< 1
	Засоленные				
Гидроморфный	3-4	2-3	1-2	1	< 1

Проточность грунтовых вод оказывает благоприятное действие на растения, т. К. в этих условиях они не испытывают экологического переувлажнения при расположении корней в зоне капиллярной каймы благодаря достаточной обеспеченности кислородом и отсутствию условий накопления токсичных продуктов анаэробиозиса в почве. В

застойных грунтовых водах происходит накопление токсичных продуктов анаэробиозиса, что особенно неблагоприятно для многолетних насаждений.

Химический состав грунтовых вод характеризуется: величиной pH, содержанием Fe2+; общим содержанием легкорастворимых солей, соды, Na+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, CO_3^{2-} и HCO_3^- и др.

Водный баланс в пределах ЭГС оценивается на основе уравнения водного баланса за определенный промежуток времени:

$$y = x + a + b, \qquad (3.13)$$

где y – объем выпавших осадков; x – объем поверхностного стока; a – объем воды, пошедшей на транспирацию и испарение; b – объем воды, пошедший на изменение запаса воды в бассейне (изменение уровня грунтовых вод, объема водоемов, влажности почвы).

Для многолетнего периода b стремится к нулю, поэтому: $y \approx x + a$, $1 = x/y + a/y$.

Коэффициент стока σ – доля стока от объема осадков: $\sigma = x/y$, $\sigma \approx 1 - (a/y)$, т. Е. с увеличением объема осадков увеличивается и коэффициент стока.

1. *Геокриологические условия* особенно важны для регионов распространения вечной мерзлоты.

В их оценку входят: тип мерзлотных условий (наличие ММП сплошного или спорадического распространения), глубина залегания ММП, глубина сезонного промерзания, характеристика ММП (вид, льдистость, пучинистость, температура ММП и т.д.), наличие и особенности геокриологических процессов и т.п.

3.2.4. Оценка состояния эдафотопа данной ЭГС сводится характеристике состава, строения и состояния почв на изучаемой территории.

При этом ряд показателей для эдафотопа совпадает с вышеописанными характеристиками литотопа, а именно: рельеф, овражная и ветровая эрозия, гидрогеологические и геокриологические условия. Дополнительно к этим характеристикам добавляются специфические показатели для почв, такие как структура почвенного покрова (СПП), его строение, гранулометрический состав, физические и физико-химические свойства, агроэкологические показатели и т.п.

Под *структурой почвенного покрова* (СПП) конкретной территории ЭГС понимается закономерное пространственное размещение почв, связанное с литолого-геоморфологическими и

геоботаническими условиями. Это понятие относится к небольшим территориям в отличие от планетарно-континентальных и зонально-провинциальных закономерностей размещения почв, для которых главным фактором является биоклиматический. Первичная исходная единица почвенного покрова названа В.М. Фридландом (2020) элементарным почвенным ареалом (ЭПА), под которым понимается участок территории, занятый одной почвой, относящейся к классификационной единице низшего ранга. ЭПА, чередуясь в пространстве, образуют почвенные комбинации (ПК), которые и создают структуру почвенного покрова. СПП можно представить как закономерную совокупность ЭПА, представленную в виде различных почвенных комбинаций (Метод. рекомендации…, 2005).

Химико-минеральный состав почв оценивается также как и для других грунтов. При этом основное внимание уделяется оценке содержания гумуса. Гумусовое состояние почв принято характеризовать содержанием гумуса в пахотном слое, запасами в слое 0 – 100 см, отношением C:N, т.е. обогащенностью азотом, и отношением углерода гуминовых кислот к углероду фульвокислот, в соответствии с которым определяется тип гумуса (табл. 3.9).

Также оценивается состав обменных катионов, кислотно-основное состояние почвы, засоленность (табл. 3.10), обеспеченность почв азотом, калием, фосфором, микроэлементами и др. показатели.

Для загрязненных эдафотопов важнейшими характеристиками являются различные *эколого-геохимические показатели*: содержание токсикантов (тяжелых металлов, бензапирена, радионуклидов и т.п.), суммарный показатель загрязнения (Z_c), ПДК, ОДК и т.п. Опасность загрязнителей определяется согласно табл. 3.11 и иных нормативных документов.

Гранулометрический состав почв характеризуется по классификации Качинского. Почвы с включениями крупнообломочных частиц по содержанию включений размером 1-3 мм делятся на:

- мелкоземистые с количеством включений менее 10 %;
- слабохрящеватые (10-30 %);
- среднехрящеватые (30-50 %);
- сильнохрящеватые (более 50 % включений).

По каменистости (содержание фракции >3 мм) выделяются группы почв:

- некаменистые с содержанием камней менее 0,5 %;
- слабокаменистые (0,5-5 %);
- среднекаменистые (5-10 %);
- сильнокаменистые (более 10 % камней).

Таблица 3.9

Показатели гумусового состояния почв (Метод. рекомендации…, 2005)

Признак	Уровень признака	Пределы значений
Содержание гумуса, %	Очень высокое	>10
	Высокое	6-10
	Среднее	4-6
	Низкое	2-4
	Очень низкое	<2
Запасы гумуса в слое 0-100 см	Очень высокие	>600
	Высокие	400-600
	Средние	200-400
	Низкие	100-200
	Очень низкие	<100
Обогащенность азотом, C:N	Очень высокая	<5
	Высокая	5-8
	Средняя	8-11
	Низкая	11-14
	Очень низкая	>14
Тип гумуса, $C_{г.к.}:C_{ф.к.}$	Гуматный	>2
	Фульватно-гуматный	2-1
	Гуматно-фульватный	1.0-0.5
	Фульватный	<0.5

По характеру скелетной части устанавливают тип каменистости почв: валунные, галечниковые, щебнистые.

Из *физических свойств* почв определяются их плотность, плотность твердой фазы, пористость, коэффициент фильтрации.

Из *физико-химических свойств* определяют: емкость катионного обмена (*CEC*), пределы пластичности, липкость, набухаемость и усадочность, а также влажностные показатели (наименьшую влагоемкость НВ (синонимы: предельная полевая, полевая), полную влагоемкость ПВ (синоним водовместимость); капиллярную влагоемкость (КВ), влажность разрыва капиллярной связи (ВРК), влажность завядания (ВЗ) и максимальную гигроскопическую влажность (МГ).), содержание влаги, доступной для растений, а также кривую водоудерживающей способности (основную гидрофизическую характеристику – ОГХ).

Все указанные характеристики эдафотопа в пределах данной ЭГС отражаются на картах и разрезах, или в трехмерной постановке с помощью ГИС-технологий. Такие двумерные или трехмерные картографические модели отражают пространственную

неоднородность рассматриваемых показателей в пределах данного эдафотопа.

Таблица 3.10

Классификация почв по типу и степени засоления (Метод. рекомендации…, 2005)

Химизм засоления (по соотношению %-ного содержания анионов)	Степень засоления (по сумме солей, %)				
	Нет	Слабая	Средняя	Сильная	Очень сильная (солончаки)
Хлоридный: $Cl^- \geq 2{,}5\ SO_4^{2-}$	Менее 0,03	0,03…0,10	0,10…0,30	0,30…0,60	Более 0,6
Сульфатно-хлоридный: $Cl^- = (2{,}5…1{,}0)\ SO_4^{2-}$	Менее 0,05	0,05…0,12	0,12…0,35	0,35…0,70	Более 0,7
Хлоридно-сульфатный: $Cl^- = (1{,}0…0{,}3)\ SO_4^{2-}$	Менее 0,10	0,10…0,25	0,25…0,50	0,50…0,90	Более 0,9
Сульфатный: $Cl^- \leq 0{,}3\ SO_4^{2-}$	Менее 0,15	0,15…0,30	0,30…0,60	0,60…1,40	Более 1,4
Содово-хлоридный, хлоридно-содовый: $HCO_3^- > Ca + Mg$ (экв), $Cl^- > SO_4^{2-}$	Менее 0,10	0,10…0,15	0,15…0,30	0,30…0,50	Более 0,5
Содово-сульфатный, сульфатно-содовый: $HCO_3^- > Ca + Mg$ (экв), $Cl^- \leq SO_4^{2-}$	Менее 0,15	0,15…0,25	0,25…0,35	0,35…0,60	Более 0,6
Сульфатно- (хлоридно-) гидрокарбонатный щелочноземельный: $HCO_3^- > SO_4^{2-}$ (Cl^-)	Менее 0,15	0,15…0,30	0,30…0,50	Не встречаются	

Таблица 3.11

Показатели для определения класса опасности химического вещества и вещества соответствующих классов опасности (ГОСТ 17.4.1.02-83)

Показатели	Нормы для классов опасности		
	I	II	III
Токсичность, $ЛД_{50}$*	менее 200	200 - 1000	более 1000
Персистентность в почве, мес.	более 12	6 -1 2	менее 6
ПДК в почве, мг/кг	менее 0,2	0,2 - 0,5	более 0,5
Миграционная способность	Есть	Слабая	Нет
Персистентность в растениях**, мес.	более 3	3 - 1	менее 1
Влияние на пищевую ценность сельхозпродукции	Сильное	Умеренное	Нет
Вещества	As, Cd, Hg, Se, Pb, F, бензопирен	B, Co, Ni, Mo, Sb, Cr	Ba, V, W, Mn, Sr, ацетофенол

Пример двумерной карты показан на рис. 3.6. На ней отчетливо выделяются зоны сильного переуплотнения (>1.5 г/см^3). Эти зоны в основном охватывают часть склона вблизи реки и вблизи дорог, что связано с антропогенным воздействием и более сильно выраженными

процессами осолонцевания. Причем переуплотнение идет по всему профилю практически с поверхности.

Кроме того, важными параметрами эдафотопа являются ***водный и тепловой режим*** почв. Выделяют следующие типы водного режима почв: мерзлотный, водонасыщающий (водозастойный), периодически водонасыщающий, промывной, периодически промывной, промывной сезонно-сухой, непромывной, аридный (сухой), выпотной, десуктивно-выпотной, паводковый, амфибиальный, ирригационный, осушительный.

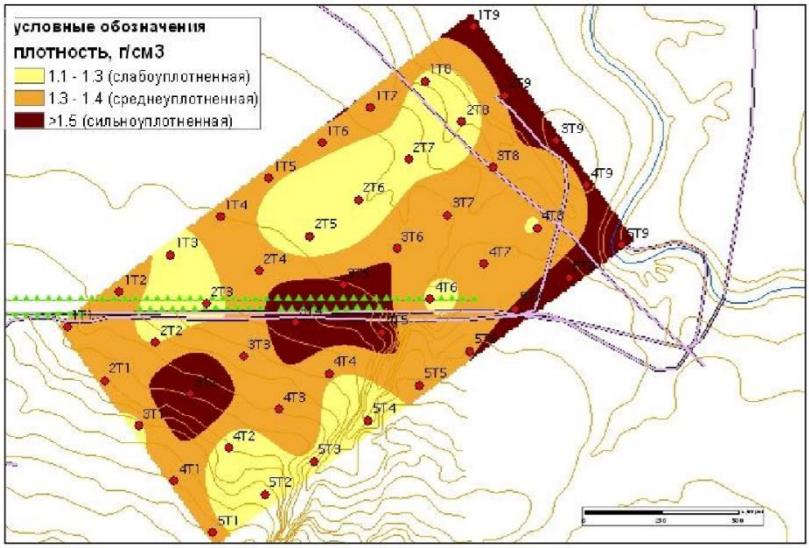


Рис.3.6. Картограмма медианных значений плотности светло-каштановой почвы в классификации Бондарева (1985) (Метод. рекомендации…, 2005)

При оценке *теплового режима* эдафотопа учитываются: фациальный подтип почвы; среднегодовая температура почвы; сумма температур выше 10° С на глубине 0,2 м; дата промерзания и оттаивания; длительность мерзлого состояния; глубина промерзания; даты перехода среднесуточных температур почвы на глубинах 10 и 20 см через +5; +10° С. В качестве базовой характеристики теплофизических свойств используется карта температуропроводности почвы при сухом состоянии (рис. 3.7).

Большое значение имеет ***санитарная оценка*** эдафотопа. санитарное состояние почвы – это совокупность физико-химических и

биологических свойств почвы, определяющих качество и степень ее безопасности в эпидемиологическом и гигиеническом отношениях. Санитарная оценка почв сельскохозяйственных угодий проводится по санитарно-химическим, санитарно-бактериологическим, санитарно-гельминтологическим, санитарно-энтомологическим показателям.

Основным критерием оценки санитарного состояния почв по степени их химического загрязнения является предельно допустимые и ориентировочно допустимые концентрации химических веществ в почве. Оценка степени опасности химического загрязнения почв, как индикатора неблагоприятного воздействия на здоровье населения, проводится согласно требованиям МУ 2.1.7.730-99.

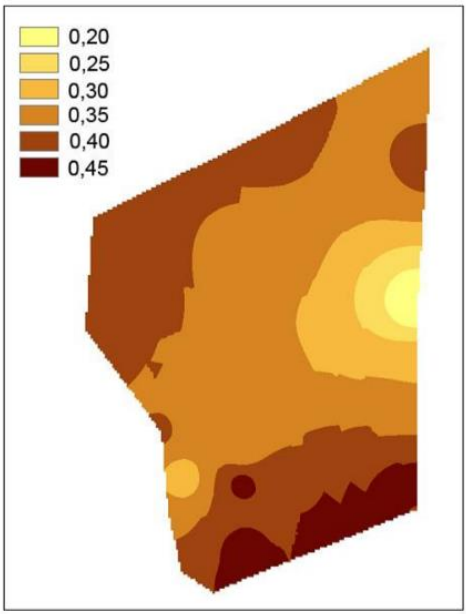


Рис.3.7. Температуропроводность (106 m2/C) участка серой лесной почвы на глубине 0,2 м (в абсолютно сухом состоянии), Владимирский НИИ сельского хозяйства (Метод. рекомендации…, 2005)

Оценка санитарного состояния почвы по степени ее биологического загрязнения проводится с использованием санитарно-бактериологических (косвенных и прямых), санитарно-паразитологических, санитарно-энтомологических показателей.

При оценке эпидемиологической опасности и степени загрязнения почвы возбудителями паразитарных болезней определяют: 1) вид возбудителей; 2) их жизнеспособность и инвазионность; 3) экстенсивный показатель загрязнения «А» 4) отношение числа положительных проб «Б» (пробы почвы, в которых обнаружены возбудители паразитарных болезней), к общему числу исследованных проб («С») в процентах: А = Б/С х 100; 5) интенсивный показатель загрязнения, общее содержание возбудителей паразитарных болезней в 1 кг (или 100 г) почвы.

Санитарное состояние, способность почвы к самоочищению могут оцениваться посредством определения изменения ее биологической активности. Основными интегральными показателями биологической активности почвы являются: общая микробная численность (ОМЧ), численность основных групп почвенных микроорганизмов (почвенных сапрофитных бактерий, актиномицетов, почвенных микромицетов), показатели интенсивности трансформации соединений углерода и азота в почве («дыхание» почвы, «санитарное число», динамика азота аммиака и нитратов в почве, азотфиксация, аммонификация, нитрификация и денитрификация), динамика кислотности и окислительно-восстановительного потенциала в почве, активность ферментативных систем и другие показатели.

3.2.5. Оценка состояния микробоценоза данной ЭГС сводится характеристике видового состава, количества и состояния микробиоты на изучаемой территории.

Микробный токсикоз изучается по состоянию растений. Выявление и учет в пределах данной ЭГС развития болезней растений, вызываемых микроорганизмами, низшими грибами, бактериями, микоплазменными организмами, вирусами и вироидами[1], осуществляется в основном 3-4 раза в течение вегетации, начиная с периода полных всходов до созревания.

Они поражают различные органы и ткани растений, и учет болезней проводят на основе симптомов поражения растений в результате их жизнедеятельности. Эти симптомы выражаются в виде отмерших растительных тканей, некрозов, налетов, пустул, изъязвлений, гнилей, опухлей, деформаций тканей, мумификаций, увяданий и др. Первым этапом учета болезней является отбор и тщательный осмотр пробы растений. Основными элементами учета являются показатели частоты встречаемости (распространенность),

[1] Вироиды – инфекционные агенты

отражающие количество поврежденных растений в пробе (в %), и интенсивность поражения (в % или баллах).

3.2.6. Оценка состояния фитоценоза данной ЭГС сводится характеристике видового состава, количества и состояния растений на изучаемой территории.

Видовой состав растений в фитоценозе характеризуется от низших форм (включая лишайники, а также грибы) к высшим растениям. Указываются доминирующие виды и второстепенные, а также инвазивные (при наличии). Характеризуя взаимоотношение растений с субстратом (почвами и другими грунтами) выделяют облигатные и факультативные формы растений. Описывается состояние растений (отличное, нормальное, угнетённое и т.п.). Приводится качественный и количественны анализ видового состава фитоценоза.

Определяется тип фитоценоза и его стадия формирования по Сукачеву (отсутствие фитоценоза, открытый фитоценоз, закрытый невыработавшийся фитоценоз, закрытый выработавшийся фитоценоз), нарушения (природные и антропогенные), симбиотические и трансбиотические отношения между растениями в фитоценозе, световой, воздушный и тепловой режим фитоценоза.

Характеризуется пространственная структура фитоценоза (или морфоструктура). В любом фитоценозе растения характеризуются определённой приуроченностью к экологическим нишам и занимают определённое пространство. Это относится и к остальным компонентам биогеоценоза. Между частями пространственного расчленения (ярусы, синузии, микрогруппировки и др.) можно достаточно легко и точно провести границы, можно нанести их на план, вычислить площадь, а затем, например, рассчитать ресурсы полезных растений или кормовые ресурсы животных. Только на основе данных по морфоструктуре можно объективно определить точки постановки тех или иных экспериментов. При описании и диагностики сообществ всегда проводится изучение пространственной неоднородности ценозов.

Большое внимание уделяется оценке жизненных форм растений. С эколого-морфологических позиций жизненная форма представляет собой своеобразный общий облик (габитус) определенной группы растений, возникающий в онтогенезе в результате роста и развития в определенных условиях среды. С экологической точки зрения жизненная форма — это «выражение определенных групп растений к пространственному расселению и закреплению на территории, к их участию в формировании растительного покрова» (Цветков, 2004).

К одной жизненной форме относятся растения, сходные по морфологической структуре и приспособительным свойствам. В биогеоценологии наибольшее распространение получила классификация жизненных форм растений Раункивера (Цветков, 2004). В основу этой классификации положена степень и характер обеспеченности возобновительного потенциала вида. В ней выделяются:

Фанерофиты - растения, почки и концевые побеги которых предназначенные для переживания неблагоприятного периода года, поднимаются в воздух на стеблях, которые живут несколько, иногда много лет. Это деревья, кустарники, лианы. Понятно, что зимовать на большой высоте их почки могут лишь в условиях сравнительно мягкого климата. В условиях бо- реальной зоны растения эти должны быть очень зимостойкими.

Хамефиты - растения с почками возобновления, которые расположены в приземном 15 см слое. Как правило, это кустарники и кустарнички. Растения этой группы произрастают и в холодных областях и в районах с жарким сухим климатом.

Гемикриптофиты - многолетние травы с почками возобновления, располагающимися на поверхности земли. В зоне умеренного климата почки этих растений в критические периоды укрыты снегом.

Геофиты - многолетние травы с почками возобновления в земле (корневища, клубни, луковицы). Это растения с наиболее надежной защитой от сурового климата, как жаркого, так и морозного.

Терофиты - однолетники, переживающие неблагоприятные периоды в виде семян.

Понятно, что в разных районах, на территориях с разными климатическими условиями формируются исторически, эволюционно сообщества с различными комбинациями организмов разных жизненных форм (табл. 3.12).

Согласно табл. 3.12, в тропических лесах доминируют жизненные формы - деревья. По мере продвижения на север доля фанерофитов последовательно снижается. В тундре эта жизненная форма представлена лишь одним видом.

В геоботанике и лесоведении применяют, кроме того, классификацию жизненных форм, также предложенную Р. Уиттикером (1980):

Деревья - крупные древесные растения, обычно значительно более 3 м. В эту группу входят деревья иглистые, широколиственные вечнозеленые; вечнозеленые склерофильные (с жесткими,

вечнозелеными большей частью мелкими листьями); широколиственные листопадные; колючие, розеточные, бамбуковые.

Таблица 3.12

Спектры жизненных форм в биогеоценозах разных природных зон
(по Р.Уиттикеру, 1980)

Биом	Фанерофиты	Хамефиты	Гемикриптофиты	Геофиты	Терофиты
Тропический дождевой лес		2	–	2	–
Субтропический лес	65	17	2	5	10
Лес умеренно теплой зоны		9	24	9	4
Лес умеренно холодной зоны		17	54	12	7
Тундра	1	22	60	15	2

Лианы - древесные, вьющиеся или лазящие растения.

Кустарники - небольшие древесные растения, обычно ниже 3 м. Иглистые, широколиственные вечнозеленые. Вечнозеленые склерофильные. Широколистные листопадные. Колючие кустарники. Розеточные кустарники. Стеблевые суккуленты.

Полукустарники - полудревесные растения, т.е. с отмирающими в неблагоприятные сезоны года верхними частями стеблей и ветвей.

Эпифиты – растения, целиком произрастающие на поверхности земли, на других растениях.

Травы - растения без многолетних наземных древесных стеблей. Сюда входят папоротники, разнотравье и злаковые.

Таллофиты - растения без четкого расчленения на стебли, листья, корни. Это лишайники, мхи, печеночники.

Весьма примечательно, что в классификациях жизненных форм в одну группу входят представители разных семейств. Растительные сообщества, выделяемые на основе проявления жизненных форм, достаточно четко обозначают единицы растительного покрова. Сформированные из растений разных жизненных форм биогеоценозы будут существенно различаться по всем параметрам структуры и уровню функционирования.

С эколого-генологических позиций важно оценить приуроченность растений к тем или иным типам грунтов, включая почвы, которые служат для них жизненным субстратом. Такие растения

называют литофитами. В этой связи среди растений выделяются следующие литофиты[1]:

а) ***петрофиты*** – приуроченные к скальным грунтам: 1) *хасмофиты*, развивающиеся на скальных трещиноватых грунтах;

б) ***собственно литофиты***: 2) *гляреофитиы*, развивающиеся на крупнообломочных грунтах; 3) *лапишистофиты* – на осыпях; 4) *псаммофиты*[2] – на песках; 5) *алевритофиты* – на пылеватых грунтах, лёссах: 6) *пелитофиты* – на глинистых грунтах.

Кроме того, важно среди этих растений выделять *облигатные* формы (растущие только на данном субстрате) и *факультативные* формы (растущие на разных субстратах).

Также среди растений по отношению к влагообеспеченности выделяют: 1) *суккуленты* – растения накапливающие воду в вегетативных органах; 2) *склерофиты* – настоящие ксерофиты, называемые иногда эуксерофитами, обладающие способностью резко снижать транспирацию в условиях недостатка воды; 3) *гемиксерофиты* (или полуксерофиты) – растения с сильно развитыми приспособлениями для добыче воды и глубокой корневой системой; 4) *мезофиты* – растения, обитающие с достаточным, но не избыточным (как у *гигрофитов*) количеством воды в грунтах.

По отношению к засоленности субстрата выделяют: 1) *эугалофиты* – виды, нуждающиеся в избыточном засолении хлоридами и сульфатами; 2) *криногалофиты* – также нуждающиеся в избыточном засолении, но удаляющие избыток солей через специальные солевыводящие железки; 3) *гликофиты* – растения, обладающие соленепроницаемостью; 4) *галотолеранты* – виды с широким спектром экологических приспособлений; 5) *галофобы* – виды избегающие избыточного засоления грунтов.

Все эти формы выделяются при оценке и характеристике любого фитоценоза.

3.2.7. Оценка состояния зооценоза данной ЭГС сводится характеристике видового состава, количества и состояния животных на изучаемой территории.

---

[1] *Боронина Д. П., Королёв В. А.* Систематика континентальных литофитов // Геология в развивающемся мире. Т. 3. — Пермь, ПГНИУ, 2018. С. 309–312.

[2] *Королёв В. А.* Многообразие флоры псаммофитов на территории России // Инженерно-геологическое и эколого-геологическое изучение песков и песчаных массивов // Тр. Межд. научн. конф. (27-28 сентября 2018 г., МГУ, Москва, Россия) / Под ред. В.Т.Трофимова и В.А.Королева / Под ред. В. А. Королёв, В. Т. Трофимов. — М.: ООО СамПринт, 2018. — С. 223–228.

Количественная ***оценка вредных и полезных насекомых*** в биотопе сводится к выявлению абсолютной численности особей в определенном ограниченном пространстве или объеме, либо относительной, по следам жизнедеятельности (количество поврежденных растений, плодов, вылову за какой-то срок в те или иные виды ловушек).

По признаку их обитания специальными методами учитываются насекомые, живущие на растениях, внутри них, свободно передвигающиеся по поверхности почвы, обитающие в ней и т.д. В зависимости от того, в какой среде учитывают насекомых, изменяются формы оценок плотности вредителей. Например, плотность видов, обитающих в почве, оценивают по числу особей в среднем на 1 м^2, живущих на растениях, - по числу особей на 100 растений, по проценту заселенных растений. Вредителей, обитающих в почве, учитывают методом раскопки площадок: мелкие (до 10 см), средние (до 45 см) и глубокие (более 45 см). Для учета насекомых, передвигающихся по поверхности почвы, используют почвенные ловушки – сосуды с фиксирующей жидкостью (2-4% формалин), закопанные в почву вровень с верхним краем, либо канавки длиной 1-5 м, глубиной и шириной по 30 см.

Вредителей, обитающих на растениях, учитывают на площадках размером 50×50 см. Рамку накладывают так, чтобы охватить ею часть рядков культуры (зерновых, свеклы, подсолнечника и т.п.) и междурядья, в пределах этого пространства подсчитывают всех особей на растениях и опавших на поверхность почвы.

О плотности популяций ***грызунов*** судят по следам их жизнедеятельности (по убежищам-норам). В одном убежище обычно живет одна семья, одна или несколько особей. Учитывают число всех колоний и жилых, число всех нор и жилых в пересчете на 1 га. Относительный учет численности полевок, мышей, хомячков проводят с помощью вылова плашками с приманкой. Плашки выставляют под вечер линиями с интервалом 5 м по 20, 50 или 100 штук.

Таким образом, проанализировав и описав количественно все компоненты данной природной ЭГС, можно составить количественную характеристику её состояния, которая впоследствии будет учитываться при управлении данной ЭГС или при составлении её модели.

В целом можно записать, что, данная природная ЭГС$_{\text{п}}$ характеризуется множеством параметров, отражающих особенности её составных частей или компонентов (S_i):

$$\text{ЭГС}_{\text{п}} = \sum_{i=1}^{n} S_i = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6,$$

(3.14)

при этом

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} K_j; \quad S_1 = K_1 + K_2 + K_3 \qquad \text{и т. д.} \tag{3.15}$$

где S_i – компонент ЭГС; i – вид компонента; K_j – параметр состояния данного компонента; j – вид параметра.

3.3. Описание техно-природных, природно-технических и искусственных эколого-геологические систем

Характеристика техно-природных, природно-техногенных и искусственных ЭГС осуществляется так же как и для природных ЭГС, с той лишь разницей, что в этом случае добавляется оценка техногенной (антропогенныой) составляющей ЭГС.

Это может быть человеческий социум, развитый в пределах рассматриваемой ЭГС (рис. 3.8), или его комбинация с техническими сооружениями (или устройствами разного типа и назначения) (рис. 3.9), или комбинация технобиоценоза и технобиотопа без технических объектов (рис. 3.10) или с техническими объектами (рис. 3.11).

Таким образом, различных комбинаций и сочетаний между отдельными компонентами в искусственных ЭГС может быть довольно много (учитывая, в том числе, их возможную полноту или неполноту по тем или иным компонентам). Из этого следует, что компонентный состав искусственных ЭГС более разнообразен, чем у природных.

Поскольку в искусственных ЭГС появляются дополнительные (по сравнению с природными ЭГС), техногенные компоненты, то и структура их будет более сложной, чем природных (рис. 3.12). Количество возможных взаимосвязей между компонентами ЭГС в этом случае достигает пятнадцати.

Для конкретной характеристики состава, состояния и свойств техно-природной $ЭГС_т$, как и в вышерассмотренном случае, необходимо оценить набор параметров, характеризующих данную $ЭГС_т$. Эти данные сводятся в таблицу, аналогичную табл.3.13, в которой содержатся компоненты и биосферы, и техносферы – источники техногенных воздействий.

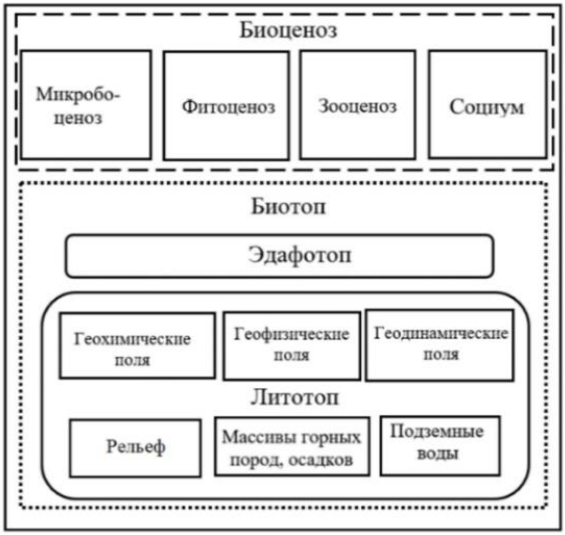


Рис. 3.8. Концептуальная модель состава техно-природной или природно-технической ЭГС без технических объектов (устройств)

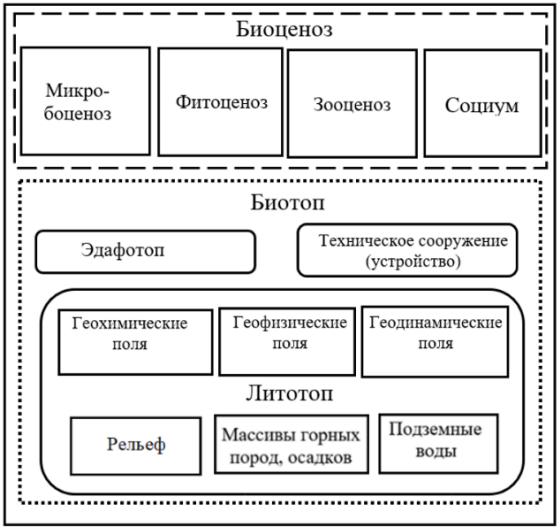


Рис. 3.9. Концептуальная модель состава техно-природной или природно-технической ЭГС с техническими объектами или устройствами

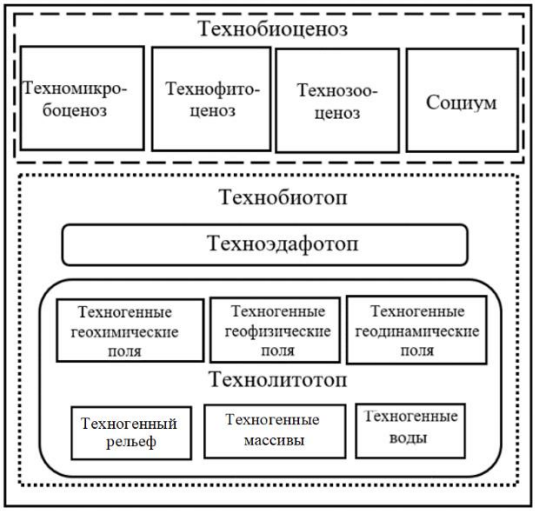


Рис. 3.10. Концептуальная модель состава искусственной ЭГС без технических объектов

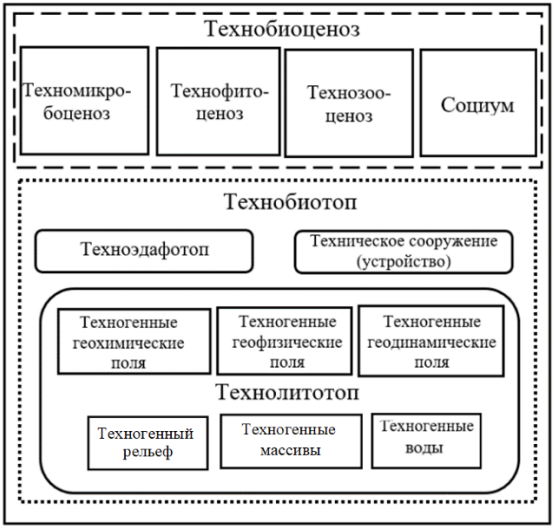


Рис. 3.11. Концептуальная модель состава искусственной ЭГС с техническими объектами или устройствами

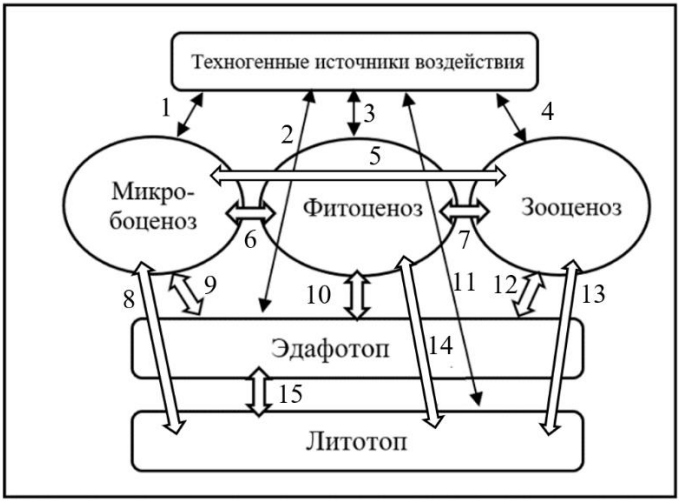


Рис. 3.12. Концептуальная модель структуры техно-природной ЭГС. Стрелки обозначают структурные взаимосвязи между подсистемами ЭГС, цифры – номера взаимосвязей

В качестве примера такой сводной таблицы представлена табл.3.13, в которой состав компонентов и параметры, их коды указаны условно. В конкретном случае эта таблица (паспорт ЭГС) составляется более подробно с более полным перечнем количественных показателей всех анализируемых компонентов данной ЭГС.

Кодировка параметров в этой таблице затем используется при формировании ГИС для данной ЭГС – при составлении соответствующей базы данных (БД) и автоматизированной системы управления (АСУ) ими. Это позволяет реализовать процесс автоматизированного управления теми или иными компонентами ЭГС на базе рассмотренных выше методов кибернетики.

В представленной таблице 3.13 набор параметров, их количественные показатели и коды приведены условно. Для конкретной техно-природной $ЭГС_{тп}$ (или природно-техногенной $ЭГС_{пт}$) они должны быть обоснованы с точки зрения их использования для контроля управления составом, состоянием и свойствами рассматриваемой $ЭГС_{тп}$.

Таблица 3.13

Характеристика техно-природной ($ЭГС_{тп}$) и природно-техногенной ($ЭГС_{пт}$)

Подсистема	**Состав**	**Параметр**	**Значение параметра**	**Ед. измерения**	**Код**
S_i	K_i	P_i	N_i	Q_i	D_i
Литотоп (S_1)	ИГЭ-1 (K_1)	Мощность	1,6	м	h_1
		Минеральный состав	Силикатный	%	M_1
		Гранулометрический состав	Суглинок	%	$Г_1$
		Плотность	1,68	г/см^3	ρ_1
		Влажность	26	%	W_1
		Содержание ТМ	0,1	ПДК	$Т_1$
		Засоленность	-		$С_1$
		Модуль деформации	1,5	МПа	$Е_1$
	ИГЭ-2 (K_2)	Аналогично			
	ИГЭ-3 (K_3)	Аналогично			
	Рельеф (K_4)	Тип, коэффициент расчлененности	-	1/км	$К_р$
	Процессы (K_5)	Вид, коэффициент пораженности	-	%	$К_п$
	Подземные воды (K_6)	УГВ	-	м	$h_г$
Эдафотоп (S_2)	Почва-1 (K_7)	Аналогично			
	Почва-2(K_8)	Аналогично			
Микробоценоз (S_3)	В почве-1 (K_9)	Видовой состав	Вид	Шт./мг	$МБ_1$
	В почве-2 (K_{10})	То же			$МБ_2$
	В ИГЭ-1 (K_{11})	То же			$МБ_3$
Фиоценоз (S_4)	Лишайники (K_{12})	Видовой состав	Вид	Шт./м^2	$Л_1$
	Травы (K_{13})	То же			$Р_1$
	Кустарники (K_{14})	То же			$К_1$
	Деревья (K_{15})	То же			$Д_1$
Зооценоз (S_5)	Черви, моллюски (K_{16})	Видовой состав	Вид	Шт./м^2	$Ч_1$
	Насекомые (K_{17})	То же			$Н_1$
	Земноводные и пресмыкающиеся (K_{18})	То же			$З_1$
	Птицы (K_{19})	То же			$П_1$
	Млекопитающие (K_{20})	То же			$Ж_1$
Источники техногенных воздействий (S_6)	Механический (K_{21})	Пораженность выемками	5,0	%	$В_1$
	Гидродинамический (K_{22})	УГВ	5,8	м	$У_1$
	Тепловой (K_{23})	Температура	8,0	°С	t1

	Электромагнитный (K_{24})	Нет	-	-	-
	Вибрационный (K_{25})	Затухание вибрации	1,5	дБ/м	
	Акустический (K_{26})	Шум	45	дБ	$Ш_1$
	Химический (K_{27})	Суммарный показатель загрязнения, Zc	12	Ед.	X_1
	Биотический (K_{28})	Нет	-	-	-

В целом же можно записать, что, например, данная техно-природная $ЭГС_{тп}$ характеризуется множеством параметров, отражающих особенности её составных частей (S_i):

$$ЭГС_{тп} = \sum_{i=1}^{n} S_i = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6, \tag{3.16}$$

при этом

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} K_j; \quad S_1 = K_1 + K_2 + K_3 \qquad \text{и т. д.} \tag{3.17}$$

где S_i – компонент ЭГС; i – вид компонента; K_j – параметр состояния данного компонента; j – вид параметра.

***

Глава 4
МЕТОДОЛОГИЯ, ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ГЕОКИБЕРНЕТИКИ

«Человечество на Земле и окружающая его живая и неживая природа составляют нечто единое, живущее по общим законам природы»
В.И.Вернадский

4.1. Целевая функция и задачи управления ЭГС

В связи с вышеизложенным, **содержательными задачами**, стоящими перед экологической геокибернетикой, являются следующие:

1) оценить состояния и выработать приемы представления информации о состояниях анализируемых ПТС, включая эколого-геологические системы (ЭГС);
2) разработать методы оценки пространства состояний ЭГС и способов отражения изменения ЭГС в различных моделях пространства состояний;
3) обосновать приемы диагностики и прогнозирования состояния ЭГС;
4) разработать рекомендации по управлению неоднородными ЭГС;
5) обосновать технологии процесса управления ЭГС.

Функциональная зависимость, устанавливающая взаимосвязь между регулируемыми и регулирующими координатами ЭГС, называется ***законом управления***. Закон управления может быть записан в виде

$$u = F(y). \qquad (4.1)$$

где u - управляющее воздействие; y - управляемая переменная.

По этому признаку различают:

1) системы с линейными законами управления (регулирования), когда управляющее воздействие u является линейной комбинацией от регулируемых величин y, а также их производных и интегралов;

2) системы с нелинейными законами управления;

3) системы экстремального и оптимального управления, обеспечивающие экстремум (максимум или минимум) целевой функции (см. ниже уравнение 4.4);

4) системы адаптивного управления, изменяющие параметры закона управления (самонастраивающиеся системы), или сам закон (самоорганизующиеся системы) в зависимости от изменения параметров объекта управления.

Используемые в настоящее время в качестве управляющего устройства (*УУ*) микропроцессоры и микроЭВМ позволяют легко реализовать самые разнообразные виды законов управления как функции $u=F(y)$, добиваясь желаемого характера управляемых процессов, протекающих в ЭГС, не внося в него каких-либо конструктивных или технологических изменений. Выбор конкретного закона управления будет определяться свойствами и характеристиками ЭГС, целью управления и ограничениями, накладываемыми на координаты объекта. Экспериментально определяемые характеристики ЭГС и теоретические исследования особенностей, управляемых процессов, протекающих в нем, позволяют создавать математические модели объектов управления в виде системы дифференциальных уравнений с обычными и частными производными от его обобщенных (фазовых) координат

$$D\Phi(x,u,f,a,l,t) = \Psi(l,t)\ , \qquad (4.2)$$

где D - символ дифференцирования функции Φ по пространственной координате l и времени t; a- параметры модели; u – управляющее воздействие; x – входная переменная (вход); f - внешнее воздействие.

В геокибернетике **цель управления** формулируется в математическом виде. Например, она может быть задана уравнением

$$y = y^* = \text{const}, \qquad (4.3)$$

где y – означает управляемую переменную (управляемые координаты или выход (здесь и далее звездочка * обозначает оптимальность параметра) т. е. необходимо поддержание существующего режима в данной ЭГС, характеризуемое величиной y^*.

Как правило, цель управления задается в виде некоторой ***целевой функции*** $I(x,u)$ от управляемых и обобщенных координат объекта

$$I = I(Y,\ U). \qquad (4.4)$$

Ограничения на координаты объекта задаются в виде неравенств

$$|x| \le X_m; \quad |y| \le Y_m; \quad |u| \le U_m. \qquad (4.5)$$

Если в процессе управления для целевой функции I(x,u) обеспечивается экстремум, то управление в этом случае называют *оптимальным*, а систему управления оптимальной. В том случае если I(x,u) зависит от времени, или остается постоянной не достигая экстремума, то управления называют *программным* или стабилизирующим.

Если в качестве целевой функции используют управляемые координаты y, т.е. I=I(y), то имеет место *автоматическое* регулирование, а не управление. Автоматическое регулирование является частным случаем автоматического управления (Артамонов, Семёнов, 2003).

В зависимости от конкретного вида выражений (4.1) - (4.2) можно выделить следующие основные классы систем автоматического управления ЭГС.

Наиболее важным классификационным признаком систем управления ЭГС является математическое описание их поведения, задаваемое с помощью выражения (4.2).

По этому признаку все ЭГС можно подразделить на:

1) ЭГС с распределенными координатами. Описываются дифференциальными уравнениями в частных производных, размерность вектора фазовых координат **X** бесконечна;

2) ЭГС с сосредоточенными параметрами. Описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, размерность вектора фазовых координат **X** конечна. Если **Y** - вектор, то имеем многомерную систему, если Y скаляр - одномерную;

3) нелинейные ЭГС. Описываются нелинейными дифференциальными уравнениями (обыкновенными и в частных производных);

4) линейные ЭГС. Описываются линейными дифференциальными уравнениями (обыкновенными и в частных производных);

5) непрерывные ЭГС. Описываются дифференциальными уравнениями, решения которых являются непрерывными функциями времени;

6) дискретные ЭГС (импульсные и цифровые). Описываются разностными уравнениями, решение которых - дискретные функции времени.

С учетом характера цели управления (4.2), все системы управления ЭГС делятся на (Артамонов, Семёнов, 2003):

1) системы *стабилизации*, у которых целевая функция постоянна

$$I(x,u) = \text{const}; \qquad (4.6)$$

2) системы *программного управления*, у которых целевая функция зависит от времени

$$I(x,u) = f(t); \quad (4.7)$$

3) системы *оптимального управления*, у которых целевая функция в процессе управления достигает экстремума

$$I(x,u) = \min(\max). \quad (4.8)$$

4.2. Методология управления ЭГС

Согласно ряду работ последнего времени (Pavlikakis, Tsihrintzis, 2000; Encyclopedia…, 2012; Pallister J., 2006; Skinner G. et al., 2017) можно предложить следующую общую методологию управления эколого-геологическими системами:

1. **Локализация проблем управления.** Первым шагом является изучение экологических проблем, которые необходимо реализовать в конкретном анализируемом регионе, в том числе - с учетом выбранной концепции устойчивого развития (см. табл. 1.1). Чтобы установить цели программы управления ЭГС, необходимо ответить на вопросы о наиболее важных потребностях, которые должны быть заранее исследованы (например, на базе ОВОС и т.п.), о наиболее важных экологических проблемах, касающихся планирования и коммуникации, проблем в конфликтных областях и областях сотрудничества, пределах, ограничениях и возможностях управления, а также деятельности, потребности и ожидания людей, живущих в данном регионе.

2. **Участие населения**. Вторым шагом до установления целей и планирования является привлечение местного населения к участию в разработке программы управления. Участие общественности должно быть гарантировано до начала реализации программы (Pavlikakis, Tsihrintzis, 2000). При этом также важна роль экологического просвещения, обучения и воспитания в школах, университетах и организациях.

3. **Политический, законодательный и экономический анализ**. Изучение и анализ политической ситуации в регионе помогает экологическим проектам управления, которые во многих случаях конфликтуют с политическими интересами или относятся с безразличием к вопросам экологии. Очень важно иметь поддержку местных властей и политиков, даже если планы и стратегии должны

разрабатываться за пределами политических ограничений, чтобы избежать задержек и потери денег. Участие общественности и СМИ могут существенно помочь в этом вопросе.

Также важно иметь информацию о структуре, операциях и миссии федеральных и местных агентств и частных организаций, которые могут участвовать в управлении ЭГС. Развитие открытой дискуссии между такими организациями необходимо для обеспечения сотрудничества и коммуникации. Всё местное законодательство должно быть заранее известно и проанализировано, а планы должны включать положения о возможных новых правилах, которые могут быть введены правительством или местными властями.

Экономическое и социальное положение людей, живущих в регионе, также является важным фактором в создании систем управления ЭГС и должно быть также заранее изучено. Нужно иметь в виду, что люди используют природные ресурсы для удовлетворения своих потребностей и улучшения своей жизни. Поэтому планы, направленные на обеспечение устойчивости ЭГС, должны гарантировать и высокое качество жизни местного населения.

4. **Определение целей управления ЭГС**. Определение целей управления реализуется после локализации проблем, общественной поддержки и воли к участию, а также анализа всех факторов, вовлеченных в управление данной ЭГС. Цели определяют план управления ЭГС, который должен быть разработан, и все процессы, необходимые для устойчивого развития региона (см. раздел 4.1).

Цели должны быть изложены так, чтобы они могли показать будущую траекторию и поведение данной экосистемы, чтобы их можно было измерить и контролировать в соответствии с социальными интересами. Управление экосистемами для поддержания жизнеспособных популяций естественных видов является одной из наиболее часто предлагаемых целей управления (Boyce, 1997; Wilcove, Blair, 1995). Хотя невозможно контролировать все виды экосистемы, популяции чувствительных видов можно использовать в качестве индикаторов экологических процессов (Noss, Cooperrider, 1994; Frost et al., 1995; Schindler, 1995; Haney, Boyce, 1997). Поддержание доступности макроэлементов для обеспечения продуктивности фитоценозов является еще одной возможной целью управления. Почвенные процессы с акцентом на круговорот макропитательных веществ также могут быть следствием управления ЭГС (David, 1997). Поддержание других эволюционных и экологических процессов в ЭГС, таких как режимы геодинамических и гидрологических процессов, а также управление в течение длительных периодов времени для

поддержания эволюционного потенциала видов и экосистем, а также для приспособления человека к использованию и заселению в рамках этих ограничений, также могут являться целями управления ЭГС, обеспечивающими устойчивое развитие (Реймерс, 1994; Grumbine, 1994; Neace M.B., 1999; Skinner G. et al., 2017).

5. **Определение границ ЭГС**. Открытый и динамический характер ЭГС не дает жестких руководящих указаний по определению их границ. Ученые оперативно определяют границы той или иной экосистемы. Её границы могут быть определены сначала и после исследования и локализации проблем (шаг 1), и в этом случае они приводят к установлению цели. В качестве альтернативы, цели предшествуют определению границ. В любом случае границы должны включать в себя большинство природных и антропогенных компонентов, учитывать иерархию ЭГС и соответствовать характеристикам региона (см. главу 1).

Несомненно, что границы ЭГС, определенные для управления одним регионом, могут быть неподходящими для другого. Предпочтение отдается той или иной модели в соответствии с характеристиками региона, компонентами экосистемы и вопросами, которые необходимо решить (Montgomery et al., 1995). В любом случае, границы ЭГС должны позволять легко контролировать и манипулировать процессами.

6. **Разработка плана управления**. Разработка плана управления ЭГС и целостного подхода является следующим шагом методологии. В нём могут участвовать различные субъекты, которые сотрудничают и общаются друг с другом, и предоставляют необходимую информацию.

Эти организации могут включать: 1) правительственные законодательные органы и министерства, которые устанавливают стандарты и правила; 2) местные органы власти, агентства, частные организации и землевладельцы, которые устанавливают местные стандарты и политику; 3) местные отрасли производства, которые помогают в лоббировании политики; и 4) инженеры, ученые и исследователи, которые разрабатывают надежные методы управления ЭГС и используют различные инструменты, такие, например, как математические модели управления, ГИС и т.п. (Реймерс, 1994: Tsihrintzis et al., 1995; Tsihrintzis et al., 1996; Tsihrintzis and Hamid, 1997a, b; Tsihrintzis et al., 1998; Tsihrintzis and Sidan, 1998; Tsihrintzis et al., 1996; Tsihrintzis et al., 1997; Scott et al., 1993), которые помогают в принятии решений.

Поддержка принятия решений управления ЭГС является одним из важных рубежей в изучении моделирования окружающей среды.

Разработка систем поддержки принятия решений может являться очень важной частью программы управления ЭГС (Mowrer, 1996; Rauscher, 1999).

7. **Мониторинг ЭГС**. В рамках управления ЭГС должны быть разработаны программы их мониторинга, чтобы определить, позволяют ли предпринимаемые действия управления экосистемой добиться желаемых результатов (Ringold et al., 1996; Королев, 2007, 2019; Трофимов, 2010а). Для этого устанавливаются целевые количественные показатели, которые должны быть измеримы и могут контролироваться.

Программы мониторинга могут быть основаны на статистических выборках собранных данных и различных моделях. Например, система поддержки принятия решений SUPERB является эффективным инструментом, который менеджеры ресурсов могут использовать при планировании проектов мониторинга (Brady et al., 1993). Компьютерная программа SUPERB содержит 5 основных этапов: 1) определение экосистемного компонента, подлежащего мониторингу, и методов мониторинга; 2) характеристика требований к дизайну мониторинга и оценки рисков; 3) создание прототипа проекта мониторинга с использованием компьютерного моделирования; 4) оценка дизайна мониторинга с использованием компьютерного прототипа; и 5) оценка того, является ли структура мониторинга удовлетворительной.

8. **Оценка**. Непрерывный мониторинг со стороны федеральных или государственных учреждений, местных органов власти, ученых, инженеров и менеджеров обеспечивает соблюдение процесса управления ЭГС, ведет к его адаптации и оценке для достижения заявленных целей и ожиданий.

Действия по исправлению положения, которые могут быть выполнены на любой стадии управления, могут быть предприняты после перманентной оценки или после информирования общественности, как показано на рис. 4.1.

На рис. 4.2 показана общая схема реализации, изложенной выше методологии управления ЭГС, которая также может служить основой для обоснования автоматизированных систем управления (АСУ) экосистемами на базе рассматриваемых кибернетических методов. Она же может служить алгоритмом для создания соответствующей управляющей компьютерной программы, типа SUPERB, для реализации предлагаемых проектов управления.

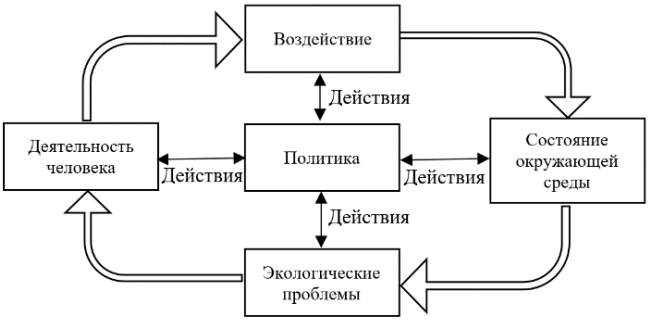


Рис. 4.1. Взаимодействие экологических показателей и проблем с экологической политикой и управленческими действиями (по Bramley, 1997)

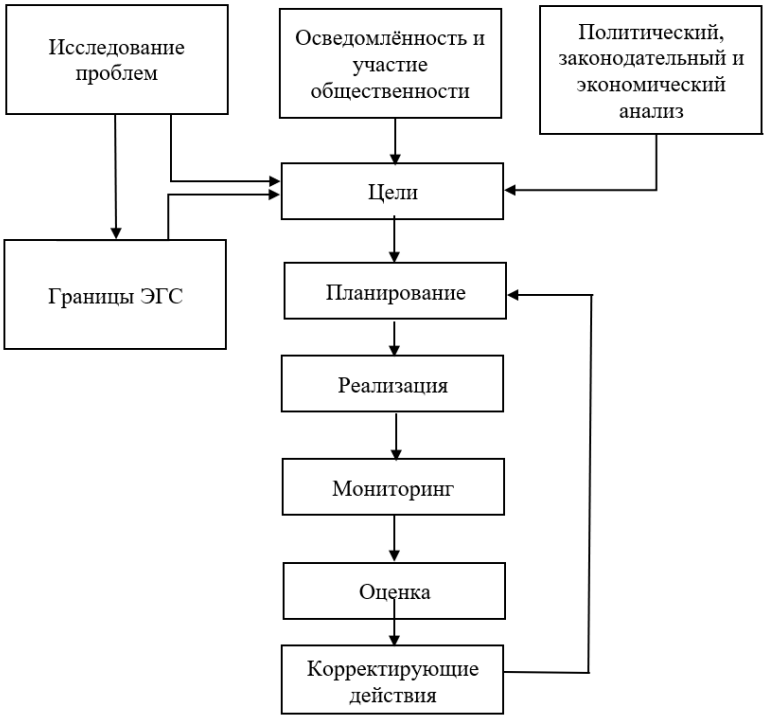


Рис. 4.2. Основные этапы реализации методологии управления ЭГС (по Pavlikakis G.E., Tsihrintzis V.A., 2000, с изм. авт.)

На рис. 4.3 показана схема основных элементов (компонентов), участвующих в управлении данной ЭГС и реализующих вышерассмотренную методологию управления. Из неё следует, что в процессе управления задействовано множество различных структур, как государственных, так и негосударственных, включая общественность. Её конкретное наполнение будет зависеть от типа и иерархического уровня анализируемой ЭГС (см. главу 1). Эта схема также может служить основой для создания автоматизированного программного обеспечения процессом управления или выработки алгоритмов соответствующих компьютерных программ управления.

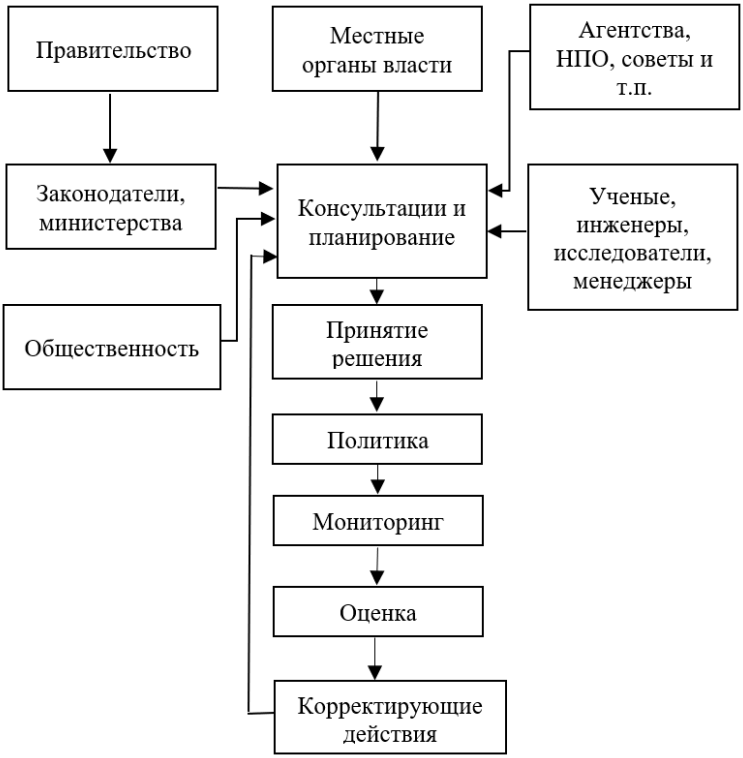


Рис. 4.3. Схема элементов, участвующих в управлении ЭГС (по Pavlikakis G.E., Tsihrintzis V.A., 2000, с изм. авт.)

4.3. Информационное обеспечение управления

Управление ЭГС неразрывно связано с информацией об этой системе. Экологическая оценка формирует информационную основу для всех форм экологического управления, включая оценку аномалий видов и репродуктивное регулирование популяций, уровней и распределения популяций, структуры и динамики сообщества и экосистемы, а также изменений ландшафта среды др. Для геологического обоснования управления ЭГС, контроля качества и последствий управляющих воздействий экогеологи получают необходимую информацию в ходе эколого-геологического мониторинга (Трофимов, 2010а). С помощью этой информации руководители могут защищать, управлять и улучшать популяции и экосистемы в целом, включая ЭГС, определять уровни и типы восстановления ЭГС, восстанавливать конкретные экосистемы и разрабатывать долгосрочные планы управления ЭГС (Новиков, 2005).

В рассмотренной выше схеме методологии управления (см. рис. 4.2) информация, в том числе осведомлённость населения об экологических проблемах, играет главенствующую роль. Н.Винер (1958) определял информацию как «обозначение содержания, полученного нами из внешнего мира в процессе приспосабливания к нему нас и наших чувств».

В кибернетике рассматриваются машины, организмы и т.п. как системы, воспринимающие, накапливающие и передающие информацию, а также перерабатывающие её в сигналы, определяющие их собственную деятельность. ЭГС может рассматриваться как такая система.

Согласно Л.Бриллюэну (1960), информация (I) имеет вероятностно-статистическую природу и определяется как

$$I=K \ln P, \tag{4.9}$$

где K – постоянная, P – вероятность события. Информация - безразмерная величина (отвлеченное число). Вышеприведенная формула сходна по форме с знаменитым уравнением Больцмана для энтропии (S), как меры рассеяния энергии и термодинамической вероятности:

$$S=k \ln(P), \tag{4.10}$$

где k – постоянная Больцмана, $1{,}38 \cdot 10^{23}$ Дж/ ^{o}К ($k=R/N$, R – молярная газовая постоянная, 8,31 Дж/моль·^{o}К; N – число Авогадро, $6{,}06 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$); P – статистический вес или число способов осуществления данного состояния (или его термодинамическая вероятность). Связь между энтропией и информацией была обоснована К.Шенноном в 1949 г.[1] Он определял информационную энтропию со знаком, обратным её обычному термодинамическому определению. Л.Бриллюэн назвал эту величину *негэнтропией*.

Энтропия всей системы (S_0) равна сумме энтропий её частей, например, S_1 и S_2, т.е.

$$S_0 = S_1 + S_2, \tag{4.11}$$

а вероятность данного состояния этой системы (P_0) будет равна произведению вероятностей состояния её отдельных частей, т.е.

$$P_0 = P_1 \cdot P_2. \tag{4.12}$$

Каждая материальная система, а следовательно, и ЭГС, и её отдельные компоненты является источником информации. Для обеспечения процесса управления данной ЭГС, в соответствии с рассмотренной выше методологией (раздел 4.2), необходимо иметь *достаточную информацию* о:

- цели управления (I_y);
- возмущениях окружающей среды (I_o);
- состоянии ЭГС (I_c);
- характеристиках ЭГС (I_x).

Следовательно, для данной ЭГС общая достаточная информация о ней определяется как

$$I = I_y + I_o + I_c + I_x. \tag{4.13}$$

Здесь информация I_y определяется целевой функцией, сведения о возмущающих воздействиях (I_o) выявляются из анализа взаимодействия ЭГС с окружающей средой, параметры состояния и характеристики ЭГС определяются вышерассмотренными уравнениями 3.14-3.17.

Получение информации об ЭГС соответствует понижению энтропии этой системы. Низкая энтропия означает неустойчивое

[1] *Shannon C.E., WeavегW.* The Mathematical Theory of Communication, U. of Illinois Press, Urbana Ill., 1949,

состояние ЭГС, которое рано или поздно путем естественной эволюции перейдет в устойчивое состояние с высокой энтропией. Второе начало термодинамики ничего не говорит нам о требуемом для этого времени, и поэтому мы не знаем, как долго ЭГС будет помнить информацию. Но если классическая термодинамика не в состоянии дать ответ на этот очень важный вопрос, то мы можем получить ответ из рассмотрения молекулярной или атомной модели с помощью кинетической теории: скорость затухания всякого рода волн, скорость диффузии, скорость протекания химических реакций и т. д. в ЭГС могут быть вычислены для подходящих моделей ЭГС, и время установления может меняться от малых долей секунды до годов или столетий (Бриллюэн, 1960).

В термодинамике энтропия обычно описывается как мера беспорядочности в физической системе. Более точно утверждение (Бриллюэн, 1960, с. 211), «что энтропия есть мера недостатка информации о действительной структуре системы. Этот недостаток информации приводит к тому, что возможно большое разнообразие различных микроструктур, которые мы практически не в состоянии отличить друг от друга. Так как каждая из этих различных микроструктур действительно может быть реализована в некоторый данный момент, недостаток информации соответствует действительному беспорядку в скрытых степенях свободы».

Сбор информации об изучаемой ЭГС может быть получен непосредственно в ходе полевых исследований, или при постановке экспериментов. Количество информации, получаемое из эксперимента, тесно связано с точностью применяемой экспериментальной установки. Определение информации при наблюдении характеризуется формулой (Бриллюэн, 1960):

$$I_1 = k\ ln\left(\frac{P_o}{P_1}\right), \tag{4.14}$$

где P_0 — число равновероятных возможностей до наблюдения; P_1— число равновероятных возможностей после наблюдения, I_1 — информация, получаемая в результате наблюдения.

Согласно Н.Ф.Реймерсу (1994), при управлении ЭГС необходимо учитывать ***принцип неполноты информации*** (неопределенности): информация при проведении хозяйственных акций в природе всегда недостаточна для априорных суждений о всех возможных результатах осуществляемого мероприятия. Связано это с исключительной сложностью природных систем. Для ослабления действия этого

неустранимого изъяна требуется многовариантная проработка прогнозов—по методу географических аналогий, на натурных моделях, с помощью логического и математического моделирования, на исторических аналогах и т. д. При этом необходим учет действия принципов удаленности события и регулярных ошибок моделирования, а также частой ошибки актуализма, предполагающего, что процессы геологического прошлого адекватны современным, искаженным антропогенной деятельностью, и идущим в ином масштабе времени.

Собранные экоданные подлежат последующей математической обработке и визуализации. На рис. 4.4. представлена блок-схема обработки экоданных.

Рис.4.4. Блок-схема процедуры обработки и визуализации экологических данных
(по Мешалкину и др., 2016)

Согласно этой схемы, начальные данные, которые часто называют исходными данными (информационное сырье), — это равнодоступные данные, полученные методами интерполяции. На основе статических равнодоступных (равноотстоящих) данных (без изменения времени) и динамических данных (рассмотрение временных зависимостей для экоданных) с использованием методов аппроксимации экологических данных производят запись результатов в виде функциональных

отношений. С другой стороны, с применением цифровой фильтрации экологических данных можно получать последовательные ряды данных для разработки моделей и компьютерного моделирования экопроцессов.

Методы интерполяции данных используются для заполнения промежутков в последовательностях или рядах данных. В случае отсутствия (потери) интерполированных данных, необходимо добавить измеряемые значения, чтобы нанести на карту данные с относительно постоянной временной сеткой с равнодоступными (равноотстоящими) интервалами наблюдений. Только такие данные должны использоваться для статистической обработки, разработки моделей и компьютерного моделирования, а также оптимизации экопроцессов.

4.4. Принципы экологической геокибернетики

Эколого-геологическая система, снабженная устройствами для её управления, формально будет представлять собой природно-техническую, техно-природную или техническую систему. Управлением подобными системами, вообще говоря, занимается техническая кибернетика, которая включает в себя теорию автоматического управления, теорию оптимальных систем, адаптивных и обучающих систем, теорию надежности. Её достижения применимы и для целей экологической геокибернетики. Главная задача технической кибернетики синтез технических систем управления, обеспечивающих достижение требуемых показателей качества, характеризующих их функционирование. Основной математический аппарат технической кибернетики: теория дифференциальных уравнений, функциональный анализ, вариационное исчисление, математическое программирование, математическая логика, теория графов, теория вероятностей.

Управление ЭГС, методология которого рассмотрена выше, может реализовываться и на базе фундаментальных принципов технической кибернетики. При этом речь идет лишь об управляемых ЭГС.

4.4.1. Принцип разомкнутого управления. Пусть имеется полная априорная информация о цели управления данной ЭГС, известны её характеристики, а возмущающие воздействия (помехи) отсутствуют. Если цель управления задана в виде уравнения (4.1), то требуемый постоянный уровень управляющего воздействия (u^*) легко определяется по статической характеристике ЭГС (или технических объектов в её составе). Под управляющим воздействием (u) на ЭГС

понимается сигнал, который необходимо передать от источника информации к объекту управления (ЭГС или ее компонент).

Если этот уровень допустим, а режим ЭГС устойчив, то цель управления может быть достигнута в системе, реализующей принцип ***разомкнутого управления*** (рис. 4.5).

Для таких ЭГС оптимальному режиму, который должен поддерживаться системой управления, соответствуют некоторые постоянные значения переменной выхода $y = y^*$ и уровня управляющего воздействия $u = u^*$, обеспечивающие экстремум (максимум или минимум) определенной целевой функции.

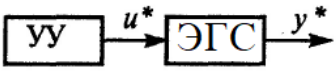


Рис.4.5. Разомкнутая система управления ЭГС

4.4.2. Принцип компенсации возмущения. Иной целью управления может быть изменение управляемой переменной y по определенной программе, заданной как функция времени $y_п(t)$, например, программы для обеспечивания влажностного режима, программа изменения температуры в грунтах литотопа ЭГС и т. п. Для вычисления оптимального управляющего воздействия $u^*(t)$ здесь необходимо знать динамические характеристики объекта управления. При этом не всегда можно найти допустимое управление, обеспечивающее точное следование заданной программе. Существуют методы вычисления оптимального управления $u^*(t)$, когда изменение ЭГС в принятом смысле минимально отличается от заданного. Для них применяют системы управления, работающие по принципу с ***компенсацией возмущения***.

Принцип компенсации (управление по возмущениям) применяются при ограниченном диапазоне изменений внешней среды, в зависимости от полноты информации о внешней среде системы управления по возмущениям могут обладать важным свойством: управление по возмущениям с полной информацией обеспечивает полную компенсацию воздействий внешней среды. Системы, в которых достигается полная компенсация, называются *инвариантными*. В них управляющее воздействие поступает в объект управления одновременно с воздействием внешней среды, нейтрализуя его. Однако в открытых системах, к которым относятся и ЭГС, предусмотреть все возможные возмущения затруднительно. Кроме

того, функциональные зависимости между возмущающими и управляющими воздействиями могут быть неизвестны. Поэтому управление по возмущениям с неполной информацией приводит к накоплению ошибок.

Более общий случай задания цели управления — это требование оптимизировать некоторый функционал

$$J(y,u) \rightarrow min_{m\in U}(max), \tag{4.15}$$

где U— множество допустимых управлений. В результате решения задачи вариационного исчисления с учетом ограничений на управление и динамики ЭГС находятся оптимальная траектория $y^*(t)$ и оптимальное управление $u^*(t)$.

В том случае, когда на ЭГС действуют внешние (или иные) воздействия (возмущения) $f(t)$, в ЭГС происходят отклонения отдельных её параметров от ранее существовавших или от постоянных ($y \neq$ const).

Если о возмущении на ЭГС $f(t)$ имеется полная *априорная* информация, то она может быть учтена при расчете оптимального управления, обеспечивающего желаемое функционирование ЭГС.

В некоторых случаях основное возмущение на ЭГС можно измерять непосредственно, т. е. доступна *текущая* информация о причине отклонений, собираемая, например, в ходе мониторинга. Используя эту информацию, можно *компенсировать* отклонения управляемой переменной, оказывая на ЭГС дополнительное воздействие. В простейшем случае компенсирующее воздействие суммируется с управлением, как это показано на рис. 4.6.

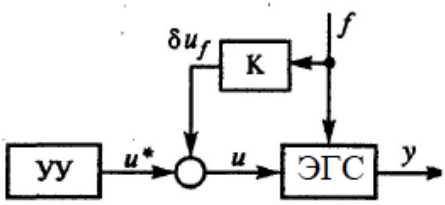


Рис. 4.6. Разомкнутая система управления с компенсацией воздействия на ЭГС

В результате получаем систему, также реализующую принцип разомкнутого управления. Алгоритм обработки текущей информации о возмущении f в компенсаторе K с целью вычисления компенсирующего

воздействия δu_f строится на базе информации о характеристиках ЭГС по каналам управления и возмущения.

Наличие текущей информации о воздействии на ЭГС, т. е. о *причине* отклонений, дает возможность формирования в системе второго (искусственного) пути из точки приложения возмущения к выходу объекта. Наличие такого пути является необходимым условием реализации абсолютной инвариантности управляемой переменной к непосредственно измеряемому возмущению (так называемый *принцип двухканалъности)* (Теория автоматического…, 2003).

Для работоспособности системы управления с компенсацией возмущения необходимо, чтобы заданный и поддерживаемый режим ЭГС был устойчив, а другие (нескомпенсированные) возмущения были слабыми.

По другому принципу организуются системы управления с ***компенсацией параметрических возмущений***. Многие ЭГС изменяют свои свойства либо в зависимости от времени (нестационарность), либо от режима работы. Если доступна априорная информация об изменениях характеристик ЭГС, то она может быть учтена при расчете оптимального управления. При отсутствии достаточной априорной информации о свойствах ЭГС управления и/или среды не представляется возможным рассчитать оптимальную программу управления $u^*(t)$ или алгоритм регулятора (Теория автоматического .., 2003).

Неопределенность в свойствах ЭГС или изменение этих свойств можно трактовать как следствие воздействий внешней среды. Если можно непосредственно измерять состояние внешней среды (например, в ходе мониторинга) — причины, вызывающие изменение свойств объекта, то текущая информация используется для подстройки параметров управляющих устройств и регуляторов.

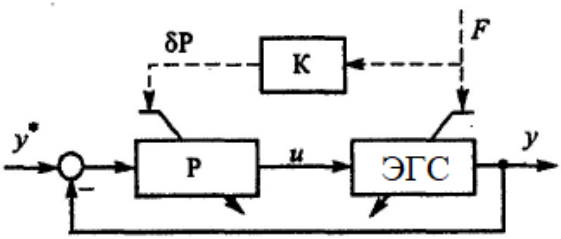


Рис.4.7. Схема системы управления ЭГС с компенсацией параметрических возмущений

На рис. 4.7 изображена структура системы управления ЭГС с компенсацией параметрических возмущений. Здесь сплошными линиями со стрелками обозначены переменные энергетического характера в системе управления с обратной связью, целью которой является воспроизведение на выходе ЭГС задающего воздействия *y** с требуемой точностью. Алгоритм регулятора (Р) рассчитан на базе априорной информации о свойствах объекта. Если эти свойства отклоняются от номинальных, качество системы может ухудшаться. На рис. 4.7 наклонная стрелка, «пронизывающая» объект, условно изображает влияние среды, приводящее к изменению свойств объекта. Если удается измерять непосредственно воздействия среды (F) (пунктирная линия на рисунке), то такая текущая информация может быть обработана в блоке компенсации (*К*) с целью вычисления новых значений параметров настройки регулятора (Р), либо для более кардинальных изменений его алгоритма.

Отметим, что по отношению к параметрическим воздействиям рассматриваемые системы управления являются разомкнутыми. Здесь управление осуществляется не по следствию, а по причине, что в принципе позволяет достичь абсолютную инвариантность характеристик таких систем к параметрическим возмущениям (Теория автоматического .., 2003).

4.4.3. Принцип обратной связи. Кроме вышеуказанных систем применяются и системы управления ЭГС по принципу с ***обратной связью***.

Структура такой системы управления, согласно Д.В.Артамонову и А.Д.Семёнову (2003), в общем виде выглядит следующим образом (рис.4.8).

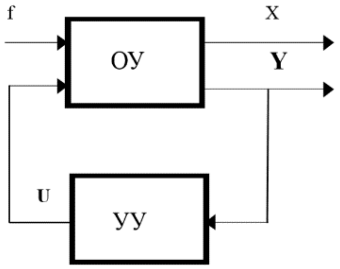


Рис. 4.8. Общий вид структуры системы управления (объяснения в тексте)

Здесь ОУ – объект управления, т.е. ЭГС; U обозначает независимые переменные (управляющие координаты или величины), вырабатываемые устройством управления (УУ); X - зависимые переменные (обобщенные или фазовые координаты), которые однозначно характеризуют состояние управляемого процесса в любой момент времени; Y – вторичные, измеряемые переменные (управляемые координаты), которые в процессе управления измеряются и используются для оценки качества функционирования системы управления; f - внешние неконтролируемые переменные (возмущающие воздействия), отклоняющие Y от заданных значений.

В этой структурной схеме реализуется фундаментальный принцип управления - принцип обратной связи (см. ниже), когда информация с выхода объекта после соответствующей обработки в устройстве управления поступает на его вход. Причем управляющие воздействия, подаваемые на вход объекта, вычисляются таким образом, чтобы обеспечить достижения заданной цели управления и скомпенсировать неблагоприятные изменения управляемых координат Y при неконтролируемом действии внешних возмущений f.

На рис.4.9 показана упрощенная схема системы с сильной обратной связью (или петлей управления), в которой выход компонента, находящегося «ниже», или же часть этого выхода направляется обратно и влияет на «верхние» компоненты, управляет ими.

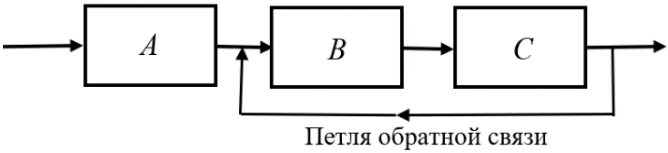


Рис.4.9. Блоковая модель экосистемы с петлей обратной связи (или управляющей петлей), которая превращает линейную систему в частично замкнутую (по Ю.Одуму, 1986)

Например, обратную связь может оказывать «нижний» хищный организм С, уменьшающий численность «верхних» растительноядных животных или растений (В и А) в пищевой цепи. Эта же схема может изображать идеальную экономическую систему, в которой ресурсы (А) превращаются в полезные товары и услуги (В), причем образуются также отходы (С), которые после переработки снова пускаются в

производство (А→В), что уменьшает итоговое количество отходов. Как правило, природные экосистемы чаще имеют кольцевую или петлеобразную, а не линейную структуру.

На рис.4.10 показана абстрактная схема системы управления объектом управления (ОУ) с указанием функций различных элементов управления. Именно объект управления (ОУ) реализует процесс, который необходимо организовать для достижения поставленной цели управления.

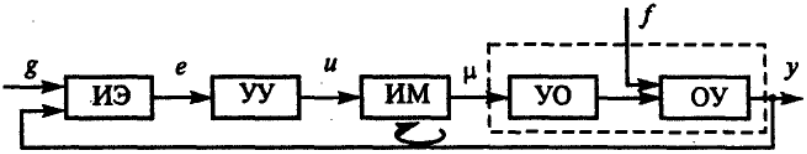


Рис.4.10. Структура системы управления с обратной связью (Теория автоматического…, 2003): **ОУ – объект управления; УО - управляющий орган, обычно конструктивно входящий в объект; ИМ - исполнительный механизм; УУ – управляющее устройство; ИЭ - измерительный элемент; *y* — управляемая переменная (выход объекта и системы); *μ*—управляющее воздействие (энергетическое); *u* — управляющее воздействие (информационное); *e* - отклонение управляемой переменной от заданного значения g или ошибка системы: *f* — возмущающее воздействие среды.**

Практически невозможно получать и своевременно обрабатывать полную информацию о всех возмущениях, действующих на ЭГС. Для ослабления действия любых возмущений на данную ЭГС может быть использована текущая информация об отклонениях управляемой переменной, т. е. информация о следствиях возмущений. На рис. 4.11 показана схема системы управления, реализующей принцип обратной связи. Особенностью такой системы управления является наличие замкнутого контура причинно-следственных связей.

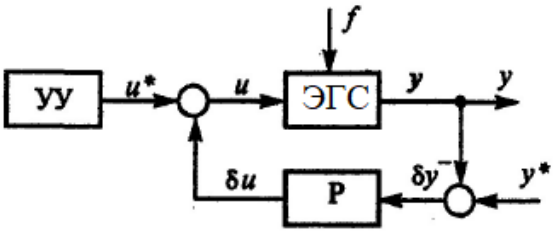


Рис.4.11. Вариант схемы управления ЭГС по принципу обратной связи

Достоинство обратной связи заключается в ее универсальности — какие бы возмущения ни действовали на ЭГС, будет выявлено их следствие — отклонение δy управляемой переменной. В регуляторе Р на базе этой информации вырабатывается дополнительное управляющее воздействие δu, направленное на уменьшение отклонения δy.

Обратим внимание на то, что для функционирования системы с обратной связью нет необходимости в полной априорной информации о цели управления. Достаточно иметь текущую информацию о цели в виде задающего воздействия $y^*(t)$ на входе элемента сравнения. Задание на рассматриваемую систему может генерироваться другими системами, например системами высших уровней иерархии управления. Более того, достаточно иметь текущую информацию только об отклонении $\delta y(t)$ управляемой переменной $y(t)$ от заданных значений $y^*(t)$. Системы, предназначенные для воспроизведения на выходе объекта управления изменяющихся во времени задающих воздействий, называют следящими. Они, в частности, реализуются в системах экологического мониторинга.

По существу автоматизированная система управления (АСУ) данной эколого-геологической системой (ЭГС) является видоизмененной ГИС (ГИС-мониторинга), в которой отслеживание изменений в ЭГС, их анализ и выработка управляющих решений на основе прогнозной оценки вырабатываются блоком ***мониторинга*** (рис.4.12).

В этой системе информация о поведении ЭГС (y) поступает в автоматизированную прогнозно-диагностическую систему (АПДС) мониторинга (Королев, 1995; 2007, 2015), где происходит ее обработка. С помощью постоянно-действующей модели (ПДМ) системы мониторинга вырабатывается прогнозная оценка «поведения» ЭГС на определенный прогнозный интервал времени ($\Delta t_{\text{п}}$), на основе которого, наконец, вырабатывается управляющее решение (Δu), которое реализуется с помощью управляющего устройства (УУ) (см. рис. 4.12).

Обратная связь является единственным средством стабилизации неустойчивых режимов ЭГС. Измеряя отклонения от положения равновесия или в общем случае — от оптимальной траектории, можно оказывать на ЭГС воздействия, направленные на возвращение данной ЭГС в исходное состояние.

Наконец, важнейшее свойство отрицательной обратной связи — уменьшение влияния изменений характеристик ЭГС на свойства самой системы в целом.

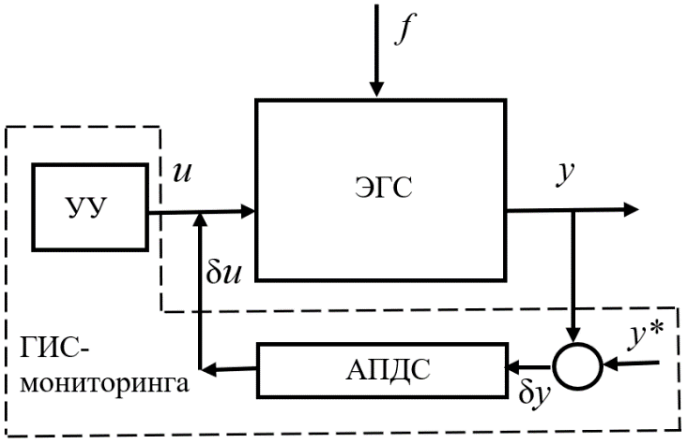


Рис. 4.12. Место геоинформационной системы мониторинга (ГИС) в общей структуре управления ЭГС (объяснения в тексте)

Вышеизложенное позволяет говорить об универсальности принципа обратной связи, которая при правильном применении способна стабилизировать неустойчивые режимы ЭГС, обеспечивать инвариантность к непосредственно неизмеряемым возмущениям и уменьшать чувствительность к вариациям характеристик ЭГС и окружающей среды.

Недостатком систем управления с обратной связью является недостижимость абсолютной инвариантности к произвольным воздействиям — для формирования сигнала управления u принципиально необходимы отклонения δy, являющиеся входной информацией управляющего устройства.

Весьма важным для практического применения в системах управления ЭГС является вопрос о циркуляции информации в каналах с обратной связью, или без нее или – вопрос о пропускной способности систем управления. Положительная обратная связь обладает свойствами, существенно отличными от отрицательной. По определению Л.Бриллюэна (1960) информация есть положительная величина, которая никогда не может стать отрицательной. Следовательно, в каналах систем управления ЭГС с обратной связью мы имеем дело не с самой информацией, а с ее ценностью. Вопрос о том, как определить ценность в такого рода задачах, остается открытым.

Для системы управления ЭГС с обратной связью (рис.4.13) балансовые уравнения передающейся информации (I_i) могут быть представлены в виде:

$$I_1(1 + \alpha + \alpha^2 + \cdots) = \frac{I_1}{1 - \alpha}, \tag{4.16}$$

$$I_2 = \frac{I_1}{1 - \alpha}, \tag{4.17}$$

$$I_3 = I_2 - \alpha I_2 = I_1. \tag{4.18}$$

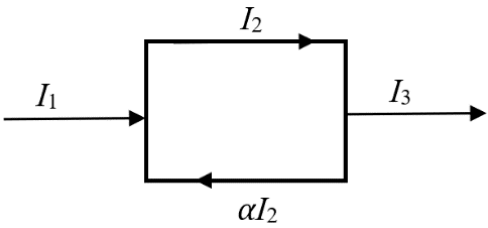


Рис. 4.13. Пропускная способность информации (I_i) в системе управления ЭГС с обратной связью

4.4.4. Принцип адаптивного управления. Наконец системы управления могут быть построены на базе принципа ***адаптивного управления***.

Несмотря на то, что в системах компенсации параметрических возмущений и происходит подстройка параметров, такие системы не принято называть самонастраивающимися. Системы управления с самонастройкой или, в общем случае, с *адаптацией* получают информацию об изменениях свойств объекта путём текущей идентификации. Это значит, что каким-либо способом оцениваются следствия параметрических воздействий среды на ЭГС. Текущая информация об отклонениях свойств ЭГС используется для принятия решения о подстройке параметров управляющих устройств и/или регуляторов.

На рис. 4.14 изображена структура адаптивной (самонастраивающейся) системы управления ЭГС. Как и в предыдущем

случае, следящая система, образованная ЭГС и регулятором (Р), нуждается в подстройке параметров регулятора из-за изменений свойств объекта. Поскольку причины, вызывающие эти изменения, непосредственно нельзя измерять, остается оценивать их следствие. В устройстве текущей идентификации (И) путем обработки данных о входе (u) и выходе (y) объекта оцениваются отклонения его характеристик. На базе этой информации в блоке адаптации (А) вычисляются новые значения параметров регулятора Р. Здесь реализуется принцип отрицательной (параметрической) обратной связи — образуется замкнутый контур передачи и обработки информации для ослабления параметрических возмущений среды.

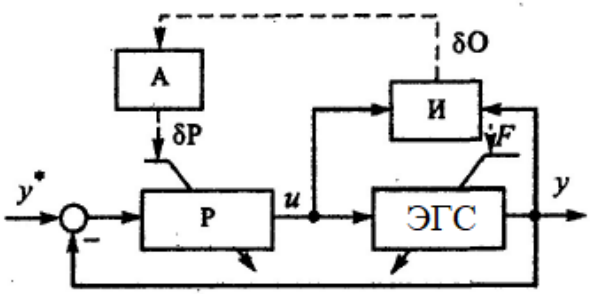


Рис.4.14. Схема адаптивной системы управления ЭГС

Заметим, что замкнутый основной контур системы управления, образованный ЭГС и регулятором, можно трактовать как объект управления системы более высокого (второго) уровня иерархии. Управляющим воздействием системы второго уровня являются изменения значений параметров регулятора системы первого уровня, а возмущением — параметрические воздействия внешней среды. Роль измерительного элемента в системе второго уровня играет устройство текущей идентификации (И), а регулятора — блок настройки (А). В блоке (А) по вариациям характеристик ЭГС или отклонениям показателей качества вычисляются параметры регулятора (Р), из условия сохранения заданных показателей качества системы нижнего уровня иерархии. Это так называемая *самонастраивающаяся система* управления.

В более общем случае целью адаптивной системы является оптимизация показателей качества, т. е. настройка регулятора связана с поиском экстремума некоторого функционала (Теория автоматического …, 2003).

4.5. Классификация систем управления ЭГС по типу сигнала

Понятия «переменная», «воздействие», «сигнал» в теории управления имеют в основном информационный смысл. Сигналы на входах и на выходах функциональных элементов систем управления рассматриваются как носители информации, а сами элементы — преобразователи сигналов — как устройства передачи и обработки этой информации.

Если информация кодируется уровнями сигналов — функций непрерывного времени (рис. 4.15, *а*), то говорят о непрерывных системах (системы с непрерывным временем, аналоговые системы). Здесь и время, и уровни всех сигналов принадлежат множеству мощности континуума.

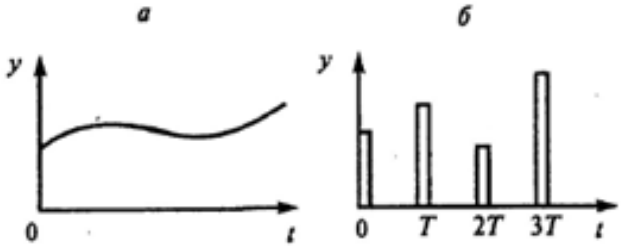


Рис.4.15. Типы информационных сигналов в системах управления ЭГС

В том случае, когда информация кодируется каким-либо параметром (высота, ширина, фаза) импульсов определенной формы, говорят об импульсных системах. Различают импульсные системы с амплитудно-импульсной, широтно-импульсной, фазо-импульсной модуляциями. На рис. 4.15,*б* изображена последовательность прямоугольных импульсов, высота (амплитуда) которых кодирует информацию в моменты времени, кратные периоду (Т), это случай амплитудно-импульсной модуляции. В математических моделях импульсных систем используется понятие дискретного времени, принадлежащего счетному множеству, а параметр импульса — амплитуда — принадлежит множеству мощности континуума. Существуют автоматические системы, в которых информация кодируется частотой импульсов.

В *цифровых системах* управления, как и в импульсных происходит квантование времени. Кроме того, в силу конечности разрядной сетки вычислительных устройств имеет место квантование и уровня, т.е.

уровень принадлежит конечному множеству (хотя, быть может, и очень большой мощности).

Также системы автоматического регулирования ЭГС можно классифицировать по типу применяемого алгоритма. Рассмотрим структуру системы автоматического регулирования с обратной связью (рис. 4.16).

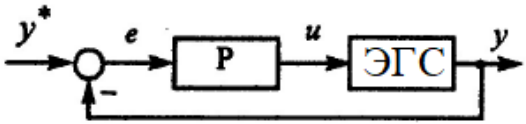


Рис.4.16. Схема системы автоматического регулирования ЭГС

Регулятор Р на базе информации об ошибке $e(t)$, т.е. отклонении управляемой переменной $y(t)$ от задания $y^*(t)$, формирует по некоторому алгоритму управляющее воздействие $u(t)$ на данную ЭГС.

Используют различные алгоритмы, или, как еще говорят, ***законы регулирования и управления***. Приведем некоторые из них, полагая, что все переменные являются функциями непрерывного времени.

Для этого рассмотрим, согласно Д.В.Артамонову и А.Д.Семёнову (2003), обобщенную структуру системы автоматического управления (рис. 4.17).

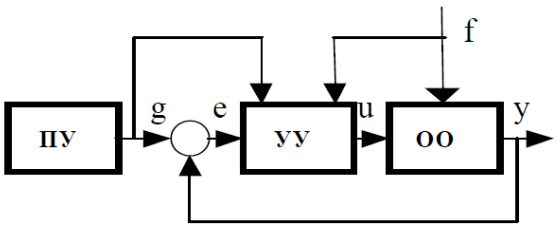


Рис. 4.17. Обобщенная структура системы автоматизированного управления (Артамонов, Семёнов, 2003)

На этой структурной схеме приняты следующие обозначения: ПУ – программное (задающее устройство), УУ - устройство управления (регулятор), ОО - обобщенный объект (ЭГС).

Для такой обобщенной структуры задачу управления можно сформулировать следующим образом. Для заданной математической

модели объекта найти закон управления, удовлетворяющий заранее заданным критериям (показателям) качества, для всех $x \in X$ и $u \in U$.

Под законом управления понимается функциональная взаимосвязь между обобщенными координатами системы x и управляющим воздействием u.

$$u = F(x,a), \tag{4.19}$$

где F, в общем случае, некоторая нелинейная функция, a - постоянные параметры закона управления.

Предполагается, что объект управления полностью управляем и наблюдаем, что позволяет достичь за конечное время любого $x \in X$, используя для управления $u \in U$, а также восстановить вектор обобщенных координат x по измеренным значениям вектора регулируемых величин y.

Задача синтеза системы управления включает в себя два этапа (Артамонов, Семёнов, 2003). На первом этапе решается задача оптимального синтеза, в результате которой определяется функция F, удовлетворяющая заданным критериям оптимальности для всех $x \in X$ и $u \in U$. Как правило, в качестве таких критериев используются интегральные критерии. На втором этапе решается задача параметрического синтеза, заключающаяся в определении параметра a , при заданной F , обеспечивающая системе показатели качества не хуже заданных. Чаще при решении этой задачи используют частотные, временные или корневые показатели качества.

Синтез автоматических регуляторов является частным случаем решения задачи управления и заключается в решении задачи параметрического синтеза. В результате решения этой задачи определяются закон регулирования и настройки регуляторов. В результате синтеза создаются системы автоматического регулирования, обеспечивающие движение объекта с заданной точностью по заранее заданной траектории, которая может быть и не оптимальной.

Для систем задаваемых структурой рис. 4.12 выражение (4.19) может быть представлено в линейной форме:

$$u = F_1(\mathrm{e}) + F_2(\mathrm{q}) + F_3(\mathrm{f}). \tag{4.20}$$

Здесь первое слагаемое соответствует регулированию по отклонению. Второе и третье - регулированию по внешним воздействиям (по возмущению).

Ограничимся, согласно (Артамонов, Семёнов, 2003), синтезом регуляторов реализующих линейные законы регулирования по

обобщенным координатам или отклонению. В этом случае выражение для законов регулирования запишется в виде:

$$u = L(x);$$
$$u = \psi(e, \frac{de}{dt}, \int edt). \quad (4.21)$$

Первое уравнение соответствует регулированию по обобщенным координатам, второе регулированию по отклонению. Для полностью наблюдаемых систем всегда можно перейти в (5.3) от обобщенных координат к ошибке системы и наоборот.

Для одномерных систем используются пять законов регулирования (Артамонов, Семёнов, 2003): 1) пропорциональный; 2) интегральный; 3) пропорционально-интегральный; 4) пропорционально-дифференциальный; 5) пропорционально-интегрально-дифференциальный.

Пропорциональный закон (П-закон) регулирования имеет ясную логику—чем больше ошибка, тем сильнее воздействие на ЭГС. Если регулятор трактовать как преобразователь сигналов, то математически алгоритм выражается так:

$$u(t) = k_p e(t). \quad (4.22)$$

Реализация такого закона осуществляется пропорциональным регулятором (П-регулятором) с передаточной функцией

$$W_P(p) = k_p. \quad (4.23)$$

где $W_P(p)$ – передаточная функция.

Интегральный закон (И-закон) регулирования означает, что уровень воздействия на объект определяется суммарной ошибкой, накопившейся определенное время (Теория автоматического …, 2003):

$$u(t) = k_l \int_0^t e(t)dt + u_0. \quad (4.24)$$

Выражение для передаточной функции выглядит так:

$$W_P(p) = 1/pk_l. \quad (4.25)$$

Если продифференцировать выражение (4.24) по времени, получим:

$$\frac{du(t)}{dt} = k_l e(t), \tag{4.26}$$

т.е. ошибка системы определяет скорость изменения управляющего воздействия. Характерной чертой И-закона является то, что управляющее воздействие изменяется до тех пор, пока ошибка не станет равной нулю.

Пропорционально-интегральный закон (ПИ-закон) является комбинацией двух предыдущих:

$$u(t) = k_p e(t) + k_l \int_0^t e(\tau) d\tau. \tag{4.27}$$

Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-закон) формирует управляющие воздействия с учетом и скорости изменения ошибки:

$$u(t) = k_p e(t) + k_l \int_0^t e(\tau) d\tau + k_D \frac{de(t)}{dt}. \tag{4.28}$$

Именно этот закон наиболее часто реализуется в системах промышленной автоматики, но может быть применен и в системах управления техническими компонентами ЭГС, если они поддаются автоматическому управлению (Красовский, Поспелов, 1962).

Аналогичным образом описываются прочие законы регулирования. С их помощью возможно различное синтезирование автоматических регуляторов (Артамонов, Семёнов, 2003).

Кроме вышеописанных признаков классификации систем управления ЭГС, их можно систематизировать по **энергетическому признаку** (Теория автоматического … 2003).

При этом, хотя переменные — входы и выходы элементов систем управления в теории управления рассматриваются как носители информации, не следует забывать, что исполнение принятого в управляющем устройстве решения об оказании управляющего воздействия на рассматриваемую ЭГС связано с определенными энергетическими затратами, иногда весьма значительными.

Для оказания управляющего воздействия может использоваться энергия самого управляемого процесса, отбираемая через

измерительный элемент. В этом случае говорят о прямом регулировании. Широко распространены *поплавковые регуляторы* уровня прямого действия, например, для систем регулирования уровня подземных или дренажных вод. Здесь поплавок одновременно осуществляет три операции: измерение уровня, принятие решения об оказании управляющего воздействия и исполнение решения.

Достоинством систем прямого регулирования ЭГС является простота и надежность. Они, как правило, органично вписываются в конструкцию ЭГС, не требуя посторонних источников энергии. Недостатком этих систем является невысокая точность при необходимости обеспечивать большие усилия для перемещения управляющих органов. Например, при стабилизации уровня жидкости в большом резервуаре с помощью регулятора прямого действия пришлось бы сильно увеличивать объем поплавка.

Для повышения точности управления ЭГС, требующими значительных энергетических затрат на управление, необходимо разделение функций между измерительным и исполнительным элементами систем управления. В системах непрямого действия для оказания управляющего воздействия на объект привлекается дополнительный источник энергии (Теория автоматического …, 2003).

4.6. Особенности управления абиотическими и биотическими компонентами ЭГС

В механизмах управления абиотическими и биотическими (живыми) компонентами ЭГС есть много общего, но есть и принципиальные различия.

Общим является то, что в обоих случаях управляемая подсистема ЭГС является открытой, обменивающейся со средой массо-энергетическими и информационными потоками.

Различия состоят в том, что в биотической подсистеме, как более сложно организованной, имеется значительно больше информационных потоков, а следовательно, и больше контуров управления – генетического, физиологического и поведенческого (рис. 4.18-4.20).

Процессы в физиологических системах управления организма протекают значительно быстрее, чем в генетической. Характерное время процессов восстановления после физической нагрузки, например, составляет 15—20 мин. Поэтому генетическая система, показанная на рис. 4.18, образует структуру рассматриваемой биосистемы, в то время

как быстрые поведенческие и физиологические процессы в системах (рис. 4.19 и 4.20) определяют ее функцию.

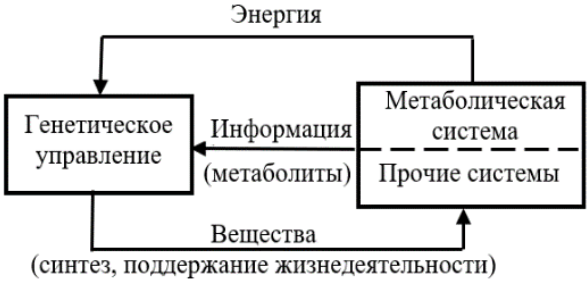
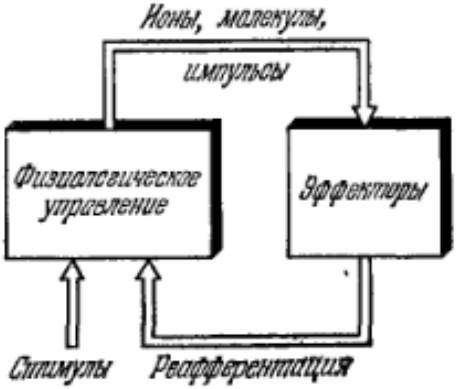


Рис. 4.18. Структура (контур) генетической системы, управляющей синтезом веществ и поддерживающая структуру остальных подсистем организма (по В.Н.Новосельцеву, 1978)



+

Рис. 4.19. Структура (контур) физиологической системы управления, определяющей поведенческими реакциями организма (по В.Н.Новосельцеву, 1978)

Организация живого есть единство структуры и функции — устойчивости и подвижности. Чем сложнее организм, тем сложнее система управления им. Поэтому сложность систем управления биотическими компонентами возрастает в ряду микроорганизмы < лишайники < мхи < травянистые растения < кустарники < деревья <

беспозвоночные животные < позвоночные животные (рептилии < рыбы < птицы < млекопитающие).

Рис. 4.20. Структура (контур) физиологической системы управления, обеспечивающей снабжение всех подсистем в соответствии с их метаболическими потребностями (по В.Н.Новосельцеву, 1978)

Из этого вытекает *принцип биологического эпиморфизма*[1]: одному элементарному процессу у низшего организма соответствует несколько элементарных процессов у высшего. Принцип биологического эпиморфизма применительно к управляющим механизмам биологических систем был обоснован В.Н.Новосельцевым (1978), согласно которому, *механизмы управления, обеспечивающие основные биологические свойства высших и низших организмов, таковы, что они находятся в эпиморфном отношении: одному элементарному механизму управления у низших организмов соответствует множество элементарных механизмов у высшего*.

Этот принцип является очень и очень важным при анализе и ЭГС. Дело в том, что в процессе накопления сложности сами биосистемы и ЭГС в целом могут приобретать новые регулятивные свойства. С увеличением сложности ЭГС или уровня их организации эпиморфизм обеспечивает эмерджентность таких систем, их структурные связи между подсистемами и компонентами.

[1] *Рашевский Н.* Модели и математические принципы в биологии. // В сб: Теоретическая и математическая биология. – М., Мир, 1968.

Важно также отметить, что эпиморфизм проявляется не только в биотических подсистемах ЭГС, но и в абиотических, а также в технических, обеспечивая возможность их самоорганизации.

Согласно Н.Ф.Реймерсу (1994), качественным нормативом эксплуатации природных систем, а, следовательно, и ЭГС, следует считать возможность формирования климаксовых или хотя бы узловых фаз сукцессионного развития экосистем в рамках ландшафтных образований. Показателями благополучия или неблагополучия могут также служить виды-индикаторы, указывающие на сохранение базовых свойств экосистем. В каждом географическом пункте и в пределах каждой экосистемы (или их сочетания) существуют свои специфические закономерности сукцессии и формирования биоты, поэтому общего стандартного перечня признаков составить нельзя: определение ситуации происходит в результате ее эмпирического изучения на месте. Отсюда следует, что управление ЭГС должно быть нацелено на обеспечение их климаксового состояния.

Задача ученых по управлению и восстановлению ЭГС состоит в том, чтобы исправить любые проблемы, связанные, например, с химическим загрязнением (включая радиологическое облучение: Wilson and Clarke, 1993; Lehr et al., 2002) и всеми видами прочих стрессоров (Cairns, 1980, 1994; Prach, 2004).

Как было показано выше, стрессоры могут быть по своей природе физическими, химическими/радиологическими и биологическими. Физические стрессоры включают физические нарушения ЭГС, такие как вырубка, строительство дорог, падение деревьев (от естественных или антропогенных причин), наводнения, эрозия, а также различные погодные явления. Химические стрессоры обусловливают всевозможные химические загрязнения компонентов ЭГС. Биологические стрессоры включают инвазивные виды, возникающие инфекционные заболевания и естественные процессы, такие как хищничество и конкуренция между видами и популяциями.

Существует целый ряд управляющих действий (детально рассматриваемых ниже, во II-й части монографии), направленных на снижение риска нанесения ущерба экосистемам, экологическим рецепторам и людям, которые включают разные способы восстановления, очистки и блокировки путей воздействия (либо физически, либо опосредованно - через образование, нормативы и рекомендации. Их общая схема показана на рис. 4.21 (по Burger, 2007a).

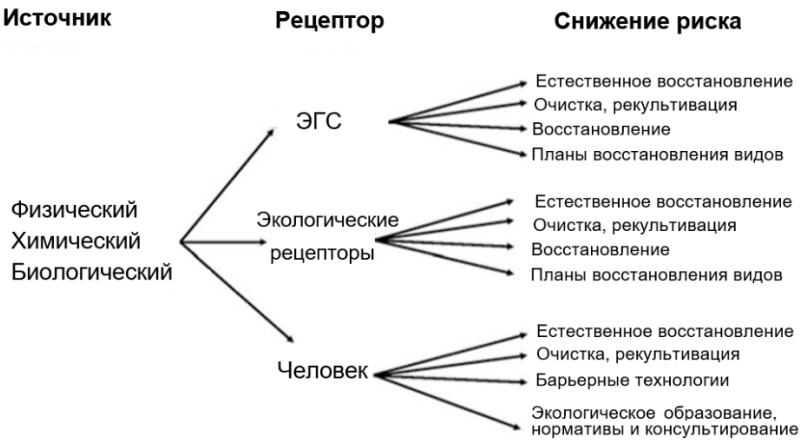


Рис. 4.21. Методы снижения риска для рецепторов в зависимости от различных стрессоров (по Burger, 2007a с изменениями авт.).

4.8. Математические модели управления ЭГС

4.7.1. Общие положения. Управление ЭГС требуют как исходной информации (см. гл. 4.2), так и временных и пространственных моделей для оценки текущего состояния здоровья и благополучия окружающей среды (Ehrenfeld and Toth, 1997; Hobbs and Harris, 2001; Leitao and Ahern, 2002; Burger et al., 2003, 2004b; Baird, 2005). Математическое моделирование объектов и систем управления начинается с их выделения из окружающей среды, что, вообще говоря, приводит к искажению изучаемых процессов, так как в природе все явления в той или иной степени взаимосвязаны и взаимообусловлены. Динамические модели объектов и систем управления строятся для объяснения и предсказания их поведения — изменений во времени состояния и наблюдаемых выходных переменных, вызванных внутренними процессами и внешними воздействиями среды.

Компьютерные модели эколого-геологических систем, которые программно реализуют на ПК математические модели ЭГС, позволяют проводить вычислительные эксперименты для отображения экопроцессов. Исходными данными для разработки математических моделей являются наблюдения и измерения характеристик экосистем, полученные в результате контроля окружающей среды и лабораторных исследований. Результаты компьютерного моделирования экосистем и компьютерная оценка воздействий окружающей среды техногенных

систем имеют важное значение для решения задач управления охраной окружающей среды (Мешалкин и др., 2016).

Разработка математических моделей и компьютерное моделирование, или вычислительный (компьютерный) эксперимент - важные инструменты принятия научно-обоснованных решений различных задач управления охраной окружающей среды. Разработка и применение математических моделей - начальные этапы системного анализа объектов ОС.

Любая математическая модель, которая позволяет лучше понимать данную проблему, столь же важна как наблюдение и факты. Математическая модель - абстрактное формализованное описание объекта, процесса или явления реального мира. Поэтому математическое абстрагирование обычно связано с некоторым упрощенным формальным представлением реального объекта. Но чем точнее математическая модель отражает свойства реальной ЭГС, тем точнее результаты проводимых расчетов. Абстракция - основа системного анализа, который позволяет выявлять главные характеристики модели объекта окружающей среды. Блок-схема процедуры математического моделирования экологических систем представлена на рис. 4.22.

Математическая модель — это математическое описание координат, параметров и функций, отображающих существенные свойства объекта, процесса или явления. Математическая модель ЭГС является основой для дальнейшего анализа и синтеза систем управления ими. В теории управления исследуются и рассматриваются не реальные системы, а их математические модели, поэтому результаты проводимых исследований и расчетов лишь приблизительно отражают свойства реальных систем, а в нашем случае – реальных ЭГС. Чем точнее математическая модель отражает свойства реальной ЭГС, тем точнее результаты проводимых расчетов.

Для получения математической модели системы управления необходимо дополнить уравнения объекта уравнениями исполнительных устройств (ИУ), устройств измерения (ИЭ) и устройства управления (УУ).

Очевидно, что без нарушения общности рассуждений исполнительные устройства (ИУ) и устройства измерения (ИЭ) можно отнести к объекту управления, расширив размерность его вектора обобщенных координат. Такой объект, включающий в себя исполнительные и измерительные устройства, называют обобщенным объектом.

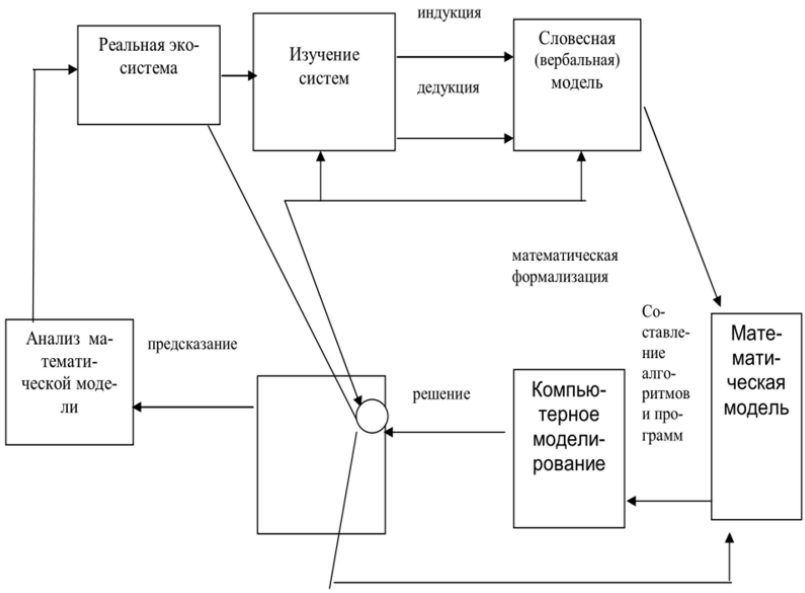


Рис. 4.22. Блок-схема процедуры разработки математической модели и компьютерного моделирования экосистемы (по Мешалкину и др., 2016)

В наиболее общем случае управляемый процесс, протекающий в ОУ, может быть описан дифференциальными уравнениями в частных производных (Артамонов, Семёнов, 2003):

$$L\Phi(l,t) = f(l,t) \quad (l \in L, t > 0) \tag{4.29}$$

при начальных условиях:

$$\Lambda_j\Phi(l,0) = \beta(l), \quad (j=1,2,\ldots n, l \in L) \tag{4.30}$$

и краевых условия условиях:

$$B_i\Phi(l,t) = b_i(l,t), \quad (i=1,2,\ldots m, l \in \mathrm{L}, t > 0), \tag{4.31}$$

где l - пространственная координата; m - число управляющих величин; n - число управляемых величин; t - время; L – оператор процесса; Ф - функция.

Если ограничиться случаем, когда L является волновым оператором или оператором переноса, что соответствует исследованию динамических процессов распространения возмущений и свободных движений, то это позволяет рассматривать достаточно широкий класс физических процессов теплопроводности, диффузии, переноса, газо-гидродинамики, колебаний и т.п. и сводится к решению смешанных задач математической физики для уравнений гиперболического и параболического типа вида (Артамонов, Семёнов, 2003):

$$\sum_{ij=1}^{n} a_{ij}(l)\frac{\partial^2 x}{\partial l_i \partial l_j} + \sum_{i=1}^{n} b_i(l)\frac{\partial x}{\partial l_i} + c(l)x = u(l,t). \tag{4.32}$$

Рассмотрим основные физические процессы, происходящие в ЭГС и сводящиеся к уравнению (4.32).

1. *Уравнение диффузии*. Процессы распространения тепла или диффузии частиц в ЭГС в общем виде описываются следующим уравнением диффузии

$$\rho\frac{\partial x}{\partial t} - div(pgradx) + qx = u(l,t), \tag{4.33}$$

где неизвестная функция $x(l,t)$ является температурой или концентрацией вещества, а $u(l,t)$ – интенсивность источников тепла или вещества в ЭГС.

Для полного описания процесса необходимо задать начальное распределение $x(l,0)$ (начальные условия) и режимы на границе среды $x(l_0,t)$ (граничные условия).

2. *Уравнения газо- или гидродинамики*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho V) = f(l,t) \tag{4.34}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V, gradV) + \frac{1}{\rho}grad(p) = u(l,t), \tag{4.35}$$

где $V(l,t)$ – вектор скорости движения жидкости или газа; $\rho(l,t)$ - плотность; $p(l,t)$ - давление; $f(l,t)$ - интенсивность источников; $u(l,t)$ - интенсивность массовых сил.

Здесь уравнение (4.34) (уравнение неразрывности) и второе уравнение (4.35) (уравнение Эйлера) дополняются уравнением состояния, учитывающим связь между давлением и плотностью в ЭГС.

Согласно Д.В.Артамонову и А.Д.Семёнову (2003), для объектов с распределенными координатами, описываемыми уравнениями в частных производных, координаты физического управляемого процесса $x(l,t)$ и внешние воздействия $u(l,t)$ непрерывно изменяются во времени и пространстве. На практике контроль координат управляемого процесса и внесение управляющих воздействий осуществляется в отдельных точках пространства данной ЭГС. В связи с этим, в задачах автоматическог о управления, для математического описания ОУ переходят к уравнениям в обыкновенных производных. Эти уравнения являются нелинейными неоднородными уравнениями в обычных производных. Они могут быть преобразованы с целью линеаризации нелинейных моделей управления ЭГС на основе ряда математических методов (Артамонов, Семёнов, 2003).

В зависимости от особенностей исследуемой ЭГС и характера решаемых задач можно использовать различные формы представления математических моделей управляемых ЭГС. Наиболее широко используются два вида математического описания систем, или два вида математических моделей — это математические модели систем в пространстве состояний и математические модели типа “вход - выход” или *структурированные модели*, уже частично рассмотренные выше.

В первом случае все переменные ЭГС представляются в виде пространственных векторов, и поведение системы рассматривается в евклидовых пространствах управляющих, управляемых и возмущающих переменных, а также в пространстве состояний внутренних переменных или просто в пространстве состояний.

Во втором случае рассматриваются математические модели типа “вход-выход”, у которых вместо обобщенных координат вводятся входная u (управляющая) и выходная y (управляемая) координаты. Такие математические модели целесообразно использовать для одномерных систем, когда u и y являются скалярами. Именно такие структурированные модели оказываются наиболее удобными для моделирования процессов управления ЭГС.

Структурированные модели, учитывающие техническую организацию систем управления, создаются на основе следующих допущений:

1. Все элементы системы являются простейшими звеньями, т.е. имеют один вход и один выход. Если звено характеризуется несколькими обобщенными координатами, то в качестве выходной

величины выбирается та координата, которая является выходной или регулируемой величиной звена.

2. Все звенья, из которых состоит система, является детектирующими. В детектирующем звене выходная величина зависит только от входной. Если выходная величина звена оказывает влияние на входную, то звено называется недетектирующим.

Допущения о том, что в состав системы управления должны входить только детектирующие звенья не сужает область применения структурированных моделей, так как недетектирующее звено может рассматривать как совокупность детектирующих звеньев, охватываемых обратной связью.

Таким образом, структурированная модель системы управления данной ЭГС разбивается на ряд взаимосвязанных математических моделей отдельных звеньев. Тогда, последовательно исключая из рассмотрения все внутренние переменные, являющиеся входными или выходными сигналами внутренних звеньев, находят дифференциальное уравнение, описывающее взаимосвязь входной (**U**) и выходной (**Y**) величины системы в виде

Функциональная взаимосвязь между векторами регулируемой величины **Y** и векторами обобщенных координат **X** линейных и линеаризованных объектов задается выражением:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{CX}, \tag{4.36}$$

где **C** - квадратная или прямоугольная матрица.

Выражение (4.34) показывает, что любая регулируемая величина **Y** является линейной комбинацией от обобщенных координат объекта **X**.

$$Y_j = \sum_{i=1}^{n} C_{ij} X_i \tag{4.37}$$

Для получения полной математической модели системы управления необходимо ввести уравнения, описывающие поведение устройства управления. Для линейных систем такое управление задается в виде

$$\mathbf{U}=-\mathbf{LX}, \quad \mathbf{U}= -\mathbf{MY}, \tag{4.38}$$

где **L, M**- прямоугольные или квадратные матрицы управления.

Уравнение (4.38) реализует фундаментальный принцип управления - принцип обратной связи. Причем знак минус перед правой частью уравнений (4.38) указывает, что обратная связь является отрицательной, и управляющий сигнал всегда стремится возвратить систему к ее установившемуся состоянию, из которого она выходит под действием возмущений. Эти уравнения позволяют создать математическую модель системы управления ЭГС в пространстве состояний вида

$$a_0 \frac{d^n Y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} Y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_{n-1} \frac{dY}{dt} + a_n Y = b_0 \frac{d^m U}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} U}{dt^{m-1}} + \cdots + b_m U, \quad (4.39)$$

где $a_0, a_1, \ldots a_n$; $b_0, b_1, \ldots b_m$ - постоянные коэффициенты; n - порядок системы.

Линейное неоднородное дифференциальное уравнение n-ого порядка (4.39) эквивалентно системе n линейных уравнений первого порядка (4.38).

4.7.2. Математические модели среды. Внешняя среда, в которой функционирует ЭГС, на входе системы моделируется *автономными системами* — генераторами воздействий, имеющими структуру, показанную на рис. 4.22, или преобразователями типовых воздействий — фильтрами.

Система называется автономной, если на нее не действуют внешние в том числе параметрического типа. Автономные системы, таким образом, стационарны. Изменение их состояния происходит в силу накопленной ранее энергии. На рис. 4.23 модель среды представлена в виде автономной системы (S), имеющей выход (y), но не имеющей входов.

Дифференциальные уравнения автономных систем включают переменные системы и их производные, но не содержат переменных, описывающих воздействия среды, и имеют постоянные параметры. Это так называемые *однородные* дифференциальные уравнения вида

$$\Phi\,(y, y', y'', \ldots, y^{(n)}) = 0, \quad (4.40)$$

дополненные начальными условиями:

$$y(0), y'(0), \ldots, y^{(n)}(0). \quad (4.41)$$

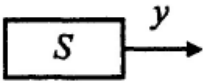


Рис. 4.23. Структура автономной системы

Начальные условия являются следствием предыстории системы и вместе с дифференциальными уравнениями полностью определяют поведение автономной системы. Если система автономна, то ее движения называют свободными.

Примеры моделирования и создания математических моделей среды описаны в литературе (см., например, Мешалкин и др., 2016).

Распространенными типовыми сигналами, моделирующими детерминированное воздействие, являются единичные импульсная и ступенчатая функции.

Примером типового случайного воздействия является так называемый «белый шум». Среда может моделироваться динамической системой того же класса, что и сама система управления. Однако часто рассматриваются детерминированные системы со случайными воздействиями на входе (Теория автоматического .., 2003).

4.7.3. Математические модели ЭГС как многомерных систем. Эколого-геологическая система (ЭГС) в простейшем случае может быть одномерной, если она испытывает лишь одно воздействие (вход). В этом случае и система управления такой ЭГС будет одномерной. Но чаще всего реальные ЭГС представляют собой *многомерные системы*, у которых есть несколько входных и выходных переменных. Системы управления такими ЭГС также будут многомерными.

Согласно Д.В.Артамонову и А.Д.Семёнову (2003), к ним относятся следующие (рис. 4.24):

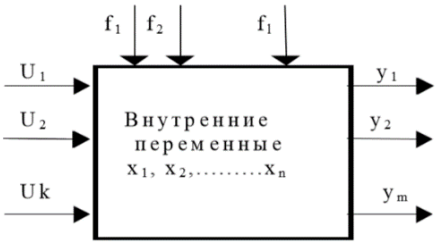


Рис.4.24. Переменные ЭГС как многомерного объекта

1) *входные переменные*, представляющие сигналы, генерируемые системами, внешними по отношению к исследуемой ЭГС, и влияющие на ее поведение. Входные переменные разделяются на управляющие переменные, задаваемые вектором **U**

$$\mathbf{u} = (u_1, u_2, \ldots u_k)^T, \tag{4.42}$$

и возмущающие воздействия, задаваемые вектором **f:**

$$\mathbf{f} = (f_1, f_2, \ldots f_k)^T, \tag{4.43}$$

2) *выходные или регулируемые переменные*, задаваемые вектором регулируемых величин **y:**

$$\mathbf{y} = (y_1, y_2, \ldots y_k)^T, \tag{4.44}$$

3) *переменные* (обобщенные координаты) *состояния* или промежуточные переменные, задаваемые вектором обобщенных координат **x:**

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \ldots x_k)^T, \tag{4.45}$$

Таким образом, переменные многомерной ЭГС являются векторными величинами, зависящими от времени (t), а сама эколого-геологическая система может быть представлена структурной схемой, аналогичной рис. 4.23.

Согласно понятию векторного пространства множество всех значений, которые может принять вектор управления **U** в момент времени t, образует пространство управляющих величин. Аналогично, множество всех значений, которое могут принимать векторы возмущений **f**, регулируемых величин **y** и обобщенных координат **x** в момент времени t, образуют пространство возмущающих воздействий, пространство регулируемых величин и пространство состояний системы.

В любой момент времени t состояние данной ЭГС является функцией начального состояния $\mathbf{x}(t_0)$ и вектора входных величин $\mathbf{U}(t_0,t)$ и $\mathbf{f}(t_0,t)$:

$$\mathbf{x}(t) = F[\mathrm{x}(t_0); \mathbf{u}(t_0,t); \mathbf{f}(t_0,t)], \tag{4.46}$$

где F - однозначная функция своих аргументов.

Вектор регулируемых величин в момент t является также функцией начального состояния $\mathbf{x}_0(t_0)$ и вектора входных величин $\mathbf{u}(t_0,t)$ и $\mathbf{f}(t_0,t)$ и может быть записан как

$$\mathbf{y}(t)= \Psi[\mathrm{x}(t_0); \mathbf{u}(t_0,t); \mathbf{f}(t_0,t)], \tag{4.47}$$

Уравнения (4.46) и (4.47) называют уравнениями состояния системы, в нашем случае – рассматриваемой ЭГС. Для ЭГС, описываемых дифференциальными уравнениями, уравнения (4.46) и (4.47) могут быть записаны в виде следующей системы:

$$\begin{cases} \dfrac{d\mathbf{x}}{dt} = F[\mathbf{x}(\mathrm{t}); \mathbf{u}(\mathrm{t}); \mathbf{f}(\mathrm{t})] \\ \mathbf{y}(\mathrm{t}) = \Psi[\mathbf{x}(\mathrm{t}); \mathbf{u}(\mathrm{t}); \mathbf{f}(\mathrm{t})] \end{cases} \tag{4.48}$$

Для линейных систем уравнения состояния ЭГС сводятся к следующей системе линейных уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{E}(t)\mathbf{f}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{f}(t) \end{cases} \tag{4.49}$$

где **A, B, C, D, E, G** – матрицы коэффициентов.

Таким образом, с помощью уравнений (4.48) и (4.49) устанавливается взаимосвязь между входными (управляющими и возмущающими) и выходными (фазовыми) координатами рассматриваемой ЭГС, определяемую видом функций $F[\mathbf{x}(\mathrm{t}); \mathbf{u}(\mathrm{t}); \mathbf{f}(\mathrm{t})]$ и $\Psi[\mathbf{x}(\mathrm{t}); \mathbf{u}(\mathrm{t}); \mathbf{f}(\mathrm{t})]$, а также позволяет описать процесс движения (изменения) эколого-геологической системы в пространстве состояний, как результат решения векторных дифференциальных уравнений (4.48) или (4.49). Способы вычислений параметров матриц передаточных функций $W(p)$ и матриц временных характеристик описаны в специальной литературе (Артамонов, Семёнов, 2003).

Можно выделить несколько классов моделей ЭГС. Модель ЭГС или системы управления принадлежит тому же классу, что и описывающий их оператор преобразования. Разумеется, что можно говорить о классе только математической модели, а не реальной ЭГС.

Таким образом, выделяют следующие признаки классов систем с непрерывным и дискретным временем:

1) линейные (Л) или нелинейные ($Л_н$);
2) стационарные (С) или нестационарные ($С_н$);
3) детерминированные (Д) или стохастичные ($Д_с$);
4) сосредоточенные (конечномерные) (К) или распределенные (бесконечномерные) ($К_б$).

Эти четыре независимых признака биальтернативны; поэтому можно насчитать всего $2^4 = 16$ классов непрерывных и столько же — дискретных систем.

Простейший класс ЛСДК — линейные стационарные детерминированные конечномерные системы. Они имеют форму обыкновенных линейных дифференциальных (разностных) уравнений с постоянными детерминированными коэффициентами. В математике разработан весьма развитый аппарат анализа этого класса систем. При построении моделей стремятся к их максимальной простоте при достаточной адекватности оригиналам. Поэтому в первом приближении часто ограничиваются описанием объектов управления в классе ЛСДК.

Более сложные классы операторов получаются при введении одного из альтернативных признаков:

$$Л_нСДК;\ ЛС_нДК;\ ЛСД_сК;\ ЛСДК_б. \qquad (4.50)$$

Для таких систем существует незначительное число общих методов аналитического исследования; в основном, они разработаны только для частных случаев.

Операторы второго уровня сложности получаются введением двух отрицаний

$$Л_нС_нДК;\ Л_нСД_сК \text{ и т.д.} \qquad (4.51)$$

При трех отрицаниях получаем операторы третьего уровня сложности типа $Л_нС_нД_сК$ и т.д.

Наконец операторы четвертого уровня сложности $Л_нС_нД_сК_б$ - нелинейные нестационарные стохастичные бесконечномерные. Им, например, соответствуют нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных с переменными случайными параметрами.

Для систем, описываемых операторами второго и выше уровней сложности, как правило, имеется только единственная возможность их анализа и синтеза путем вычислительных экспериментов.

Если модель системы образована элементами различных классов, то класс системы определяется классом элемента с максимальным числом отрицаний.

При создании математической модели ЭГС используется метод количественного формализованного отображения концептуальной модели, при котором правила, описывающие динамику системы, и существующие в ней процессы и явления задаются с помощью математических уравнений.

Этапы разработки математических моделей (Мешалкин и др., 2016):

1. Формулировка общего вида математических операторов.
2. Выбор временного интервала моделирования.
3. Идентификация параметров функций связи.
4. Определение параметров уравнений математической модели.
5. Разработка алгоритмов и использование специальных комплексов программ решения систем уравнений математической модели.
6. Компьютерные (вычислительные) эксперименты.
7. Обсуждение полученных результатов вычислительных экспериментов.

Наилучшим видом информации, которая может быть использована для разработки математических моделей, являются результаты наблюдения и измерения конкретных параметров реальной экосистемы. Полученные экспериментальные данные обрабатываются статистическими методами. При отсутствии экспериментальных данных следует использовать известные теоретические причинно-следственные зависимости или эмпирические соотношения. Информация, необходимая для математического моделирования экосистем, также может быть получена из литературных источников или из экспертных оценок.

Для математического *моделирования динамики экосистем* могут быть использованы различные типы математических описаний (Мешалкин и др., 2016):

1. Матричная алгебра (например, для описания популяционных моделей).
2. Дифференциальные уравнения (например, для описания массопереноса в непрерывном времени).
3. Конечно-разностные уравнения (например, для описания процессов массопереноса с дискретным временем).

Основной задачей компьютерного моделирования экосистем является имитация процессов и явлений в экосистеме или конкретные

вычисления при заданных условиях. Результаты компьютерного моделирования экосистем могут быть использованы в качестве эталона при оценке изменений в поведении экосистемы при изменении условий ОПС.

При разработке математических моделей сложных экосистем используется блочный (модульный) принцип, при котором каждый процесс или явление, происходящее в экосистеме, отображается в виде некоторого отдельного блока (модуля). Каждый блок (модуль) имеет некоторое математическое описание. Математическая модель экосистемы представляет собой совокупность математических описаний всех блоков (модулей) и уравнений взаимосвязи между этими блоками. Выделение блоков (модулей), соответствующих отдельным процессам и явлениям в экосистеме является важным этапом концептуального моделирования экосистем.

4.7.4. Математические модели организмов в ЭГС. На основе анализа биохимических процессов, происходящих в организме животных включая человека, может быть построена упрощенная математическая модель, основанная, например, на концепции «естественной технологии организма» - компартментальная модель (Машинцов Е.А., 2007; Машинцов и др., 2010). В ней для математического моделирования организма человека используется двухуровневое описание «комплекса организма».

Под *компартментом* в биосистеме понимается некоторое относительно независимое количество (объем) вещества, выступающее в процессах транспорта и обмена как самостоятельная единица и описывается массой, концентрацией или объемом рассматриваемого вещества (уровень содержания вещества). Если некоторое вещество в биосистеме перемещается из одного компартмента в другой, темп изменения количества этого вещества для i-го компартмента определяется уравнением (Машинцов, 2007):

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} a_{ij} y_{ij} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n} a_{ki} y_{ki} + y_{i0} - y_{0i} + w_i \qquad (4.52)$$

где x_i - количество вещества в i-ом компартменте; y_{ij} - темп потока вещества из i-го компартмента в j-й; y_{i0}, y_{0i} - темпы потоков вещества из окружающей среды в i-й компартмент и из компартмента в среду, $w_i = g_i - a_i$ - темп возникновения/исчезновения вещества вследствие

жизненных процессов в *i*-м компартменте, *a* - вектор параметров, *n* - количество компартментов в системе.

Верхний уровень представляет модель его «естественной технологии», воспроизводящая в обобщенном виде основные жизненные процессы (рис. 4.25), а именно: 1) доставка в организм «горючего» (пища) и окислителя (кислород) - функция систем пищеварения и дыхания; 2) внутренний транспорт (доставка кислорода к клеткам) – функция сердечно-сосудистой системы; 3) собственно процессы жизнедеятельности (суммарное описание синтеза биополимеров, проведения нервною импульса сокращения мышечных волокон и др.) с образованием конечных продуктов; 4) элиминация и выведение конечных продуктов из организма (функция печени и почек).

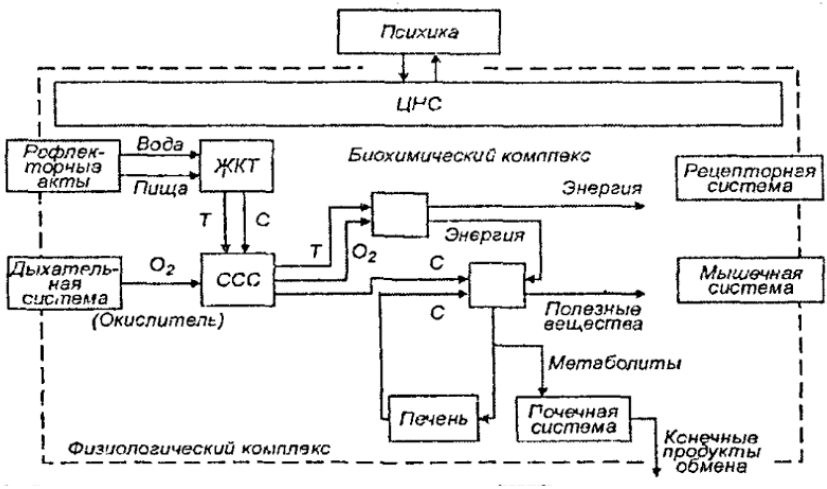


Рис. 4.25. Организм как «технологическая система»: ЦНС - центральная нервная система, ЖКТ - желудочно-кишечный тракт, ССС - сердечно-сосудистая система и система крови, Т - топливо (углеводы жиры), С - сырье (субстраты) (по Е.А.Машинцову, 2007)

Выделив в схеме набор компартментов x_i, $i = 1,n$, и потоков y_{ij}, $ij = 1, n$, функции верхнего уровня 1-4 можно записать в виде системы уравнений баланса (4.52).

В целях математического моделирования жизненного цикла организма человека рассматривается базовая модель «естественной технологии организма», где каждой организменной функции отвечает минимально необходимое число компартментов. В модели участвуют *n*

= 4 компартмента, соответствующие четырем (N = 4) основным подсистемам организма человека (рис. 4. 26): системе легких, сердечно-сосудистой системе и системе крови (рассматриваются совместно), системе печени и системе почек. Здесь x_1 - парциальное давление кислорода в легких (мм рт. ст.).

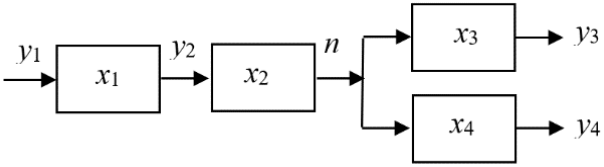


Рис. 4.26. «Минимальная» компартментальная модель «технологической системы» организма x_2 - парциальное давление кислорода в тканях организма (мм рт. ст.), x_3 - уровень шлаков в тканях организма, элиминируемых печенью (%), x_4 - уровень шлаков в тканях организма, экскретируемых почками (%) (по Е.А.Машинцову, 2007)

Тогда система уравнений баланса (4.47) может быть переписана в виде:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = (y_1(x,t) - y_2(x,t))c_1 \\ \frac{dx_2}{dt} = (y_2(x,t) - w)c_2 \\ \frac{dx_3}{dt} = (w - y_3(x,t))c_3 \\ \frac{dx_4}{dt} = (w - y_4(x,t))c_4 \end{cases} \quad (4.53)$$

Решение этой системы уравнений при заданных начальных условиях позволяет получить зависимость $x_i=x_i(t)$ на любой момент времени t. Введение в модель экологических факторов, влияющих на здоровье организма (например, чистота воздуха, воды и т.п.), позволяет прогнозировать влияние этих процессов на старение организма и т.п., что, например, было реализовано для населения и экосистемы г.Тулы (Машинцов и др., 2010).

Такая универсальная методология построения иерархии упрошенных системных моделей на основе базовых математических

моделей данных и/или систем, позволяет оценивать влияние экологической составляющей окружающей среды на здоровье городского населения в геоинформационной постановке.

4.7.5. Математические модели взаимодействия ЭГС со средой могут строиться на основе вышеописанного подхода – на базе упрощенных системных моделей, или использовать кибернетический подход на базе анализа причинно-следственных связей.

Рассмотрение причинно-следственного взаимодействия системы управления, т.е. ЭГС с внешней средой, связано с обоснованием собственно эколого-геологической системы S и выделением её связей со средой через переменные входа f и выхода y (рис. 4.27.а). Система оказывается звеном в искусственно разорванной цепи причинно-следственных отношений «среда-ЭГС-среда».

В теории и расчетной практике объектами исследований оказываются модели собственно систем управления M_s, модели систем со связями со средой M_{rSF} и модели расширенных систем M_{rs} (рис. 4.27, б). Модели M_s позволяют выявить свойства свободных движений автономных систем, M_{YSF}— свойства каналов передач от входов к выходам M_{ys} при отсутствии информации о переменных входа $f(f)$ — модели среды M_F, а модели M_{RS} привлекаются для изучения вынужденных движений переменных выхода $y(t)$ при адекватных моделях воздействий.

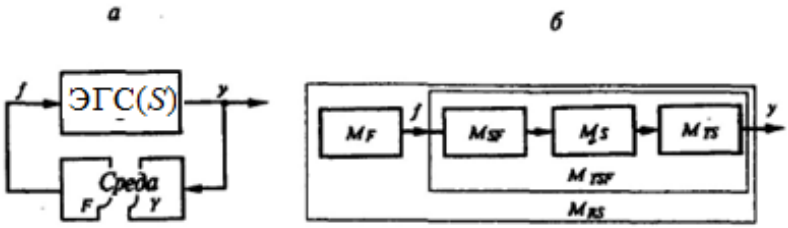


Рис. 4.27. Схема взаимодействия ЭГС (S) с внешней средой

На содержательном уровне ЭГС и системы управления ими интерпретируются как устройства получения, передачи и обработки информации. С другой стороны, ЭГС и системы управления можно рассматривать как преобразователи сигналов — носителей этой информации. Преобразование сводится к изменению параметров, кодирующих информацию. Свойства системы как преобразователя характеризуются ее оператором, отображающим множество функций времени на входе системы на множество функций выхода:

$$y(t) = \Omega\{f(t)\}. \quad (4.54)$$

Примерами операторов являются оператор дифференцирования или дифференциальные уравнения

$$\Phi(y, y', y'', \ldots, y^{(n)};\ u, u', u'', \ldots. u^{(m)}) = 0 \quad (4.55)$$

а также разностные уравнения:

$$\Phi^* y(k), \Delta y(k), \Delta^2 y(k),\ldots, \Delta^n y(k);\ u(k), \Delta u(k),\ldots, \Delta^m u(k)\} = 0, \quad (4.56)$$

где $\Delta y(k) = y(k) - y(k - 1)$; $\Delta^2 y(k) = \Delta y(k) - \Delta y(k - 1)$ и т.д. — разности первого и высших порядков.

Оператор линеен, если обладает свойствами однородности и аддитивности, т.е. если

$$\Omega\{af(t)\} = a\Omega\{f(t); \quad (4.57)$$

а также

$$\Omega\{f_1(t)+f_2(t)\} = \Omega\{f_1(t)+f_2(t)\}. \quad (4.58)$$

Для линейного оператора справедливо, что:

- при любом усилении (ослаблении) входного воздействия выходная переменная претерпевает точно такое же усиление, не изменяя своей формы;
- реакция на сумму любых входных воздействий равна сумме реакций на эти воздействия.

В общем случае линейной комбинации входных воздействий отвечает та же линейная комбинация соответствующих реакций:

$$\Omega\left\{\sum_i a_i f_i(t)\right\} = \sum_i a_i \Omega\{f_i(t)\}. \quad (4.59)$$

Свойство линейности оператора, выраженное приведенной формулой, иногда называют *принципам суперпозиции*. Принцип суперпозиции дает возможность выражать реакцию линейной системы на любое воздействие через её реакцию на определенный вид элементарных воздействий. Для этого произвольное воздействие $f(t)$ представляется как линейная комбинация элементарных воздействий выбранного типа. Зная реакцию линейной системы на элементарные

воздействия этого типа, определяется ее реакция на воздействие $f(t)$. Таким образом, линейна система как преобразователь полностью характеризуется ее реакцией на типовое воздействие, называемой временной характеристикой. Хотя в простейших случаях такая форма представления оператора нагляднее недостатком является неудобство решения задач анализа и синтеза.

Если не выполняется принцип суперпозиции, то оператор называется нелинейным. Разумеется, класс нелинейных операторов много больше класса линейных.

Оператор стационарен, если его характеристики инвариантны ко времени. Другими словами, при сдвиге во времени входного воздействия без изменения его формы реакция претерпевает такой же сдвиг времени без изменения своей формы. В ряде случаев модели должны отражать изменение свойств объекта во времени; тогда вводятся в рассмотрение нестационарные операторы типа

$$y(t) = \Omega\{f(t), t\}. \qquad (4.60)$$

В простейшем случае нестационарность сводится к изменению параметров модели, например коэффициентов дифференциального уравнения. В общем случае влияние среды приводит к необходимости изменения структуры оператора, например, порядка дифференциального уравнения или даже класса оператора.

Если вариации оператора происходят много медленнее основных процессов, то вместо нестационарного оператора рассматривают множество стационарных операторов, различающихся значениями параметров. Описание ЭГС множеством равновероятных операторов содержит неопределенность. Если параметры модели ЭГС заданы с точностью до интервалов значений, то о таких системах говорят, что они интервальные.

Оператор может быть детерминированным или стохастичным. В случае стохастичных операторов параметры представляются как случайные величины и задаются их вероятностными характеристиками.

Наконец, ЭГС как объекты управления могут быть с сосредоточенными или распределенными параметрами. В последнем случае они описываются уравнениями в частных производных (разностях).

***

Глава 5
УСТОЙЧИВОСТЬ И САМОВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

5.1. Устойчивость эколого-геологических систем

5.1.1. Понятие устойчивости. Изучение процессов регуляции в организмах и их системах позволило классикам физиологической науки - К.Бернару, И.М. Сеченову, У.Кэннону, сформулировать положение о том, что все жизненные механизмы организмов (от вирусов до млекопитающих), как бы разнообразны они ни были, имеют только одну цель — сохранение постоянства условий своей жизни во внутренней среде обитания, т.е. собственную устойчивость. Эта концепция предстала в окончательном виде после того, как И.М. Сеченов обратил внимание на связь постоянства внутренней среды с адекватным снабжением организма веществами и энергией, а У.Кэннон ввел термин «гомеостаз».

Иван Михайлович Сеченов
(1829-1905)

В настоящее время общепризнано, что принцип гомеостаза как таковой играет важную роль в жизненных процессах на всех уровнях организации жизни. Концепция гомеостаза оказалась настолько содержательной, что породила целый ряд направлений в исследовании сохранительных свойств биотических систем как на специфическом уровне, характерном для различных типов живых систем, так и на уровне формальных обобщений в биокибернетике. Так, на организменном уровне к гомеостатическим реакциям относят обычно только реакции физиологических систем вегетативной регуляции, обеспечивающих постоянство уровней вещества и энергии в организме, его органах и тканях.

Понятие устойчивости многообразно. В самом широком смысле под устойчивостью понимают способность системы сохранять текущее состояние при влиянии внешних воздействий. В рамках экологии под устойчивостью понимают способность окружающей среды выдерживать воздействие человека, или как способность биологических систем к сохранению и развитию биоразнообразия (Арманд, 1983; Ильичев, 2009).

Определение устойчивости, одобренное Советом ООН по продовольствию и сельскому хозяйству (ФАО) в 1988 году, гласит, что «устойчивость - это обращение с природными ресурсами и их сохранение, а также ориентация на технологические и институциональные изменения, с целью обеспечения постоянного удовлетворения потребностей человека в настоящем и на будущие поколения» (Cena, 1999; Burger J., 2008). Такое определение антропоцентрично, поэтому более приемлемым определением устойчивости является удовлетворение потребностей настоящего времени без ущерба для способности будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности (UN, 1987). В идеале, использование или извлечение компонентов из экосистемы не должно ставить под угрозу биологическую структуру и функционирование системы, в противном случае оно не является устойчивым в долгосрочной перспективе (Cabezas et al., 2005). Например, многие сельскохозяйственные ЭГС не являются устойчивыми, поскольку требуют добавления питательных веществ (удобрений), пестицидов, а во многих случаях также и воды и т.п., т.е. они являются зависимыми от влияния человека.

Устойчивостью обладают как физические системы (физическая устойчивость), так и живые (биологическая устойчивость), механизмы которых, однако, различны (Арманд, 1983). Согласно В.Г.Горшкову (1995) физическая устойчивость динамического равновесия системы определяется подведенным к системе внешним потоком энергии (включая запасаемые гравитационную, деформационную и химическую потенциальные энергии) в котором распад упорядоченности компенсируется ее генерацией, т. е. отношение числа распадов упорядоченных внутренне скоррелированных структур, образующих систему, к числу генераций этих структур равно единице. Число структур не имеет значения. Физическое состояние может образовываться из одной структуры с корреляционным радиусом, захватывающим все состояние. При изменении внешнего потока физическая устойчивость нарушается, и система переходит в новое состояние динамического равновесия.

В противоположность этому, стабилизирующий биологический отбор, основанный на конкурентном взаимодействии большого числа независимых особей в популяции, способен поддерживать любой сколь угодно высокий уровень упорядоченных особей при фиксированных потребляемых потоках энергии. Живые особи эквивалентны сверхупорядоченным физическим флуктуациям и вне популяции необратимо распадаются независимо от их способности к размножению

при условии, что их потомки также изолируются и не образуют популяцию. Как будет показано в следующих разделах, отношение числа распадов любого типа биологической скоррелированности к числу спонтанных генераций подобных типов скоррелированности всегда на много порядков превосходит единицу, приближается к величине порядка 10 и практически не зависит от величины внешнего потока энергии. В физических же состояниях динамического равновесия это отношение равно единице (Горшков, 1995).

Живые особи, кроме адаптации, должны быть способны к стабилизации условий окружающей среды, что и приводит к их несравнимо более сложной организации по сравнению с физически самоорганизованными системами. Стабилизация условий окружающей среды может осуществляться за счет функционирования определенной направленности — работы организма каждого вида в рамках своего естественного сообщества. И адаптация к условиям окружающей среды, и работа по стабилизации этих условий контролируются соответствующими генетическими программами организма.

Эти программы В.Г.Горшков (1995) назвал «программой адаптации» и «программой стабилизации». Согласно его воззрениям, только конкурентное взаимодействие в рамках популяции и биологический отбор, а не внешний поток энергии (как в физических системах), предотвращают распад биологической скоррелированности, т. е. генетических программ стабилизации и адаптации.

Поэтому между физическими состояниями динамического равновесия и жизнью существует количественная пропасть в 25 порядков, которая определяет принципиальное качественное различие этих состояний. Еще раз следует отметить, что устойчивым биологическим состоянием динамического равновесия с неограниченным временем существования является только популяция, но не самовоспроизводящаяся особь. Таким образом, устойчивое существование жизни возможно при наличии конкурентного взаимодействия особей в популяции. Образование популяций и конкурентное взаимодействие особей внутри популяции — генетически закрепленные свойства всех живых организмов (Горшков, 1995).

Эколого-геологические системы (ЭГС) создаются в результате столкновения на одном и том же пространстве разнообразных органических форм и разделения сфер влияния, захвата экологических ниш. Состояние равновесия в них (биоценотический гомеостаз — поддерживается многочисленными механизмами активной и пассивной регуляции.

Специфика экологических механизмов регуляции такова, что исследование влияния условий внешней среды на свойства экосистем (и, в частности, на равновесные численности популяций входящих в нее видов) довольно затруднительна. Не в последнюю очередь эти трудности объясняются тем, что экосистемы реагируют на малозаметные изменения, например, погодных условий резкими колебаниями численности видов. Эти колебания настолько велики, что обычно соответствующие графики строятся в логарифмическом масштабе.

Наиболее изученными механизмами регуляции в экосистемах являются, по-видимому, так называемые механизмы, зависящие от плотности популяции (здесь очевидна аналогия с механизмами управления на клеточном уровне). Интересно отметить, что, в отличие от клеточного и организменного уровня, аналогия механизмов экологической регуляции с простыми системами автоматической стабилизации была подвергнута критическому разбору, и такие модели экосистем не получили распространения. Однако механизмы регуляции, зависящие от плотности популяции, являются лишь одним из довольно частных видов регуляции, существующих в экосистеме. Регуляция в экосистемах связана и со структурой пищевых сетей, с механизмами конкретного взаимодействия отдельных видов (например, борьбой за места обитания), а также генетическими механизмами.

Способность экосистем сохраняться в условиях постоянной или изменяющейся среды описывается в экологии с помощью целой группы терминов. Часто для этой цели используются термины *устойчивость* или *стабильность*. Однако эти термины обладают рядом недостатков.

Таким образом, под *устойчивостью* ЭГС понимается их способность пассивно сохранять и (или) активно восстанавливать свои существующие параметры в случае малых нарушений (Базовые.., 2012).

Пассивное сохранение параметров системы называют ее жесткостью или статической устойчивостью, их активное восстановление – динамической или регуляторной устойчивостью (Раутиан, 2006). Таким образом, обеспечение устойчивости ЭГС предполагает ее противостояние как малым внутренним возмущениям, так и малым внешним природным или техногенным воздействиям (нарушениям), которые нарушают (но не разрушают полностью!) ее структуру, режим ее функционирования и (или) отклоняют траекторию ее развития от избранной.

5.1.2. Теория устойчивости ЭГС базируется на работах, выполненных как в области системного анализа, так и в географии,

инженерной геологии, экологии и биологии (работы отечественных ученых: П.К.Анохина, А.Д.Арманд (1983), В.Г.Горшкова, М.Д.Гроздинского, М.А.Красносельского, А.П.Левича[1], В.Н.Новосельцева, И.Пригожина, А.С.Раутиана и др., а также иностранных исследователей: П.М.Кюри и др.[2], Ф.Кены[3]; Г.Кабезаса и др.[4]).

Устойчивость в отличие от представлений теории динамических систем, должна определяться как соотношение между изменением характеристик системы и величиной вызвавшего их воздействия. Если при анализе поведения системы фиксируется только изменение характеристик систем, безотносительно к величине вызвавшего его внешнего воздействия, то предлагается использовать понятие стабильности (Новосельцев, 1978).

Если, например, при воздействии на систему, обозначаемом *f,* возникает изменение некоторой характеристики системы, обозначаемое a_{ti}, то меру устойчивости системы (*Us*) предлагается определять отношением (Новосельцев, 1978)

$$Us = \frac{f}{a_{ti}}, \tag{5.1}$$

в то время как мера *стабильности системы* (*St*) должна характеризоваться величиной

$$St = \frac{1}{a_{ti}}. \tag{5.2}$$

Таким образом, для характеристики состояния ЭГС наряду с устойчивостью применим термин «стабильность», под которой понимается способность системы возвращаться в исходное состояние

---

1 *Левич А. П.* Понятие устойчивости в биологии. Математические аспекты. Сб. «Человек и биосфера», вып. I. – М.: Изд. МГУ, 1976.

2 *Cury PM, Mullon C, Garcia SM, Shannon LJ.* Viable theory for an ecosystem approach to fisheries. - ICES J Mar Sci. 2005, v. 62, pp. 577–584.

3 *Cena F.* The farm and rural community as economic systems. In: Golley FB, Gellot J, editors. Rural planning from an environmental systems perspective. - New York: Springer; 1999. pp. 229–286.

4 *Cabezas H, Pawlowski C.W., Mayer A.L., Hoagland N.T.*. Simulated experiments with complex sustainable systems: ecology and technology. - Resour Conserv Recycl. 2005, v. 44, pp.279–291.

после выведения из равновесия: «Стабильность — это свойство любого тела, заставляющее его возвращаться к исходному состоянию после того, как это тело выведено из состояния равновесия». Как отмечал Ю.Одум: «Это представляется достаточно ясным, но на практике люди разных профессий (например, инженеры, экологи или экономисты) могут вкладывать в термин «стабильность» разный смысл, особенно при попытках оценить меру стабильности н выразить ее количественно. Соответственно много путаницы по этому вопросу и в литературе, поэтому полное рассмотрение теории стабильности выходит за рамки данной книги. Но для целей экологии можно выделить два «типа» стабильности.

Резистентная устойчивость — это способность экосистемы сопротивляться пертурбациям (нарушениям), поддерживая неизменной свою структуру и функцию.

Упругая устойчивость — это способность системы восстанавливаться после того, как ее структура и функция были нарушены. Сейчас накапливается все больше фактов, указывающих на то, что оба типа стабильности, возможно, взаимно исключают друг друга, или, другими словами, системе трудно одновременно развить оба типа устойчивости» (Одум, 1986, т.1, с. 66).

Устойчивость ЭГС придает им свойство преемственности развития, динамичности, направленности, постепенности и порогового реагирования. Последнее обусловлено существованием для каждой системы своего «порогового уровня нарушений» (предельно-допустимого уровня, ПДУ), превышение которого необратимо приводит к разрушению системы, т.е. потере устойчивости. Для ЭГС и отдельных организмов устойчивость характеризуется их гомеостазом (рис.5.1).

Различные варианты нарушения устойчивости ЭГС при достижении нижнего или верхнего ПДУ, а также резистентная устойчивость показаны на рис. 5.2 и 5.3.

Возвращение параметра $x(t)$ ЭГС с упругой устойчивостью в состояние динамического равновесия или исходное состояние представляет собой *переходный процесс*, который может быть нескольких типов: *колебательным* (кривая 1 на рис.5.4); *малоколебательным* (кривая 2), процессом *без перерегулирования* (кривая 3) и *монотонным* (кривая 4). Если же воздействие на ЭГС неограниченно возрастает, то упругая устойчивость с ним не справляется и отклонение ЭГС с течением времени также будет неограниченно возрастать.

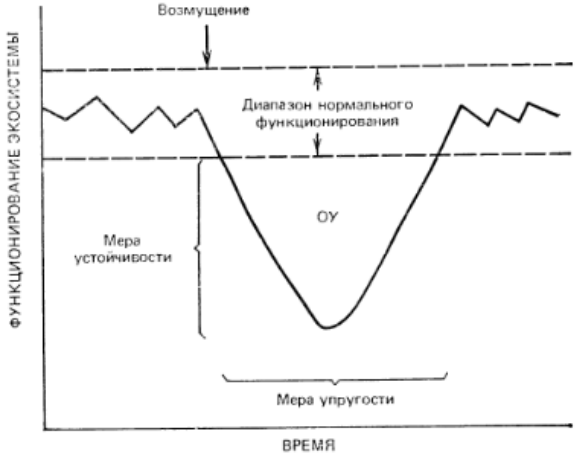


Рис. 5.1. Резистентная устойчивость и упругая устойчивость ЭГС. Когда та или иная важная функция экосистемы под действием какого-либо возмущения (нарушения или стресса) отклоняется от нормальных значений, степень этого отклонения показывает относительную устойчивость ЭГС, а время, необходимое для восстановления нормального значения, — ее относительную упругость. Область над кривой — относительная мера общей устойчивости (ОУ). (По J.W. Leffler, 1978)

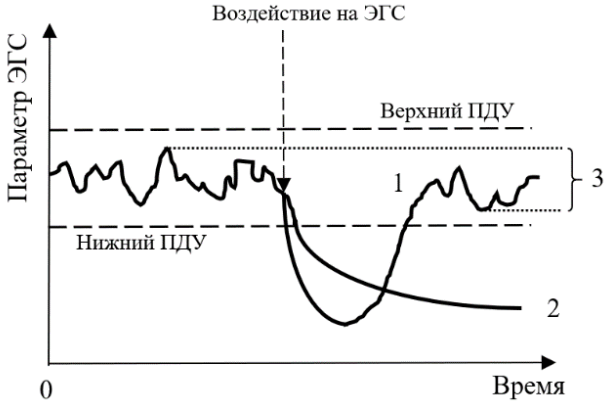


Рис.5.2. Разные варианты устойчивости ЭГС и её потеря при достижении нижнего ПДУ: 1 – ЭГС с упругой устойчивостью; 2 – ЭГС не способная восстанавливаться; 3 – резистентная устойчивость ЭГС

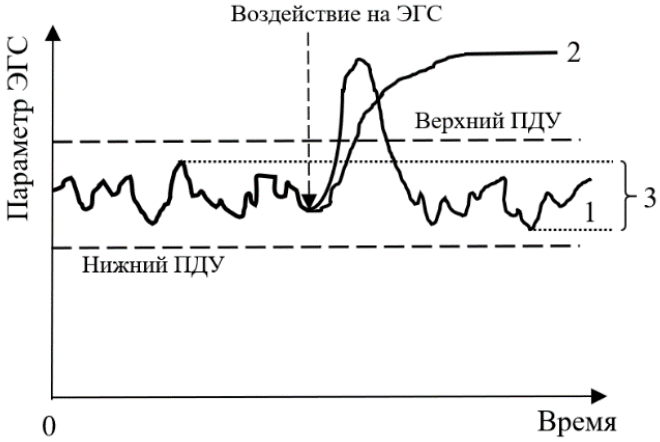


Рис.5.3. Разные варианты устойчивости ЭГС и её потеря при превышении верхнего ПДУ: 1 – ЭГС с упругой устойчивостью; 2 – ЭГС не способная восстанавливаться; 3 – резистентная устойчивость ЭГС

В экологической геологии особую сложность и особенно важное значение для данной эколого-геологической системы имеет оценка и обоснование ПДУ техногенных воздействий на неё. Пока теория обоснования ПДУ для эколого-геологических систем не разработана. В какой-то мере это обусловлено наличием у эколого-геологических систем свойства инерционности – некоторого отставания, запаздывания их реакции на внешние возмущения. Они не способны мгновенно реагировать на нарушения, не способны мгновенно менять одно свое состояние на другое, это происходит во время более или менее постепенного переходного процесса.

Возможны следующие варианты положения изображающей точки в фазовом пространстве состояний относительно границ устойчивой области и области допустимых состояний системы в признаковом пространстве: a_{ti} расположена в устойчивой области; a_{ti} находится внутри области допустимых состояний; a_{ti} находится на границе области допустимых состояний.

Устойчивой следует считать такую ПТС, траектория которой никогда не покидает устойчивой области внутри области допустимых состояний - устойчивость по А.М. Ляпунову. Её также называют устойчивостью по начальным условиям.

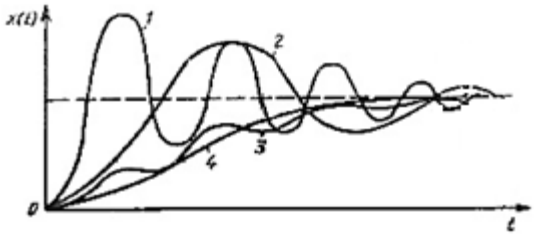


Рис.5.4. Основные типы переходных процессов в ЭГС во времени *t* (объяснения в тексте)

«Сохраняются только такие составляющие живой природы, в которых стремление к самосохранению выражено достаточно ярко», — писал А. А. Ляпунов[1]. Если система устойчива, то затухают все составляющие свободных движений, вызванных любыми ненулевыми начальными условиями. Свойство устойчивости линейных непрерывных систем анализируется по моделям типа (см. рис. 5.4) в форме однородных дифференциальных уравнений *n*-го порядка

$$A(p)y(t) = a_n y^{(n)} + \ldots + a_1 y' + a_0 y = 0 \qquad (5.3)$$

или систем дифференциальных уравнений в форме пространства состояний

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = A\mathbf{v} \qquad (5.4)$$

где **v** – вектор переменных состояния;

Устойчивую систему характеризует равновесный режим. Для того чтобы система функционировала в равновесном режиме внутри устойчивой области координаты системы (геологические и технические параметры) также должны находиться в состоянии равновесия ($\varphi i \pm \sigma_{\varphi i}$).

Для оценки устойчивости ПТС в момент времени t_i возможно воспользоваться показателем *s*, который вычисляют по формуле:

$$s = 1 - \frac{a_{ti}}{a_{\text{Пр}}}$$

[1] *Ляпунов А.А*. О рассмотрении биологии с позиции изучения живой природы как большой системы. Сб. «Проблемы методологии системного исследования». – М.: «Мысль», 1970.

(5.5)

где a_{ti} – состояние системы в момент времени t_i; $a_{\text{Пр}}$ – то же, предусмотренное проектом на период функционирования ПТС.

Значения основных параметров состояния устойчивой ПТС изменяются в пределах, предусмотренных проектной документацией (s = 0). Нахождение a_{ti} вне устойчивой области, но внутри границ ОДС отвечает системе, функционирующей в переходном режиме – неустойчивая ПТС. Вероятность наступления предельного состояния такой системы (риск) зависит от того, насколько приблизилась к нему траектория, какова скорость приближения траектории к границам ОДС. Если a_{ti} расположена на границе области допустимых состояний, то ПТС находится в предельном (критическом) состоянии. Оно проявляется в виде повреждений, аварий (нарушения сооружений, целостности земель, недр, объектов гидро- и биосферы). Предельное состояние соответствует предельно допустимым значениям координат, определяющим границу ОДС. В случае выхода системы за эту границу наступает катастрофа (разрушение) системы (Бондарик, 2012).

В географии разрабатывается теория устойчивости ландшафтов, как природных, так и антропогенных. Среди последних особое внимание уделяется устойчивости агроландшафтов.

Развивая понятие экологической устойчивости агроландшафтов, следует рассматривать его в контексте природно-антропогенной эволюции, которая может складываться в направлении окультуривания или деградации. Весь диапазон возможной эволюции можно описать S-образной кривой, проходящей через нуль-пункт, соответствующий состоянию устойчивого природного ландшафта (рис. 5.5).

Представления об устойчивости агроландшафта и устойчивости природного ландшафта, иногда отождествляемые, принципиально различаются. Устойчивость природного ландшафта часто не имеет агрономического значения, особенно когда речь идет о такырах, солончаках, солонцах, болотах и т.д. Агронома интересует не устойчивость, а податливость таких ландшафтов мелиорации и освоению. В отличие от саморегулирующегося функционирования природного ландшафта, агроландшафт функционирует в режиме, заданном человеком. Его устойчивость связана с поддержанием заданных параметров функционирования (определенного физико-химического состояния почв, гидрологического режима и др.) ценой определенных усилий. Цена устойчивости агроландшафта включает затраты на поддержание производительных и экологических функций, в том числе природоохранных.

Рис.5.5. Природно-антропогенная эволюция ландшафтов (Метод. рекомендации…, 2005)

Таким образом, устойчивость агроландшафта – это способность поддерживать заданные производительные и социальные функции, сохраняя биосферные.

В соответствии с основными функциями рассматриваются и основные виды устойчивости агроландшафтов, как составной части сельскохозяйственных ландшафтов (Метод. рекомендации…, 2005).

1. *Экологическая устойчивость* агроландшафтов реализуется режимами: органического вещества, биогенных элементов, реакции среды, окислительно-восстановительных условий, структурного состояния и сложения почвы, воздуха, влаги, тепла, биогенности, биологический активности почвы, фитосанитарного состояния агроценозов. В зависимости от объектов и механизмов действия экологическая устойчивость подразделяется на:

- *физическую* (устойчивость литотопа, противоэрозионная устойчивость и т.п.);
- *биологическую* (восстановительные и защитные функции растительности, устойчивость против вредных организмов);
- *геохимическую* (способность к самоочищению от продуктов загрязнения и снижению их токсичности, буферность, противостояние засолению);
- *гидрогеологическую* и гидрологическую (противостояние остепнению, опустыниванию, заболачиванию).

С экологической устойчивостью агроландшафта связано выполнение биосферных, общеэкологических функций – сохранения

почв, растительного и животного мира, запасов поверхностных и подземных вод, их качества, поддержания оптимального состава атмосферы.

2. *Агрономическая (производительная) устойчивость* включает устойчивость урожайности сельскохозяйственных культур, продуктивности пастбищ, качества продукции. Она оценивается по коэффициенту вариации показателя.

3. *Экономическая устойчивость* характеризуется экономическими параметрами производства.

В отличие от природных экосистем, которые ориентированы на выживание с помощью природных механизмов, агроэкосистемы ориентированы на урожайность и определенное качество продукции. Экологическая устойчивость первых несравненно выше, чем вторых. Это определяет особый интерес к механизмам природной устойчивости (естественно, речь идет об экосистемах высокой биопродуктивности и механизмах ее обеспечения), их использованию при формировании агроландшафтов. В основе этих механизмов лежит биологический круговорот веществ при большом видовом разнообразии и высокой численности организмов, что является главным фактором обеспечения устойчивости.

В большинстве агроценозов биологическая продуктивность меньше, чем в естественных ценозах, особенно велики различия по общим запасам фитомассы. Пополнение запасов органического вещества, повышение биогенности почв – общее условие повышения устойчивости агроландшафтов.

В процессе трансформации ландшафта для поддержания нового его состояния требуются специальные затраты, и по мере интенсификации производства возрастает цена экологической устойчивости. Цена устойчивости агроландшафта тем больше, чем сильнее отличаются требования сельскохозяйственных культур и животных от агроэкологических условий ландшафта.

Наименьшей ценой устойчивости характеризуются наиболее благополучные по условиям возделывания полевых культур плакорные лесостепные и степные черноземные агроландшафты (Метод. рекомендации…, 2005).

5.1.3. Пороги устойчивости ЭГС. Согласно Н.Ф.Реймерсу (1994) весьма приблизительно можно наметить общие пороги воздействия, за которыми происходят деградация и существенные изменения в природных системах в целом или в их отдельных экологических

компонентах. Такие пороговые значения могут выбираться за основу при организации систем управления ЭГС.

Эти ***ориентировочные пороги,*** следующие:

а) для энергетических процессов или воздействия на них:

- порог «спускового крючка» или триггерного эффекта (например, при наведенных землетрясениях) — 10^{-6}—10^{-8} раз от наблюдаемой нормы энергетичского состояния;
- порог выхода экосистемы из стационарного состояния (с возвращением в него после окончания воздействия) — до 1 % от нормы (обычно значительно меньше при длительном (в системном времени) воздействии; кратковременные возмущения могут достигать значительно больших величин, не принося существенных изменений в системы природы, но эти флуктуации, как правило, не могут выходить за рамки 10—70 % от наблюдаемой нормы;
- порог деструкции (деградации) — до примерно 10% от нормы при перманентном воздействии (но может быть больше или меньше, например, для энергетики биосферы как целого он, видимо, ниже 1 % от солнечной постоянной у поверхности Земли);

б) для природных систем с организменным (централизованным) типом управления (вещественные изменения):

- порог малых доз — около 10^{-3} раз от острого воздействия;
- порог выхода из стационарного состояния — около 1 % от нормы;
- порог разрушения (деструкции) — 10-30% от нормы;

в) материально вещественные изменения в системах с популяционным типом управления:

- порог минимума — 10^{-6}—10^{-8} раз от нормы;
- порог выхода из стационарного состояния (устойчивых колебаний без угрозы деструкции) — в пределах 7-18%, в среднем 10 % от нормы;
- порог постепенной, но неуклонной деструкции находится в среднем свыше 10 % от нормы и примерно до величины 10 % от среднего прироста популяции (потенциала самовозобновления, саморегуляции);
- порог катастрофического саморасширения или самосужения под влиянием внешних факторов равен 10^{5}—10^{6}, очень редко 10^{7}—10^{8} раз по сравнению со средним числом особей в популяции.

Эти количественные оценки следует рассматривать как ориентировочные, а для их уточнения и конкретизации необходимы специальные исследования, учитывающие особенности тех или иных ЭГС.

Когда пороги устойчивости ЭГС превышаются, система начинает деградировать и разрушаться. Она уже не может поддерживать себя вследствие самовоспроизводства и начинается её деградация.

Под ***деградацией ЭГС*** (исходя из позиций экологического императива, – это негативные изменения, выражающиеся в снижении или утрате им способности выполнять функции воспроизводства ресурсов и среды и социально-экономические функции). Виды деградации ЭГС различаются в зависимости от природы процессов.

1. *Физическая деградация*: плоскостной смыв и линейный размыв, дефляционный снос почв, расчленение территории ЭГС оврагами, увеличение площади эродированных почв, выход на поверхность почвообразующих и подстилающих пород, усиление сложности и контрастности почвенного покрова, ухудшение физических свойств почв и подпочвенных грунтов, увеличение площади подвижных песков, засыпание и заиливание водоемов и т.п.
2. *Биологическая деградация*: деградация микробо-, фито- и зооценозов, уменьшение биологического разнообразия, снижение биологической продуктивности ЭГС.
3. *Геохимическая деградация*: нарушение круговорота веществ в ЭГС (ослабление биологического, усиление геологического круговорота); засоление (повышение минерализации поверхностных и грунтовых вод, засоление территорий, обнажение соленосных пород); загрязнение вредными токсичными веществами почв, подпочвенных грунтов, поверхностных и грунтовых вод, воздуха.
4. *Гидрогеологическая и гидрологическая деградация*: обсыхание территории ЭГС (усиление поверхностного и сокращение грунтового стока, уменьшение запасов поверхностных и грунтовых вод); заболачивание (затопление, поднятие УГВ выше критического; усиление неоднородности почвенного покрова вследствие формирования полугидроморфных и гидроморфных почв).

Оценка степени деградации ЭГС может даваться с помощью показателей, указанных в табл. 5.1.

Для оценки экологической устойчивости ЭГС можно использовать такое понятие как «экологическая ёмкость ландшафта». Под экологической емкостью ландшафта понимается величина антропогенной нагрузки, которую способен воспринять данный ландшафт, сохраняя экологическую и производительную устойчивость. Высказываются предложения разделить земли на разряды по данному критерию, чтобы поставить технологические решения в определенные рамки по уровню интенсивности, объемам и номенклатуре технических средств, агрохимикатов и пр.

Таблица 5.1

Оценка степени деградации ландшафтов и почв в ЭГС (Метод. рекомендации…, 2005)

Показатели	Степень деградации				
	0	1	2	3	4
Деградация ландшафтов					
Увеличение площади средне- и сильно-эродированных почв, % в год	< 0,5	0,6…1,0	1,1…2,0	2,1…5,0	>5,0
Глубина размывов и водороин, см	< 20	21…40	41…100	101…200	> 200
Расчлененность оврагами, км/км^2	< 0,1	0,1…0,3	0,4…0,7	0,8…2,5	> 2,5
Площадь обнаженных почвообразующей и подстилающей пород, % от общей	0…2	3…5	6…10	11…25	> 25
Площадь подвижных песков, % от общей	0…2	3…5	6…15	16…25	> 25
Глубина пресных (<1 г/л) почвенно-грунтовых вод в гумидной зоне, м	> 1,0	1,0…0,8	0,8…0,6	0,6…0,3	< 0,3
Глубина минерализованных (>3 г/л) почвенно-грунтовых вод, м	> 7	5,1…7,0	3,1-5,0	2,0…3,0	< 2
Продолжительность затопления (поверхностного переувлажнения), мес.	< 3	4…6	7…12	13...18	> 18
Проективное покрытие пастбищной растительностью, % от зонального	> 90	71…90	51…70	10…50	< 10
Деградация почв					
Увеличение равновесной плотности пахотного слоя, % от исходного	< 10	11…20	21…30	31…40	> 40
Межагрегатная пористость (без учета трещин), см^3/г	> 0,2	0,11…0,2	0,06…0,1	0,02…0,05	< 0,02
Внутриагрегатная пористость, см^3/г	> 0,3	0,26…0,3	0,2…0,25	0,17…0,19	< 0,17
Коэффициент фильтрации, м/сут.	> 1,0	0,3…1,0	0,1…0,3	0,01…0,1	< 0,01
Каменистость, % покрытия	< 5	6…15	16…35	36…70	> 70
Уменьшение мощности гумусового профиля (А+В), % от исходного	< 3	3…25	26…50	51…75	> 75
Уменьшение запасов гумуса в профиле почвы (А+В), % от исходного	< 10	11…20	21…40	41…80	> 80
Сработка торфа, мм/год	< 1	1…2,5	2,6…10	11...40	> 40
Потери почвенной массы, т/га в год	< 5	6…25	26…100	101…200	> 200

Экологическая емкость ландшафта – понятие неоднозначное, оно не может быть охарактеризовано одним показателем, поскольку различные виды антропогенной нагрузки (физической, химической, гидрогеохимической и др.) воспринимаются разными элементами системы посредством различных механизмов. Например, способность почв воспринимать возрастающие дозы удобрений, связанное с ними повышение концентрации почвенного раствора и его подкисление, обусловлена буферностью почвы, ее поглотительными свойствами, а способность той же почвы выдерживать пестицидную нагрузку зависит от наличия микрофлоры, способной их разрушить, и энергетического

материала для ее функционирования. Более того, одни и те же почвы противоположным образом могут реагировать на разные нагрузки. Например, песчаные и супесчаные почвы, обладая минимальной экологической емкостью по отношению к химическим нагрузкам (минеральным удобрениям, пестицидам), в то же время способны воспринимать максимальную гидрогеохимическую нагрузку, то есть орошение водами повышенной минерализации, с повышенным содержанием соды.

5.1.4. Законы оптимальности ЭГС. Устойчивое состояние ЭГС является оптимальным и должно подчиняться так называемым законам оптимальности (Реймерс, 1994). Главные из них, которые необходимо учитывать при управлении ЭГС, следующие.

1). *Правило интегрального ресурса*: конкурирующие в сфере использования природных систем (природных комплексов, экосистем, ЭГС) отрасли хозяйства неминуемо наносят ущерб друг другу тем сильнее, чем значительней они изменяют совместно эксплуатируемый экологический компонент (энергия, вода, атмосфера, почво-субстраты, растения-продуценты, организмы консументы и редуценты) или всю систему (комплекс) в целом.

2). *Правило меры преобразования природных систем*: в ходе эксплуатации природных систем нельзя переходить некоторые пределы, позволяющие этим системам сохранять свойства самоподдержания (самоорганизации и саморегуляции).

3). *Закон оптимальности* гласит, что с наибольшей эффективностью любая система (в том числе природный и хозяйственный объект) функционируют в некоторых пространственно-временных пределах, выход за которые обесценивает данный объект как подсистему более крупной системы или ведет к разрушению этой крупной системы.

4). *Закон необходимого разнообразия*: система не может сформироваться из абсолютно одинаковых элементов или на принципе монополизма. Любая (природная, социальная, экономическая) монокультура не обладает свойствами самоподдержания за пределами индивидуального срока существования.

5). *Закон (принцип) увеличения степени идеальности*: гармоничность отношений между частями системы историко-эволюционно возрастает (что ведет к миниатюризации изделий и хозяйственных объектов). Новый объект нарушает сложившуюся гармонию, что требует учета. Наблюдавшееся стремление к гигантизму всех проектов приводило к глубокой дисгармонии региональных систем природы и общества.

Кроме того, при управлении ЭГС необходимо учитывать и группу ограничивающих факторов или законов. Согласно Н.Ф.Реймерсу (1994) это следующие законы.

1). *Закон соответствия* между *уровнем развития производительных сил и природно-ресурсным потенциалом*: развитие производительных сил остается относительно постоянным до момента резкого истощения природно-ресурсного потенциала, вслед за чем следует революционное (относительно ускоренное) их изменение.

2). *Правило взаимодействия экологических компонентов*: изменение количества или качества одного из экологических компонентов неминуемо ведет к качественно-количественным изменениям других экологических компонентов или динамических свойств природной системы. При этом соотношение меняется не строго пропорционально, а, как правило, скачкообразно.

3). *Закон сукцессионного замедления*: насыщающаяся система имеет тенденцию к замедлению количественного роста и продуктивности, если не имеет мощного входа и выхода («омоложение» на своей территории или в составе надсистемы).

4). *Правило (неизбежных) цепных реакций «жесткого» управления природой*: возведение технических объектов, меняющих природные процессы, чревато природными цепными реакциями, значительная часть которых оказывается экологически, социально и экономически неприемлемыми в длительном интервале времени.

5). *Принцип разумной достаточности и допустимого риска*: размерность и число аналогичных объектов, воздействующих на среду жизни, должно быть не больше и не меньше того количества, которое обеспечивает сохранность этой среды и свободный маневр в случае изменения обстоятельств. Риск, связанный с осуществлением проекта, не должен превышать принятого норматива.

5.2. Механизмы самовосстановления ЭГС

«Вся природа стремится к самосохранению»
Марк Туллий Цицерон

Механизмы обеспечения устойчивости ЭГС, как и механизмы гомеостаза организмов, до конца пока не познаны. Проблема изучения свойств ЭГС, позволяющих в изменяющихся условиях окружения сохранять свою жизнедеятельность, поддерживая стационарное неравновесное состояние и обеспечивая постоянство внутренней среды, приобретает в последние годы все большее значение. В.Н.Новосельцев (1978) назвал эту особенность биосистем *сохранительными*

свойствами, под которыми понимается их способность поддерживать стационарное неравновесное состояние и постоянство внутренней среды при изменении условий окружающей среды и режимов функционирования.

Основной вклад в обеспечение устойчивости ЭГС и её сохранительных свойств могут вносить: инерционность системы, обусловленная наличием «резервной ёмкости», закрытость (замкнутость) системы, «проточность» системы и отрицательная обратная связь. Особую роль в обеспечении устойчивости ЭГС играют круговые процессы – циклическая организация (круговорот) движения вещества и (или) энергии в них. Круговые процессы оказываются одним из наиболее эффективных механизмов поддержания «стабильности» биосферы Земли в целом. В эколого-геологических системах круговые процессы могут быть как природными, так и искусственными (рециклинг и др.).

Процессы перераспределения загрязнителей в горных породах, почвах, илах сопровождаются самоочищением геологической среды, закономерности которого до конца еще не изучены. Познание этих процессов имеет важное значение для их использования при разработке новых способов и технологий очистки грунтов от загрязнителей.

Самоочищением геологической среды *называется совокупность самопроизвольных природных физических, геохимических и биологических процессов, происходящих в ее пределах и направленных на снижение в тех или иных компонентах геологической среды (грунтах, почвах, подземных водах и т.п.) загрязнителей до уровней, безопасных для экосистем.*

Самоочищение геологической среды во многом зависит от природы загрязнителя (см. гл.1). По способности загрязнителей к самоочищению в геологической среде они могут быть разделены на три группы.

1. Консервативные загрязнители, к которым относятся вещества, не разлагающиеся самопроизвольно в геологической среде, или разлагающиеся чрезвычайно медленно. Эту группу загрязнителей составляют труднорастворимые соли, ионы некоторых металлов, гидрофобные хлорогранические вещества (типа пестицидов), нефтяные углеводороды, а также радионуклиды (особенно долгоживущие). Самоочищение этих веществ имеет кажущийся характер (Скурлатов Ю.И. и др., 1994), поскольку эти вещества способны лишь перераспределяться или рассеиваться в геологической среде.

2. Биогенные загрязнители, участвующие в биогеохимическом круговороте веществ. К этой группе относятся различные минеральные

формы азота и фосфора, а также различные легкоусвояемые органические соединения. Самоочищение от этих веществ происходит в геологической среде в основном за счет биохимических процессов.

3. Водорастворимые загрязнители, не вовлекаемые в биологический круговорот. К ним относятся различные токсичные вещества, самоочищение от которых происходит в основном за счет химических процессов их разложения, иногда с участием микробиологической трансформации.

С *термодинамической точки зрения* самоочищение геологической среды происходит вследствие стремления изолированной системы к равновесию (по всем термодинамическим потенциалам, включая и химические потенциалы компонентов-загрязнителей, которые (за исключением энтропии) в состоянии равновесия достигают минимальных значений).

При этом энтропия такой системы возрастает в соответствие со вторым началом термодинамики. Хаотическое рассеивание загрязнителей, их разбавление, растворение и т.д. в пределах системы сопровождается возрастанием ее энтропии и является самопроизвольным процессом. В отличие от этого, концентрирование загрязнителей в одном месте системы, ее упорядочение - антиэнтропийный процесс. Поэтому антиэнтропийными являются большинство процессов техногенеза - извлечение веществ из недр, их концентрирование, обогащение руд, создание аномалий загрязнений, т.е. загрязнение геологической среды и т.п.

Таким образом "расползание" ореолов и самопроизвольное рассеивание загрязнителей в геологической среде идет в соответствие со вторым началом термодинамики и сопровождается увеличением энтропии. Этот процесс более вероятен, чем противоположный - самопроизвольное концентрирование, упорядочивание и локализация загрязнителей в каком-либо одном месте.

Поэтому самопроизвольная очистка геологической среды может осуществляться только за счет рассеивания загрязнителей или их разрушения (деструкции) (Caliman F.A. et al., 2011; Королев В.А., 2001, 2019).

С другой стороны этот процесс можно проанализировать и на основе *принципа Ле Шателье - Брауна*[1] - принципа смещения

[1] Ле Шателье Анри Луи (1850-1936) - французский физико-химик и металловед, член Парижской АН (1907), Почетный член АН СССР (1927), профессор Парижской высшей горной школы и Парижского университета. В 1888 г. сформулировал общий закон (принцип) смещения равновесия.

равновесия. Если считать, что любое техногенное загрязнение в пределах геологической среды, как внешнее воздействие на систему, создает определенное возмущение в системе, нарушающее ее равновесие, то согласно принципу Ле Шателье - Брауна это воздействие вызывает в системе процессы, стремящиеся ослабить эффект данного воздействия. Самоочищение системы (геологической среды или ее части) идет в соответствие с принципом Ле Шателье - Брауна, который позволяет определить направление смещения равновесия.

В литературе по теоретической и математической биологии (Горшков, 1995) начало анализа «сохранительных свойств» или гомеостаза биосистем также связывается с принципом Ле-Шателье: «Если на систему, находящуюся в устойчивом равновесии, подействовать извне, изменяя какое-нибудь из условий, определяющих положение равновесия, то равновесие смещается в том направлении, при котором эффект произведенного воздействия уменьшается». Этот принцип был сформулирован французским химиком А. Ле-Шателье в 1887 г. для термодинамических систем. После того, как немецкий физик К. Браун показал, что это положение является следствием второго начала термодинамики, то стали употреблять название «принцип Ле-Шателье—Брауна».

Согласно работам В.Г.Горшкова (1980, 1995, 2004), имеются многочисленные свидетельства в пользу биотической регуляции концентраций различных веществ и выполнения принципа Ле-Шателье в биосфере Земли. Естественная биота Земли устроена так, что способна с высочайшей точностью поддерживать пригодное для жизни состояние окружающей среды.

Анализу устойчивости биосферных процессов на основе принципа Ле-Шателье посвящены и работы А.М.Тарко (1995, 2005).

В основе процессов самоочищения, как известно (Скурлатов и др., 1994; Корте, 1996), лежат процессы абиотического или биотического превращения химических веществ-загрязнителей: а) физические процессы массопереноса: разбавление (рассеивание, перемешивание), вынос загрязнителей за пределы экосистемы, испарение, сорбция, бионакопление; б) микробиологическая трансформация; в) химическая трансформация: гидролиз, фотолиз, окисление и др. Особая роль в процессах самоочищения принадлежит автотрофным[2] организмам.

[2] *Автотрофы* - организмы (растения, водоросли, бактерии и др.), способные самостоятельно продуцировать необходимые для их существования органические вещества из неорганических, являются первичными продуцентами органического вещества в биосфере. Среди них выделяют также *фитотрофов* (осуществляющих фотосинтез) и *хемоавтотрофов* (окисляющих неорганические вещества).

К абиотическим превращениям загрязнителей в геологической среде относятся окислительные и восстановительные процессы, гидролиз, фотохимические реакции, реакции между самими посторонними веществами и т.п.

К биотическим превращениям относятся ферментативная детоксикация (например, тяжелых металлов), ферментативное окисление, разложение, восстановление и т.п. (Корте, 1996). Органические вещества окончательно выводятся из геологической среды лишь в результате их **минерализации**, т.е. разложения органических соединений до диоксида углерода, воды и других небольших неорганических молекул (например, CO, HCl, NH_3 и т.п.). Разные соединения обладают различной нежелательной устойчивостью к минерализации.

Биологическая деструкция загрязнителей может вызываться различными организмами (энзимы, грибы, микроорганизмы и т.д.). При полной биологической деструкции образуется только вода, углекислый газ и появляются новые органические биотические образования. Однако чаще происходит неполная биологическая деструкция, при которой какой-либо вид организмов осуществляет лишь определенную стадию (ступень) процесса разложения. В итоге для полного биологического разложения какого-либо загрязнителя на конечные продукты в большинстве случаев требуется совместная деятельность большого числа различных организмов, объединенных в данном биогеоценозе.

По этой же причине более богатые в видовом разнообразии биогеоценозы обладают большей устойчивостью к различным загрязнителям, обладают большей способностью к самоочищению, чем бедные в видовом отношении биогеоценозы. В общем случае чем сильнее молекулярное строение того или иного загрязнителя отклоняется от строения близких природных веществ, тем сложнее идет процесс его биологического разложения.

5.3. Круговые биогеохимические циклы в эколого-геологических системах

«Земля никогда не возвращает без излишка то, что получила»

Марк Туллий Цицерон

Одной из основных особенностей экологической геохимической функции литосферы является её участие в биогеохимических циклах. Химические элементы, в том числе все основные элементы

протоплазмы клеток организмов, обычно циркулируют в биосфере по характерным путям из внешней среды в организмы и опять во внешнюю среду. Эти в большей или меньшей степени замкнутые пути называются *биогеохимическими циклами*. Движение необходимых для жизни организмов элементов и неорганических соединений называется круговоротом элементов питания. В каждом круговороте различают две части, или два «фонда»: 1) *резервный фонд* — большая масса медленно движущихся веществ, в основном небиологический компонент, 2) *подвижный,* или *обменный, фонд* меньший, но более активный, для которого характерен быстрый обмен между организмами и их непосредственным окружением. Если иметь в виду биосферу в целом, то биогеохимические циклы можно подразделить на два основных типа: 1) *круговорот газообразных веществ* с резервным фондом в атмосфере или гидросфере (океан) и 2) *осадочный цикл* с резервным фондом в земной коре.

Анализу круговых биогеохимических процессов на Земле посвящены работы М.И.Будыко (1977, 1985), В.Г.Горшкова (1995), А.М.Тарко (2005) и др.

Глобальные круговые и циклические процессы, идущие на Земле, являются важнейшим фактором самоочистки геологической среды от загрязнений и поддержания жизнеспособности (гомеостаза) биосферы в целом. Они обеспечивают глобальный круговорот фосфора (рис. 5.6), углерода (рис. 5.7), серы (рис.5.8), воды (рис.5.9), биофильных элементов, круговорот других различных веществ в природе, а также круговорот горных пород (рис.5.10) и др.

Природные круговые процессы идут независимо от человека. Однако в ходе техногенеза человек всё больше оказывает на них влияние. При этом происходит деформация круговых процессов, их усложнение. Появляются новые круговые процессы или отдельные их фрагменты, искажающие естественное самовосстановление в природе. Понять влияние суммарного техногенного воздействия на круговые процессы в биосфере Земли – задача ближайшего будущего.

Одним из важнейших круговых процессов, имеющих глобальное значение, имеет круговорот углерода в биосфере или в рамках отдельного биогеоценоза.

При современных аналитических возможностях в биологических системах удается проследить до 30 звеньев круговорота углерода, все они в принципе имеют место в лесном биогеоценозе. Существенно, что в круговороте вещества этот элемент может быть представлен несколькими формами. Основные пути его в жизненных циклах лесных сообществ отражает рис. 5.7, построенный по А.А. Ляпунову и А.А.

Титляновой (1974). На рис. 5.7 биогеоценоз также представлен как система блоков. В каждом блоке существует запас разного рода субстанций (вещество, энергия, вещество + энергия).

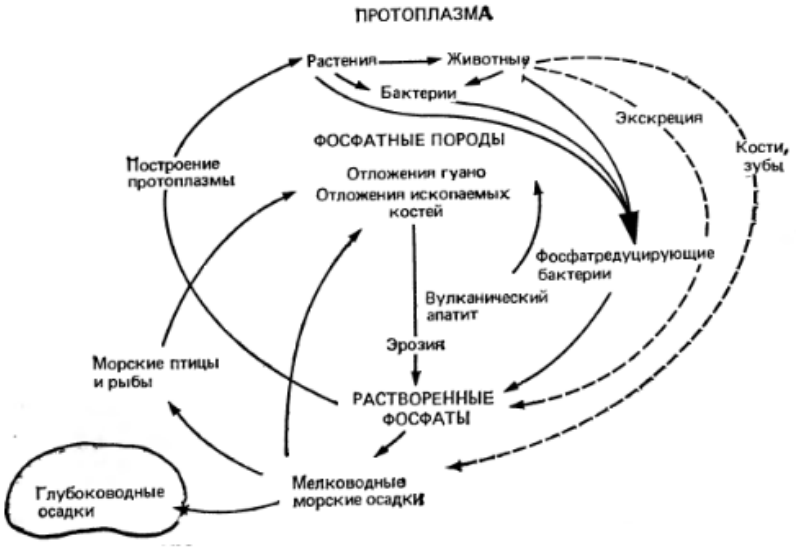


Рис.5.6. Круговорот фосфора (по Ю.Одуму, 1986)

Расшифровка индексов структуры, показанной на рис. 5.7 дается в табл. 5.2. Каждое звено блока этой схемы отражает различные процессы, обеспечивающие поток углерода в лесном биогеоценозе.

Сущность основных звеньев круговорота углерода в лесном биогеоценозе (БГЦ) представлен следующим неполным их списком: 1 - солнечная энергия, ассимилированная в процессе фотосинтеза; 2 - вынос зачатков организмов за пределы БГЦ; 3 - привнос зачатков организмов в БГЦ; 4 - поедание автотрофов фитофагами; 5 - перемещение консументов между биогоризонтами пологами, парцеллами; 6 - газообмен автотрофов с окружающей средой; 7 - отмирание автотрофов; 8 - поедание отмерших автотрофов и их частей редуцентами; 9 - поедание редуцентов косументами; 10 - поедание трупов консументов редуцентами; 11 - газообмен между консументами; 12 - выделение экскрементов консументов редуцентами; 13 - водный обмен консументов; 14 - газообмен редуцентов; 15 - потребление автотрофами минеральных веществ почвы; 16 - потребление воды автотрофами; 17 - поступление отмерших частей автотрофов в почву;

18 - корневые выделения автотрофов; 19 - потребление редуцентами органических веществ почвы; 20 - внесение в почву продуктов жизнедеятельности редуцентов: 21 - водообмен редуцентов; 22 - отмирание редуцентов; 23 - поедание трупов редуцентов другими редуцентами; 24 - поступление отмерших редуцентов в почву; 25 - поступление в почву экскрементов и трупов консументов и т. д.

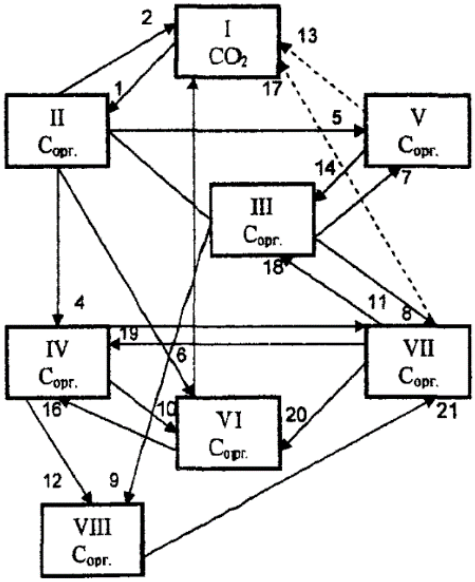


Рис.5.7. Основные потоки углерода в лесном насаждении (схема по А.А.Ляпунову, А.А. Титляновой, 1974)**. Блоки системы: I - атмосфера (запас $C0_2$); II - растения (запас органического $C0_2$); III - подстилка (запас органического С); IV - органические остатки в почве (трупы животных, простейших, микроорганизмов); V - наземные животные (запас органического С); VI - почвенные животные (запас С); VII - микроорганизмы (запас С); VIII - органическое вещество почвы**

Углерод в биосфере представлен несколькими формами. В газообразном состоянии, в форме CO_2 он распространен в атмосфере. В океане он представлен в нескольких формах: в виде раствора газа в морской воде, в виде взвешенного вещества - коллоида, а чаще всего в виде твердого осадка в составе СаСОз. На суше он встречается в составе органики, законсервированной, в виде гумуса, торфа, древесины, а также в форме ископаемых угля, нефти, газа (Цветков, 2004).

Таблица 5.2

Основные потоки субстанций, обеспечивающие кругоговорот углерода в лесном биогеоценозе (по А.А.Ляпунову и А.А.Титляновой, 1974)

№	Форма	Звено от блока к блоку	Процесс, обеспечивающий поток, сущность потока
1	CO_2	I –II	Фотосинтез
2	CO_2	II – I	Дыхание растений
3	$C_{орг.}$	II – III	Отмирание растений (надземных органов)
4	$C_{орг.}$	II – IV	Отмирание растений (подземные органы)
5	$C_{орг.}$	II – V	Поедание растений надземными животными
6	$C_{орг.}$	II – IV	Поедание растений почвенными животными
7	$C_{орг.}$	III – V	Поедание подстилки надземными животными
8	$C_{орг.}$	III – VII	Потребление подстилки микроорганизмами
9	$C_{орг.}$	III – VIII	Синтез почвенного органического вещества из органических соединений
10	$C_{орг.}$	IV – VII	Поедание растительных остатков в почве почвенными животными
11	$C_{орг.}$	IV – VII	Потребление растительных остатков в почве микроорганизмами
12	$C_{орг.}$	IV – VIII	Синтез почвенных органических веществ из органических соединений, накопленных в блоке «органич. остатки в почве»
13	$C_{орг.}$	V – I	Дыхание почвенных животных
14	$C_{орг.}$	V – III	Выделение экскрементов, поступление трупов, личиночных шкурок наземных животных
15	$C_{орг.}$	VI – I	Дыхание почвенных животных
16	$C_{орг.}$	VI – IV	Выделение экскрементов, трупы, личиночные шкурки почвенных животных
17	$C_{орг.}$	VII – I	Дыхание микроорганизмов
18	$C_{орг.}$	VII – III	Отмирание микроорганизмов и поступление мертвых клеток в подстилку
19	$C_{орг.}$	VII – IV	Отмирание микроорганизмов и поступление мертвых клеток в почву
20	$C_{орг.}$	VII – VI	Поедание микроорганизмов почвенными животными
21	$C_{орг.}$	VIII – VII	Потребление почвенного органического вещества микроорганизмами

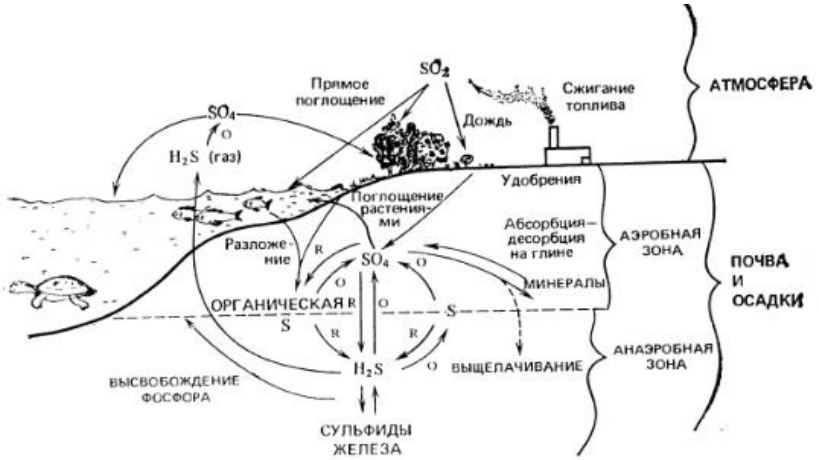


Рис.5.8. Круговорот серы (по Ю.Одуму, 1986)

Вмешательство человека в круговые процессы, многие из которых до конца еще не познаны, может обернуться глобальной экологической катастрофой. Наиболее активно вмешательство человека в настоящее время проявляется в круговорот углерода и углекислого газа на Земле. Техногенные выбросы углекислого газа могут существенно повлиять на его общий круговорот и вызвать климатические изменения, связанные с парниковым эффектом и т.п.

Внутри эколого-геологических систем и биогеоценозов также осуществляются круговые процессы вещества и энергии, поддерживающие и обеспечивающие их гомеостаз. В обобщенном виде эти круговые процессы представлены на рис. 5.11. Аналогичные процессы совершаются и в ЭГС.

В биогеоценозе совершаются многоуровневые круговые потоки энергии и вещества между различными его подсистемами и компонентами. Между биотическими компонентами также совершаются круговые процессы массо-энергообмена, обусловливающие так называемый «биологический круговорот», показанный на рис. 5.12. В него вовлечены в основном по пищевым цепям различные группы организмов от микроорганизмов до растений и животных. В этот круговорот также «вмешиваются» на разных этапах редуценты, также преобразующие органическое вещество разного вида, которые на схеме не показаны. По этой же схеме осуществляется

биологический круговорот и в ЭГС различных иерархических уровней, вплоть до биосферы в целом, обеспечивая глобальный гомеостаз биосферы Земли.

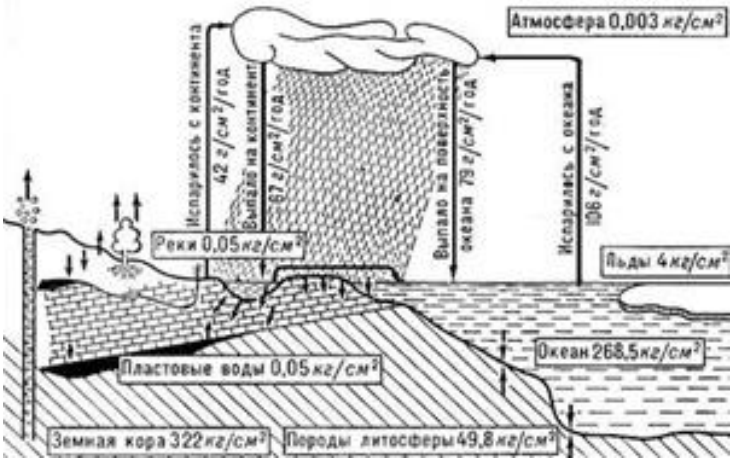


Рис. 5.9. Схема круговорота воды. Содержание воды дано в *кг/см²* в год на поверхности Земли. Испарение и выпадение осадков дано в *г/см²* в год на поверхность океана или континента соответственно

Рис. 5.10. Схема малого геологического круговорота горных пород

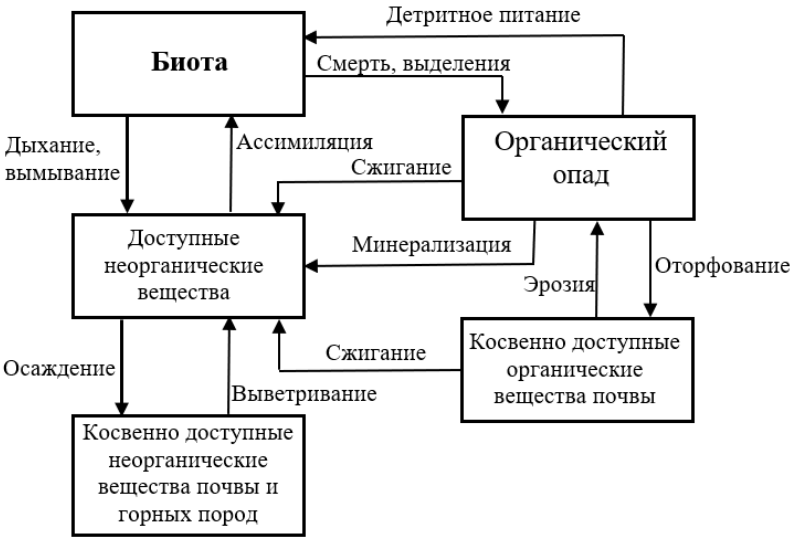


Рис. 5.11. Круговорот веществ и энергии в биогеоценозе (по В.Ф.Цветкову, 2004, с изменениями авт.)

Круговые и циклические процессы, подчиняющиеся законам сохранения вещества и энергии, идут таким образом, что обеспечивают в ходе различных превращений восстановление тех или иных веществ. В целом они осуществляются достаточно медленно на Земле (табл.5.2). Наиболее интенсивно они идут в атмосфере, медленнее в гидросфере и наименее интенсивно – в литосфере.

Таким образом, круговые биогеохимические процессы в биосфере оказываются замкнутыми. Замкнутость биохимических круговоротов веществ приводит к тому, что жизнь оказывается возможной на основе органических соединений, энергия которых может быть использована при их разложении. Именно ограничения, налагаемые необходимостью биотической регуляции окружающей среды и замкнутостью круговорота веществ на земную биоту, и составляют сущность экологии.

Распределение и обилие организмов, объяснение которых иногда называют основной задачей экологии, являются лишь следствием этих ограничений. Основной же задачей экологии следует считать выяснение причин, обеспечивающих устойчивое существование жизни в окружающей среде (Горшков, 1995).

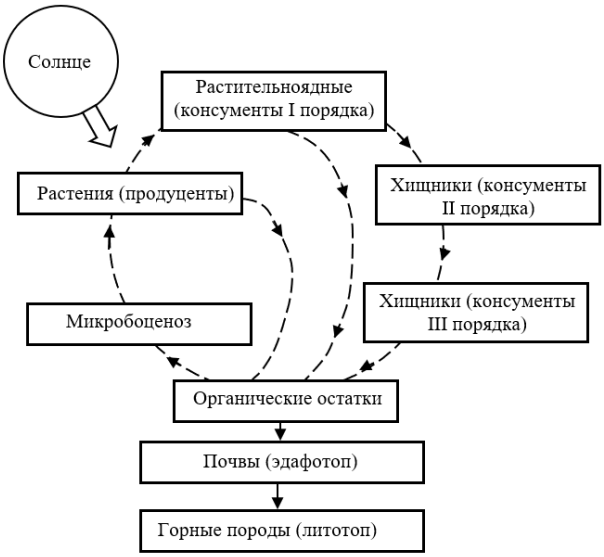


Рис. 5.12. Биологический круговорот в биогеоценозе

Таблица 5.3

Время полного кругооборота различных вещества на Земле

Вещество	**Среда**	**Время оборота, годы**
CO_2 (через фотосинтез)	Атмосфера	ок. 300
O_2	Атмосфера	ок. 2000
H_2O	Гидро- и атмосфера	ок. 10^6
N_2	Атмосфера	ок. 10^8
Горные породы	Литосфера	ок. 10^8

Согласно В.Г.Горшкову (1980, 1984), замкнутость биохимических круговоротов должна обеспечиваться скоррелированным взаимодействием видов различных трофических уровней, биологическая устойчивость замкнутых круговоротов должна поддерживаться за счет естественного отбора различных конкурентно взаимодействующих локальных биоценозов в локальных экосистемах, имеющих конечные размеры. Конечность размеров локальных экосистем подтверждается неоднородностью распределения биоты даже в полностью однородных условиях окружающей среды.

Биохимические потоки в области порядка размеров одного организма полностью разомкнуты. С увеличением области и включением в нее все большего числа организмов локальной экосистемы разных трофических уровней разомкнутость уменьшается. С расширением области до размеров локальной экосистемы усредненная по времени разомкнутость достигает величины разомкнутости во всем экосостоянии.

В целом процессы самоочистки в геологической среде (как и в окружающей среде в целом) ограничены. Самоочищение может осуществляться лишь в определенных пределах загрязнения, не превышающих некоторых границ, уровень которых лимитируется механизмами указанных выше процессов самоочищения. Для каждого механизма, как и для каждого вещества-загрязнителя, существует свой предельный уровень, превышение которого уже не позволяет системе самопроизвольно "справиться" с данным загрязнителем в конкретных геохимических условиях. Превышение этих уровней исключает самопроизвольное очищение системы. В этом случае система переходит уже в качественно иное состояние. Многообразие механизмов самоочищения в геологической среде, как и обилие различных веществ-загрязнителей, определяет чрезвычайную сложность этих процессов и не позволяет однозначно установить предельные уровни загрязнений для их самоочищения.

Не менее важным вопросом является оценка и учет ***устойчивости*** (персистентности[1]) различных ***загрязнителей***. В общем случае все вещества, период полураспада которых в природных условиях превышает двое суток, считаются трудноразложимыми.

Например, для различных хлорированных углеводородов длительность периода полураспада при 20° С составляет от 9 до 116 лет. Поэтому и после введения запретов на применение стойких биоцидов заражение ими почв и грунтов сохранится в течение десятилетий.

В последнее время выполнено много работ по оценке самоочищения почв от загрязнения нефтью и нефтепродуктами. Самоочищение возможно в результате действия нескольких механизмов: физико-химического, биологического, механического и др.

Физико-химическое самоочищение почв от нефти и нефтепродуктов связано с прямым окислением углеводородов

[1] *Персистенция* (от лат. persistere - оставаться, упорствовать) - способность компонентов не видоизменяясь и не разрушаясь оставаться в окружающей среде. Персистенция бактерий - способность бактерий или вирусов сохраняться в организме хозяина или в клеточной культуре

кислородом воздуха и испарением их легких фракций. Главные факторы, позволяющие регионально оценить эти процессы, – окислительно-восстановительный режим почв и годовая сумма температур в почвах, превышающих 10°С.

Биологическое разложение нефти и нефтепродуктов в почвах определяется их биологической активностью (в основном, деятельностью углеводородокисляющих микроорганизмов). Основные факторы, контролирующие биологическую активность почв, — это продолжительность вегетационного периода и степень увлажнения почв.

Механическое рассеяние нефти, нефтепродуктов и продуктов их метаболизма происходит как в латеральном (плоскостной сток), так и в радиальном (нисходящий внутрипочвенный сток) направлениях. На потенциальную способность почв к механическому рассеянию нефти и нефтепродуктов влияют две группы факторов, определяющих, с одной стороны, интенсивность выноса нефти и нефтепродуктов, с другой — способность к их закреплению в почвенном профиле. Интенсивность выноса загрязняющих веществ за пределы почвенного профиля зависит от количества атмосферных осадков и характера водного режима почв. Препятствует их рассеянию наличие сорбционных и механических геохимических барьеров в почвах.

Сорбционные барьеры в почвах представлены органогенными, гумусовыми и иллювиальными (состоящими, в основном, из глинистых частиц) горизонтами почв. Для оценки сорбционной способности почв выбрана мощность этих горизонтов. Чем больше толщина сорбирующих слоев, тем больше частиц нефти и нефтепродуктов задерживаются в почвенном профиле.

Механические барьеры в почвах представлены мерзлыми слоями, которые могут быть сплошными или островными. Сплошные мерзлые слои усиливают закрепление на их поверхности неразложившихся частиц нефти и нефтепродуктов. Почвы с самым низким потенциалом самоочищения (низкая способность к деградации и слабое рассеяние нефти и нефтепродуктов). Это, в основном, арктические, арктотундровые, тундровые глеевые, тундрово-болотные и болотные торфяные почвы равнинных территорий, находящиеся в зоне холодного и очень холодного тепловых режимов. Сюда же относятся аллювиальные почвы низовьев сибирских рек (https://geographyofrussia.com/).

Самоочищение является важнейшим способом рекультивации и восстановления нарушенных земель. В качестве основных мероприятий по рекультивации загрязненных земель следует рассматривать те,

которые наилучшим образом обеспечивают условия самоочищения почвы как за счет развития существующих почвенных процессов, так и за счет инженерно-экологического обеспечения жизнедеятельности микроорганизмов, внесенных в почву для деструкции токсичных веществ.

Необходимо учитывать, что процесс самоочищения почвы идет нелинейно, т. е. со временем затухает (нелинейность природных процессов – одно из свойств геосистемы), поскольку деструкция загрязняющих веществ определяется ростом и отмиранием бактерий, функционирующих в условиях уменьшения объема питательной среды.

5.4. Термодинамика самоорганизации, самовосстановления и саморегуляции ЭГС

Экосистема или ЭГС с позиций термодинамики рассматривается как открытая термодинамическая система, которой присущи процессы массо- и энергообмена с внешней средой и процессы массо- и энергообмена внутри самой системы. Поэтому к экосистеме приложимы все законы термодинамики и вытекающие из них следствия. Эколого-геологическая система, как часть экосистемы, также не является в этом смысле исключением.

Эффективность описания процессов в открытых системах с помощью методов термодинамики открытых систем зависит от того, насколько открытая система близка к термодинамическому равновесию. Если рассматриваемая открытая система близка к термодинамическому равновесию, а значения ее переменных мало отличаются от равновесных, то поведение энтропии S такой системы определяется теоремой Пригожина: *в стационарном состоянии прирост энтропии, обусловленный протеканием необратимых процессов внутри системы, имеет минимальное из возможных и положительное значение*.

Баланс энтропии S в открытой системе представляется в виде

$$\Delta S = \Delta S_i + \Delta S_e, \qquad (5.6)$$

где ΔS_i и ΔS_e — прирост энтропии за счет процессов внутри системы и приток энтропии извне, соответственно. В зависимости от соотношения ΔS_i и ΔS_e величина ΔS может быть как положительной, так и отрицательной. В стационарном состоянии $\Delta S = 0$.

Согласно теореме Пригожина прирост энтропии внутри системы в единицу времени в стационарном состоянии принимает максимальное значение. Если потоки вещества и энергии через открытую систему велики, а динамические значения переменных сильно отличаются от равновесных, то в общем случае такие системы нельзя описать термодинамическими методами; отдельные части таких систем могут составлять подсистемы, близкие к равновесию, но наряду с ними в системе действуют и «не термодинамические» силы. Ответ на вопрос, к какому классу открытых систем относятся те или иные биологические системы, может дать только эксперимент.

Для практически важных задач организменного и более высоких уровней методы термодинамики открытых систем применяются довольно редко. Более распространены методы моделирования, при которых биологический объект представляется в виде нескольких относительно изолированных и взаимодействующих между собой количеств вещества — *компартментов*.

В последнее время появляется все больше термодинамических исследований различных особенностей экосистем, включая термодинамику процессов эволюции организмов. Трудами М.Эйгена, П.Шустер и др. была разработана физико-химическая теория биогенеза, опирающаяся на представления термодинамики и синергетики. Значительный вклад в эти работы внесли В.Эбелинг (1990, 2001), А.Энгель, Р.Файстель, М.Пешель, М.В.Волькенштейн, Ю.Л.Климонтович, В.Г.Горшков (1984, 1995), А.М.Тарко (1995) и др.

Значение и огромная роль необратимых физических процессов для экосистем были поняты значительно раньше, чем сформировалась современная статистическая и термодинамическая теория необратимых процессов. Основополагающими здесь явились работы В.И.Вернадского, заложенные в них положения науки о биосфере, уже содержали представления современной теории самоорганизации и синергетики, которая разрабатывается бельгийской школой физиков во главе с И.Р.Пригожиным.

Как показал И.Р.Пригожин, термодинамическое описание систем, в том числе и экосистем, принимает различные формы в зависимости от того, как далеко система находится от равновесия. При этом на базе статистической термодинамики разрабатываются вопросы теории устойчивости различных экосистем и их самоорганизации, бифуркации и катастроф. В работах И.Р.Пригожина и его школы развивалась теория самоорганизации природных систем на основе понятия структурной устойчивости, применимая к многим фундаментальным проблемам экологической геологии.

Важнейшей термодинамической характеристикой ЭГС, экосистем и биосферы в целом является способность создавать и поддерживать высокую степень внутренней упорядоченности, т.е. состояние с *низкой энтропией*. Низкая энтропия в ЭГС достигается постоянным и эффективным рассеянием легко используемой энергии (например, энергии света или пищи) и превращением ее в энергию, используемую с трудом (например, в тепловую). Упорядоченность экосистемы или ЭГС, т. е. сложная структура биомассы и абиотических компонентов, поддерживается в том числе за счет дыхания всего сообщества экосистемы, которое постоянно «откачивает из сообщества неупорядоченность». Таким образом, экосистемы и организмы представляют собой открытые неравновесные термодинамические системы, постоянно обменивающиеся с окружающей средой энергией и веществом, уменьшая этим энтропию внутри себя, по увеличивая энтропию вовне в согласии с законами термодинамики.

Г. Одум (H. Odum, 1967)[1], основываясь на концепциях А. Лотки (Lotka, 1925)[2] и Э. Шредингера (Schrodinger, 1945)[3], следующим образом связывает принципы термодинамики с экологией. В любой сложной системе реально существующего мира первостепенную важность имеет поддержание процессов, идущих против температурного градиента. Для поддержания внутренней упорядоченности в системе, находящейся при температуре выше абсолютного нуля, когда существует тепловое движение атомов и молекул, необходима постоянная работа по откачиванию «неупорядоченности». В экосистеме отношение общего дыхания сообщества к его суммарной биомассе (R/B) можно рассматривать как отношение затрат энергии на поддержание жизнедеятельности к энергии, заключенной в структуре, или как меру термодинамической упорядоченности. Это «соотношение Шредингера» служит мерой экологического оборота (это понятие введено Ю.Одумом 1986).

Если выразить R и B в калориях (единицах энергии) и разделить их па абсолютную температуру, то отношение R/B становится отношением прироста энтропии (и соответствующей работы), связанного с поддержанием структуры, к энтропии упорядоченной

[1] *Odum H. T.* Energetics of world food production. In: The World Food Problem. // A Report of the President's Science Advisory Committee, Panel on World Food Supply (I. L. Bennett, Chairman), Vol. 3, Washington, D. C. The White House, 1967. pp. 55—94.

[2] *Lotka A.J.* Elements of Physical Biology. // Baltimore, Williams and Wilkins, 1925, 400 pp. (Reprinted as Elements of Mathematical Biology, New York, Dover, 1956.)

[3] *Schrodinger E.* What Is Life? The Physical Aspects of the Living Cell. // Cambridge, England, Cambridge University Press, 1945. 91 pp.

части. Чем больше биомасса, тем больше затраты на поддержание; но если размер единиц, на которые поделена биомасса (отдельных организмов, например), достаточно велик (скажем, это большие деревья в лесу), то затраты на поддержание процессов, идущих против температурного градиента, в пересчете на структурную единицу биомассы будут ниже. Один из дискутируемых сейчас теоретических вопросов — стремится ли природа довести до максимума отношение «структурного» метаболизма к «поддерживающему», или же это относится к самому потоку энергии?

5.5. Вещественно-энергетический баланс в эколого-геологических системах

Энерго-массообмен в различных ЭГС происходит по-разному. В частности, мировое распределение первичной продукции различных экосистем существенно отличается для систем разных типов (рис. 5.13).

Плодородные от природы области, получающие естественные энергетические субсидии, встречаются главным образом в дельтах рек, эстуариях, прибрежных зонах апвеллинга и в районах, хорошо «перепаханных» ледником, а также па лёссовых (перенесенных ветром) или вулканических почвах там, где осадки достаточно обильны (см. рис. 5.13).

Рис. 5.13. Мировое распределение первичной продукции экосистем основных типов (валовая продукция в тыс. ккал на 1 м²) (по Ю.Одуму, 1986): **I – пустыни; II – луга и пастбища, степи; III – влажные леса, агроэкосистемы; IV – эстуарии, коралловые рифы, экосистемы аллювиальных равнин; V – воды континентального шельфа; VI – воды океана**

На суше отмечается общая корреляция между величиной эвапотранспирации (и в меньшей степепи количеством осадков) и продуктивностью, в озерах и океанах - обратная корреляция между глубиной и продуктивностью. На отдельных особенно благоприятных участках экосистем каждого типа продукция может быть вдвое (а то и в несколько раз) выше средних величин, указанных на рис.5.13.

За верхний предел валовой продукции фотосинтеза для практических расчетов принимают величину 50 000 ккал/м^2 в год. Человеку придется подгонять свои нужды под этот предел, пока не удастся убедительно доказать, что усвоение солнечной энергии путем фотосинтеза можно сильно повысить, не подвергая при этом опасности равновесия других, более важных ресурсов жизненного круговорота. Годовая продукция большинства сельскохозяйственных культур невелика, поскольку однолетние зерновые культуры продуктивны лишь на протяжении нескольких месяцев (менее полугода). Получение двойных урожаев за счет выращивания таких культур, которые дают продукцию в течение всего года, может приблизить валовую продуктивность к уровню лучших природных сообществ. При этом, чистая первичная продукция составляет около половины валовой продуктивности, а урожай зерновых, доступный человеку, не превышает одной трети валовой продуктивности (Одум, 1986).

Согласно представлениям В.Г. Горшкова (1995) живая материя характеризуется универсальной скоростью потребления энергии на единицу объёма, поэтому общее энергопотребление животного растёт пропорционально кубу линейного размера тела, а потребление на единицу площади земной поверхности, занятой организмом, прямо пропорционально линейному размеру тела. На единицу площади, занимаемой организмом, крупные животные потребляют поток энергии, на порядки превышающий поглощаемый жизнью поток солнечной энергии. Если средняя мощность фотосинтеза составляет порядка 0.1 Вт/м^2, то человек, например, имея метаболическую мощность около 150 Вт и площадь проекции тела порядка 0.5 м^2, потребляет, 300 Вт/м^2, т.е. в три тысячи раз больше.

Таким образом, рост размера тела приводит, во-первых, к увеличению зависимости от окружающей среды, выражающейся в росте потока энергии через единицу площади поверхности тела, и, во-вторых, к уменьшению доли потребляемой энергии, которую организм тратит на поддержание внешней окружающей среды, от которой он зависит.

Иными словами, в ходе эволюции животных генетическая информация об их взаимодействии с окружающей средой утрачивалась.

Этот процесс можно сравнить с редукцией различных органов у паразитических видов – так, например, некоторые ленточные черви утратили пищеварительную систему, используя внутреннюю окружающую среду своего хозяина. Аналогичным образом крупные животные существуют в окружающей среде, которую поддерживают остальные виды биосферы.

Доля потребления продукции биоты всеми крупными животными от мышей до слонов не превосходит 1% и быстро уменьшается с ростом размера животных (рис. 5.14).

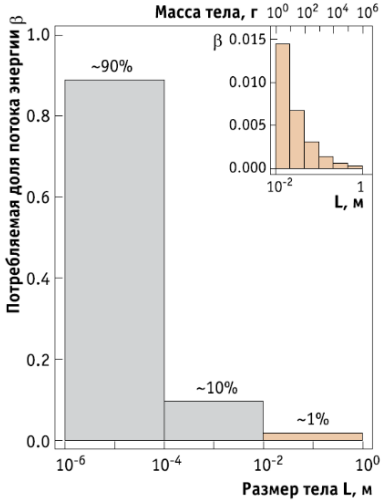


Рис. 5.14. Зависимость потребляемой доли потока энергии организмами в зависимости от массы или размера тела (по А.М.Макарьевой и др., 2014)

Современный человек, согласно В.Г.Горшкову (1995), превысил этот порог, отведённый для совокупности всех видов крупных животных на порядок величины: включая древесину, пищу для людей и корм для скота, человечество потребляет около 10% чистой первичной продуктивности биосферы.

Одноклеточные организмы на протяжении всей истории жизни контролировали потребление продукции растений: 90% продукции растений потребляется мельчайшими организмами (бактериями и грибами). Насекомые – мельчайшие передвигающиеся животные – потребляют около 10% первичной продукции. Функции насекомых сводятся к уничтожению дефектных растений (нашествия саранчи, короедов и листоедов – иммунная система управляющей части биоты) и к опылению цветковых растений. Диаграмма вверху слева на рис.

5.13. – потребление лесных растительноядных млекопитающих и птиц в бореальной зоне.

Рассмотрим согласно Ю.Одуму (1986) основные компоненты модели потока энергии. На рис. 5.14 представлена модель, которую можно назвать «универсальной», поскольку она приложима к любому живому компоненту системы или ЭГС, будь то растение, животное, микроорганизм, особь, популяция или трофическая группа. Соединенные между собой, такие графические модели могут отразить пищевые цепи или биоэнергетику экосистемы в целом.

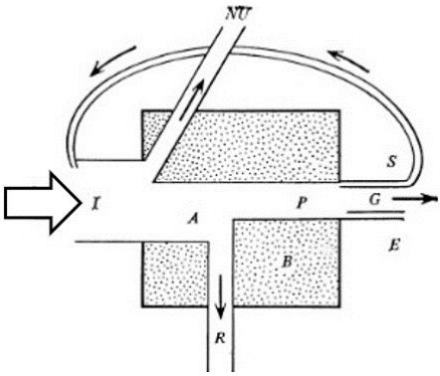


Рис. 5.15. «Универсальная» модель экологического потока энергии в системе (по Ю.Одуму, 1986): ***I* – поступившая или поглощенная энергия; *NU* – неиспользованная энергия; *A* – ассимилированная энергия; *P* – продукция; *R* – дыхание; *B* – биомасса; *G* – рост; *S* – накопленная энергия; *E* – выделенная энергия**

На рис. 5.15 квадрат, обозначенный буквой B, изображает живую структуру или биомассу основного компонента модели. Хотя биомассу выражают обычно через какую-либо массу (живая [сырая] масса, сухая масса или масса обеззоленного вещества), желательно выражать биомассу в калориях, чтобы выявить связь между размерами потока энергии и одномоментной или средней биомассой. Общее поступление энергии на рис. 5.15 обозначено буквой *(I)*. Для облигатных автотрофов это свет, для облигатных гетеротрофов — органическая пища. Некоторые водоросли и бактерии могут использовать оба источника энергии, а многие из них нуждаются в определенном соотношении этих источников. Сходная ситуация наблюдается у лишайников и тех беспозвоночных животных, в которых содержатся водоросли-мутуалисты. В таких случаях канал притока на схеме потоков энергии

можно разделить пропорционально использованию различных источников энергии или же можно разделить биомассу на отдельные резервуары, если необходимо чтобы каждый резервуар соответствовал одному энергетическому (трофическому) уровню.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что концепция трофического уровня введена не для того, чтобы классифицировать виды. Энергия течет через сообщество в соответствии со вторым законом термодинамики, но отдельная популяция вида может быть вовлечена не в один, а в несколько этапов, или трофических уровней (и очень часто именно так и бывает). Поэтому универсальную модель потока энергии, приведенную на рис. 5.15, можно использовать двояко. Она может представлять популяцию какого- либо вида — в этом случае каналы притока энергии и связи с другими видами составляют обычную схему пищевой сети с названиями отдельных видов в ее узлах, или же она может изображать определенный энергетический уровень — тогда прямоугольники биомассы и каналы потоков энергии представляют все популяции, поддерживаемые одним источником энергии.

Энергия характеризуется не только количественными, по и качественными параметрами. Не все калории (или другие единицы количества энергии) одинаковы, т. е. одинаковые количества разных форм энергии могут сильно различаться по своему рабочему потенциалу. Высококонцентрированные формы энергии, такие, как энергия нефти, газа, обладают более высоким рабочим потенциалом и соответственно более высоким качеством, чем такие «разбавленные» формы, как солнечный свет, а солнечный свет в свою очередь обладает более высоким качеством по сравнению с еще более рассеянным низкотемпературным теплом.

Качество энергии измеряется ее количеством, расходуемым при превращении, или, говоря точнее, количеством определенного типа энергии, затрачиваемым на получение другого типа в цепи превращений энергии, например в пищевой цепи или в цепи превращений энергии, ведущих к получению электричества. По мере того, как в этой цепи уменьшается количество энергии, пропорционально на каждом этапе повышается качество той её доли, которая (после соответствующего теплового рассеяния) действительно перешла в новую форму. Другими словами, при снижении количества энергии повышается её качество. Удобным показателем качества энергии может быть количество калорий солнечного света, которое должно рассеяться, чтобы получилась одна калория более высококачественной формы (например, энергии пищи или древесины и т.п.).

На рис. 5.16 иллюстрируется принцип качества энергии для двух энергетических цепей: природной (*А*) и искусственной (*Б*).

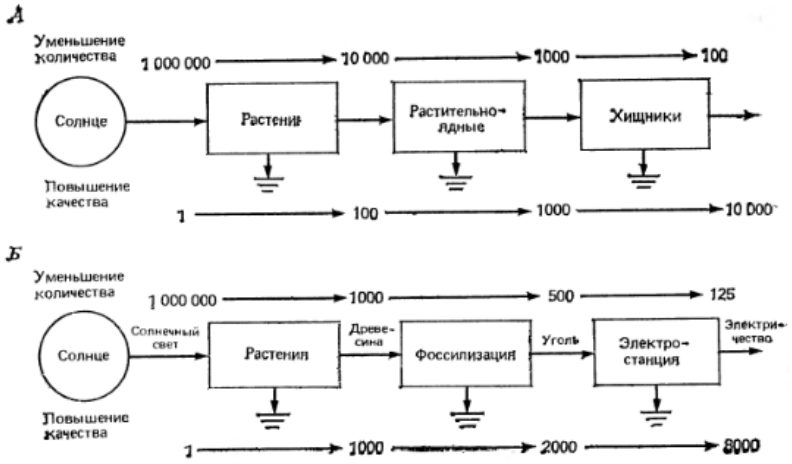


Рис. 5.16. Повышение качества и понижение количества энергии в двух цепях ее переноса, начинающихся с Солнца (по H.T. Odum, 1978)**: *А* — пищевая цепь. *Б* — цепь производства электроэнергии.**

Для природной цепи характерно снижение количества энергии на каждом последующем уровне. Для искусственной энергетической цепи, приводящей к генерации электроэнергии, по мере продвижения вдоль цепи количество энергии падает, но её качество (т.е. способность совершать работу) увеличивается с каждым превращением.

Источник и качество доступной энергии в той или иной степени определяют видовой состав и численность организмов, характер функциональных процессов, протекающих в экосистеме, и процессов ее развития, а также образ жизни человека. Поскольку энергия — общий знаменатель и исходная движущая сила всех экосистем и ЭГС, как техногенных, так и природных, логично принять энергию за основу для «энергетической» классификации экосистем. Ю.Одум (1986) выделил на этой основе четыре фундаментальных тина экосистем:

- Природные, движимые Солнцем, не субсидируемые.
- Природные, движимые Солнцем, субсидируемые другими естественными источниками.
- Движимые Солнцем и субсидируемые человеком.
- Индустриально-городские, движимые топливом (ископаемым, другим органическим или ядерным).

В результате круговых процессов содержание какого-либо вещества в выделенном элементе (объеме) геологической среды меняется во времени. Количественная оценка процесса самоочистки геологической среды и её загрязнения дается нами на основе анализа баланса загрязнителя, поступающего или выходящего из анализируемого элемента геологической среды согласно схеме, показанной на рис. 5.17 (Королев, 2019).

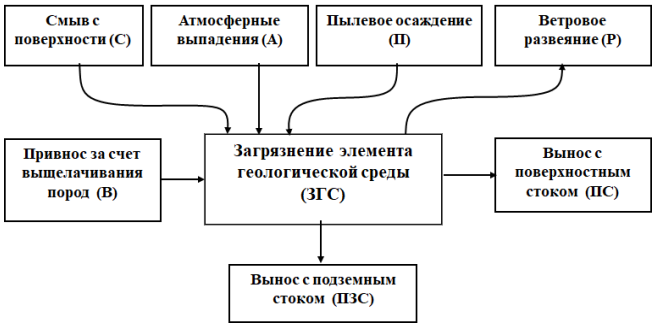


Рис. 5.17. Схема баланса загрязнения элемента геологической среды (по В.А.Королеву, 2019а)

На этой схеме указаны составляющие прихода и расхода загрязнителя, обозначенные буквами. Для изучаемого объема (или элемента) геологической среды, подвергающегося загрязнению, могут быть составлены балансовые уравнения, учитывающие приходные и расходные составляющие:

$$ЗГС = С + А + П + В - Р - ПС - ПЗС\ . \qquad (5.7)$$

В состоянии равновесия уровень загрязнения элемента геологической среды остается неизменным, т.е.:

$$С + А + П + В = Р + ПС + ПЗС\ = \text{const}. \qquad (5.8)$$

Если сумма приходных составляющих загрязнения меньше расходных, то происходит самоочистка рассматриваемого элемента геологической среды, т.е.:

$$\Sigma \text{ прихода} < \Sigma \text{ расхода}\ = \text{самоочистка}. \qquad (5.9)$$

Если же сумма приходных составляющих загрязнения больше расходных, то происходит загрязнение рассматриваемого элемента геологической среды, т.е. (Королев, 2019):

$$\Sigma \text{ прихода} < \Sigma \text{ расхода} = \text{загрязнение}. \quad (5.10)$$

На основе балансовых оценок (наподобие указанной на рис. 5.15) в настоящее время все больше появляется работ по компьютерному моделированию процессов самоочистки в разных средах (Ecological impacts..., 2011). В то время как ранние компьютерные модели описывали лишь фиксированный «единичный мир», который должен был как бы представлять «глобальный мир», более поздние модели давали пользователям при моделировании возможность выбирать и настраивать среду (вода, воздух, подземные воды, горные породы и т.п.) и задавать разные пространственные масштабы. Совсем недавно использование пространственных компьютерных моделей стало наиболее распространенным.

Согласно В.Г.Грошкову (1984), современная биосфера занимает устойчивое состояние. Замкнутые биохимические круговороты элементов в биосфере обеспечиваются статистическими законами, основанными на отсутствии управления биотой в биоценозах и ее максимальной хаотичности и некоррелированности. Главная часть полного биоэнергетического потока протекает через гетеротрофные организмы микроскопических размеров. Полная мощность биосферы равна 1014 Вт и не может быть увеличена при существующем потоке солнечной энергии. В рамках биосферы могут стабильно существовать крупные позвоночные животные, поглощающие ~ 1 % полного потока энергии. Человечество как популяция из крупных организмов может стабильно существовать в стационарной биосфере без дополнительных затрат на поддержание замкнутых биохимических круговоротов элементов с величиной потребления в антропогенном канале порядка величины потребления всех диких позвоночных биосферы. При этом существующих возобновимых источников энергии, по-видимому, будет достаточно для поддержания соответствующей потреблению продуктов биосферы высокоразвитой индустрии с замкнутым круговоротом химических элементов, используемых в индустрии.

Современное антропогенное потребление биосферы в десятки раз больше потребления диких позвоночных и не может быть стационарно обеспечено энергетикой существующей биосферы. Если считать, что биосфера — единственно возможное состояние, обеспечивающее замкнутость круговорота биогенов при наличии крупных позвоночных,

то для поддержания современного антропогенного потребления людям потребуется сконструировать аналог современной биосферы с мощностью, в десятки раз большей, т. е. порядка 1015 Вт. Изменение энергетического бюджета Земли в таких масштабах даже при наличии неограниченных запасов невозобновимых источников энергии (типа термоядерной энергии) или за счет перераспределения солнечной энергии разрушит стабильность климата Земли.

При отказе от замкнутых круговоротов элементов за счет использования концентрированных ископаемых источников последних можно игнорировать законы распределения потребления в биосфере. В этом случае для временного поддержания существующей величины антропогенного потребления продукции биосферы требуется дополнительное энергопотребление на два порядка меньше, чем в предыдущем случае. Время существования заданной величины антропогенного потребления продукции биосферы определяется временем истощения источников невозобновимых ресурсов.

Генофонд современного человечества сформировался около сорока тысяч лет назад. С тех пор эволюция человека определяется эволюцией культурного наследия при практически неизменном генофонде. Человечество не заинтересовано в изменении своего генофонда. Стабилизация генофонда человека может производиться на основах научно разработанного отбора подобного искусственному отбору культурных видов растений и животных. Поэтому человечество может образовать скоррелированную систему своего вида в пределах всей Земли. Заменяя природные биоценозы возделываемыми землями, человек способен увеличивать долю потребления своего вида вплоть до энергетического предела $\beta = 1$ (Горшков, 1984).

***

Часть II
МЕТОДЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ГЕОКИБЕРНЕТИКИ

Глава 6
МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ АБИОТИЧЕСКИМИ КОМПОНЕНТАМИ ЭГС

Как известно (Трофимов, Зилинг, 2002; Трофимов, 2010а), в практике экологически ориентированных работ используют различные группы методов управления – административно-правовые и экономические механизмы, научно-технические механизмы, международные положения и механизмы. В рамках геокибернетики рассматриваются *только научно-технические механизмы*, реализуемые на практике теми или иными методами, рассматриваемыми ниже.

Характеризуемые в этой и последующих главах методы управления компонентами ЭГС в нашем случае есть не что иное как элемент в системе управления, характеризуемой в простейшем случае схемой, показанной выше на рис. 1.5.

Каждый конкретный метод управления, рассматриваемый ниже, есть то, или иное управляющее воздействие (u) на ЭГС или ее компонент, создаваемое управляющим устройством (*УУ*). Связка $УО \rightarrow УУ \rightarrow u$ представляет собой конкретный метод управления (*МУ*), реализуемый на практике управляющим органом (*УО*). Поскольку методов управления компонентами ЭГС достаточно много, их можно обозначить как *МУi*, где $i = 1,2,3,\ldots n$ – метод управления.

Тогда, для реализации конкретного метода управления справедлива запись

$$(МУ_i) = УО \rightarrow УУ_i \rightarrow u_i. \qquad (6.1)$$

6.1. Методы управления составом, строением, состоянием и свойствами грунтов ЭГС

Для управления химико-минеральным составом, строением, состоянием и свойствами различных грунтов, как компонентов ЭГС, используется широкий арсенал методов технической мелиорации

грунтов и горного производства (Воронкевич, 2005; Новик, Зильбершмидт, 1994).

Техническая мелиорация грунтов – прикладное направление инженерной геологии, занимающееся разработкой теории и методов целенаправленного улучшения состава, структуры, состояния и свойств грунтов в связи с запросами разных видов строительства, инженерной защиты территорий, решением экологических проблем и др.

Существующие методы управления свойствами грунтов довольно многочисленны и объединяются в три группы. Первая группа методов относится к *гидро-геомеханической мелиорации*, традиционно именуемой как уплотнение и осушение грунтов, и включает все виды дренажей, электроосмотическое осушение и все методы уплотнения грунтов (трамбовками, гранулометрическими смесями и т.п.). Вторая - составляет суть *геохимической* (или физико-химической) *мелиорации*: к ней относятся все виды инъекций, совмещение грунтов с различными вяжущими и температурная обработка, при которых происходит закрепление грунтов. Третья — *геотехническая мелиорация*, чаще именуется как армирование грунтов — объединяет все виды совмещения грунтовых масс или грунтовых массивов с пространственными конструкциями из элементов повышенной прочности (армирование, геотекстиль, геокомпозит и т.п.) (Воронкевич, 2005). В последнее время интенсивно разрабатываются и биологические методы мелиорации, основанные на использовании микроорганизмов, обладающих цементирующим действием. Указанные группы методов управления можно выделять и по их природе: физические ($МУ_{ф}$), физико-химические ($МУ_{фх}$), физико-механические ($МУ_{фм}$), химические ($МУ_{х}$), биологические ($МУ_{б}$) и др.

Концептуальная схема управления грунтовым массивом методами технической мелиорации (на примере группы физических методов $МУ_{ф}$) показана на рис. 6.1.

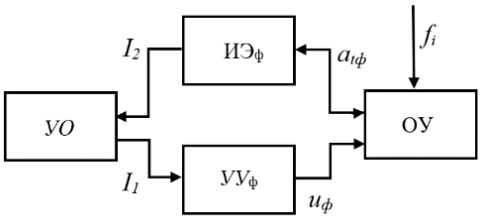


Рис. 6.1. Концептуальная схема управления грунтовым массивом физическими методами технической мелиорации ($МУ_{ф}$) (объяснения в тексте)

Здесь стоит задача управления состоянием и свойствами грунтового массива, являющегося объектом управления (ОУ) и испытывающего внешние воздействия f_i, с помощью группы физических методов технической мелиорации грунтов ($МУ_ф$). Для этого (см. рис.6.1) управляющий орган ($УО$) или оператор, с помощью сигналов (I_1), посылаемых на управляющее устройство ($УУ_ф$) оказывает на грунт воздействие ($u_ф$) физической природы, относящееся к той или иной группе физических методов ($МУ_ф$)**,** тем самым модифицируя грунт в нужную сторону. Контроль за этим процессом осуществляется с помощью измерительного элемента ($ИЭ_ф$), отслеживающего динамику физических характеристик состояния системы ($a_{tф}$). Эта информация по каналу обратной связи (I_2) поступает к оператору (УО) и позволяет ему регулировать конкретные параметры процесса управления в автоматическом режиме. Следует подчеркнуть, что в автоматическом режиме система начинает работать лишь тогда, когда внешнее воздействие f_i приводит к такому изменению физических свойств грунта, при котором они достигают пороговых (критических) значений ($a_{tф}$*), т.е. когда выполняется условие:

$$a_{tф} \geq a_{tф}^*, \qquad (6.2)$$

где $a_{tф}$* – критическое (пороговое) значение показателя физических свойств грунта; $a_{tф}$ - его текущее значение на момент времени t.

Для прочих групп методов технической мелиорации грунтов ($МУ_{фх}$, $МУ_х$, $МУ_{фм}$, $МУ_б$) концептуальная схема управления с их помощью массива будет такой же как на рис.6.1.

Основные методы управления свойствами грунтов на базе методов технической мелиорации представлены в табл. 6.1. Там же указаны обозначения отдельных групп методов управления ($МУi$), реализуемых по схеме, показанной на рис. 6.1.

Методами технической мелиорации можно менять свойства различных грунтов в широких пределах, что позволяет их использовать для целей управления состоянием ЭГС. Закрепление грунтов широко применяется при строительстве промышленных и гражданских зданий, в гидротехническом, подземном и дорожном строительстве, горном деле.

Оно используется для: усиления грунтовых оснований зданий и сооружений; укрепления откосов выемок дорог и стенок котлованов; предупреждения деформаций склонов; предупреждения деформаций горных выработок и тоннелей и борьбы с водопритоками в них; создания противофильтрационных завес в основании гидротехнических

сооружений; защиты бетонных и каменных сооружений (фундаментов) от агрессивного воздействия; увеличения несущей способности свай, анкерных устройств, опор большого диаметра; удаления связанной воды из грунта; увеличения коэффициента уплотнения грунта; снижения пучинистости грунтов и др.

Таблица 6.1

Методы технической мелиорации грунтов

Класс грунтов	Группа методов	Метод управления	Разновидность методов управления
Скальные	Физико-химические ($МУ_{фх}$) и химические ($МУ_{х}$)	Скрепление трещин скобами	-
		Тампонажное закрепление Противофильтрационные завесы Защитные экраны	Цементация, силикатизация, глинизация, битумизация
Дисперсные, мерзлые, техногенные	Физико-механические ($МУ_{фм}$)	Механические ($МУм$)	Трамбование, укатка, гравитационное уплотнение, виброуплотнение, грунтовые сваи, энергия взрыва, замачивание лессовых грунтов
		Физические ($МУ_{ф}$)	Электрохимическое уплотнение, электроосмотическое осушение, обжиг, замораживание
	Физико-химические ($МУ_{фх}$)	-	Солонцевание, кольматация, гидрофобизация, электрообработка
	Химические ($МУ_{х}$)	С органическими вяжущими С неорганическими вяжущими	Битумизация, смолизация, полимеры Силикатизация, цементация, известкование
	Биологические ($МУ_{б}$)	Микробиологический	Биоцементация

Наряду с методами технической мелиорации для управления свойствами горных пород широко применяются ***методы горного производства*** (Новик, Зильбершмидт, 1994). Они обеспечивают

целенаправленное изменение параметров состава, строения и свойств горных пород до требуемых значений, которые соответствуют оптимальному решению поставленной задачи. В теории и практике горного производства такие задачи решаются давно, а управление свойствами пород рассматривается как целенаправленно обоснованное. Если методы технической мелиорации пород в основном нацелены на их упрочнение и улучшение в строительных целях, то методы горного производства в основном нацелены на дезинтеграцию, разрушение и диспергирование горных пород для их эффективной разработки, извлечения и последующей переработки (обогащения и т.п.). Однако в ряде случаев они также используются для упрочнения пород.

В общем случае целенаправленное изменение состава, строения, состояния и свойств грунтов (и их массивов) в пределах ЭГС осуществляется человеком с помощью внешних воздействующих полей (рис. 6.2). При этом между составом, строением, состоянием и свойствами грунтов существует внутренняя взаимосвязь, показанная на рис.6.2 пунктиром и подчиняющаяся основному закону грунтоведения (Грунтоведение, 2005). Таким образом, изменение свойств грунтов есть следствие внутренних изменений их состава, строения и состояния, испытывающих внешние воздействия разной природы. В этом и состоит суть целенаправленного управления грунтами и грунтовыми массивами.

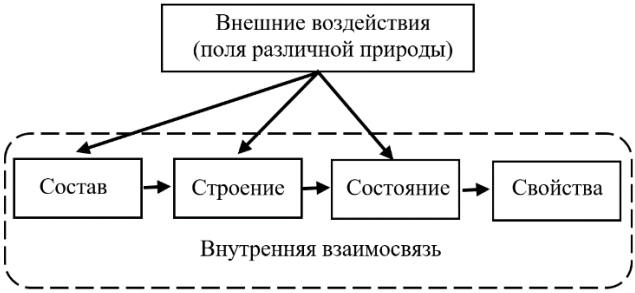


Рис.6.2. Общая схема искусственного изменения свойств грунтов

В результате воздействия внешних полей в грунтах происходят различные процессы: 1) изменение химико-минерального состава в результате химических реакций окисления, восстановления и т.п.; 2) изменения структурных связей между частицами, кристаллами, обломками; 3) изменения структуры и текстуры грунта; 4) изменения агрегатного состояния грунта в результате процессов плавления, кристаллизации, кипения и т.п.; 5) изменения энергетического, термо-

влажностного, напряженно-деформированного состояния грунта и т.п. Эти процессы меняют свойства грунтов. При управлении грунтами важно выявить конкретные взаимосвязи между воздействиями и процессами, их вызывающими с тем, чтобы целенаправленно изменять те или иные свойства грунтов в необходимых пределах.

Следуя Г.Я.Новику и М.Г.Зильбершмидту (1994) основные виды воздействия внешних полей на состояние грунтов в ЭГС можно свести в следующие группы.

1. *Изменение энергетического состояния:*
   а) изменение энергии упругого деформирования (напряженного состояния);
   б) изменение количества теплоты;
   в) изменение количества электричества (энергия электрического поля);
   г) изменение магнитного потока (энергия магнитного поля);
   д) изменение электромагнитного поля;
   е) изменение энергетического состояния поровой воды.
2. *Изменение состояния дефектной структуры грунта:*
   а) уплотнение;
   б) разуплотнение;
   в) разрушение;
   г) упрочнение.
3. *Изменение фазового состояния:*
   а) фазовые превращения I рода:
   $а_1$) полиморфные переходы;
   $а_2$) плавание;
   $а_3$) испарение;
   б) фазовые переходы II рода;
   в) растворение;
   г) адсорбция и смачивание;
   д) спекание.
4. *Изменение химического состояния:*
   а) химическое разложение:
   $а_1$ дегидратация;
   $а_2$) диссоциация;
   $а_3$) гидролиз;
   $а_4$) термолиз;
   $а_5$) электролиз;
   б) химическое соединение;
   в) окисление.
5. *Изменение биотического состояния*:
   а) биосорбция (биопоглощение)
   б) биоразложение
   в) биотоксикоз
   г) биоцементация.

В результате изменений того или иного состояния грунтов меняются и их свойства, среди которых выделяют химические, физико-химические, физические, физико-механические и биотические (Грунтоведение, 2005).

Сам же процесс воздействия тем или иным полем на грунт в статических условиях распадается на три основных этапа: первый - интервал времени нарастания поля до какого-то конечного значения *1,* второй - время выдержки горной породы в условиях постоянного (статического) поля *2,* третий - период времени после снятия поля *3* (рис. 6.3).

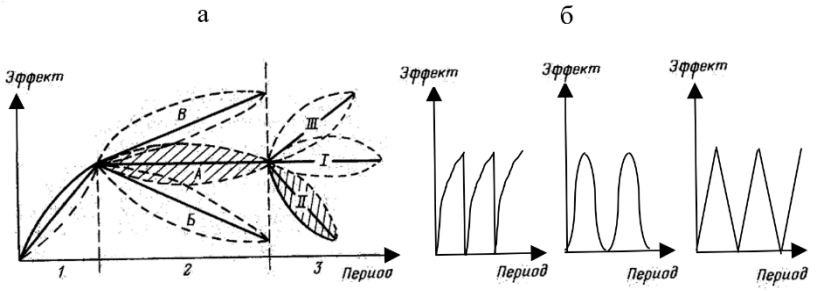


Рис. 6.3. Схема группирования физических эффектов в грунтах под воздействием внешних статических (а) и динамических (б) полей

В зависимости от поведения грунтов на втором этапе (рис.6.3а), эффект от приложенного статического поля остается постоянным, снижается или увеличивается) все горные породы могут быть подразделены на группы А, Б и В.

В зависимости от поведения грунтов на третьем этапе все горные породы подразделяют на группы I, II, III (см. рис. 6.3а). Таким образом, каждый грунт по способности к соответствующим изменениям в статическом поле может быть отнесена к одному из девяти классов А (I-III), Б(I-III), В(I-III).

В динамических условиях интенсивность воздействия внешнего поля во времени не постоянна. В этом случае могут быть самые разные эффекты динамического воздействия полей на грунты: импульсные, периодические, хаотические и т.п. (рис.6.3б). Соответственно, реакция грунтов от этих полей на втором (2) и третьем (3) периодах может также различаться (I-III)[1].

[1] На рис. 6.3б эта реакция не показана

Таким образом, в арсенале современных средств управления свойствами грунтов в ЭГС имеется множество различных методов, позволяющих менять свойства грунтов в нужном направлении или создавать грунты с заданными свойствами. Следует отметить, что в настоящее время реализация большинства из вышерассмотренных методов технической мелиорации и горного производства осуществляется не в автоматизированном, а в «ручном» режиме.

Однако, в целом ряде случаев, в том числе в системах мониторинга (концептуальную схему которой см. на рис. 4.5), за особо ответственными или опасными объектами, применение методов технической мелиорации целесообразно в автоматизированном режиме. Это тем более важно для динамичных объектов – ЛТС или ПТС, в которых их состояние меняется относительно быстро в физическом времени.

6.2. Методы очистки массивов грунтов от загрязнений

«Человечество усердно перерабатывает природу в мусор».

Мейсон Кули (1927-2002)

Особую группу методов управления грунтовыми массивами представляют различные мероприятия, нацеленные на очистку грунтов от загрязнений и имеющие огромное экологическое значение.

Там, где естественные процессы самоочищения грунтов не могут обеспечить удаление загрязнителей приходится использовать искусственные методы очистки. С каждым годом разрабатывается все больше и больше методов управления искусственной очисткой грунтов, основанных на разных принципах, механизмах воздействия и т.д. (Королев В.А. и др., 1997; Caliman et al., 2011; Королев, 2001, 2019).

Группы методов управления очисткой также можно выделять и по их природе: физические ($МУ_{оф}$), физико-химические ($МУ_{офх}$), физико-механические ($МУ_{офм}$), химические ($МУ_{ох}$), биологические ($МУ_{об}$) и др. Классификация основных способов очистки грунтов в массивах от загрязнителей представлена в табл. 6.2.

В классификации выделяются типы методов очистки по природе оказываемого при этом воздействия: физического, физико-химического, химического или биологического. Внутри каждого типа методов могут выделяться различные методы, отличающиеся друг от друга по механизму (природе) того или иного оказываемого воздействия. На практике для очистки грунтового массива от загрязнений редко используется какой-либо один метод, чаще всего для

этого применяется комплекс методов ($МУ_{ок}$), выстроенных в определенной последовательности по времени применения в зависимости от особенностей загрязнителя.

Таблица 6.2

Классификация методов управления очисткой массивов грунтов от загрязнений

Методы очистки		**Принцип воздействия на загрязнитель**		
Тип метода	Механизм управления	Локализация загрязнителя ($МУ_{лз}$)	Деструкция загрязнителя ($МУ_{дз}$)	Удаление загрязнителя ($МУ_{уз}$)
1	2	3	4	5
Физический ($МУ_{оф}$)	Механический	Механические экраны	Механическое разрушение	Механическое удаление
	Гидродинамический	Инъекционные экраны		Промывка Фильтрование
	Аэродинамический		Газовая нейтрализация	Вакуумирование Продувка Экстракция
	Термический	Термоэкраны (витрификация) Термолокализация	Термодеструкция (нагреванием, обжигом, плавлением) Термодезинфекция	Термоосмос
	Электрический		Электролиз Электродеструкция	Элекрохимическое удаление: Электроосмос Электрофорез Электромиграция Электродиализ
	Электромагнитный	СВЧ-экраны	Ультрафиолетовая деструкция	Магнитная сепарация
	Испарение			Удаление летучих
Физико-химический ($МУ_{офх}$)	Растворение, диффузия			Разбавление Выщелачивание, диффузиофорез
	Ионный обмен	Ионообменные экраны	Ионообменная детоксикация	

	Сорбция	Сорбцирионные экраны	Сорбционная детоксикация	
Химический ($МУ_{ох}$)	Гидролиз		Гидролитическое разложение	
	Фотолиз		Фоторазложение	
	Нейтрализация	Химическая иммобилизация	Нейтрализация кислот или оснований	Реагентное выщелачивание
	Окисление		Окисление Дезинфекция	То же
Биологический ($МУ_{об}$)	Биопоглощение		Биодетоксикация Биосорбция	Фитопоглощение Микробиопоглощение
	Биодеградация		Микробиодеструкция (активизация биодеструкции или внесение культур)	Биовыщелачивание Электробиоочистка

В приведенной классификации учтены лишь наиболее важные с нашей точки зрения методы очистки, которые могут быть реализованы непосредственно в грунтовых массивах. Здесь не учитываются методы утилизации загрязнителей, осуществляемые с помощью всевозможных химико-технологических установок по переработке отходов или очистке шлама, загрязненной породы и т.п., которые разрабатываются в области инженерной экологии. Также здесь не учитываются методы очистки о обработки воды, которые также составляют самостоятельный раздел исследований по очистке и восстановлению окружающей среды (Королев, 2019а).

В соответствии с этой классификацией концептуальная схема автоматизированного управления загрязненным грунтовым массивом с целью его очистки от химических загрязнений комплексом методов ($МУ_{ок}$) показана на рис. 6.4.

В этом случае стоит задача управления химическим составом грунтового массива, являющегося объектом управления (ОУ) и испытывающего внешнее химическое воздействие f_x, с помощью комплекса методов очистки ($МУ_{ок}$). Для этого (см. рис. 6.4) управляющий орган ($УО$) или оператор, с помощью сигналов I_1, I_2 и I_3, посылаемых последовательно во времени на управляющие устройства сначала для физических методов очистки ($УУ_{оф}$), затем химических ($УУ_{ох}$) и на последней стадии – биологических методов очистки ($УУ_{об}$)

оказывает на грунт последовательно сначала воздействие физической природы ($u_{оф}$), затем химической ($u_{ох}$) и, наконец, биологической ($u_{об}$).

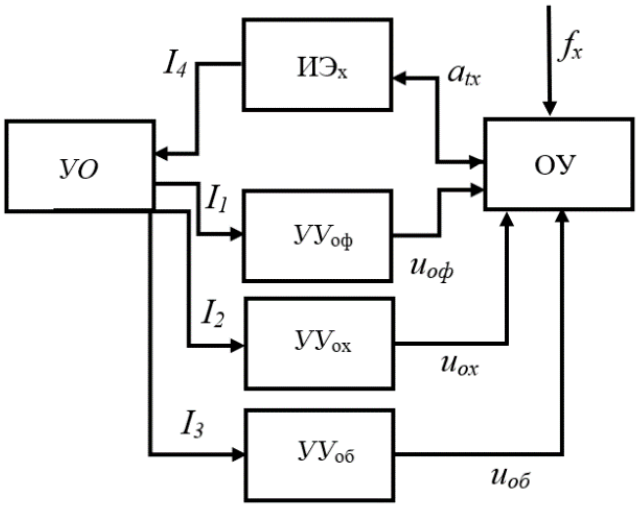


Рис. 6.4. Концептуальная схема управления грунтовым массивом для его очистки от химических загрязнений комплексом методов ($МУ_{ок}$**)** (объяснения в тексте)

Контроль за процессом очистки грунта от загрязнений осуществляется с помощью измерительного элемента (ИЭх), отслеживающего динамику содержания загрязнителя в грунте с помощью тех или иных показателей (a_{tx}) на каждой стадии очистки. Причем следующая стадия очистки начинается только тогда, когда действующая стадия очистки достигла своих максимальных возможностей для данного метода.

Эта информация по каналу обратной связи (I_4) поступает к оператору (УО) и позволяет ему регулировать конкретные характеристики процесса очистки в автоматическом режиме. При этом в автоматическом режиме система начинает работать лишь тогда, когда внешнее химическое воздействие f_x приводит к такому загрязнению грунта, при котором оно достигает пороговых (критических) значений, например ПДК, т.е. когда выполняется условие:

$$a_{tx} \geq \text{ПДК}, \qquad (6.3)$$

где ПДК – предельно допустимая концентрация данного загрязнителя в грунте; a_{tx} - текущая величина загрязнения на момент времени *t*.

В общем случае загрязнители из грунтов можно или удалять (извлекать), или разрушать их на месте (деструкция в массиве без извлечения загрязнителей), или локализовать (иммобилизовать) в массиве (Королев, 2001, 2019). Эти *три принципа* воздействия на загрязнители, различные по своему характеру, также отражены в представленной классификации (табл. 6.2).

6.2.1. Методы удаления загрязнений. Среди этих методов для удаления загрязнений из литотопа ЭГС применяют: механические, гидродинамические, вакуумные, термические, физико-химические и др. методы. Все они детально были охарактеризованы нами ранее (Королев, 2001; 2019а), поэтому ниже они рассматриваются кратко как те или иные методы управления очисткой.

За рубежом опубликовано много работ по удалению из грунтов тех или иных конкретных загрязнений. В частности, технологии очистки грунтов от тяжелых металлов описаны в ряде работ (Gavrilescu M., 2004; Pavel V.L. et al., 2010; Caliman et al., 2011), электрокинетические методы очистки грунтов от радионуклидов, органических токсикантов также изложены во многих работах (Alshwabkeh, 2009) и т.п.

Гидродинамическое удаление загрязнений. Гидродинамическое удаление загрязнителей осуществляется путем ***промывки*** водой грунтового массива, растворения и фильтрации воды. Промывка массивов от загрязнителей в общем случае представляет собой один из вариантов выщелачивания или экстракции, в котором выщелачивающей жидкостью является вода. Промывка осуществляется в двух вариантах: при *диффузионной промывке* происходит переход отмываемого загрязнителя из порового раствора грунта в промывную воду под влиянием разности концентраций при контактировании грунта с промывной жидкостью; при *фильтрационной промывке* (методом вытеснения) происходит переход загрязнителя в промывную жидкость частично за счет его вытеснения из порового раствора, замещения промывной жидкостью и растворения.

Методы гидродинамического ***растворения*** токсичных загрязнений основаны на способности некоторых экологически опасных соединений образовывать с водой идеальные или неидеальные растворы. В целях очистки промышленно загрязнённых почв и грунтов от растворимых солей токсичных соединений используют поверхностное и подземное затопление водой и выщелачивающими растворами (см. также гл. 8). С помощью растворения загрязнений

водой удается очистить почвы от тяжелых металлов (хрома, кадмия, серебра, меди), радионуклидов (америция и плутония), летучих и растворимых углеводородов, галогенидов, пестицидов, гербицидов и цианогидрида ацетона (Блямкман Л.М. и др., 1992; Ecological impact…, 2011).

Несмотря на большой класс удаляемых загрязнений данный метод мало эффективен и может вызвать загрязнение более глубоких почвенных горизонтов и подземных вод. Поэтому применение этого метода в экологических целях возможно только в комплексе с другими химическими и гидродинамическими методами. Метод не применим для изотропных по проницаемости почв и грунтов.

Поверхностная промывка – метод удаления поверхностных загрязнений в почвах и иных грунтах (Королев, 2019). Этот способ применяют для удаления солей из корнеобитаемых горизонтов тяжелых почв с низкой водопроницаемостью, высокой влагоемкостью, высоким содержанием солей в поверхностном слое и низким содержанием в нижних горизонтах. При этом, удаление солей из верхних горизонтов происходит путем декантации, т.е. путем систематического растворения солей в промывных водах и их сброса. Повторная декантация новыми порциями воды осуществляется за один прием 2–3 раза (т.е. вода стоит некоторое время, происходит растворение солей, затем вода с растворившимися солями удаляется с поля, и так 2–3 раза) (Мелиорация засоленных…, 2018).

Рассоляющий дренаж используют в двух вариантах: вертикальном и горизонтальном. Горизонтальный дренаж может иметь разную глубину (до 3 м, иногда более). Наиболее целесообразен систематический (т.е. равномерно распределенный на территории массива) горизонтальный трубчатый дренаж с уклоном дна не менее 0,001 и нормальным сбросом дренажных вод в водоприемник.

В комплекс сооружений для организации стока и отвода воды входят: 1) ложбины и воронки стока, 2) водоемы-копани; 3) планировка поверхности; 4) глубокое рыхление почв; 5) колодцы-поглотители и др.

В легко размываемых (например, лессовых) грунтах вертикальные дренажные скважины могут создаваться с помощью размыва. Дренаж используется и при очистке массивов от поверхностного нефтяного загрязнения. Для этого создается сеть дренажных канав, где собираются нефтепродукты и вода, в дальнейшем нефтепродукты тем или иным образом из канав извлекаются и утилизируются (Лебель, 1996).

Одним из вариантов промывки массивов и загрязненных водонасыщенных пластов пород является схема *замкнутого цикла*.В этом случае используется система из нескольких нагнетательных и

эксплуатационных скважин. Через нагнетательные скважины подается промывочная вода, поступающая в очищаемый горизонт массива, а через эксплуатационные скважины проводится откачка воды вместе с растворенным в ней загрязнителем. Откачиваемая «грязная" вода на поверхности подвергается очистке от загрязнителя, проходя через систему водоочистки и попадая в резервуар. Из резервуара вода вновь насосами подается в нагнетательные скважины и т.д. Система водоочистки зависит от состава загрязнителя и состоит из различных сепараторов, очистных блоков и фильтров, с помощью которых от воды отделяется загрязнитель. Преимуществом подобной замкнутой схемы очистки массива является то, что загрязнитель частично концентрируется, выводится из геологической среды и может в дальнейшем быть подвергнут переработке или утилизации (Королев, 2019).

Фильтрование применяется чаще всего для очистки поверхностных вод, однако не редко создаются специальные фильтрующие стенки и в грунтовых массивах. Фильтрование может быть как просто механическим (через нейтральные фильтры) для очистки от взвешенных частиц, так и с использованием специфических фильтров, удерживающих растворенные и коллоидные вещества за счет физико-химических взаимодействий (Блянкман Л.М., и др. 1992).

Наиболее известным методом удаления загрязнения вместе с водой является ***откачка.*** Она может применяться самостоятельно и в сочетании с другими методами для всех типов загрязняющих веществ, содержащихся в подземных водах. Откачка проводится с помощью специально оборудованных скважин или иглофильтровых установок(Королев, 2019).

Существенным преимуществом откачки при удалении монолитного нефтяного загрязнения является возможность последующего использования извлеченных нефтепродуктов. В ряде институтов России (например, в Иркутском университете) разработаны стационарные, передвижные и самоходные установки, позволяющие откачивать нефть и нефтепродукты из техногенных залежей без существенного понижения грунтовых вод (Лузин В.Ф. и др., 1997). При очистке грунтов и подземных вод от мощного загрязнения нефтью и нефтепродуктами за счет откачки при благоприятных гидрогеологических условиях реально можно извлечь около 30% содержащего в массиве загрязнения (Kirshner M., Pressly N.C., Roth R., 1996).

Общим недостатком откачки является сильное нарушение обводненности массива, что изменяет гидродинамический режим

территории и свойства пород, слагающих массив, а также экономические затраты на оборудование сети скважин.

Вакуумное удаление загрязнений применяется довольно широко для извлечения из грунтов летучих газообразных токсикантов (например, из свалок ТБО), а также ликвидации поверхностных разливов нефти и иных жидких токсикантов (Королев, 2019). Для ликвидации поверхностных разливов нефти применяют вакуумные сборщики различных типов. Они представляют собой передвижные установки, снабженные устройством захвата нефти (поплавочного типа или иные), вакуумным насосом и цистерной для сбора нефти.

Для сбора нефти с водной поверхности используются скиммерные установки различной конструкции и мощности. Они бывают разной конструкции и производительности: от небольших ручных скиммеров до крупных стационарных или плавающих высокопроизводительных скиммеров используемых для ликвидации крупных аварий разливов нефти на водных акваториях – морских, речных или озёрных (водохранилищ).

На основе вакуумного удаления биогазов из свалок на полигонах ТБО организуются электрогенерирующие установки, работающие на извлекаемом биогазе (Королев, 2019). Вакуумирующие скважины имеют специальное устройство, обеспечивающее их герметичность. С помощью гибких шлангов скважины соединяются в одну магистраль и подкачаются к вакуумному насосу.

Аэродинамическое удаление загрязнений. Близкими по механизму действия к гидродинамическим методам очистки являются аэродинамические методы. При использовании этих методов загрязнение удаляется вместе с циркулирующим в массиве воздухом или газами. К аэродинамическим методам очистки массивов относятся различного рода продувки, а также вакуумная и паровакуумная ***экстракция***. Аэродинамические методы в основном используются для удаления из грунтов газообразных и жидких летучих экотоксикантов.

Самым простым из аэродинамических методов является ***продувка*** загрязненного массива воздухом через скважины с выносом загрязнителей на поверхность. Она применяется для веществ, находящихся в грунте в виде мелких твердых частиц, и проводится по аналогии с очисткой фильтрующих материалов (Блянкман Л.М., Пономарев В.Г., Смирнова Н.Л., 1992).

При вакуумировании через нагнетательную скважину под давлением подается воздух или газ, не реагирующий с загрязнителем. При этом вокруг скважины создается зона компрессии, из которой вытесняется загрязнитель. Радиус этой зоны зависит от давления

компрессии и проницаемости грунта. Из расположенной рядом вакуумной скважины поровый воздух откачивается вакуумным насосом, при этом вокруг скважины создается зона разряжения, из которой откачивается токсичный загрязнитель и затем попадает в газовый сепаратор и резервуар для хранения или дальнейшей утилизации. Ограничивает применение данного метода величина открытой пористости грунта.

Особым видом аэродинамического воздействия является продувка углекислым газом под высоким давление для очистки от органических веществ, в частности, от ароматических углеводородов (Mensinger M.C. et al., 1995). Процесс очистки включает в себя экстракцию ароматических углеводородов суперкритическим углекислым газом и их последующее влажностно-воздушное окисление. Используется углекислый газ под давлением 48 - 137 атмосфер. Для различных фракций углеводородов достигается эффект очистки от 75% до 99% (Mensinger M.C. et al., 1995).

Химические методы удаления загрязнений. Среди химических методов очистки грунтов широко применяются различные методы удаления загрязнителей с помощью химических реакций, осуществляемых в массиве, методы химической деструкции токсичных загрязнителей с помощью всевозможных химических реагентов, а также химическая локализация загрязнителей, как с помощью химичечских реагентов, так и с помощью создания защитных экранов (например, химическими инъекционными растворами) (Tarr, 2003; Королев, 2019). Оно основано на химических реакциях, протекающих в очищаемом массиве грунта одновременно с выщелачиванием загрязнителя и интенсифицирующих этот процесс. Это так называемое *реагентное выщелачивание*. При этом химические реакции могут осуществляться одновременно с растворением загрязнителя.

Усовершенствованные процессы окисления грунтов, загрязненных стойкой органикой, представляют собой многообещающую технологию для обработки сред, содержащих стойкие органические загрязнители, такие как красители, фармацевтические препараты и средства личной гигиены, и особенно химические вещества, разрушающие эндокринную систему человека (Esplugas et al., 2007; Bautista et al., 2007; Peternel et al., 2007; Caliman and Gavrilescu 2009; Caliman et al., 2011).

Методы бактериального выщелачивания загрязнений. На избирательной способности бактерий извлекать из многокомпонентных грунтов определенные химические элементы и загрязнители основаны способы очистки грунтов методом *бактериального выщелачивания*. При бактериальном выщелачивании элементы извлекаются

посредством их растворения микроорганизмами в водной среде. На его основе можно проводить и очистку грунтов от различных загрязняющих компонентов, в том числе тяжелых металлов.

Методы электробиоочистки грунтов. Суть этой технологии состоит в том, что одновременно с электрохимическим выщелачиванием токсикантов из массива этот процесс интенсифицируется действием микроорганизмов, способствующих деструкции загрязнителей. При этом питательные вещества для микроорганизмов подаются в грунт с анолитом, который выполняет двоякую роль: как выщелачивающий раствор и как питательный раствор. Кроме того, за счет действия тока и разогрева при этом межэлектродного пространства в грунтовом массиве создается благоприятная температурная среда для активного развития микроорганизмов (Королев, 2019а).

Физико-химическое удаление загрязнений. Физико-химические методы удаления загрязнений основаны на таких явлениях массообмена как экстрагирование (выщелачивание) из твердой или жидкой фазы, диффузия, диффузиофорез и др. (Королев, 2019).

Выщелачивание загрязнений. Выщелачивание или экстрагирование загрязнителей представляет собой извлечение одного или нескольких загрязняющих компонентов из грунтов с помощью соответствующих избирательных растворителей (экстрагентов) и технологий. Оно подчиняется законам массообмена. Движущей силой этого процесса является разность между концентрациями загрязнителя, растворяемого в порах грунта, и в основной массе экстрагента. Механизм экстракции загрязнителя в общем случае включает следующие стадии физико-химических процессов: 1) проникновение экстрагента в поры, пустоты и микротрещины грунта; 2) растворение загрязнителя; 3) перенос загрязнителя под действием молекулярной диффузии из глубины твердых минеральных частиц к поверхности раздела фаз "грунт-экстрагент"; 4) перенос загрязнителя под действием конвективной диффузии от поверхности раздела фаз в объем экстрагента. Для грунтов, обладающих существенной емкостью обмена, к этим стадиям добавляется процесс ионного обмена.

Центральным вопросом при очистке грунтов от загрязнителей выщелачиванием является выбор экстрагента. Экстрагент должен отвечать определенным требованиям экологического, экономического и технологического характера. Он должен быть нетоксичным, безвредным для экосистем, не оказывать негативных экологических последствий. Стоимость экстрагента во многом определяет экономические затраты на очистку данного массива в целом.

Экстрагент должен легко регенерироваться после извлечения из него (отделения) загрязнителя.

Жидкостная экстракция загрязнений. Экстрагированием можно удалять из грунтов как твердые (растворимые) загрязнители, так и жидкие (Королев, 2019). В последнем случае процесс называется жидкостной экстракцией. Жидкостная экстракция широко используется в процессах обогащения и химических технологиях. При жидкостной экстракции происходит извлечение и разделение загрязняющих компонентов порового раствора грунтов путем их перевода из одной жидкой фазы (x) в другую (y), содержащую экстрагент. Количественной характеристикой этого процесса является *коэффициент распределения* α, равный отношению равновесных концентраций загрязнителя в фазах y и x. Если $\alpha \neq \text{const}$, распределение характеризуется так называемой изотермой экстракции $y = f(x)$. Фаза, в которую после жидкостной экстракции переходит экстрагируемый загрязнитель, называется экстрактом, а фазу, очищаемую от загрязнителя, - рафинатом. При жидкостной экстракции загрязнителей в грунтах часто экстракт может быть представлен органическим раствором (раствором неэлектролита), а рафинат - водным поровым раствором.

6.2.2. Методы деструкции (детоксикации) загрязнений. Деструкция токсичных загрязнений в массиве грунта (in situ) без их удаления является экономичным способом борьбы с загрязнениями. Она проводится различными методами: химическими, термическими, аэродинамическими и др. (Caliman et al., 2011; Королев, 2019а).

***Химическая деструкция загрязнений*.** В основе химической деструкции загрязнителей лежат химические реакции между токсичными загрязнителями и вводимыми в грунт реагентами, вступающими с ними в химическое взаимодействие. В результате этого загрязнители переходят в нетоксичные соединения или формы, либо теряют свою структуру и разрушаются. При этом важно, чтобы химические реакции, осуществляемые в грунте, были бы полными, необратимыми и исключали бы возможность при изменении физико-химических условий среды возникновения вновь токсичных компонентов.

Центральными вопросами при химической деструкции загрязнителей является подбор соответствующего химического реагента-деструктора и осуществление необходимой реакции непосредственно в грунтовом массиве. При этом химический реагент-деструктор должен обладать рядом признаков, обеспечивающих надежность разрушения загрязнителя, быть не токсичным и

относительно дешевым. Реагент-деструктор должен активно проникать в грунт, поэтому для осуществления требуемой химической реакции в массиве наиболее предпочтительно использовать жидкие или газообразные реагенты.

Среди химических методов деструкции важная роль отводится ***гидролизу загрязнителей***. В естественных условиях гидролиз является важной составной частью в механизмах самоочищения почв и грунтов. Гидролиз или гидролитическое расщепление, гидролитическая деструкция представляет собой обменную реакцию между водой и загрязнителем.

Методы химического осаждения основаны на ионных реакциях протекающих с образованием малорастворимых веществ, выпадающих в осадок в виде цемента в порах грунта. Реагент подбирается таким образом, чтобы он и продукты его реакции с загрязнителем были бы экологически безопасны. Методы осаждения особенно эффективны для загрязнений, содержащих тяжелые металлы и радионуклиды, чья растворимость и сорбционные характеристики непосредственно зависят от концентрации связующих лиганд или от окислительно-восстановительных условий и pH. Введение химических реагентов для обработки почв и грунтов, содержащих загрязнение в жидкой фазе, позволяет прочно связывать их остаточные концентрации с вмещающей породой.

Процесс ***химического окисления*** загрязнений в почвах, грунтах, подземных и поверхностных водах основывается на отдаче электронов с внешнего не устойчивого слоя электронной оболочки атомов веществ и элементов, что приводит к переходу загрязняющего вещества в менее токсичную и реакционноспособную форму. К отдаче электронов склонны атомы элементов, у которых во внешнем электронном слое содержится малое число электронов. Процесс является составной частью окислительно-восстановительного взаимодействия загрязняющего вещества и химреагента или реакционноспособной поверхности грунта.

В последнее время активно разрабатываются ***нанотехнологии*** для очистки грунтов и подземных вод от загрязнений. Наночастицы некоторых окислителей, восстановителей и питательных веществ могут способствовать трансформации загрязняющих веществ в нетоксичные формы, а также стимулировать рост полезных микробов благодаря их небольшому размеру и большой площади поверхности. Некоторые недавние исследования показали, что наноразмерные частицы нульвалентного железа (nZVI) оказываются эффективными в преобразовании большого разнообразия загрязнителей окружающей

среды, при том, что они недороги и нетоксичны (Zhang 2003). Это частицы оксида FeO/Fe размером 5–40 нм, которые быстро превращают многие загрязняющие вещества в окружающей среде в неагрессивные продукты. Так, например, Р.Тратник и Р.Джонсон (Tratnyek, Johnson, 2006) показали значительный потенциал и реальные преимущества использования наночастиц, содержащих железо с нулевой валентностью (nZVI), в качестве новой технологии для восстановления загрязненных грунтов и грунтовых вод. Эти технологии применяются для деструкции таких токсикантов как: хлорированные углеводороды (четыреххлористый углерод, хлороформ, дихлорметан, ди-, три-, тетра-, пента-, гексахлорбензолы, линдан, винилхлорид и полихлорированные бифенилы (ПХБ); металлы (ртуть, никель, серебро и кадмий); пестициды (ДДТ и ГХГ); красители (оранжевый II, хризоидин, тропеолин, кислотный апельсин и кислотный красный), токсичные соли (дихроматы, перхлораты и нитраты), а также нитроароматические соединения.

Для химического разрушения полициклических и ароматических углеводородов (ПАУ) в подземных и поверхностных водах также используют газообразный озон - метод ***озонирования*** (Caliman et al., 2011). Озон образуется из обычного кислорода под действием тлеющего электрического разряда или ультрафиолетового излучения. В результате окисления углеводородов образуются промежуточные продукты реакции (органические кислоты) также обладающие токсичностью и поэтому требующие дальнейшей обработки.

Для ***химического обеззараживания грунтов,*** включая почвы, в которых содержатся патогенные микробы и бактерии, могут использоваться различные химические бактерицидные вещества - пестициды (фунгициды, амебоциды и др.) и антисептические средства. Бактерицидным свойством обладают различные по своей химической природе соединения: фенол, сулема, спирт, формалин, перекись водорода и др., из газов - сернистый газ, окись этилена, бромистый этил и др. Однако, следует иметь ввиду, что сами перечисленные бактерицидные вещества могут являться загрязнителями почв и грунтов. Среди распространенных химических средств дезинфекции почв используются такие биоцидные вещества как *хлорпикрин, метилбромид, дазомед, варпан, тропекс, хлорбензол* и *линдан*. Большинство этих веществ сами по себе являются опасными и токсичными для человека, в связи с чем их применение может быть только в исключительных случаях.

Термическая деструкция загрязнений. Термические методы разрушения (деструкции) загрязнителей часто используются в

грунтовых массивах. Очистка достигается в разных случаях как за счет нагревания, так и за счет охлаждения массивов. Нагревание используется во всех тех случаях, когда экотоксикант является термически нестойким соединением. При температурном воздействии на загрязнитель он может разлагаться на нетоксичные соединения или разрушаться. Особую роль термические методы, включая сжигание и пиролиз, имеют при конечном уничтожении или разложении отходов-экотоксикантов.

Для осуществления термической деструкции загрязнителей необходимо иметь информацию об их термической устойчивости. В определенной мере показателями термостойкости веществ-загрязнителей могут служить их температуры плавления, кипения, испарения и др. (табл. 6.3).

Газовая нейтрализация загрязнений. Если по каким-либо причинам токсичный загрязнитель невозможно откачать из грунта, то в этом случае его можно нейтрализовать с помощью закачиваемого газа.

Схема и технология таких работ аналогична газовой силикатизации грунтов, применяемой для закрепления лёссов. Через нагнетательные скважины в массив компрессорами под давлением закачивается газ, реагирующий с загрязнителем. Газ подбирается таким образом, чтобы нейтрализовать или разрушить загрязнитель.

Таблица 6.3

Критические температуры некоторых органических загрязнителей при нормальном давлении

Вещество-загрязнитель	Формула	Температура кипения, °С	Температура плавления,°С
Четыреххлористый углерод	CCl_4	76,7	-22,6
Метиловый спирт	CH_4O	64,7	-97,8
Ацетон	C_3H_6O	56,5	-94,6
1,4-Диоксан	$C_4H_8O_2$	101,1	10
Хлорбензол	C_6H_5Cl	132,2	-45,2
Нитробензол	$C_6H_5NO_2$	210,6	5,7
Бензол	C_6H_6	80,1	5,5
Фенол	C_6H_6O	181,9	40,6
Анилин	C_6H_7N	184,4	-6,2

Физико-химическая деструкция загрязнений. Физико-химическая деструкция загрязнителей осуществляется за счет процессов их сорбции и ионного обмена в грунтах, а также последующих физико-химических превращений, приводящих к разрушению вредных компонентов или их детоксикации.

Так, например, тяжелые металлы активно аккумулируются *гумусовым веществом* почв (в основном гуминовыми кислотами), вследствие чего происходит их детоксикация. В основе этого явления лежат сорбционные процессы (см. ниже). По снижению интенсивности аккумуляции металлы располагаются в следующий ряд - Cu, Cd, Pb, Co, Ni, Zn, Mn. Имеющиеся в литературе данные по детоксицирующему действию гуминовых веществ на различные экотоксиканты довольно противоречивы. Установлено, что действие гуминовых веществ на Cu, Pb, Cr(III) приводит к образованию хелатных соединений и снижению токсичности этих тяжелых металлов, тогда как их действие на Cd разнонаправленно. Гуминовые кислоты не влияют на нафталин, но снижают токсичность полиароматических углеводородов (ПАУ) и полихлоридных бифенилов (ПХБ). С другой стороны их влияние на токсичные низкомолекулярные органические соединения (пестициды, ароматические амины, хлорфенолы и др.) также разнонаправленно. Наибольшим детоксицирующим действием обладают гуминовые кислоты, обогащенные ароматическими молекулярными структурами (Перминова, 1997; Caliman et al., 2011).

Методы биодеградации загрязнений. Методы микробиодеградации загрязнителей основаны на деструкции токсичных загрязняющих компонентов различными видами микроорганизмов. Эффект достигается либо за счет активизации аборигенной микрофлоры, либо - за счет внесения в грунт определенных культур микроорганизмов, а также всевозможных комплексных препаратов и методов.

Методы очистки грунтов активизацией микрофлоры. Эти методы основаны на активизации уже существующей (аборигенной) в почве или ином грунте микрофлоры. В результате этой активизации микроорганизмы начинают активно поглощать загрязнитель и вызывать его деструкцию. Методы активизации аборигенной микрофлоры направлены на создание оптимальной среды для развития определенных групп микроорганизмов, разлагающих загрязнитель. Эти методы могут быть использованы везде, где естественный микробиоценоз сохранил жизнеспособность и достаточное видовое разнообразие. Очистка за счет активизации микрофлоры является медленным, но очень эффективным процессом.

Простейшими способами активизации микрофлоры являются механические. Рыхление, частые вспашки, дискование, распашка загрязненных нефтью земель являются благоприятным фактором, стимулирующим процессы биодеградации нефти в почве, при этом также улетучиваются легкие фракции нефти. Существует также метод

смешивания загрязненной почвы с чистой, после чего там не только активизируется микрофлора, но и сама почва становится пригодной для выращивания растений, которые впоследствии используются в качестве субстрата, в свою очередь ускоряя биодеградацию (Киреева Н.А., 1994).

Часто активизация биодеградации осуществляется за счет поддержания оптимальной температуры. Так загрязненную почву зимой для увеличения температуры покрывают черной полиэтиленовой пленкой, летом такую же пленку, только прозрачную, используют для снижения испарения с поверхности (Киреева Н.А.,1994).

В последние годы появились методы электрокинетической активизации биодеградации. За счет электрического тока обеспечивается миграция микроорганизмов, имеющих собственный заряд по загрязненной зоне, что гарантирует более быструю и равномерную очистку грунта (Marks R.E. et al., 1995; Caliman et al., 2011).

Механизм активизации биодеградации с помощью ультразвука состоит в разбивке крупных почвенных агрегатов, которые особенно часто образуются при нефтяном загрязнении, что, в свою очередь, увеличивает доступность загрязнителя для микроорганизмов (Киреева Н.А.,1994).

Часто методы продувки воздухом сочетаются с введением питательных веществ. Для удаления из массивов летучих углеводородов через горизонтальные скважины вместе с воздухом подается газообразная питательная смесь. Другим вариантом этого метода является разбрызгивание микрочастиц питательного раствора (Billings J.F. et al., 1995). Активизация углеводородокисляющих микроорганизмов за счет закачки в грунты химически активных пен имеет высокую эффективность за счет своего комплексного воздействия: улучшения условий дыхания, оптимизации баланса питательных веществ, а также увеличения подвижности и доступности неводорастворимых органических загрязнений (Peters R.W., Enzien M.V., 1994; Caliman et al., 2011).

Идеальными pH для биодеструкции являются нейтральные. В кислых почвах для нейтрализации широко применяют известь. В нефтезагрязненных почвах известь дополнительно нейтрализует продукты разложения нефти и снижает подвижность токсичных веществ, ускоряет разложение метаново-нафтеновых структур. Наиболее эффективно для ускорения биодеградации нефти в почве внесение смеси извести и карбонатной сажи (туфа). Для нейтрализации щелочных почв используют гипс (Киреева Н.А., 1994). Методы нейтрализации для активизации биодеградации применяются и в

поверхностных водах, в частности для очистки от фосфора (Ревель,1995; Koehler et al., 2005).

При поверхностном нефтяном загрязнении можно использовать препарат “Фаерзайн”, содержащий ферменты, активизирующие микрофлору. Мощность слоя обработки без выемки грунта 30-40 см, срок очистки около 4 недель. Препарат вносится с помощью брандспойта из машины, желательна также обработка грунта рыхлением. Используют “Файерзайн” и для очистки вод и донных осадков (Девлин Т., Черданцев А., 1995).

Методы очистки грунтов внесением культур микрофлоры. Методы внесения культур микроорганизмов применяются в тех случаях, когда необходимая аборигенная микрофлора отсутствует. Они могут применяться при массированном и аварийном загрязнении, в сложных условиях, при отсутствии развитого естественного биоценоза. Достоинством этих методов является их селективность и возможность выведения штаммов микроорганизмов, разрушающих сложные токсичные соединения. Однако их эффективность не всегда бывает одинаково высока, поскольку многие культуры “работают” лишь в относительно узком диапазоне условий. Кроме того, иногда происходит вырождение микроорганизмов до достижения необходимого уровня очистки. Также необходимо учитывать, что их применение может нарушать естественные биоценозы, поскольку при этом происходит смена состава популяций ведущих сообществ микроорганизмов.

Обычно для очистки почв и грунтов используют бактерии (*Bacterium, Actinomyces, Artrobacter, Thiobacterium, Desulfotomaculum, Pseudomonas, Hydromonas, Bacillus* и др.), а также низшие формы грибов. Часто применяют комплексные биопрепараты, которые содержат не только целый набор культур, но и питательные вещества. В последнее время именно эта область - разработка искусственных биопрепаратов-деструкторов получила во всем мире широкое распространение (Caliman et al., 2011).

Различные виды дрожжей *Candida* разлагают ароматические соединения с концентрацией 1% за 180-200 дней. *Candida sp*. способна также утилизировать керосин и газ (Киреева Н.А., 1994). *Candida lipolytica*, введенная в дозе 10^8 кл/г почвы, активно разлагает сырую нефть (Куличевская И.С. и др., 1995).

Нефтезагрязненные почвы обрабатывают *Acinetobacter sp., Alcalgenes sp., Pseudomonas sp*., одновременно вносят растворы фосфорных и аммонийных солей. Нефть на поверхности почвы уничтожают *Actinomycor elegans* и *Geotrichum marinum* (Киреева Н.А., 1994). Использование *Actinebacter sp*. дает 80% эффект очистки от

ароматических соединений по истечение пяти недель (Joshi M.M., Lee S., 1996). Для деструкции нефти выделены штаммы галотолерантных и галофильных архебактерий. В условиях высоких температур может быть использована *Bacillus thermoleovorans*. Бактерия рода *Desulfobacterium* осуществляет деградацию салицилата в условиях сульфатредукции (Беляев С.С. и др., 1994). *Streptomyces albiaxialis sp.* разлагает углеводороды нефти при содержании соли до 30%, эффективность при оптимальной температуре 28-30^{0}С достигает 50% (Кузнецов В.Д. и др., 1992). Деградацию ароматических углеводородов осуществляют некоторые виды *Mycobacterium* (Schneider J. et al., 1996), а также *Pseudomonas alcaligenes*, который разлагает и галоуглеводороды (Imamura T., Yano T., 1995).

Для очистки вод от хлорфенолов используют штамм *Rhodococcus erytropolis* (Головлева Л.А., 1994), биоочистка почв от пентахлорфенола в концентрации 100 мг/кг почвы, а также от его смеси с дихлорфенолом в концентрации 200 мг/кг почвы использовался штамм *S. rochei* в дозе 10^5 кл/г почвы (Заборина О.Е., Головлева Л.А., 1994). Фенолы в воде и почвах разлагаются также *Pseudomonas aureofaciens, P. fluorescens, Pseudomonas sp.* с эффективностью около 70% (Головлева Л.А. и др., 1995), различными штаммами *Bacillus, Flavobacterium, Artrobacterium* (Ягафарова Г.Г., 1994). У бактерии *Pseudomonas aeruginosa* 142 установлены пути катаболизма дихлорбензоатов (Слепенькин А.В. и др., 1994). Для биодеградации формальдегида и дихлорметана используют бактерии *Metilobacterium, Hyphomicrobium, Metilophiens* (Доронина Н.В. и др., 1994). Деструкторами метанола являются *Methilophilus methanica, Methylomonas sp., Metilomonas sp.* С1012, *Methilophilus metanolovorus nov. gen, Metilobacillus flagelatum nov. sp.*, они работают при концентрациях до 5000-10000 мг/л, в нейтральной среде, оптимум температуры 30-400С.

Деструкцию этиленгликоля осуществляют *Azotobacter picolinophilus, Artrobacter paraffineus, Artrobacter terregens, Pseudomonas aeruginosa, Pseudomonas putida, Bacillus subtilis* разрушает диэтиламин (Цинберг М.Б. и др., 1992).

Для очистки почв и вод от пестицидов и гербицидов широко применяют грибки, а также бактерии, и даже грибки с пересаженными бактериальными генами (Xu В.И др., 1996). Интродукция в почву, загрязненную гербицидами *Nocardioides simplex* 3Е в дозе 1-1,6·10 кл/г почвы, снижает содержание загрязнителя на 91-98% в течении трех недель (Финкельштейн З.И. и др. 1994).

Внесение микроорганизмов в почвы и грунты эффективно и при очистке их от тяжелых металлов (Briseid T., 1994), радионуклидов (Entry J.A. et al., 1994), сульфатов. Так показана возможность использования *Aspergillus sp*., *Penicullium sp.*, *Streptomyces sp., Bacillus sp*. для концентрирования стронция, цезия, плутония из ультраразбавленных растворов (Ховрычев М.П., и др., 1994). Для переработки сульфатсодержащих отвалов с получением серы используются *Thiobacillus thioper* и *Thiobacillus thiooxidans*. Окисление сульфидов осуществляют *Thiosphaera pantotropha*, *Thiosphaera denitrifians* (Сорокин Д.Ю., 1994).

Биодеградация нефтяных загрязнений применяется в комплексе с другими методами борьбы с углеводородными загрязнителями[1]. В сложных случаях наиболее эффективна очистка комплексными биопрепаратами (табл. 6.4). При нефтяном загрязнении они используются наиболее широко. Рабочие растворы биопрепаратов готовятся на месте на специальных станциях.

Таблица 6.4

Сводная таблица показателей биопрепаратов (РД 153-39.4-074-01)

Показатель	**Путидойл**	**Деворойл**	**Биоприн (олеворин)**
Исходный материал	Природный штамм «Псевдомонам пу тида»	Микроорганиз мы	Штамм «Олеоворум»
Вид	Порошок	Порошок	Порошок
Среда нефтеокисления	Вода, почва	Вода, почва	Вода, почва
Максимальное содержание нефти и нефтепродуктов в воде (г/л)	20	н/о	н/о
Срок хранения (мес.)	12	н/о	12
Удобрение	Нитроаммофос	Диаммофос	Диаммофос, аммофос
Рабочие температуры (оС)	+10–40	+10–40	+1–35
Продолжительность обработки (дни)	24	н/о	24
Разработчик	ЗапсибНИГНИ, Тюмень	НПП «Биотехинвест », Москва	ВНИИсинтезбелок, Санкт-Петербург

[1] См. также Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2002 г. № 240 "О порядке организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации" (с изменениями и дополнениями)

Методы биопоглощения загрязнений. Этот метод основан на способности различных организмов, прежде всего растений (фиторемедиация), а также микроорганизмов поглощать токсичные всевозможные компоненты из почв и грунтов и тем самым очищать их. После этого растения выкашиваются и перерабатываются с целью утилизации накопившихся в них загрязнителей. Недостатком метода биопоглощения является необходимость последующей утилизации загрязнителей.

Концентрирование элементов является одной из важнейших биохимических функций живого вещества на Земле, изучаемых в биогеохимии. При этом различаются два вида биоконцентрирования: I рода - по отношению к 14 биофильным элементам, встречающимся в теле всех без исключения живых организмов (H, C, K, O, Na, Mg, A1, Si, P, K, C1, K, Ca, Fe); II рода – избирательная (селективная) концентрация организмом определенных элементов или веществ. В методах биопоглощения загрязнений используется концентрирование II рода.

Методы биопоглощения (фиторемедиации, зооремедиации, микроборемедиации и др.) широко используются для борьбы с различными загрязнениями и засолением почв – биологической мелиорации солончаков. Она заключается в том, что на мелиорируемой территории дают возможность развиваться растениям-галофитам – видам, питающимся солями и склонными к засоленным почвам. Галофиты способны поглощать до 20–50% солей от веса собственной сухой массы. Наземная масса этих растений скашивается и удаляется с участка, а вместе с ней удаляются и те соли, которые растения извлекли из почвы.

В настоящее время выделяется несколько направлений фиторемедиации (Киреева и др., 2011; Caliman et al., 2011): 1) ***фитоэкстракция*** – поглощение, транслокация и аккумуляция загрязнителя в растении. Для рекультивации окружающей среды этим методом применяют растения гипераккумуляторы; 2) ***фитостабилизация*** – перевод веществ из растворимой формы в нерастворимую в корневой зоне растений; 3) ***фитодеградация*** – «внутреннее» разрушение поллютантов растениями при участии растительных ферментов; 4) ***фитоиспарение*** – экстракция поллютанта из грунта и выделение его в газообразной форме; 5) ***ризодеградация*** – разложение поллютантов микроорганизмами в прикорневой зоне растений. В процессе фиторемедиации направление ризодеградации является преимущественным при элиминации органических поллютантов из загрязнённой почвы. Принцип этого механизма состоит в том, что разложение загрязняющих веществ производится не самим

растением, а микроорганизмами, обитающими в непосредственной близости к его корням, т. е. в ризосфере.

Факторами, обеспечивающими трансформацию загрязнителей в почве, являются такие растительные ферменты, как *дегалогеназа, оксидоредуктаза, нитроредуктаза, пероксидаза, лакказа, нитрилаза, медьсодержащая фенолоксидаза*, которые могут функционировать за пределами растения и оказывать некоторое краткосрочное действие после его гибели.

Таким образом, методы биопоглощения загрязнителей весьма многочисленны и обладают специфическими преимуществами перед другими способами, в частности селективностью.

6.2.3. Методы локализации загрязнений. Локализация загрязнений в массиве позволяет препятствовать их дальнейшему распространению. Особенно важна локализация для регулирования потоков загрязнителей в подземных водах. Методы локализации основаны на так называемых «*барьерных технологиях*», позволяющих создавать защитные барьеры с различными свойствами на пути миграции загрязнений (Caliman et al., 2011; Королев, 2019а). Для создания таких барьеров применяют различные способы: химические инъекционные, механические, термические, физико-химические и др.

Для локализации очагов загрязнений, создания непроницаемых завес и **защитных барьеров** применяются различные технологии, разработанные в области технической мелиорации грунтов. Среди них выделяют экраны (барьеры): битумные, силикатные, смоляные, цементные, глиняные и др. Эти же экраны могут использоваться и для регулирования гидрогеологических условий на техногенно нарушенных территориях. Рассмотрим их особенности.

Битумные защитные экраны могут создаваться двумя способами: горячей и холодной битумизацией. Способ горячей битумизации состоит в нагнетании через пробуренные скважины расплавленного битума, который, остывая в порах и трещинах, создает в породе необходимую водонепроницаемость.

Поэтому более предпочтительна холодная битумизация, разработанная для придания водонепроницаемости песчаным грунтам. Метод основан на нагнетании в песчаный массив битумной эмульсии, содержащей диспергированные битумные частицы.

Силикатные защитные экраны создаются на базе методов силикатизации грунтов. Методы основаны на закачивании в грунт водных растворов жидкого стекла (силиката натрия), которые с помощью отвердителей переходят в гидрогели кремниевой кислоты,

заполняющие поры грунта и делающие его водонепроницаемым. Модификации способа силикатизации зависят от применяемого отвердителя.

Так, например, в двурастворном способе силикатизации, разработанном в 1931 г. Б.А.Ржаницыным, отвердителем служит раствор хлористого кальция, закачиваемый в грунт после жидкого стекла. В способе газовой силикатизации отвердителем служит углекислый газ и т.д. Для химически активных грунтов применяется однорастворный способ силикатизации. Рецептуры гелеобразующих растворов для создания силикатных защитных экранов подбираются с учетом химико-минерального состава грунта и состава загрязнителя.

Смоляные защитные экраны создаются с помощью методов смолизации грунтов. Методы основаны на использовании в качестве инъецируемых растворов жидких синтетических смол. Среди них наиболее часто используются мочевино-формальдегидные (карбамидные), фенольные, фурановые, акриловые, эпоксидные и др. Используемые смолы должны отвечать экологическим требованиям и быть относительно дешевыми.

Из перечисленных смол наиболее распространена карбамидная смола. Она легко растворяется в воде и поэтому ее раствор может закачиваться в грунты с малым коэффициентом проницаемости. Закачиваемый гелеобразующий раствор состоит из смеси раствора смолы и отвердителя в виде соляной или щавелевой кислоты.

Цементные и глиняные защитные экраны. Поскольку *цементация* не позволяет полностью снизить фильтрационную проницаемость грунтов, то ее применение для создания защитных экранов ограничено. Кроме того, цементация проводится для грунтов, коэффициент фильтрации которых находится в интервале не более 50-2000 м/сут, поскольку при больших скоростях движения подземных вод цемент вымывается из пор до его затвердения.

Глинизация грунтов, как и цементация, ограниченно используется для создания защитных экранов и иммобилизации загрязнителей, поскольку не позволяет полностью исключить фильтрацию. Тем не менее, глинизация является довольно дешевым способом и в ряде ситуаций ее применение вполне оправдано.

Химическая локализация загрязнений. Химическая локализация загрязнителей осуществляется путем создания химических защитных экранов, являющихся геохимическими барьерами для тех или иных загрязнителей. С помощью химических реакций токсичные вещества осаждаются в поровом пространстве и теряют свою мобильность.

Методы *управления окислительно-восстановительными условиями* в специально созданных подземных барьерах in situ используются для трансформации соединений тяжелых металлов (цинк, никель, свинец, соединения хрома, сурьмы, селена, кадмия, марганца) и радионуклидов (стронция, технеция и оксидов урана) в менее растворимые формы (гидроокислы), а также разрушения цианидов, растворенных форм нитратов, органических и хлорорганических соединений (тетрахлорид и другие хлорированные растворители).

Создаваемые с помощью химических реагентов барьеры и завесы являются зоной с заданным окислительно-восстановительным потенциалом. В качестве химических реагентов для осаждения тяжелых металлов используют известь (поташ), сульфат натрия, оксиды и диоксиды железа, органический углерод и др. Эффективность очистки зависит от реакционной способности реагента и экотоксиканта. Размеры барьера в среднем до 18 м в диаметре и 30 м в глубину. Водный реагентный раствор закачивают в почву через скважины на 5-30 дней, затем загрязнённый раствор удаляют на поверхность. Преимущество метода в разрушении хлорированной органики и фиксации тяжелых металлов и радионуклидов in situ, в высокой по сравнению с откачкой на поверхность скоростью очистки, не требующей дальнейших затрат на разрушение и дезактивацию загрязнений и в достаточно низких капиталовложениях.

Химическая иммобилизация загрязнений. Для химической иммобилизации (связывания) загрязнений in situ используют различные органические и неорганические вяжущие типа извести, битума, смол, цемента, золы, Na- и K-силикатов, доменного шлака, смеси зола-известь и гелеобразующих веществ типа силиката натрия, бентонита и целлюлозы. Эти методы детоксикации геологической среды применяют в тех случаях, когда менее радикальные способы очистки не эффективны или экономически не оправданы.

Суть химической локализации загрязнителей состоит в создании защитных экранов. В этом случае создание защитных экранов с помощью методов химического инъекционного закрепления грунтов позволяет локализовать загрязненный массив, отделив его от экосферы относительно непроницаемым экраном, окружающим загрязненный грунт со всех сторон. Понятно, что этот метод также является временным, т.к. ликвидации или удаления загрязнителей из грунта при этом не происходит, они лишь как бы консервируются в массиве на определенное время. Период консервации зависит от диффузионной проницаемости создаваемого вокруг защитного экрана. С течением времени законсервированный загрязнитель также должен быть удален.

Однако временный характер локализации бывает иногда оправдан и необходим, особенно в чрезвычайных ситуациях, когда нужно в короткий срок (например, во время аварии) локализовать очаг загрязнения геологической среды, не допустить попадания токсичных веществ в подземные воды, водоемы и тем самым уменьшить масштабы техногенной катастрофы.

Термическая локализация загрязнений. Термическая локализация загрязнителей может осуществляться в различных вариантах. Суть их состоит в том, что вокруг очага загрязнения, который необходимо иммобилизовать, создается с помощью термического воздействия непроницаемый монолитный экран из оплавленных или обожженных грунтов, препятствующий рассеиванию загрязнителя.

Так, например, с помощью термического воздействия (нагревания или охлаждения) можно создавать непроницаемые для загрязнителей экраны. Такие экраны с использованием повышенных температур создаются путем ***обжига*** или ***плавления грунтов***, располагающихся вокруг очага загрязнения. При обжиге частицы грунта спекаются или частично оплавляются, что хорошо видно на электронно-микроскопическом снимке, полученном после термообработки лёссового грунта. Такой грунт становится водостойким, а его водопроницаемость резко падает.

Физико-химическая локализация загрязнений. Физико-химическая локализация загрязнителей осуществляется за счет процессов коагуляции, сорбции и ионного обмена. Эти явления могут осуществляться непосредственно в грунте или при создании искусственных сорбционных и ионообменных защитных экранов.

Коагуляционные методы особенно широко применяются для очистки сточных вод и в меньшей степени применимы в грунтах. Для коллоидных частиц природных вод характерен отрицательный дзета-потенциал (около 70 мВ). Поэтому для их коагуляции применяются коагулянты, продукты гидролиза которых имеют положительный заряд. При pH = 5,5-7,5 обычно применяют $Al_2(SO_4)_3$ в дозе подобранной экспериментально, составляющей для большинства поверхностных вод стран СНГ 0,5 - 1,2 мг-экв/кг. При pH= 10-10,5 используют $FeSO_4$, $Fe_2(SO_4)_3$, $FeCl_3$, доза для $FeSO_4$ - 0,1-0,5 мг-экв/кг. Оптимальная температура для коагуляции 30-35^{0}C. Для ускорения коагуляции широко применяются *флокулянты*. Флокулянт сорбирует на себя предварительно скоагулировавшие частицы и при этом образуются быстро опадающие крупные хлопья. В качестве флокулянта может

использоваться 0,1% раствор полиакриламида (Большакова И.С., Субботина Н.П., 1994).

Для *электрокоагуляции* используют алюминиевые и железные электроды-аноды (см. выше). Преимущества метода состоят в том, что он не требует применения реагентов, не увеличивает солесодержание воды, используется простое оборудование. Определенные трудности при применении могут вызвать значительные затраты электроэнергии и растворение электродов (Кузубова Л.И., Морозов С.В., 1992).

Ионо-обменные методы позволяют за счет замены ионов обменного комплекса грунтов на другие модифицировать грунт. При этом токсичные мобильные компоненты могут перейти в связанное состояние. Физико-химические методы, основанные на ионном обмене, широко используются в мелиорации засоленных почв путем гипсования, известкования и др.

Известкование также широко применяется для борьбы с засолением почв и основано на их обработке известью. При известковании солонцов реакция ионного обмена идет по схеме:

$$\text{ППК[Na]} + CaCO_3 \leftrightarrow \text{ППК[Ca]} + Na_2CO_3 \qquad (6.3)$$

Продуктом реакции является сода, поэтому этот метод неприменим на содовых солонцах, но может быть использован на осолодевающих солонцах, где ППК частично насыщен ионами водорода.

Известкование является необходимым приемом повышения плодородия кислых дерново-подзолистых, серых лесных почв. Известь оказывает многостороннее действие на почву. Она устраняет кислотность почвы, уменьшает содержание подвижного алюминия, улучшает микробиологическую деятельность в почве (аммонификацию, нитрификацию, активность симбиотических и свободноживущих в почве азотфиксирующих микроорганизмов), повышает насыщенность почв основаниями и буферность, улучшает физические свойства почв, их водный и воздушный режим, способствует переводу труднодоступных для растений фосфатов алюминия и железа в более доступные фосфаты кальция и магния.

Нуждаемость в известковании может быть установлена при учете насыщенности почв основаниями и гранулометрического состава (таблица 6.5).

Ионообменные методы локализации загрязнителей применяются и для подавления миграционной способности радионуклидов в дисперсных грунтах и почвах. Так, например, физико-химический

метод, который, по существу, ставит своей задачей не очистку почв от радиоактивных загрязнений, а перевод долгоживущих продуктов радиоактивного распада в малорастворимое состояние с целью недопущения их миграции в корни растений, был разработан М.К.Мельниковой и ее сотрудниками (1960).

Таблица 6.5

Нуждаемость почв в известковании в зависимости от гранулометрического состава, величины pH и степени насыщенность почв основаниями V

Гранулометрический состав	Нуждаемость в известковании							
	сильная		Средняя		слабая		отсутствует	
	pH_{KCl}	V, %	pH_{KCl}	V, %	pH_{KCl}	V, %	pH_{KCl}	V, %
Тяжело и среднесуглинистая	<5,0	<45	5,0…5,5	45…60	5,5…6,0	60…70	>6,0	>70
	<4,5	<50	4,5…5,0	50…65	5,0…5,5	65…75	>5,5	>75
	<4,0	<55	4,0…4,5	55…70	4,5…5,0	70…80	>5,0	>80
Легкосуглинистая	<5,0	<35	5,0…5,5	35…55	5,5…6,0	55…65	>6,0	>65
	<4,5	<40	4,5…5,0	40…60	5,0…5,5	60…70	>5,5	>70
	<4,0	<55	4,0…4,5	45…55	4,5…5,0	65…75	>5,0	>75
Супесчаная и песчаная	<5,0	<30	5,0…5,5	30…45	5,5…6,0	45…55	>6,0	>55
	<4,5	<35	4,5…5,0	35…50	5,0…5,5	50…60	>5,5	>60
	<4,0	<40	4,0…4,5	40…55	4,5…5,0	55…65	>5,0	>65
Заболоченная торфянистая и торфяно-болотная почва	<3,5	<35	3,5…4,2	35…55	4,2…4,8	55…65	>4,8	>65

Сорбционные методы позволяют непосредственно сорбировать мобильные загрязнители в грунтах и тем самым иммобилизовать их. Почвы обладают естественной способностью переводить часть тяжелых металлов в малоподвижное состояние в основном за счет содержания гумуса. В результате аккумуляции насыщенность гумусовых веществ цинком, медью, свинцом и кадмием в загрязненной почве часто превышает их фоновое содержание. По интенсивности аккумуляции в гумусе тяжелые металлы располагаются в следующем порядке Cu>Cd>Pb=Co>Ni>Zn>Mn. Макроэлементы (N, P, S, Mg, Fe, K) не аккумулируются.

Сорбционные защитные экраны позволяют локализовать загрязнители и применяются для строительства хранилищ различных, в том числе и токсичных отходов. Высокой сорбционной способностью обладает брусит и сорбенты, изготовленные на его основе.

Сорбенты очень эффективны при аварийной очистке от нефти, в таких случаях используют торф, органический сапропель, молодые

бурые угли, получают сорбенты также из коры, жмыха, смолы. Все они подвергаются гидрофобизации. Достоинством метода является повсеместное распространение природных сорбентов и возможность последующего извлечения из них собранных нефтепродуктов.

Важную роль *искусственные геохимические барьеры* играют при локализации загрязнений на полигонах ТБО при их рекультивации. Для этого наиболее эффективно применять полупроницаемые обратимые экраны, пропускающие воду, но не пропускающие токсиканты (рис. 6.5 и 6.6).

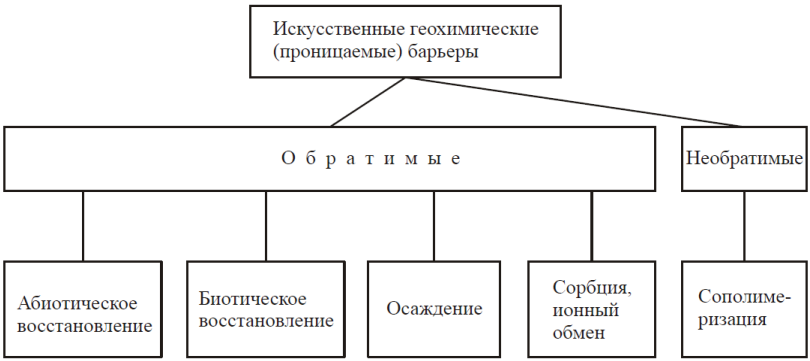


Рис. 6.5. Классификация искусственных геохимических барьеров по механизму поглощения токсиканта (Самарин, 2017)

При этом весьма важен с экологической точки зрения анализ токсичности вяжущих, материалов и химических реагентов, которые предполагается использовать для создания полупроницаемого сорбционного барьера. Из всего спектра вяжущих наименьшей токсичностью рабочих растворов характеризуются гидравлические вяжущие, коагуляционные суспензии минеральных и органических веществ, неорганические полимеризационные вяжущие – жидкое стекло и коллоидный кремнезем, некатализированные растворы аминопластовых олигомеров. Использование указанных вяжущих, по крайней мере, избавляет от экологических проблем, связанных с токсичностью постинъекционных растворов (Самарин, 2017).

На рис. 6.7 представлена блок-схема, которая позволяет наглядно продемонстрировать в каком качестве для по какому назначению можно использовать конкретную группу вяжущих.

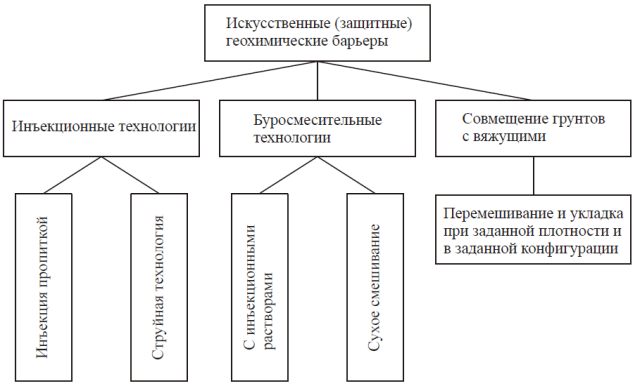


Рис. 6.6. Технологические приёмы устройства искусственных геохимических барьеров (Самарин, 2017)

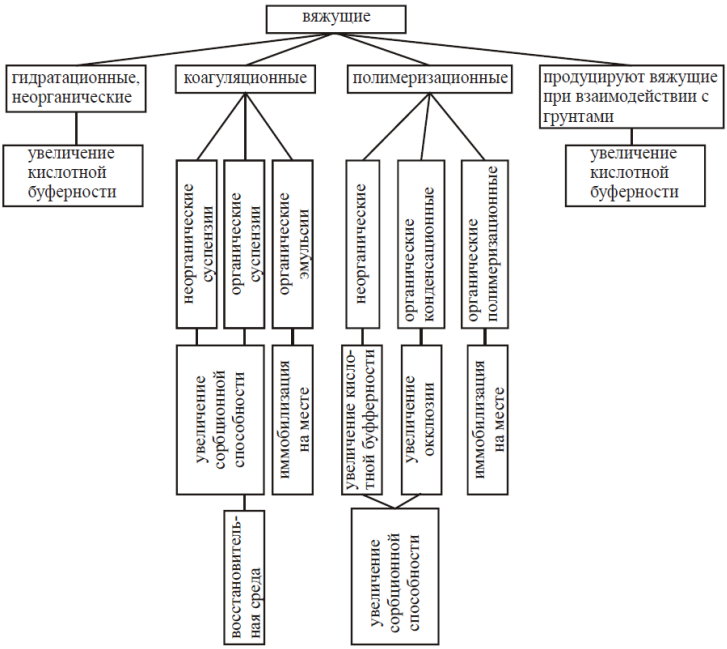


Рис. 6.7. Блок-схема функциональных возможностей применения инъекционных материалов для создания искусственных поглощающих барьеров или иммобилизации токсичных соединений в местах их складирования (Самарин, 2017)

Не маловажную проблему представляет стоимость различных методов очистки загрязненных грунтов. Вопросам оценки экономической эффективности различных способов очистки посвящен ряд зарубежных работ (Hardisty P.E., Ozdemiroglu E., 2005; Caliman et al., 2011).

6.3. Методы управления подземными и поверхностными водами ЭГС

> «Гераклит утверждал, что в одну реку нельзя вступить дважды. Современные экологи утверждают, что есть реки, в которые нельзя вступить и раза.»
>
> *Е.Кащеев*

Методы управления подземными и поверхностными водами в пределах ЭГС сводятся к различным мероприятиям и технологиям, позволяющим регулировать в нужных параметрах режим подземных вод (уровень, напор, направление и т.п.), чистоту поверхностных (сточных) вод, водонасыщенность пород, увлажненность почв и т.п., а также управлять поверхностными водотоками (реками, каналами, ручьями и т.п.) и водоёмами (водохранилищами, озерами и т.п.). Среди важнейших мероприятий применяются: водопонижение, регулирование поверхностного стока, гидромелиорация земель и т.п. (Королев, 2019а).

6.3.1. Водопонижение в ЭГС основано на различных методах регулирования уровня грунтовых вод, режима и напора подземных вод и применяется, в частности, для борьбы с подтоплением, заболачиванием, управления склоновыми гравитационными и др. процессами (Кац, Пашковский, 1988).

Группы методов водопонижения можно выделять и по их назначению: дренажные ($МУ_д$), гидромелиоративные (осушительные и оросительные) ($МУ_{гм}$), польдерные ($МУ_п$) и др.

Концептуальная схема управления водопонижением грунтового массива дренажными методами (на примере методов поверхностного водопонижения путем одноярусной откачки $МУ_в$) показана на рис. 6.8.

При водопонижении стоит задача управления уровнем грунтовых вод (УГВ) в пределах грунтового массива, являющегося объектом управления (ОУ) (см. рис. 6.8): необходимо понизить УГВ с текущего значения (a_{th}) до запланированной величины (a_{th}*). В свою очередь УГВ зависит от комплекса внешних воздействий f_h, определяющих реакцию массива на них (y). Водопонижение осуществляется с помощью

различных методов ($МУ_в$): откачки, многоярусного водопонижения, прямого водоотлива, электроосмотического осушения и др., каждый из которых реализуется с помощью соответствующего управляющего устройства ($УУ_h$), позволяющего регулировать УГВ (величину h) и состоящего из насосов, оборудованных фильтрами скважин, трубопроводов или электроосмотической установки и т.п.

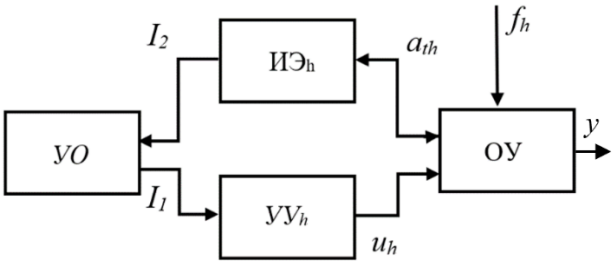


Рис. 6.8. Концептуальная схема управления грунтовым массивом при водопонижении ($МУ_в$) (объяснения в тексте)

Для этого (см. рис. 6.8) управляющий орган (*УО*) или оператор, с помощью сигналов (I_1), посылаемых на управляющее устройство ($УУ_ф$) оказывает на грунтовые воды воздействие (u_h), тем самым регулируя величину h. Контроль за этим процессом осуществляется с помощью измерительного элемента (ИЭh), отслеживающего динамику изменения характеристик УГВ (a_{th}). Эта информация по каналу обратной связи (I_2) поступает к оператору (УО) и позволяет ему регулировать конкретные параметры процесса водопонижения в автоматическом режиме. При этом в автоматическом режиме система водопонижения работает до тех пор, пока УГВ (величина h), не достигнет нижних пороговых значений (a_{th}*), т.е. когда выполняется условие:

$$a_{th} \geq a_{th}^*, \tag{6.4}$$

где a_{th}* – нижнее (пороговое) запланированное значение УГВ; a_{th} - текущее значение УГВ на момент времени *t*. При достижении величины a_{th}* система водопонижения отключается и таким образом поддерживается требуемый УГВ.

Для прочих групп методов водопонижения в грунтовых массивах ($МУ_{гм}$, $МУ_п$, и др.) концептуальная схема управления с их помощью будет такой же как на рис.6.8.

Дренирование оползневых склонов является одной из основных мер повышения их устойчивости, так как приводит к снижению гидродинамического давления в склоне и улучшению механических свойств грунтов. Осушение грунтов оползневого склона может быть достигнуто перехватом подземных вод на подходах к оползню и непосредственным дренированием водонасыщенных грунтов, слагающих оползневой склон. В большинстве случаев эти задачи решаются одновременно. Искусственное понижение уровня подземных вод (водопонижение) следует предусматривать для устранения или ослабления разупрочняющего и разрушающего воздействия подземных вод на грунты, снижения или устранения фильтрационного давления. Для достижения требуемого понижения уровня подземных вод надлежит применять следующие виды водопонизительных устройств:

- траншейные дренажи - открытые траншеи и канавы, лотки, откосные дренажи;
- закрытые беструбчатые дренажи – прорези, траншеи, заполненные фильтрующим материалом) для осушения оползневого тела, рассчитанные, как правило, на недолговременный срок службы;
- трубчатые и галерейные дренажи, штольни - в устойчивой зоне за пределами смещающихся грунтов для перехвата подземного потока при продолжительном сроке службы;
- пластовые дренажи на участках высачивания подземных вод на склонах (откосах) - для предотвращения суффозии и в основании подсыпок (банкетов);
- водопонизительные скважины различных типов (в том числе самоизливающиеся и водопоглощающие) в сочетании с дренажами или взамен их, в случае большей эффективности или целесообразности их применения;
- вертикальные и комбинированные дренажи, каптажные устройства.

Наслонный дренаж применяют при фронтальном выклинивании водоносного слоя па оползневом склоне и укладывают на всю мощность водоносного горизонта. Он состоит из наслонного обратного фильтра, дренажной трубы и утепляющего слоя. Фракции отдельных слоев обратного фильтра подбирают расчетом. Толщину утепляющего слоя назначают исходя из глубины промерзания грунтов для данной местности (зоны). Каптажи устраиваются для организованного захвата и отвода грунтовых вол, выклинивающихся на поверхность оползневого склона в виде родников, в результате чего достигается сокращение инфильтрации воды в грунты оползневого склона и уменьшение активности суффозионных процессов.

Гидромелиорация земель. Для восстановления техногенно нарушенных территорий, а также для мелиорации сельскохозяйственных угодий применяются различные способы гидромелиорации. Они включают в себя комплексы мероприятий по осушению или орошению мелиорируемых территорий (Кац, Пашковский, 1988). Некоторые из них (промывка, рассоление, вертикальный дренаж, вакуумный дренаж и др.) были рассмотрены выше.

Наряду с ними важнейшими являются мероприятия по регулированию водного баланса территорий, достигаемые методами осушения и орошения. Помимо гидромелиорации сельскохозяйственных земель, осушение и водопонижение применяется для борьбы с подтоплением на застраиваемых территориях, организации поверхностного стока, осушения теплиц, осушения болот для добычи торфа, осушение спортивных площадок и сооружений, осушения лесов и др.

Водоотливные, водопонизительные и осушительные системы создаются и при разработке глубоких карьеров, препятствуя их затоплению подземными водами. При добыче полезных ископаемых в зонах избыточного переувлажнения рекультивационная поверхность формируется одновременно с созданием благоприятного гидрологического и гидрогеологического режимов внутренних отвалов.

Поверхность отвалов планируют с уклонами, необходимыми для организации поверхностного стока, а при наличии близких грунтовых вод – для строительства открытой осушительной сети. Конструкцию осушительной сети принимают в зависимости от направления использования нарушенных земель. Рекультивацию гидроотвалов начинают на 6–8-й год после окончания их намыва. За этот период они стабилизируются, подсыхают и частично покрываются растительностью.

Польдерные системы. На практике для регулирования продолжительности затопления пойм и низменностей могут применяться польдерные мелиоративные системы (Королев, 2019). Они представляют собой совокупность гидромелиоративных сооружений, предназначенных для регулирования водного режима на периодически или постоянно затапливаемых землях. Наиболее часто их организуют для осушения затапливаемых пойменных земель.

По способу удаления воды с осушаемых земель польдерные системы подразделяются на системы с машинным водоотведением и самотечные. Польдерные осушительные системы издавна используются в Нидерландах на значительных территориях.

Осушительно-увлажнительные системы. Они создаются с целью более эффективного регулирования влажностных условий территорий, позволяя добиваться оптимального или требуемого водного режима.

Самой простой реализацией осушительно-увлажнительной системы является *шлюзование* одиночных открытых водотоков (проводящих каналов) и через них – регулирующей сети (Желязко, Лагун, 2016). Различают системы с предупредительным и гарантированным шлюзованием.

Водооборотные системы. Прогрессивным направлением в развитии гидромелиорации является создание водооборотных систем. Эти системы наиболее перспективны в экологическом плане, поскольку позволяют задерживать в пределах объекта мелиорации местный сток (в искусственно созданных водохранилищах или прудах) и расходовать его в периоды засухи для увлажнения или орошения. При этом одновременно с накоплением и использованием сбросных вод повторно утилизируются вынесенные из почвы с дренажным стоком химические элементы и биогенные вещества, предотвращается загрязнение природных водных источников удобрениями, пестицидами, гербицидами и пр. (Желязко, Лагун, 2016).

Оросительные системы также являются важнейшими компонентами гидромелиорации. Площади орошаемых земель устойчиво увеличиваются во всех странах мира, включая и Россию. Основными способами орошения в России являются: 1) дождевание; 2) поверхностное орошение; 3) капельное орошение; 4) внутрипочвенное орошение. Для их реализации создаются специальные оросительные системы, включающие в себя различные сооружения: каналы, трубопроводы, сооружения и различные устройства, обеспечивающие возможность своевременного забора из водоисточника, подачи и распределения воды по орошаемым участкам в целях поддержания в корнеобитаемом слое заданного уровня (диапазона) влажности почвы в соответствии с природными условиями каждого участка и требованиями выращиваемых культур.

В состав оросительной системы входят следующие элементы (Желязко, Лагун, 2016): орошаемые земли; водоисточник орошения; головное водозаборное сооружение и насосная станция; магистральный оросительный канал (трубопровод); распределительные проводящие каналы или трубопроводы; регулирующая оросительная сеть и оросительные устройства; водоотводная сеть, включающая закрытый дренаж при борьбе с подтоплением и на водооборотных системах с применением для полива сточных вод; сооружения на каналах; дороги,

телефонная и электрическая сеть, производственные постройки; природоохранные сооружения и защитные лесополосы.

6.3.2. Управление водостоком в ЭГС. Согласно СП 32.13330-2012[1] сооружения по регулированию и отводу поверхностных вод с городских территорий и промышленных площадок надлежит разрабатывать в соответствии с требованиями инженерной подготовки территорий СП 42.13330-2010[2]. Проектирование дюкеров, выпусков, ливнеотводов и ливнеспусков, отстойников, усреднителей, насосных станций и других сооружений следует производить в соответствии требованиями СП 32.13330-2012.

На территориях промышленной и гражданской застройки надлежит предусматривать дождевую канализацию закрытого типа. Применение открытых водоотводящих устройств (канав, кюветов, лотков) допускается в районах 1—2-этажной застройки, на территориях парков и зон отдыха с устройством мостиков или труб на пересечениях с улицами, дорогами, проездами и тротуарами — в соответствии с требованиями СНиП 2.05.02-85[3] и СНиП II-39-76.

Стокорегулирующие и руслорегулирующие сооружения и мероприятия по предотвращению затопления и подтопления сельскохозяйственных территорий, примыкающих к незарегулированным средним и малым рекам, а также для защиты открытых и подземных горных выработок полезных ископаемых и отдельных народнохозяйственных объектов такие, как переходы под автодорогами, подходы к судоходным сооружениям и т. д., следует применять в зависимости: от масштабов и времени затопления территории; от естественных факторов — подтопления и водной эрозии; от техногенных факторов, усиливающих затопление и подтопление земель в зоне защищаемых объектов.

Большинство систем водостока на застроенных территориях не требует управления и работает в пассивном режиме, за исключением специальных сооружений (заглубленных транспортных трасс, коллекторов, подземных переходов и т.п.), которые оборудуются автоматизированными системами водоотлива на случай чрезвычайных ситуаций (обильные ливни, катастрофические паводки и т.п.). В этом случае концептуальная схема управления водоотливом будет аналогична той, которая показана на рис.6.6.

---

[1] Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85

[2] Введен вместо СНиП II-60-75**

[3] Введен вместо СНиП II-Д.5-72

При регулировании и отводе поверхностных вод с защищаемых сельскохозяйственных земель следует выполнять требования норм «Мелиоративные системы и сооружения». Учет естественной водной эрозии почвенного покрова следует производить в зависимости от нормы осадков, испарения, уклонов поверхности, естественной дренированности и т.д. На защищаемых склонах территории ЭГС должен быть организован беспрепятственный сток поверхностных вод, исключено застаивание вод на бессточных участках и попадание на склон вод с присклоновой территории. Расчетные расходы дождевых вод в оползневой зоне следует определять по методу предельных интенсивностей. Период однократного превышения расчетной интенсивности дождя следует назначать в соответствии с требованиями СП 32.13330-2012. Поверхностный сток регулируется системой нагорных и водоотводных каналов, канав, лотков, ограждающих валов и специальными планировками. В зависимости от характера рельефа на этих сооружениях устраивают перепады, быстротоки, шахтные и консольные водосбросы, обеспечивающие нормальную работу водоотводов при пересеченном рельефе оползневых участков (Моисеев В.Ю. и др., 1974). Нагорные и водоотводные канавы проектируют при минимальных уклонах параллельно горизонталям склона и располагают их не ближе 6—15 м от бровки оползневого склона с тем, чтобы не ухудшались условия устойчивости склона за счет утечки ливневых вод в грунт склона. Эффективность нагорных и водоотводных канав определяется правильным выбором трасс, продольных уклонов, поперечных сечений и вида крепления дна и откосов. Вдоль канав устраиваются крепления - защитные покрытия, обеспечивающие их сохранность от размыва текучими водами.

Сеть водоотвода на оползневом массиве проектируют в увязке с планировкой для предотвращения размыва поверхности склона и уменьшения инфильтрации атмосферных осадков. Водоотводные устройства на оползне трассируют с таким расчетом, чтобы всю его поверхность расчленить на микроплощадки и обеспечить сокращение пути стекания воды с каждой площадки. Сеть таких водоотводов состоит из магистральных и водосборных лотков. Водосборные лотки располагают перпендикулярно к направлению стока, а магистральные, или водоотводящие, — в зависимости от рельефа оползневого склона; их может быть один или несколько. Для отвода поверхностных вод на оползне применяют лотки телескопические и монолитные, изготовляемые на месте в инвентарной опалубке методом протягивания.

Быстротоки устраивают в виде крутонаклонных лотков прямоугольного сечения без уступов. Гашение энергии потока в быстротоках осуществляется водоотбойными колодцами, устраиваемыми в конце быстротоков. Устройство очистных сооружений на водосточных коллекторах, расположенных в оползнеопасной зоне, не допускается. Выпуск воды из водостоков следует предусматривать в открытые водоемы и реки, а также в тальвеги оврагов - с соблюдением требований очистки в соответствии с СП 32.13330-2012 и при обязательном осуществлении противоэрозионных устройств и мероприятий против заболачивания и других видов ущерба окружающей среде.

6.3.3. Методы очистки поверхностных сточных вод применяются во всех случаях, когда в пределах ЭГС неочищенные сточные воды по поверхности попадают в открытые водотоки или иные водоёмы, загрязняя их.

Подобная ситуация часто возникает, например, в результате сельскохозяйственной деятельности, когда сельскохозяйственные стоки с полей большой площади, обычно богатые нитратными загрязнителями (нитрогенами) и фосфатами стекают по склонам попадая в ближайшую реку, озеро или море, сильно загрязняя их.

Строить в этом случае задерживающие плотины или перехватывающие канавы не целесообразно, так как они вскоре сами становятся источниками и очагами вторичного нитратного и фосфатного загрязнения.

С целью решения этой проблемы шведским профессором В.Маркстрёмом была разработана технология управления стоками на основе аквакультуры с созданием искусственной водно-болотной системы. Схема работает в пассивном режиме, т.е. не требует специальной системы управления. Его метод состоит в выкапывании широких и неглубоких каналов параллельно основному водотоку, длина которого получается довольно значительной из-за многочисленных изгибов (рис. 6.9 и 6.10).

Эти каналы наполняются водой в начале плотины и сбрасывают ее в конце. Основной поток может удерживать часть воды, но основная часть потока замедляется в очистном канале, чтобы сдерживать нитраты и фосфаты, которыми питается растительность в канале. Хорошие условия для роста растений и связанных с ними беспозвоночных обеспечивают корм для рыбы и уток, которые могут использоваться для получения дохода. Кроме того, воду в канале можно спустить, чтобы использовать растительность как компост для

сельскохозяйственных угорий, когда она становиться слишком плотной.

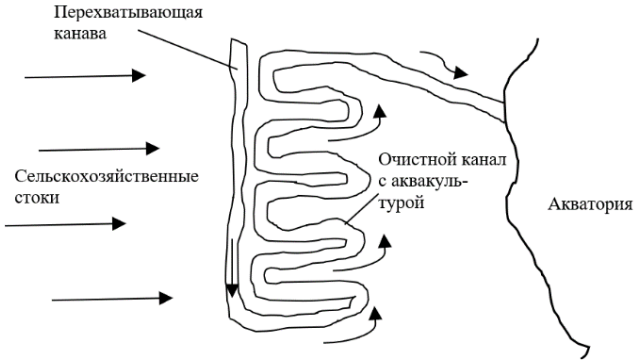


Рис. 6.9. Схема пассивного управления сельскохозяйственными стоками (план). Стрелки указывают направление движения воды

Эта техника аквакультуры является тем более гибкой в эксплуатации, чем более естественным является водно-болотное угодье. Больше всего она подходит для равнинных условий, которые встречаются только на поймах, потому что только канал 40-50 см в глубину способствует усилению роста растений. Однако, там, где возможно применить этот метод, шведские власти были готовы предоставить 90% субсидий на его внедрение.

Общий вид искусственных очистных водно-болотных угодий в районе Харка-Гард (Швеция), показан на рис.6.10.

6.3.4. Методы управления руслом рек ЭГС. Нередко возникают ситуации, при которых сход грандиозных оползней полностью перекрывает русло реки. В результате этого образуется естественная плотина из оползневых отложений, выше которой постепенно формируется водохранилище (или горное озеро), а ниже которой резко падает расход воды в русле реки.

Особенно опасны подобные ситуации в долинах крупных рек, в пределах которых построены те или иные гидротехнические сооружения. Например, если выше комплекса ГЭС происходит подобный оползень, перекрывающий русло реки, то в приплотинном водохранилище ГЭС начинает падать уровень воды, что сразу сказывается на эффективности генерации электроэнергии и работе ГЭС, а выше перекрытия образуется новое водохранилище, постепенное

заполнение которого приводит к расширению подтапливаемых территорий, затоплению поселений, транспортных сетей и т.п.

Рис.6.10. Общий вид искусственной очистной водно-болотной системы

При этом очень опасен возможный прорыв сформировавшегося оползневого перекрытия, которое как правило бывает не надежным в этом отношении. Классическим примером такой опасной ситуации является Сарезское озеро на Памире, образовавшееся в 1911 году в результате грандиозного оползня. Оно возникло в результате катастрофического перекрытия русла реки Бартанг, и последующего интенсивного наполнения озера, которое завершилось в 1926 году (рис.6.11).

В последующие годы уровень колебался, а вопрос о возможном прорыве так и остается открытым до сих пор. Однако никто не отрицает, что возможный прорыв может стать причиной катастрофического селя, который дойдет до Аральского моря и нанесет ущерб всем поселениям по долинам Бартанга, Пянджа и Амударьи.

Другим примером завального перекрытия крупной реки является сход в декабре 2018 г. гигантского криогенного оползня в долине реки Бурея в Хабаровском крае России выше Буреинской ГЭС, который полностью перекрыл русло Буреи и вызвал формирование водохранилища выше завала (рис.6.12).

Рис. 6.11. Завальная плотна на р.Мургаб в Таджикистане: справа – Сарезское озеро

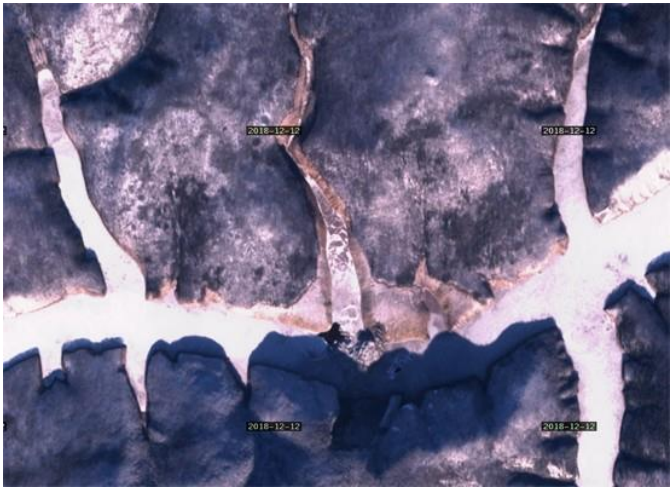


Рис.6.12. Космоснимок завального перекрытия русла р.Бурея (декабрь 2018 г.)

Ниже по течению, напротив, стал резко падать уровень воды в водохранилище Буреинской ГЭС, что стало угрожать её нормальному функционированию. Интересно отметить то обстоятельство, что оползень сошел в зимний период, т.е. был обусловлен криогенными процессами – ослаблением структурных связей в трещиноватых

водонасыщенных скальных породах на прилегающем склоне при замерзании в них воды и создании при этом огромного кристаллизационного давления, приведшего к разрушению скальных мерзлых пород.

Для ликвидации образовавшегося перекрытия русла Буреи была предпринята масштабная операция по управлению руслом реки. Были привлечены силы и средства Министерства обороны РФ, которые с помощью взрывных технологий расчистили проран в теле завала длиной 150 м и шириной 80 м при глубине 20 м, что обеспечило водоток по руслу Буреи и восстановление уровня Буреинского водохранилища до требуемых нормальных отметок.

Важно отметить, что работы удалось завершить в зимний период (до конца февраля), т.е. до периода весеннего снеготаяния, которое могло существенно осложнить всю критическую ситуацию.

Имеются и противоположные примеры – целенаправленного перекрытия русел рек путем направленного взрыва. Такая технология, в частности, была применена при строительстве противоселевой плотины Медео в Казахстане (Королев, 2013).

Таким образом, для борьбы с грандиозными оползневыми завалами в долинах рек могут успешно применяться взрывные методы, технологии направленного взрыва и т.п., позволяющие с наименьшими экономическими затратами и с наибольшей эффективностью бороться с такими крупными стихийными явлениями.

6.4. Методы управления рельефом территорий ЭГС

Методы управления рельефом территории ЭГС сводятся к различным мероприятиям, обеспечивающим более надёжное функционирование инженерных сооружений в пределах ЭГС, ликвидацию опасных геологических процессов, а также сохранение биотических компонентов ЭГС и их регулирование.

К ним относятся: планировка рельефа, террасирование склонов, создание искусственных форм рельефа и т.п. Искусственное изменение рельефа склона (откоса) следует предусматривать для предупреждения и стабилизации процессов сдвига, скольжения, выдавливания, осыпей и течения грунтов, включая оползни-потоки (см. СНиП 22-02-2003). Все указанные методы управления рельефом относятся к пассивным и не требуют автоматизации.

Образование рационального профиля склона (откоса) достигается приданием ему соответствующей крутизны, ***террасированием*** и общей планировкой склона (откоса), удалением или заменой неустойчивых

грунтов, отсыпкой в нижней части склона упорной призмы (банкета). При проектировании уступчатой формы откоса размещение берм и террас следует предусматривать на контактах пластов грунтов и на участках высачивания подземных вод. Ширину берм (террас) и высоту уступов, а также расположение и форму банкетов следует определять расчетом общей и местной устойчивости склона (откоса), планировочными решениями, условиями производства работ и эксплуатационными требованиями. На террасах необходимо предусматривать устройство водоотводов, а в местах высачивания подземных вод - дренажей. Удаление неустойчивых грунтов следует предусматривать, если обеспечение их устойчивости оказывается неэффективным или экономически нецелесообразным.

Следует иметь ввиду, что рельеф территории ЭГС является важнейшим экологическим фактором существования и развития биоты. От экспозиции склонов зависит обеспеченность светом и солнечной энергией микробо-, фито- и зооценозов, а также почв. Расчленённость рельефа влияет на биоразнообразие во всех биоценозах: чем сложнее рельеф, больше его расчленённость и разнообразие, тем больше создается условий для укрытия животных, появления новых видов микроорганизмов, растений и животных разных классов. Напротив, выровненный и однообразный (однотипный) рельеф территории ЭГС характеризуется меньшим видовым разнообразием биоценозов.

6.5. Методы управления геологическими и инженерно-геологическими процессами в ЭГС

6.5.1. Управление эндогенными процессами. Основные эндогенные процессы – землетрясения и извержения вулканов, относятся к катастрофическим геологическим процессам, приводящим к гибели ЭГС или их кардинальной перестройке. Управлять ими в настоящее время не представляется возможным. Хотя для управления землетрясениями и были предложены практические меры, основанные на принудительном сбросе накапливающихся напряжений путем наведенной сейсмичности, но пока они остаются на уровне гипотетических защитных инженерных мероприятий.

Описан также случай управления лавовым потоком в Исландии, позволившим сохранить морской порт.

Были предложены и запатентованы и иные способы. Сущность одного из них состоит в следующем: способ защиты от лавы при извержении вулкана включает создание защитного вала на пути движения лавы и искусственного водохранилища выше намеченного

места образования защитного вала в ложе движения лавы. Валы создают в одном или более местах. При этом при подходе лавы подают воду, управляя системой с места наблюдения оператором. Происходит интенсивный отвод тепла, образования корки застывшей лавы и, в конечном счете, образование защитного вала.

Предпринимались попытки бомбардировки лавового языка с самолётов с целью управления его движением.

Также для управления лавовым потоком строятся специальные защитные желоба, попадая в которые лава двигается по этому желобу, не причиняя ущерба рядом расположенным строениям. В ряде случаев были попытки строительства защитных бетонных стен, устанавливаемых на пути предполагаемого движения лавового потока. Но это всё – единичные или уникальные случаи.

По этой причине «управление эндогенными процессами» сводится главным образом к серии защитных мероприятий. Основные защитные мероприятия от землетрясений и вулканических извержений сводятся к сейсмомониторингу (концептуальную схему которого см. на рис. 4.5), и на его основе - своевременному оповещению населения и его эвакуации. Кроме того, на сейсмоопасных территориях осуществляется специальное сейсмостойкое строительство, учитывающее данные сейсмического микрорайонирования застраиваемой территории (Королев, 2013).

Поэтому главными мерами защиты населения является ***мониторинг вулканоопасных территорий*** и своевременная эвакуация населения (Королев В.А., 2007, 2013).

Современная освоенность вулканоопасных территорий в России требует осуществления мониторинга наиболее активных вулкано-тектонических структур. В основе мониторинга вулканоопасных территорий лежит применение аэрокосмических технологий. Дистанционное исследование вулканоопасных регионов базируется на существовании тесных взаимосвязей различных процессов и явлений, совершающихся в земной коре и на поверхности Земли, проявлении этих природных взаимосвязей в современном ландшафте и их объективном отображении на материалах дистанционного зондирования.

Мониторинг вулканоопасных территорий выполняет три основные функции:

1) выявление изменений территорий и тенденций путем сравнения измерений или оценок, осуществляемых в динамике;

2) выяснение механизмов вулканических процессов с помощью выявления корреляций между измеренными переменными среды;

3) прогноз развития опасных вулканических процессов и разработка мер по снижению или полному предотвращению ущерба от них.

В большинстве стран, где действующие вулканы расположены вблизи населенных пунктов, властями организованы в той или иной форме наблюдения за приближающимися извержениями. Обычно вблизи вулканов устанавливаются сейсмографы, но многие извержения начинаются раньше, чем фиксируются первые толчки. Некоторые другие признаки, такие, например, как увеличение уклонов земной поверхности вблизи вулкана или изменение температуры воды горячих источников и кратерных озер, нередко могут служить более надежными предвестниками приближающегося извержения.

На Камчатке, на вулканологических станциях Академии наук России, проводятся детальные систематические наблюдения за всеми извержениями, очень активным вулканом Ключевской сопки. На территории России существует две службы сейсмических наблюдений: «Единая служба сейсмических наблюдений» (ЕССН) и «Инженерно-сейсмометрическая служба» (ИСС).

Из всего комплекса многообразных задач службы мониторинга вулканов можно выделить первостепенные, наиболее приближенные к практическим действиям населения, в условиях предвидения и возникновения извержения. Их можно изложить в следующем порядке:

- Оповещение о прогнозируемом или уже наступившем извержении;
- Защита населения в предвидении извержения и в ходе его развития,
- Обеспечение работы предприятий и учреждений в условиях извержения, направленной, прежде всего, на функционирование систем жизнеобеспечения населения;
- Ликвидация последствий извержения,
- Обучение населения действиям, способам и средствам по противодействию извержению.

Каждая территориальная подсистема предназначена для предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций подведомственной территории. Служба мониторинга должна включать республиканские, региональные, краевые или областные центры мониторинга. Служба и ее подразделения должны иметь структурную иерархию, включающую местный, региональный и федеральный уровни Успех работы системы мониторинга вулканических территорий обеспечивается совместными усилиями Минприроды и экологии РФ, МЧС РФ, Российской Академии наук и других организаций.

В отличие от вышерассмотренных экзогенные геологические процессы поддаются управлению. Большинство имеющихся в настоящее время методов управления ими сводится к различным пассивным мероприятиям и технологиям инженерной защиты территорий, зданий и сооружений.

6.5.2. Методы управления гравитационными склоновыми процессами в ЭГС направлены на регулирование режима таких склоновых гравитационных процессов как оползни, обвалы, осыпи, камнепады, снежные лавины, движущиеся ледники. Согласно (СНиП 22-02-2003) при проектировании инженерной защиты от оползневых и обвальных процессов следует рассматривать целесообразность применения следующих мероприятий и сооружений, направленных на предотвращение и стабилизацию этих процессов:

- изменение рельефа склона в целях повышения его устойчивости:
- регулирование стока поверхностных вод с помощью вертикальной планировки территории, устройства системы поверхностного водоотвода, предотвращение инфильтрации воды в грунт и эрозионных процессов;
- искусственное понижение уровня подземных вод (Королев, 2013);
- агролесомелиорация;
- закрепление грунтов (в том числе армированием);
- устройство удерживающих сооружений;
- прочие мероприятия (регулирование тепловых процессов с помощью теплозащитных устройств и покрытий, защита от вредного влияния процессов промерзания и оттаивания, установление охранных зон и т. д.). Большинство указанных мероприятий и методов управления работает в пассивном режиме и не требует постоянного, а тем более автоматизированного, управления в активном режиме.

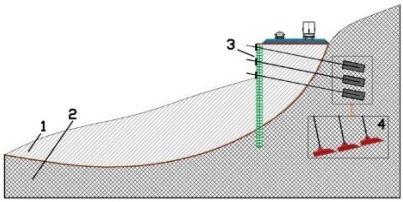
Если применение мероприятий и сооружений активной инженерной защиты, указанных выше, полностью не исключает возможность образования оползней и обвалов, а также в случае технической невозможности или нецелесообразности активной защиты, следует предусматривать мероприятия пассивной инженерной защиты (приспособление защищаемых сооружений к обтеканию их оползнем, улавливающие сооружения и устройства, противообвальные галереи и

др.). Они также в большинстве случаев не требуют автоматизированного управления.

Удерживающие сооружения следует предусматривать для стабилизации оползневых процессов при невозможности или экономической нецелесообразности изменения рельефа склона (откоса). Удерживающие сооружения применяют следующих видов (рис.6.13):

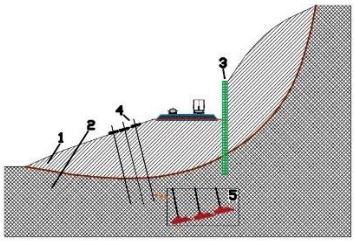
- *подпорные стены* (на естественном или свайном основании);
- *свайные конструкции и* столбы*, шпонки* - для закрепления неустойчивых участков склона (откоса) и предотвращения смещений грунтовых массивов по ослабленным поверхностям;

а



1 – оползневые отложения, 2 – коренные отложения, 3 – низовое свайно-анкерное удерживающее сооружение глубокого заложения, 4 – самораскрывающиеся анкеры

б



1 - оползневые отложения, 2 – коренные отложения, 3 – верховое сооружение – свайное удерживающее сооружение, врезаемое в коренные породы, 4 - нагельное поле, 5 – самораскрывающиеся грунто-вые анкеры

Рис. 6.13. Примеры укрепления оползневых склонов с автомобильными дорогами (Королев, Минина, 2017)

- *анкерные крепления* - в качестве самостоятельного удерживающего сооружения (с опорными плитами, балками и т.д.) и в сочетании с подпорными стенами, сваями, столбами.
- опояски - массивные сооружения для поддержания неустойчивых откосов;
- облицовочные стены - для предохранения грунтов от выветривания и осыпания;

- пломбы (заделка пустот, образовавшихся в результате вывалов на склонах) - для предохранения скальных грунтов от выветривания и дальнейших разрушений;
- анкерные крепления - в качестве самостоятельного удерживающего сооружения (с опорными плитами, балками и т.д.) в виде крепления отдельных скальных блоков к прочному массиву на скальных склонах (откосах).

Улавливающие сооружения и устройства (стены, сетки, валы, траншеи, полки с бордюрными стенами, надолбы) следует предусматривать для защиты объектов от воздействия осыпей, вывалов, падения отдельных скальных обломков, а также обвалов объемом, определяемым расчетом, если устройство удерживающих сооружений или предупреждение обвалов, вывалов и камнепада путем удаления неустойчивых массивов невозможно или экономически нецелесообразно (СНиП 22-02-2003).

Улавливающие стены и сетки располагают у подошвы склонов (откосов) крутизной 25-35° для защиты от воздействия осыпей, вывалов, падения отдельных скальных обломков и небольших обвалов. Прочность и устойчивость конструкций улавливающих стен проверяются на статическую нагрузку от обвальных масс, а также на удар обломков скального грунта.

Улавливающие траншеи и улавливающие полки с бордюрной стеной следует размещать у подошвы обвалоопасных склонов (откосов) высотой до 60 м и крутизной более 35° для защиты от вывалов отдельных обломков грунта объемом до 1 куб. м, улавливающие - валы у подошвы обнаженных обвалоопасных склонов большой протяженности. Улавливающие стены, траншеи и валы допускается располагать на склонах на высоте не более 30 м над защищаемым объектом при крутизне склона не более 25°. С низовой стороны нагорных (расположенных на склоне) улавливающих траншей следует устраивать валы из местного грунта с упорами из каменной или бутобетонной кладки.

Оградительные стены следует размещать у подошвы склонов (откосов) высотой до 30 м (соответственно 50 м) и крутизной 40-45° для улавливания мелких (до 0,01 куб.м) обломков скального грунта или задерживания осыпающегося скального грунта.

Барражные стены следует устраивать в крутопадающих тальвегах ложбин и распадков для задерживания скатывающихся по ним скальных обломков. В нижней части барражной стены должно быть предусмотрено отверстие для пропуска вод, стекающих по ложбине или распадку.

Заградительные сетки надлежит применять для защиты объектов, близко расположенных к подошве склона (откоса), от падающих скальных обломков.

Надолбы следует предусматривать на затяжных склонах высотой до 50 - 60 м и крутизной до 30° в комплексе с другими улавливающими сооружениями и устройствами для погашения скорости обломков скального грунта (Королев, 2013).

Управление осыпями и камнепадами, которые часто являются следствием развития процессов выветривания пород на склонах, сводится к превентивным защитным мероприятиям, которые должны быть направлены на ликвидацию условий для выветривания. Следуя рекомендациям Н.В. Коломенского (1964), выделяются следующие виды ***защитных мероприятий от выветривания***:

- Ограничение доступа к горным породам для главных агентов выветривания: отвод атмосферных, поверхностных и подземных вод, покрытие обнажений, изолирующее их от внешних воздействий.
- Повышение устойчивости горных пород тампонажем трещин и карстовых пустот, укреплением методами технической мелиорации и т. п.
- Ограничение масштабов формирования техногенных обнажений с обязательной рекультивацией осваиваемых территорий.
- Управление процессом перемещения современного элювия на склонах и откосах.
- Организация мониторинга (концептуальную схему которого см. на рис. 4.5), разного уровня на территориях интенсивного выветривания на искусственных и естественных обнажениях.

Согласно СНиП 22-02-2003 для закрепления выветрелых, слабых и трещиноватых скальных грунтов склонов (откосов) и повышения их прочностных и противофильтрационных свойств допускается применять методы технической мелиорации. Среди них в качестве противоосыпных мероприятий используют цементацию, смолизацию, силикатизацию и термическое закрепление грунтов (Королев, 2013).

Управление снежными лавинами сводится к предупредительным мероприятиям, направленным на принудительный спуск лавин, что чаще всего достигается путем обстрела лавиноопасных участков из орудий, а также строительством противолавинных сооружений.

Для искусственного спуска лавин, проверки устойчивости снега на склоне и его закрепления, кроме артиллерийских систем, применяются заряды взрывчатых веществ. Снаряд, мина или ракета долетают до опасного склона в считанные секунды, а заряд взрывчатки лавинщик доставляет туда на собственной спине, но зато он может уложить его

точно в предназначенное место. Кроме того, такой способ воздействия на снег намного дешевле. Все это в ряде случаев делает взрывчатку более удобным средством искусственного регулирования лавин (Королев, 2013).

Современные тенденции противолавинных средств меняются. В частности, происходит замена огнестрельного оружия для спуска лавин на стационарные газовые пушки, в том числе типа «Газекс» (рис. 6.14), работающие в автоматизированном режиме.

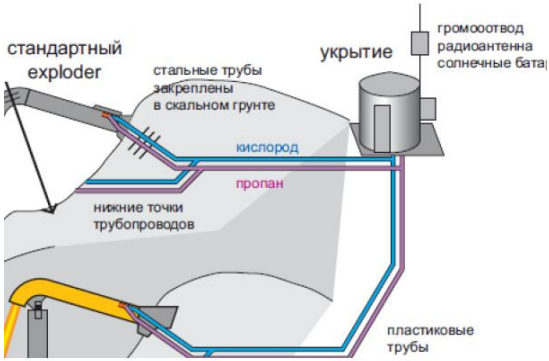


Рис. 6.14. Схема автоматизированного управления лавинами на основе газовой пушки «Газекс» (Баринов-Каштанов А.С., 2009)

Концептуальная схема системы автоматизированного управления снежными лавинами показана на рис. 6.15.

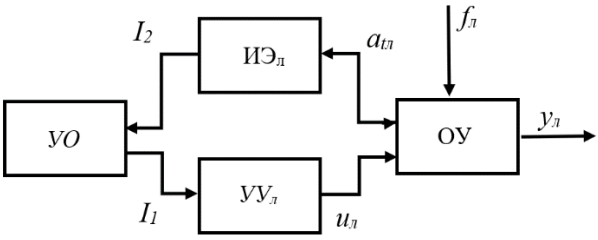


Рис.6.15. Концептуальная схема автоматизированного управления снежными лавинами (объяснения в тексте)

В этом случае (см. рис.6.15) стоит задача оценки накопления снежной массы на склоне, подвергающемся воздействию выпадающего снега ($f_л$), до критического состояния, предшествующему сходу лавины ($y_л$). Оператор ($УО$) с помощью системы обратной связи (I_2) и измерительных элементов ($ИЭ_л$), отслеживающих параметры накапливаемой снежной массы на склоне ($a_{tл}$), автоматически подает управляющий сигнал (I_1) на управляющее устройство ($УУ_л$), в качестве которого выступает газовая пушка. Она в свою очередь путем выстрела оказывает воздействие ($u_л$) на накопленную снежную массу склона (ОУ), вызывая сход лавины.

Таким образом, система в автоматическом режиме включает пушку в том случае, когда выполняется соотношение:

$$a_{tл} \geq a_{tл}^*, \tag{6.5}$$

где $a_{tл}^*$ - критическое (пороговое) значение параметра снежной массы на склоне; $a_{tл}$ – текущее значение этого параметра на момент t.

В качестве лавинозащитных сооружений применяются снегозадерживающие и противолавинные щиты (рис. 6.16), снеговыдувающие щиты (дюзы, кольктафели и др.), противолавинные дамбы, лавинорезы, галереи и др. (Королев, 2013).

Рис. 6.16. Снегозаградительные и противолавинные щиты на горном склоне, Австрия (фото В.С.Королева, 2019)

Однако при защите от лавин самые надежные решения возможны только при наличии комплексных систем защиты, т.е. при сочетании нескольких типов противолавинных сооружений, а вот как это сделать - подсказывают местные географические особенности района, в котором намечается строительство, и хорошее знание характера местных лавин и снежного покрова.

Снегозадержание в пределах ЭГС может проводиться и с целью регулирования водного баланса территории. Так, например, снегозадержание в пределах сельскохозяйственных ЭГС целесообразно осуществлять в годы, когда соблюдается условие:

$$W_H + X_c < W_{опт}\,, \qquad (6.6)$$

где W_H - влагозапасы в слое почвы 0-50 см в предзимний период, мм; X_c -норма снегозапасов, мм; $W_{опт} = 0{,}85W_{ПВ}$ (зябь), $W_{опт} = 0{,}9\ W_{ПВ}$ (уплотненная пашня); $W_{ПВ}$ - полная влагоемкость почвы в слое 0-50 см в мм.

Управление гляциальными процессами, обусловлено активностью ледников, которые также могут наносить огромный ущерб и инженерным сооружениям, и ЭГС в целом. Поэтому на ряде освоенных территорий с развитыми гляциальными процессами, а также по трассам линейных сооружений, особенно в горных регионах, создаются системы инженерной защиты от опасных гляциальных процессов (Королев, 2013).

Скорости движения льда при подвижках возрастают на один—три порядка, фронт пульсирующего ледника может продвигаться вперед со скоростью до первых сотен метров в сутки.

Комплекс мер по снижению гляциального риска можно разделить на две группы: (1) мероприятия по снижению гляциальной опасности и (2) мероприятия по снижению уязвимости людей и инфраструктуры. Снижение гляциальной опасности достигается путем предотвращения или регулирования опасных гляциальных процессов. Это сложная научная и техническая проблема. Ее решения существуют пока только для приледниковых озер, вероятность прорыва которых может быть понижена путем строительства искусственных дамб, обычно соединяемых с водосбросами.

Регулирование уровня приледниковых озер осуществляется путем строительства водосбрасывающих тоннелей или открытых водосливов. Тоннели пробиваются в коренных породах ниже уровней озер, а открытые водосливы делаются в моренных грунтах. В Альпах такие тоннели сооружались уже в XIX веке. Водосливы необходимо

бетонировать во избежание эрозии. При этом оптимально использование ворот, регулирующих расход воды. При понижении уровня небольших озер бетон можно заменить пластиком, стеклотканью и/или брезентом. Для экстренного понижения уровня озера при его быстром подъеме можно использовать систему сифонов и насосов.

Мероприятия по *снижению уязвимости людей и инфраструктуры* можно делятся на три группы: (1) административно-профилактические, (2) организационно-технические и (3) инженерные (Королев, 2013).

6.5.3. Методы управления абразией в ЭГС. Все мероприятия по управлению абразией по берегам морей и океанов сводятся к различных профилактическим действиям, а также к строительству берегозащитных инженерных сооружений, работающим в постоянном пассивном режиме и не требующим автоматизированного управления. Берегозащитные сооружения возводятся для предупреждения разрушений (размывов) берегов и затоплений населенных пунктов, промышленных объектов, дорог, мостов, линий связи, ценных лесных и с.-х. угодий, культурных и исторических памятников и т.п. В курортных зонах берегозащитные сооружения используются для сохранения, создания и расширения пляжей.

К ***берегозащитным мероприятиям*** относят целый комплекс инженерных сооружений и работ, снижающих или исключающих процесс береговой абразии. К защитным сооружениям на берегах морей относят:

- буны и волноломы, форма и конструкция которых может быть весьма различна;
- защитные волноприбойные стенки и набережные;
- береговые опояски;
- защитные наброски из бетонных блоков (тетраподов и др.) или камней (валунов).

Все берегозащитные сооружения, согласно СНиП 2.06.01-86[1], относятся к основным гидротехническим сооружениям. Главными задачами, выполняемыми берегозащитными сооружениями, являются (Кофф и др., 2003): защита участков побережья и расположенных на нем строений от разрушающего воздействия волн; защита прибрежных территорий от затопления и подтопления; благоустройство прибрежной зоны. Среди разнообразных конструкций берегозащитных сооружений

[1] Заменен на СТО 70238424.27.140.002-2010 "Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Условия создания. Нормы и требования".

выделяются волноотбойные стены, откосные сооружения, молы, волноломы, буны. Они могут выполнять как одну, так и несколько нижеперечисленных функций. Согласно п. 6.1 и табл. 3 СНиП 2.01.15-90[1], берегозащитные сооружения могут быть:

- волнозащитными;
- волногасящими;
- пляжеудерживающими (наносоудерживающими);
- специальными.

Так, волноотбойные (подпорные) береговые стены (в том числе набережные) относятся к волнозащитным сооружениям; откосные сооружения являются как волнозащитными, так и волногасящими; молы - волнозащитными и пляжеудерживающими; волноломы - волногасящими и пляжеудерживающими. Буны относятся к пляжеудерживающим сооружениям, а искусственные свободные пляжи и различные наброски - к волногасящим сооружениям. Естественные пляжи также выполняют волногасящую функцию. При необходимости в состав комплекса морских берегозащитных сооружений включаются сооружения, регулирующие сток устьевых участков рек в целях изменения береговой зоны или обеспечения ее речными наносами (п. 6.4 СНиП 2.01.15-90[2]). Они относятся к специальным сооружениям (Кофф и др., 2003).

6.5.4. Методы управления водной эрозией в ЭГС. Мероприятия по управлению водной эрозией на территории ЭГС определяются её видом: плоскостная, линейная (русловая, береговая и др.).

Методы инженерной защиты от ***плоскостной (склоновой) эрозии*** достаточно хорошо разработаны и зависят от вида и характера эрозионного нарушения, а также особенностей защищаемого сооружения. Так, например, для защиты линейных трубопроводов от склоновой плоскостной эрозии, согласно РД 51-2.4-007-97, рекомендуется:

- устройство водоотводных и дренажных сооружений;
- поверхностное закрепление грунта;
- биологическая рекультивация (Чибрик, 2002).

В качестве альтернативных защитных мероприятий также при этом согласно РД 51-2.4-007-97 рекомендуется:

- устройство перемычек в траншее;

[1] Заменен на СНиП 22-02-2003 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения».

- задержание и уменьшение стока с водосборной территории.

Предотвращение поверхностного смыва и вымывания грунта засыпки на склонах выполняется на основе прогнозного расчета размыва грунта засыпки на склоне ЭГС. Согласно РД 51-2.4-007-97 такой расчет выполняется на базе оценки донной допускаемой неразмывающей скорости течения воды, оцениваемой по параметрам склона, данных о слагающих его грунтах и др. параметрах.

Основными мероприятиями, предотвращающими поверхностный смыв и вымывание грунта засыпки на склоновых участках газопроводов, являются устройства открытого или закрытого дренажа и поверхностное или объемное закрепление грунта.

В последнее время появились новые технологии борьбы с плоскостной эрозией почв и других грунтов с помощью различных геокомпозитных материалов. Специальные материалы и технологии, разработанные с этой целью, позволяют предотвратить размывание почвы или иного грунта и целиком сохранить растительный покров, максимально сокращая воздействие воды, осадков и ветра на поверхность, способствуя росту и развитию растительности. Различными фирмами предлагается широкий ассортимент рулонных материалов из полиэстера, полиэтилена, полипропилена и поливинилхлорида: сетки "Hate-Gewebe" с различными размерами ячеек - плоские и объемные, сборные крупноячеистые ребристые покрытия "Armater", нетканые синтетические материалы для изготовления бентонитовых матов "Nabento", рулонный ячеистый материал "Enkamat" и многое другое. Геокомпозитные материалы выпускаются в виде специальных геоматов. Так, например, противоэрозионный геосинтетический материал K-Mat позволяет удовлетворить самым разным потребностям в области защиты почв и иных грунтов от эрозии и восстановления окружающей среды.

Управление овражной эрозией в пределах ЭГС является одной их важных задач. При этом отметим, что для биоты овражная эрозия как правило является благоприятным процессом, а для человека – неблагоприятным. Для эффективного предупреждения овражной эрозии применяют различные комплексные мероприятия (Моисеев В.Ю. и др., 1974), которые работают в пассивном режиме и не требуют автоматизированного управления (за исключением систем автоматизированного контроля за овражной эрозией, работающих как подсистема мониторинга):

- агротехнические приёмы, которые устраняют или уменьшают поверхностный сток и способствуют задержанию влаги на полях:

почвозащитные севообороты, вспашка и последующие обработки почвы поперёк склонов, применение геоматов;

- прерывистое бороздование, щелевание;
- полосное размещение сельскохозяйственных культур, создание поперёк склонов полос-буферов из многолетних трав, заравнивание промоин и др., а также посадку водопоглощающих лесных полос по горизонталям склоновых земель;
- создание защитных противоэрозионных конструкций и закрепление оврагов;
- регулирование поверхностного стока (Королев, 2013).

6.5.5. Управление речной эрозией в пределах ЭГС является весьма распространенной задачей. Все методы борьбы с речной эрозией в ЭГС не требуют автоматизированного управления процессом и осуществляются в пассивном режиме. Исключение составляют лишь системы автоматизированного контроля за речной эрозией, работающие как компонент мониторинга (концептуальную схему которого см. на рис. 4.5). Активная речная эрозия является существенным фактором, влияющим на расположенные в речной долине инженерные сооружения и ЭГС. Известны многочисленные случаи, когда приходилось переносить дальше от берега те или иные сооружения и даже города.

Как и для прочих видов эрозии, защитные мероприятия от речной эрозии проводятся в двух направлениях: профилактическое и защита инженерными сооружениями. Первое направление сводится к агротехническим и лесотехническим *предупреждающим* мерам и редко к строительству укрепительных или защищающих от воздействия водного потока сооружений (каменные пригрузки, регуляционные канавы и др.). К *профилактическим* же мероприятиям относится и регулирование водного режима реки, особенно в периоды весенних и осенних половодий, т.к. большинство рек уже имеет зарегулированный сток (Королев, 2013).

Второе направление включает строительство защитных сооружений. Капитальные сооружения строятся для борьбы с боковой эрозией, с гравитационными явлениями на береговых склонах и на участках, угрожающих устойчивости зданий и сооружений. Эти сооружения чаще всего представлены подпорными и защитными стенками, банкетами, пригрузочными призмами. Капитальные сооружения от наводнений (плотины и дамбы) не следует рассматривать как противоэрозионные.

Одним из эффективных методов борьбы с боковой эрозией является строительство струенаправляющей стенки, располагающейся под углом к направлению течения реки и отклоняющей его от берега. Для этих же целей возводят защитные дамбы и буны, регулирующие направление течения реки.

Для борьбы с донной речной эрозией (ниже меженного горизонта) применяют укрепление дня каменной наброской и фашинными тюфяками, загруженными камнем. Донная эрозия особо опасна для опор мостов, поэтому они должны иметь достаточное заглубление (Королев, 2013).

6.5.6. Управление селями. Управление селевыми потоками в пределах ЭГС и защита территорий и сооружений от селевых потоков является очень сложной и дорогостоящей задачей. Для явлений с опасными, часто катастрофическими последствиями необходимо прежде всего точно ранжировать защитные мероприятия по времени и месторасположению. Исходя из известных случаев селевых явлений, из закономерностей их формирования и развития, а также из роли различных природных и техногенных условий факторов, следует сгруппировать все возможные защитные мероприятия в три категории (Иванов, Тржцинский, 2001):

- предупреждающие возникновение селевого потока;
- ограничивающие разрушительную работу селя;
- ликвидирующие последствия селевого потока.

Мероприятия всех трех категорий могут быть обоснованы только на базе работы современного геодинамического мониторинга регионального или локального масштаба. Кроме того, имеет смысл говорить о специальном, селевом, мониторинге.

Согласно СНиП 22-02-2003 селезадерживающие плотины, разрушение которых угрожает катастрофическими последствиями, необходимо проверять на воздействие селя, вызванного паводком, с вероятностью превышения 0,01 %. При этом проектом следует предусматривать устройство поверхностных селесбросных сооружений, обеспечивающих сброс избыточного (по сравнению с расчетным) объема селевого потока или повышение отметки гребня плотины, обеспечивающее аккумуляцию всего объема селевого потока.

При проектировании селезадерживающих плотин следует предусматривать водопропускные сооружения для пропуска в нижний бьеф бытового стока реки, а также сброса водной составляющей наносоводных селей. При этом сбросной расход не должен превышать

критического селеобразующего расхода, определяемого для участка ниже створа плотины.

Согласно СНиП 22-02-2003 селезадерживающие плотины, разрушение которых угрожает катастрофическими последствиями, необходимо проверять на воздействие селя, вызванного паводком, с вероятностью превышения 0,01 %. При этом проектом следует предусматривать устройство поверхностных селесбросных сооружений, обеспечивающих сброс избыточного (по сравнению с расчетным) объема селевого потока или повышение отметки гребня плотины, обеспечивающее аккумуляцию всего объема селевого потока.

При проектировании селезадерживающих плотин следует предусматривать водопропускные сооружения для пропуска в нижний бьеф бытового стока реки, а также сброса водной составляющей наносоводных селей. При этом сбросной расход не должен превышать критического селеобразующего расхода, определяемого для участка ниже створа плотины (Королев, 2013).

6.5.7. Управление наводнением и затоплением территорий ЭГС. Системы управления наводнениями и затоплениями территорий от затопления — это гидротехнические сооружения защитного и регулирующего назначения, объединенные в единую территориальную систему, обеспечивающую инженерную защиту территории от затопления и подтопления.

При проектировании инженерной защиты территории от затопления и подтопления надлежит разрабатывать комплекс мероприятий, обеспечивающих предотвращение затопления и подтопления территорий в зависимости от требований их функционального использования и охраны природной среды или устранение отрицательных воздействий затопления и подтопления. Организация инженерной защиты от затопления и подтопления регламентируется СНиП 2.06.15-85[1].

Согласно СНиП 2.06.15-85 в качестве основных средств инженерной защиты следует предусматривать обвалование, искусственное повышение поверхности территории, руслорегулирующие сооружения и сооружения по регулированию и отводу поверхностного стока, дренажные системы и отдельные дренажи, и другие защитные сооружения.

В качестве вспомогательных средств инженерной защиты надлежит использовать естественные свойства природных систем и их

[1] Заменен на СП 104.13330-2016 «Инженерная защита территории от затопления и подтопления. Актуализированная редакция СНиП 2.06.15-85».

компонентов, усиливающие эффективность основных средств инженерной защиты. К последним следует относить повышение водоотводящей и дренирующей роли гидрографической сети путем расчистки русел и стариц, фитомелиорацию, агролесотехнические мероприятия и т.д.

В состав проекта инженерной защиты территории надлежит включать организационно-технические мероприятия, предусматривающие обеспечение пропуска весенних половодий и летних паводков.

Управление территорией ЭГС при затопления следует осуществлять:

- обвалованием территорий со стороны реки, водохранилища или другого водного объекта;
- искусственным повышением рельефа территории до незатопляемых планировочных отметок;
- аккумуляцией, регулированием, отводом поверхностных сбросных и дренажных вод с затопленных, временно затопляемых, орошаемых территорий и низинных нарушенных земель.

В состав средств инженерной защиты от затопления могут входить:

- дамбы обвалования,
- защитные барьеры,
- дренажи,
- дренажные и водосбросные сети,
- нагорные водосбросные каналы,
- быстротоки и перепады,
- трубопроводы и насосные станции.

В случае организации автоматизированного водоотлива на затопляемой территории концептуальная схема управления такой системой будет аналогична, рассмотренной выше на рис. 6.6.

В зависимости от природных и гидрогеологических условий защищаемой территории системы инженерной защиты могут включать несколько вышеуказанных сооружений либо отдельные сооружения (Королев, 2013).

6.5.8. Управление карстом. Под управлением карстовыми процессами подразумевается система мероприятий, позволяющих снизить карстовую опасность на территории ЭГС и замедлить (или ликвидировать) развитие современного карстового процесса. При этом следует иметь ввиду, что карстовый процесс развивается чрезвычайно медленно.

Для недопущения развития негативных процессов, связанных с карстом, разрабатывают системы инженерной защиты. В них предусматриваются две группы мероприятий: профилактические и инженерные (конструктивные). К профилактическим мероприятиям относятся (Королев, 2019а):

- организация поверхностного стока;
- дренаж и отвод агрессивных вод;
- организация мониторинга.

К конструктивным мероприятиям относятся:

- закрепление карстующихся массивов методами технической мелиорации грунтов (тампонирование трещин, цементация пустот и т.п.);
- закрепление поверхности карстующегося массива (защитные экраны);
- особые формы фундаментов и т.п.;
- специальные конструктивные мероприятия (противофильтрационные завесы и т.п.). Большинство указанных методов реализуется в пассивном режиме и не требует организации автоматизированного управления.

Для защиты оснований гидротехнических и иных ответственных сооружений, строящихся на потенциально карстующихся породах, применяют противофильтрационные завесы, предотвращающие активизацию подплотинной или обходной фильтрации и тем самым снижающие риск возникновения карста.

Если применением геотехнических мероприятий возможность образования карстовых (и карстово-суффозионных) деформаций полностью не исключена, а также в случае технической невозможности или нецелесообразности их применения должны предусматриваться конструктивные мероприятия, назначаемые согласно СНиП 2.02.01, исходя из расчета фундаментов и конструкций сооружения с учетом образования карстовых деформаций.

Конструктивные мероприятия применяют отдельно или в комплексе с геотехническими мероприятиями. В их состав могут входить

- специальные конструктивные решения фундаментов (на естественном основании и свайных);
- надфундаментные и поэтажные пояса;
- пространственные рамы.

Технологические противокарстовые мероприятия включают: повышение надежности технологического оборудования и коммуникаций, их дублирование, контроль за давлением в

коммуникациях и утечками из них, обеспечение возможности своевременного отключения аварийных участков и т.д. В состав эксплуатационных противокарстовых мероприятий (мониторинга) входят:

- постоянный геодезический контроль за оседанием земной поверхности и деформациями зданий и сооружений;
- наблюдения за проявлениями карста, состоянием грунтов, уровнем и химическим составом подземных вод;
- периодическое строительное обследование состояния зданий, сооружений и их конструктивных элементов;
- система автоматической сигнализации на случай появления недопустимых карстовых деформаций;
- устройство (и периодическое наблюдение) глубинных марок, реперов и маяков на трещинах строительных конструкций;
- контроль за выполнением мероприятий по борьбе с инфильтрацией поверхностных, промышленных и хозяйственно-бытовых вод в грунт, запрещение сброса в грунт химически агрессивных промышленных и бытовых вод;
- контроль (и ограничение) за взрывными работами и источниками вибрации (Королев, 2013).

6.5.9. Управление суффозией сводится к комплексу мероприятий, обеспечивающих снижение или ликвидацию проявления этого процесса и описанных в литературе (Королев, 2019а).

Для борьбы с суффозией применяют различные противосуффозионные пассивные мероприятия:

- закрепление массива методами технической мелиорации грунтов (тампонирование и др.);
- снижение водопроницаемости массива;
- снижение напоров, специальный дренаж;
- пригрузка склона.

6.5.10. Управление заболачиванием и подтоплением. Заболачивание не является катастрофическим процессом, тем не менее этот процесс существенно усложняет условия строительства и эксплуатации различных инженерных сооружений. Поэтому для борьбы с заболачиванием в инженерно-геологических целях применяют различные мероприятия, а также специальные конструктивные схемы строительства на заболоченных территориях. К ним относятся (Королев, 2019а):

- осушение болот путем создания систем дренажа территорий;

- создание насыпей под сооружения;
- создание песчаных или специальных дрен (заполненные дрены);
- замораживание;
- применение свайных оснований и др.

В бывшем СССР широко вели осушение, мелиорацию и освоение низинных болот под травосеяние, овощи (капуста, морковь), зерновые (овёс, рожь), технические (конопля, лён) и силосные культуры. В результате этого были окультурены обширные болота долины Яхромы (Московская область), на болотах Колхиды культивируются цитрусовые; был составлен проект мелиорации болот Барабинской низменности, освоены в значительной части болота Полесья.

Как известно *подтопление территорий* – это комплексный процесс, проявляющийся под действием техногенных и, частично, естественных факторов, при котором в результате нарушения водного режима и баланса территории за расчетный период времени происходит повышение уровня подземных вод, достигающее критических значений, требующих применения защитных мероприятии. Под подтоплением — повышение уровня подземных вод и увлажнение грунтов зоны аэрации, приводящие к нарушению хозяйственной деятельности на данной территории, изменению физических и физико-химических свойств подземных вод, преобразованию почв и других грунтов, видового состава, структуры и продуктивности растительного покрова, трансформации мест обитания животных.

Зоной подтопления называют территорию, подвергающуюся подтоплению в результате строительства водохранилищ, других водных объектов и застройки или в результате воздействия любой другой инженерно-хозяйственной деятельности.

Наиболее опасно, когда подтопление затрагивает различные неблагоприятные грунты: просадочные, набухающие, пылевато-глинистые заторфованные, засоленные грунты и т.п. Для защиты земель от подтопления строят осушительные системы — дренаж горизонтальный, вертикальный или комбинированный с машинной откачкой воды. Дрены располагают по границе защищаемой территории. В качестве защитных мер применяют:

1. Дренаж территории;
2. Создание экранов, завес у зданий;
3. Гидроизоляцию фундаментов;
4. Борьбу с утечками;
5. Организацию поверхностного стока;
6. Создание комплексной схемы защиты (общее водопонижение).

Общая характеристика методов водопонижения и дренажа территорий ЭГС рассмотрена выше (Королев, 2013).

6.5.11. Управление дефляцией и ветровой эрозией. К основным мероприятиям по предотвращению развития дефляции, ветровой эрозии почв или корразии в пределах ЭГС относятся:

• *фитомелиорация*, особенно сельскохозяйственных угодий — закрепление развеваемых грунтов, включая почвы с помощью растительности;

• правильная *агротехника* на полях (для районов потенциальной опасности ветровой эрозии почв) и обоснованное ведение других видов сельского хозяйства, в т.ч. выпаса скота;

• создание *систем механического закрепления* грунтов — щиты, заборы из местных материалов (камыш, хворост и др.);

• закрепление поверхности грунтов и почв *геосинтетическими материалами;*

• закрепление поверхности грунтов вяжущими с помощью методов *технической мелиорации*;

• создание вдоль различных линейных сооружений (дорог, трубопроводов и др.) *лесозащитных полос* и полос механического закрепления грунтов;

• применение *защитных покрытий* от корразии.

Все перечисленные мероприятия работают в пассивном режиме и не требуют организации системы автоматизированного управления ими.

Нормативные документы, регламентирующие размещение лесных полос основаны, главным образом, на учете двух важнейших факторов – лесорастительных условий и размера эффективных ветрозащитных зон с заветренной и наветренной сторон лесных полос. Первый из этих факторов определяет проектную и фактическую защитную высоту лесных полос, долговечность лесонасаждений, а второй обусловливает нормативную величину межполосного пространства, равную 30 Н (проектная высота насаждения), или с учетом проектной высоты лесных полос – 200…600 м. Продольные (основные) полезащитные лесные полосы располагаются перпендикулярно к господствующим в данной местности вредоносным ветрам (суховейным, метелистым, вызывающим пыльные бури), а поперечные (вспомогательные) – как правило, перпендикулярно продольным (рис. 6.17). Отклонение продольных лесных полос от указанного выше положения допускается до 30^{o}.

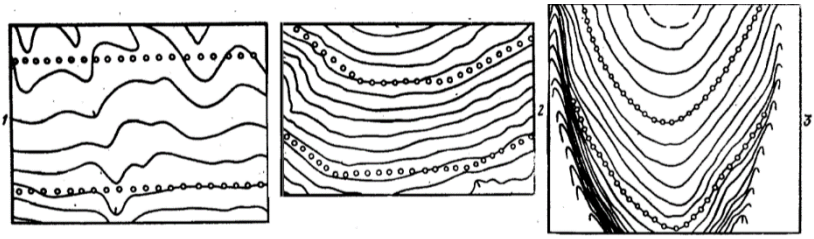


Рис.6.17. Способы трассирования лесных полос на склонах разной формы: 1) прямолинейно-параллельный на нейтральном склоне; 2) контурно-параллельный на рассеивающем склоне с субпараллельными горизонталями; 3) контурный на рассеивающем склоне с непараллельными горизонталями (Метод. рекомендации…, 2005)

Расстояние между продольными полезащитными лесными полосами на землях, не подверженных или слабо подверженных дефляционным процессам, не должно превышать: на серых лесных почвах, оподзоленных и выщелоченных черноземах – 600 м, типичных и обыкновенных черноземах – 500 м, южных черноземах – 400 м, темно-каштановых и каштановых почвах – 350 м, светло-каштановых почвах – 250 м, песчаных почвах лесостепи – 400 м, степи – 300 м, полупустыни – 200 м. Для проезда сельскохозяйственных агрегатов и машин с одного поля на другое в местах пересечения основных и вспомогательных лесных полос оставляют разрывы шириной 30 м. Полевые дороги проектируют вдоль лесной полосы с наиболее освещенной стороны (Метод. рекомендации…, 2005).

На богарных землях лесонасаждения создают в основном рядовым способом. В отдельных регионах применяют диагонально-групповой и шахматный способ посадки. На солонцеватых почвах сухой степи используют куртинный способ по микрозападинам, а на почвах подверженных ветровой эрозии – кулисный из кустарников. Почву под лесные полосы готовят (с учетом почвенно-климатических особенностей) в лесостепи, как правило, по системе раннего пара, а в степи по системе черного пара. На чистых от сорняков полях в лесостепи европейской части страны допускается посадка лесных полос по глубокой зяби.

К основным защитным мерам от эоловой аккумуляции и *движущихся песков* относятся:

- фитомелиорация – высадка растений, создание защитных лесополос и т.п.;
- искусственные преграды (щиты, стенки, заборы и т.п.);

- закрепление верхнего слоя песков (методами технической мелиорации – битумизация и др.);
- создание искусственного почвенного слоя;
- изменение гранулометрического состава пород верхнего слоя.

Выбор того или иного метода инженерной защиты определяется конкретными инженерно-геологическими условиями территории, типом и конструкцией защищаемых сооружений. Чаще всего при разработке схем инженерной защиты от ветровой эрозии применяются комплексы защитных методов (Королев, 2013).

6.5.12. Управление криогенными процессами в ЭГС представляет собой различные способы борьбы с такими процессами как морозное пучение, наледообразование, солифлюкция, термокарст и др. Следует отметить, что методы управления криогенными процессами наиболее сложны и часто трудно реализуемы. Большинство этих методов работает в пассивном режиме и не требует организации системы автоматизированного управления (Кондратьев, 2010).

Для управления ***морозным пучением*** применяют инженерно-мелиоративные; конструктивные; физико-химические и комбинированные. Тепломелиорация направлена на ускорение смерзания свайных фундаментов по боковой поверхности сваи с грунтом, что ведет к заанкериванию фундамента и уменьшению сил морозного пучения. Тепломелиоративные мероприятия заключаются в теплоизоляции фундамента; прокладке вблизи фундамента по наружному периметру подземных коммуникаций, выделяющих в грунт тепло.

Гидромелиоративные мероприятия сводятся к понижению уровня грунтовых вод, осушению грунтов в пределах сезонно-мерзлого слоя и предохранению грунтов от насыщения поверхности атмосферными и производственными водами. Применяют открытые и закрытые дренажные системы (лотки, канавы, трубы). Конструктивные противопучинные мероприятия предусматривают повышение эффективности работы конструкций фундаментов и сооружений в пучиноопасных грунтах и предназначаются: для снижения усилий, выпучивающих фундамент; для заанкерирования фундаментов в талых и мерзлых грунтах, залегающих глубже сезонно-промерзающего слоя; для приспособления фундаментов и наземной части сооружения к неравномерным деформациям пучинистых грунтов. Для снижения касательных сил пучения следует:

- проектировать сооружения на столбчатых и свайных фундаментах;

- уменьшать число отдельно стоящих опор фундаментов с целью увеличения нагрузки на каждую опору; уменьшать сечение столбчатых фундаментов и свай в пределах промерзающего слоя;
- устраивать у железобетонных фундаментов наклонные боковые грани (1° - 2°), обеспечивающие увеличение сопротивления фундамента действию касательных сил пучения.

Для охлаждения мерзлых грунтов и предотвращения их оттаивания применяются различные охлаждающие устройства – термосифоны и термосваи (Кондратьев, 2010; Королев, 2013,2019).

Физико-химические противопучинные мероприятия основаны на применении различных методов технической мелиорации грунтов и сводятся к специальной обработке грунта вяжущими и стабилизирующими веществами, понижающими пучинистость или воздействию физических полей. Гидрофобизацию грунтов производят посредством обработки его экологически чистым веществом (полимером) при определенных гидротермических условиях. На основе электрокинетических процессов в грунтах основан способ их противопучинной электрохимической обработки.

Для ***управления наледообразованием*** используются методы и конструкции долговременного постоянного действия. *Свободный пропуск* наледи через зону искусственного сооружения применяют в районах развития средних и крупных наледей подземных вод (III и IV категорий), когда применение других мероприятий невозможно или экономически нецелесообразно. Для свободного пропуска наледи, как правило, сооружается мост с отверстием, которое должно быть рассчитано на пропуск всего объема паводковых и наледеобразующих вод по поверхности льда.

Безналедный пропуск водотоков применяют для защиты сооружений от воздействий средних и больших наледей поверхностных и подземных вод (III и IV категорий). Этот способ предусматривает сосредоточение водотока на подходах к защищаемому сооружению (часто это водопропускные сооружения) и создание оптимального теплового режима в зимнее время. Данный метод включает следующие мероприятия: концентрация потока поверхностных вод, спрямление и углубление русла, утепление водотока поверхностных и подрусловых вод, использование лотков различного типа (открытых, закрытых, утепленных), перехват и отвод подземных вод с помощью дренажных систем и каптажа источников, фильтрующие насыпи из крупнообломочного грунта. Выбор мероприятий по безналедному пропуску наледеобразующих вод производят на основании теплотехнического расчета из условия пропуска воды в течение всего

зимнего периода без ее замерзания. Мероприятия по задержанию наледи выше сооружения сводятся к искусственному ее формированию на безопасном расстоянии от него.

Удерживающие сооружения и мероприятия применяют на поверхностных водотоках с малыми расходами воды и низкой ее температурой, при неглубоко залегающих грунтовых водах и в местах выхода источников подземных (грунтовых) вод небольшого дебита (наледи II и I категорий). К удерживающим мероприятиям и устройствам относятся: противоналедные валы, заборы, водонепроницаемые экраны, мерзлотные пояса, наледные пояса, резервные выемки и бассейны в стороне от защищаемого сооружения, рассчитанные на максимальный объем наледи. *Противоналедные валы* могут быть земляными, ледогрунтовыми, снежными, ледяными, заборы - деревянными, бетонными. *Водонепроницаемый экран* представляет собой траншею, заполненную нефильтрующим (глинистым) грунтом. Устраивается на склонах и в узких долинах в комбинации с противоналедными валами и заборами поперек движения наледеобразующих вод на некотором удалении от сооружения. *Мерзлотный пояс* состоит из комбинации канавы и вала выше наледи. Сечение канавы должно обеспечить промерзание грунта до водоупорного слоя в начале зимнего периода (до появления наледи). Глубина канавы должна быть не менее 0,6 м, ширина по дну не менее 0,5 м. Вал, параллельный канаве, осуществляет непосредственное задержание самой наледи (Королев, 2013, 2019а).

Управление солифлюкцией на склонах осуществляется системой специальных мероприятий и превентивных мер, исключающих развитие солифлюкции в будущем. К ним относятся:

- фитомелиорация на склонах, меры по обеспечению сохранности естественной растительности на склонах;
- дренирование склонов;
- локальное уменьшение глубины сезонного оттаивания, стабилизация склонов микросваями и др.

К конструктивным инженерным мероприятиям для борьбы с уже возникшей солифлюкцией относят: планировку рельефа местности с выполаживанием склонов; регулирование термо-влажностного режима массива методами технической крио-мелиорации и т.п. Для борьбы с быстрой солифлюкцией и сплывами требуются специальные инженерные мероприятия, во многом аналогичные противооползневым (см. выше).

Управление термокарстом предполагает ряд мероприятий, не допускающих или частично допускающих протаивание верхних, как правило, наиболее льдистых горизонтов грунтовой толщи:

- сохранение напочвенных растительных покровов;
- отсыпка территории слоем песчаного или гравийно-песчаного грунта;
- укладка на поверхности грунта теплоизоляционных покрытий (тепловых экранов);
- устройство охлаждающих систем из труб вертикального и горизонтального заложения;
- создание вентилируемых подполий при строительстве зданий и сооружений со значительным тепловыделением;
- регулирование стока поверхностных вод.

Основной способ инженерной защиты территории от термокарста - *отсыпка* застраиваемой территории песчаным и гравийно-песчаным грунтом, толщину которой определяют теплотехническим расчетом. Отсыпка может выполняться в зависимости от инженерно-геокриологических условий и функциональных особенностей сооружений сплошной по всей застраиваемой территории или под отдельные сооружения и их группы. Отсыпку производят в зимний период после промерзания сезонно-оттаивающего слоя с послойным уплотнением насыпного грунта. Проезд используемой техники допускается только по отсыпанному грунту с сохранением растительных покровов.

Следует заметить, что управление многими криогенными процессами (курумы, термоабразия и др.) является наиболее сложной, а иногда и не выполнимой задачей.

Таким образом, большинство имеющихся методов управления экзогенными геологическими процессами реализуется в пассивном режиме и не требует организации систем автоматизированного управления.

6.6. Методы управления литотехническими системами.

В техногенных ЭГС существенную роль играет литотехническая система или подсистема. Поэтому в управлении ЛТС большое значение имеет геологическое обоснование этого процесса.

Согласно А.Н.Галкину (2012), инженерно-геологическое обоснование управления литотехнической системой определяется как технологическая процедура в системе управления ЛТС, направленная на выбор среди множества альтернативных вариантов такого инженерно-геологического мероприятия (или их комплекса),

применение которого необходимо и достаточно для обеспечения оптимального режима функционирования ЛТС.

Анализ теории и практики управления различными природными и природно-техническими системами позволяет установить необходимость применения в процессе выработки геологически обоснованных управленческих решений следующих основополагающих научных подходов: системного, ситуационного, динамического и сценарного (рис.6.18).

Рис.6.18. Реализация методологических подходов на разных этапах выработки геологически обоснованных управленческих решений для оптимизации функционирования ЛТС (по А.Н.Галкину, 2012)

Системный подход предполагает рассмотрение литотехнической системы как совокупности ее взаимосвязанных элементов (геологической и технической подсистем), обладающих благодаря их взаимосвязи качественно новыми характеристиками (причем каждая ЛТС выступает элементом системы более высокого порядка, а любой ее элемент — системой более низкого порядка). Этот подход дает возможность учесть все необходимые взаимосвязи и взаимодействия в систе ме управления ЛТС и ее подсистемами, позволяет при постановке целей всесторонне анализировать, взвешивать факторы и направлять механизмы управления на достижение поставленных целей.

Ситуационный подход сосредоточивается на том, что обоснование различных методов управления ЛТС и ее компонентами, главным образом геологической средой, определяется конкретной ситуацией — совокупностью условий, возникающих под влиянием внутренних и внешних воздействий в некоторый момент времени. Основанием применения данного подхода в управлении ЛТС является «поведение» режима ее функционирования. Это обусловлено тем, что происходящие изменения параметров состояния литотехнической системы (или развитие инженерно-геологических процессов) на разных этапах ее существования могут быть как значительными, так и малозначимыми, иногда даже не поддающимися прогнозу. Последние, несмотря на свое «слабое» проявление, впоследствии способны оказать существенное влияние как на отдельные подсистемы ЛТС и их элементы, так и на всю систему в целом.

Динамический подход применяется в дополнение к ситуационному. При его использовании геологическая среда, как компонент ЛТС, рассматривается в ее диалектическом развитии, причинно-следственных связях и соподчиненности. Для этого проводятся ретроспективный анализ состояния геологической среды за определенный промежуток времени и прогнозная оценка ее дальнейшего развития.

Сценарный (поисковый) *подход* позволяет проводить многовариантный ситуационный анализ применения разнообразных методов управления (или мероприятий по управлению) ЛТС и ее компонентами с учетом возможностей и ограничений (рисков) каждого из них для обеспечения оптимального режима на всех этапах развития системы. По существу, сценарий выступает в роли качественной и количественной оценки вероятного развития различных геологических и инженерно-геологических процессов, которые возникли или могут возникнуть в будущем при создании, эксплуатации или ликвидации ЛТС, и их влияния на состояние компонентов системы (прежде всего

геологической среды) в случае использования какого-либо специального мероприятия или комплекса мероприятий.

Преимущество сценарного подхода заключается в возможности заблаговременного выявления неэффективных с точки зрения последствий управленческих решений, разработки множества вариантов развития ситуаций и прогнозирования состояния геологической среды в каждой из них. Методологически сценарный подход в общей схеме выработки управленческих решений используется на последних ее этапах (см. рис. 6.18), когда необходимо осуществлять поиск и формирование набора вариантных решений (альтернатив), отбор критериев выбора оптимального решения и в результате выбор и принятие наилучшего решения.

***

Глава 7
МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭДАФОТОПОМ ЭГС

Методы управления техно-природными, природно-техногенными и искусственными эдафотопами ЭГС разработаны в агротехнике и применяются в основном для сохранения и повышения плодородия почв техногенно-нарушенных или освоенных территорий.

Методы управления природными эдафотопами ЭГС менее разработаны. Они применяются в комплексе с другими работами по управлению ЭГС и экосистемами в целом. Особенно большое значение эти работы имеют для особо охраняемых природных территорий, национальных парков, заказников и т.п.

Для управления эдафотопами применяются различные агротехнологии. По фактору интенсивности предложено различать четыре категории технологий:

Экстенсивные технологии, ориентированные на использование естественного плодородия почв без применения удобрений и других химических средств или с очень ограниченным их использованием.

Нормальные технологии, обеспеченные минеральными удобрениями и пестицидами в том минимуме, который позволяет осваивать почвозащитные системы земледелия, поддерживать средний уровень окультуренности почв, устранять дефицит элементов минерального питания, находящихся в критическом минимуме и давать удовлетворительное качество продукции. В этих технологиях используются пластичные сорта зерновых.

Интенсивные технологии, рассчитанные на получение планируемого урожая высокого качества в системе непрерывного управления продукционным процессом сельскохозяйственной культуры, обеспечивающие оптимальное минеральное питание растений и защиту от вредных организмов и полегания. Интенсивные технологии предполагают применение интенсивных сортов и создание условий для более полной реализации их биологического потенциала. Интенсивные технологии, рассчитанные, например, на 40-50 ц/га озимой пшеницы высокого качества, могут быть реализованы с использованием отечественной серийной техники, сортов, удобрений и импортных пестицидов.

Высокоинтенсивные технологии, рассчитанные на достижение урожайности культуры, близкой к ее биологическому потенциалу с заданным качеством продукции с помощью современных достижений научно-технического прогресса при минимальных экологических рисках. Они относятся к категории так называемого точного земледелия

с использованием прецизионной техники, современных препаратов, информационных технологий. Высокоинтенсивные, или высокие технологии являют собой качественный скачок и в создании сортов, и в подготовке почвы, и в насыщении технологическими операциями по уходу за посевами. В высоких технологиях достигается максимальная интеграция агроприемов с учетом их системного взаимодействия. Их следует осваивать в первую очередь в опытных и базовых хозяйствах научных центров для демонстрации возможностей научно-технического прогресса.

Современное *программное управление* в так называемом «точном» (управляемом или автоматизированном) земледелии осуществляется на базе ГИС-технологий путем предварительного исследования вариабельности почвенного покрова поля и составления электронной карты поля на стационарном компьютере. Программа дифференцированной по полю технологии также разрабатывается на базе этого компьютера, который используется в режиме “off line”. Разработанная программа записывается на дискету и вводится в бортовой компьютер, который и реализует ее выполнение. При применении другого способа управления, “on line”, управляемая величина, например, содержание азота в растениях, измеряется непосредственно в процессе работы агрегата по полю. Текущее значение дефицита азота используется непосредственно для выработки управляющего сигнала, командующего внесением той или иной дозы азотного удобрения.

Применение технологий точного земледелия требует оснащения предприятия специальным оборудованием и программным обеспечением (Метод. рекомендации…, 2005). Пример концептуальной схемы автоматизированного управления эдафотопом ЭГС в пределах агросистемы при точном земледелии показан на рис. 7.1. В эту систему входят следующие элементы (см. рис.7.1):

1. Навигационная система – глобальная система позиционирования (ГСП, например ГЛОНАС) с вводом данных в бортовой компьютер. Именно с появлением ГСП открылись принципиальные возможности для перехода от традиционной технологии к той, в которой можно именять воздействия на агроэкосистему с учетом локальной изменчивости свойств почвенного покрова в пределах поля.

2. Комбайн(ы) для уборки зерновых или корне-клубнеплодов с дифференциальным измерением величины урожая, составляющий управляющее устройство ($УУ_{эр}$). Составление карт изменчивости

урожайности с использованием таких комбайнов является первым шагом в переходе к точному земледелию.

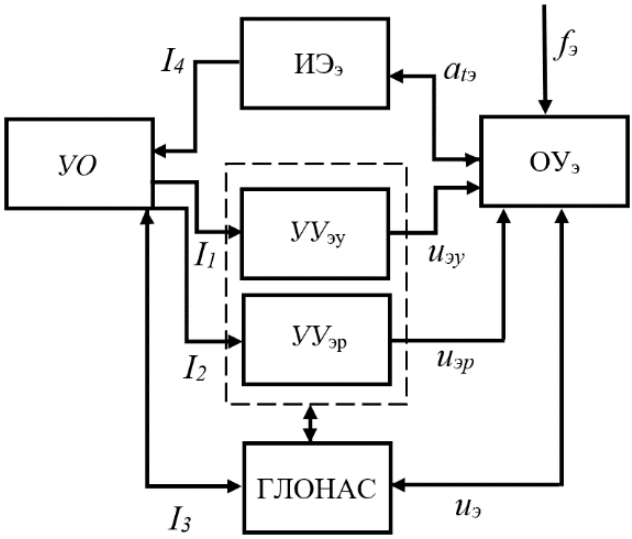


Рис. 7.1. Концептуальная схема автоматизированного управления эдафотопом агросистемы при точном земледелии (объяснения в тексте)

3. Аппаратура (*ИЭ*$_э$) для исследования изменчивости характеристик почвы ($a_{tэ}$) в пределах поля с использованием автоматизированных средств, в которых соответствующая аппаратура размещается либо на самом движителе, либо на прицепном устройстве к нему, что позволяет составлять электронные карты параметров состояния поля в автоматизированном режиме.

4. Рабочие органы (*УУ*$_{эу}$) с компьютерным управлением технологическими операциями ($u_{эу}$) (норма высева, дозы внесения агрохимикатов, удобрений и т.п.), функционирующие на комбайнах, показанных на рис. 7.1 пунктиром.

5. Управляющий объект (*УО*) (оператор) с стационарным компьютером с программным обеспечением, выполняющим следующие функции: а) ведение картотеки полей с использованием геоинформационных систем (ГИС); б) анализ вариабельности характеристик почвенного и растительного покрова; в) формирование программы и ее запись и т.п.

6. Бортовые компьютеры с программным обеспечением, установленные в блоках ($УУ_{эу}$) и ($УУ_{эр}$), реализующими программы управления, осуществляющие следующие функции: а) прием сигналов от ГСП и других датчиков в процессе движения агрегата по полю; б) накопление измеренных данных с использованием ГИС-технологии; в) формирование управляющих сигналов для дифференцированного выполнения тех или иных технологических операций.

Основная опасность для почв связана с их потерей плодородия и *эрозией*. Крайней степенью эрозии почв является ***опустынивание***. При умеренном опустынивании пастбищ и пахотных земель их продуктивность падает на 10—25 %, при сильном — на 25—50 %. Очень сильное опустынивание означает падение продуктивности земли более чем вдвое и образование на месте плодородных угодий глубоких оврагов и песчаных дюн. Опустынивание может происходить и в силу естественных причин, но в природе это достаточно медленный процесс, к тому же, как правило, обратимый, и происходит он на границах существующих пустынь.

Под антропогенным воздействием опустынивание может происходить гораздо быстрее и охватывать территории, далёкие от природных пустынь, но находящиеся в зонах недостаточного увлажнения. Судя по всему, современные полупустыни и пустыни Ближнего Востока, а возможно, и большая часть Сахары — дело рук человека.

Основными причинами антропогенного опустынивания являются (Гальперин, 2003):

• перевыпас скота на протяжении длительного времени;

• неправильное орошение, ведущее к засолению почв и раз рушению их верхнего слоя;

• распашка земель, в принципе непригодных для земледелия;

• вырубка и уничтожение лесов и кустарника;

• деградация земель за счет многолетней добычи полезных ископаемых, строительства и пр.

Для ***подавления эрозионных*** процессов в эдафотопе существует целый ряд эффективных приёмов, в основном пассивного типа не требующих автоматизированного управления. Чтобы сохранить почвенную структуру, минимизируют механическое воздействие на почву, используя безотвальную обработку. Верхний слой почвы при этом рыхлится без переворачивания пластов. В результате сохраняются прошлогодние растительные остатки и влага и уменьшаются расходы энергии на обработку. Однако при этом приходится использовать много гербицидов — пестицидов, предназначенных для борьбы с сорняками.

На склонах пахота и сев должны вестись строго поперёк, а не вдоль склона. Тогда ряды растений препятствуют стоку воды и смыву верхнего слоя почвы. На более крутых склонах используется террасирование.

На поливных землях должны применяться дождевальные установки, позволяющие минимизировать смыв верхнего слоя почвы и правильно дозировать поступление воды, чтобы избежать заболачивания и засоления.

Особую роль в сохранении почв способны сыграть меры, которые можно назвать экологическими. В их основе лежит восстановление видового и ландшафтного разнообразия в антропогенных системах, что является основным условием повышения системной устойчивости любого биоценоза, а также в максимально возможной степени восстановление в антропогенных биогеоценозах естественных геохимических круговоротов (Гальперин, 2003).

Сохранению почвы способствует использование чересполосицы, при которой сельскохозяйственные культуры высеваются чередующимися широкими полосами поперёк уклона. Этот приём используется совместно с севооборотом на полосах. Чередование полос не только снижает эрозию. Посев на части полос бобовых обогащает почву азотом, а смена типа растительности препятствует распространению болезней, сорняков и вредителей.

Чтобы избежать ***заовраживания***, производятся посадки деревьев и кустарников. Эти посадки одновременно дают приют птицам, истребляющим насекомых, что позволяет сократить использование инсектицидов. Уже образовавшиеся овраги перегораживаются плотинами, которые удерживают наносы, постепенно заполняющие сам овраг.

Лесопосадки в виде полос не только уменьшают смыв почвы, дают приют птицам и препятствуют миграции нежелательных видов. Они являются одним из главных средств борьбы с ветровой эрозией. Резко увеличивая трение воздушных потоков о поверхность, лесные полосы уменьшают поверхностную скорость ветра, что может практически полностью подавить ветровую эрозию и, во всяком случае, предотвратить возникновение пыльных бурь.

В природных экосистемах взятые из почвы питательные вещества возвращаются в неё, что обеспечивает поддержание её плодородия в естественных условиях. В антропогенных биогеоценозах этот геохимический цикл оказывается разорван, так как каждый раз, когда убирается урожай, вместе с ним с полей вывозится масса питательных веществ, которые оказываются утраченными для экосистемы. Эрозия

усиливает эту убыль. Так происходит истощение почв, эксплуатируемых в сельскохозяйственных целях. Поэтому эти почвы нуждаются в удобрениях и отдыхе (Гальперин, 2003).

Минеральные удобрения в силу относительной простоты применения наиболее употребительны в сельском хозяйстве. Они действительно позволяют пополнить запасы связанного азота, фосфора, калия и большинства других необходимых растениям веществ. Однако их применение недостаточно для полного восстановления почв и связано с рядом дополнительных проблем. Во-первых, они не пополняют утраченные запасы гумуса, а потому не восстанавливают структуру почвы, необходимую для удержания и накопления влаги. Нарушение структуры почвы и её уплотнение ведут к ухудшению аэрации корней. Среда обитания многочисленных организмов, живущих в почве и важных симбионтов растений, оказывается нарушенной. Во-вторых, использование искусственных минеральных удобрений связано с необходимостью расчёта точной дозировки при их внесении. Это требует достаточно развитой агрохимической инфраструктуры, обеспечивающей постоянный контроль химического состава почвы. Последнее доступно далеко не всем хозяйствам даже в наиболее развитых странах.

Для восстановления слоя гумуса почва нуждается в органических удобрениях, основу которых составляют навоз, перегной и компост, то есть отходы жизнедеятельности живых организмов (Гальперин, 2003).

Мероприятия, направленные на регуляцию параметров почв, включают комплекс противоэрозионных мероприятий, способствующих восстановлению и улучшению условий обитания диких животных (табл. 7.1).

Из обширного перечня сельскохозяйственных и лесохозяйственных противоэрозионных мероприятий выбираются наиболее соответствующие состоянию почвенного покрова и задачам данной ООПТ и возможностям его восстановления на отдельных участках и улучшения условий обитания диких животных. Применяются преимущественно на землях национальных парков (НП) и – по договоренности с землевладельцами и землепользователями – на землях сторонних пользователей в границах НП. Возможно использование в государственных природных заказниках (заказниках).

Особо важную задачу представляют способы очистки почв от загрязнений, которые являются первым, начальным звеном различных мероприятий по рекультивации (восстановлению) почв. Многие из методов очистки грунтов, рассмотренные выше, применимы и для почв.

Но некоторые из них, применимые для почв, имеют свои особенности. К ним, в частности, относятся мелиоративные методы.

Таблица 7.1

Перечень возможных регуляционных мероприятий, направленных на оптимизацию почв охраняемых экологических систем (Дёжкин, 1986).

Компоненты экологических систем	Регуляционные мероприятия	Примечания
Почвы	Противоэрозионные мероприятия на участках, пострадавших от прошлой хозяйственной деятельности Рекультивация участков, разрушенных (нарушенных) прошлой хозяйственной деятельностью	Проводятся методами, исключающими транс формацию ландшафтов и засорение флоры заповедника чуждыми видами

7.1. Мелиоративные методы

Промывка массивов от загрязнителя наиболее часто осуществляется по схеме рассоления грунтов (см. выше), например, применяемого при сельскохозяйственной мелиорации для ликвидации вторичного засоления почв (Королев, 2019а). В этом случае загрязнитель растворяется и разбавляется поступающей в массив водой и выносится либо в специально созданную дренажную систему, либо в нижележащие горизонты подземных вод.

Метод имеет ряд ограничений. Данный метод очистки может применяться лишь для таких загрязнителей, токсическое действие которых может быть снижено разбавлением водой, а также когда исключается вредное воздействие загрязнителя на подземные воды. Этот метод не применим к глубоко залегающим загрязнителям и в основном эффективен для удаления поверхностных водорастворимых загрязнителей. Метод требует значительного количества пресной воды.

Перед промывкой поверхность массива выравнивается, глубоко вспахивается и разбивается валиками на чеки - прямоугольные участки размером 0,1 -0,3 га. Затем чеки затопляют водой. Промывные нормы воды устанавливают в зависимости от степени загрязненности массива, водопроницаемости грунтов, состава загрязнителя, его растворимости и т.п. Например, для рассоления метрового слоя почвы необходимо 4-10 тыс. $м^3$/га воды.

Наряду с поверхностной промывкой для борьбы с засолением почв и иных грунтов применяют и ***сквозную промывку***, под которой понимают промывку водорастворимых солей из всей толщи горизонтов почвенного профиля, вынос солей в грунтовый поток и их удаление в условиях естественного или искусственного дренажа за пределы орошаемого массива. При этом способе происходит опреснение не только почвенной толщи, почвообразующих и подстилающих пород, но и поверхностных слоев грунтовых вод. Таким образом, при сквозной промывке исключается реставрация засоления, т.е. происходит коренная мелиорация массива.

В.А. Ковда предложил формулу (7.1), учитывающую физические свойства почв, глубину и минерализацию грунтовых вод:

$$M = n_1 \times n_2 \times n_3 \times 400 \times S \pm 100, \qquad (7.1)$$

где M – норма промывки (мм); S – среднее содержание солей в слое почвы 0–2 м (%); n_1, n_2, n_3 – коэффициенты, отражающие зависимость норм промывки от свойств почв и грунтовых вод (табл. 7.2).

Таблица 7.2

Величины коэффициентов n_1, n_2, n_3 для расчета нормы промывки
(по В.А. Ковде, 1947)

Гранулометрический состав	n_1	Глубина уровня грунтовых вод, м	n_2	Минерализация грунтовых вод	n_3
Песок	0,5	Более 7–10	1,0	Средняя и малая	1,0
Суглинок	1,2	5	1,5	Сильная	2,0
Глина	2,0	1,5-2,0	3,0	Рассолы	3,0

На практике объемы и нормы промывки достигают несколько тысяч кубических метров на гектар. Согласно И.С.Рабочеву нормы промывки почв указаны в табл. 7.3.

Промывные воды отводят через *рассоляющий дренаж* с тем, чтобы они не попали в нижележащие водоносные горизонты. Длительность промывки при рассолении доходит до 1 - 2 лет, при этом очистка массива никогда не бывает полной (Саакян С.В., 1993).

Промывки применяются на почвах, засоленных токсичными солями щелочных, щелочноземельных и/или тяжелых металлов, с целью детоксикации этих почв. Для полевых сельскохозяйственных культур толщина промываемого слоя составляет, как правило, 1.0 м. Для солеустойчивых культур и культур средней солеустойчивости, но с

неглубокой корневой системой (кормовая свекла, суданская трава, сорго, зерновые колосовые злаки, некоторые овощные культуры) допускается толщина промываемого слоя 0.5 м, если при этом степень засоления следующего полуметрового слоя почвы будет не выше слабой (Руководство…, 2017).

Таблица 7.3

Средние нормы полной промывки почв

Почвы	Среднезасоленные		Сильнозасоленные	
	Норма промывки, $м^3$/га	Количество промывок	Норма промывки, $м^3$/га	Количество промывок
Легкие и средние суглинки	2500–3000	2	3000–3500	2–3
Тяжелые суглинки и глины	3000–3500	2–3	4000–5000	3

Основным методом промывок, наиболее распространенным в производственных условиях, является затопление по чекам. Оптимальный срок проведения промывок затоплением - сентябрь-октябрь. Это период глубокого залегания УГВ, уменьшения испарения. В этот срок промывка является одновременно и влагозарядковым поливом. Подготовка к промывке включает вспашку, планировку поверхности, вторую вспашку, внесение кальциевых мелиорантов, боронование, устройство валиков для предотвращения поверхностного стока.

Методы борьбы с засолением почв. К засоленным относят почвы, если содержание солей в них превышает пороги токсичности, которые соответствуют: 1) концентрации солей в почвенном растворе - 3-5 г/л; 2) сумме токсичных солей, полученных методом водных вытяжек, - 0,05-0,15%; 3) удельной электропроводности фильтратов из насыщенных водой почвенных паст - 2-4 мСм/см (USDA Agriculture Handbook, 1954). При оценке пригодности почв для выращивания конкретных культур используются специальные группировки почв по засолению, разработанные с учетом солеустойчивости растений (Руководство…, 2017).

Для организации мероприятий по борьбе с засолением почв организуется ***экологический мониторинг*** (концептуальную схему которого см. на рис. 4.5), их состояния, включающий: 1) оценку изменения регионального влагооборота и частоты засух и суховеев; 2) оценку степени изменения природной структуры и состава биотических и абиотических элементов; 3) оценку относительной экологической

значимости этих элементов; 4) оценку уровня стабильности экосистем; 5) оценку стоимости утраченных экосистемных услуг (экологический ущерб).

Мелиоративные мероприятия, применяемы для борьбы с засолением почв, указаны в таблице 7.4 (Руководство…, 2017):

Таблица 7.4

Мелиоративные мероприятия против засоления

Группы	Виды	Способы
Гидротехнические	Оросительные системы	дождевание поверхностное орошение (по бороздам, полосам, затоплением) внутрипочвенное орошение капельное орошение
	Дренажно-оросительные системы	Способ орошения на фоне горизонтального дренажа Способ орошения на фоне вертикального дренажа
Химическая мелиорация	Гипсование Кислование и др.	Сплошное внесение в разброс компенсирующее локальное комбинированнное
Агротехническая мелиорация	Поверхностно-водорегулирующие мелиорации	Планировка поверхности Бороздование Гребневание Грядование
	Внутрипочвенно-водорегулирующие мелиорации	Глубокое рыхление почвы Щелевание Аэрационное кротование
Фитобиологическая мелиорация	Травяная мелиорация	Насыщение фитомелиорантами севооборотов Сидерация Секвестрация органического углерода Залужение
Культуртехническая мелиорациия	Мелиорация (окультуривание) поверхности земельной делянки	Освобождение поверхности от древесно-кустарниковых зарослей, пней, камней Уничтожение кочек, выполаживание
Структурная мелиорация	Структурное изменение твердой фазы пахотного слоя почвы	Пескование Глинование
	Структурное изменение почвенного профиля	Плантаж Глубокая полуотвальная вспашка Вертикальные скважины

В проектировании и строительстве мелиоративных систем и сооружений выделяются четыре блока: А. Оросительные системы (орошение); Б. Осушительные системы (осушение); В. Гидротехнические и другие сооружения вне оросительных и осушительных систем; Г. Эксплуатация, освоение и использование мелиорируемых земель и мелиоративных сооружений.

В будущем, возможно, появится необходимость выделения пятого блока (Д) по строительной базе мелиоративных объектов (заводы, полигоны, транспорт и пр.). Важнейшей составляющей оросительных и осушительных систем является режим орошения (осушения), ибо от его обоснования и соблюдения на практике зависят возможные отрицательные воздействия на почву, гидрологию, гидрогеологию, природные комплексы, здоровье людей и т.д. Режим орошения и осушения определяет параметры оросительной и осушительной сети, насосных станций и других гидротехнических сооружений, которые непосредственно воздействуют на окружающую среду (Половников, 2016; Руководство…, 2017).

7.2. Агротехническая рекультивация

Сельскохозяйственная рекультивация в пределах ЭГС является самой сложной, так как большинство сельскохозяйственных культур предъявляют повышенные требования к поверхностному слою почвы, поэтому принципиальное значение для оценки возможности биологической рекультивации для сельскохозяйственного использования имеет состав и свойства верхнего слоя рекультивируемых земель. Если нарушенные земли ЭГС предназначены для сельскохозяйственного использования, то общий состав работ биологической рекультивации может быть следующим:

– планировка поверхности земли и нанесение на нее почвенного слоя, особенно на субстраты, содержащие малопригодные породы (заключительные работы технической рекультивации);

– выращивание пионерных культур (однолетних или многолетних) для активизации процессов почвообразования;

– введение специальных севооборотов для восстановления и формирования почвенного слоя;

– применение приемов почвозащитного земледелия для повышения плодородия почвы и ее устойчивости против водной эрозии и дефляции;

– мониторинг почв природоохранными и санитарно-эпидемиологическими службами.

В проекте биологической рекультивации карьеров для сельскохозяйственного использования определяют период их освоения; состав, чередование и нормы высева предварительных культур; нормы и периодичность внесения удобрений, извести.

В зависимости от типа грунтовых толщ и характера их техногенной нарушенности, особенностей химико-минерального и гранулометрического состава и других показателей выбирается метод их биологической рекультивации согласно СНиП 2.04.03-85[1]. В соответствие с этим определяется та или иная группа пригодности биологической рекультивации.

Весьма важной физико-химической возможностью борьбы с радиоактивной загрязненностью почв является ***система агротехнических*** мер, направленных против поглощения радиоактивного стронция корневой системой. В этом плане можно упомянуть: а) работы, в которых имеется в виду снижение поглощения специальными методами обработки почв, их эффективность оказалась весьма малой; б) работы, в которых предполагается ослабление эффекта поглощения корнями растений путем известкования почв карбонатами и сульфатами для создания высокой концентрации ионов Ca^{2+} и удовлетворения потребностей растений в щелочноземельных элементах за счет кальция.

В том же направлении усиления сорбционных свойств почвы и более прочного закрепления поглощенных продуктов радиоактивного распада действуют внесенные в почву органические удобрения или, еще лучше, комбинации из извести и органических удобрений. Анализ показал, что при этом можно уменьшить содержание ^{90}Sr в соломе в 2—3 раза и в зерне в 3—5 раз. Внесение калия в комбинации с различными удобрениями приводит к снижению ^{137}Cs в урожае. Данный метод особенно эффективен на легких, кислых почвах, бедных кальцием (Нерпин С.В., Чудновский А.Ф., 1967; Королев, 2019а).

***

[1] Заменен на СП 32. 13330-2012 «Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85»

Глава 8
МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ БИОТИЧЕСКИМИ КОМПОНЕНТАМИ ЭГС

8.1. Общие положения

Прежде чем характеризовать методы управления биотическими (живыми) компонентами ЭГС необходимо заметить, что конкретные методы классической теории управления, связанные, например, с анализом передаточных функций, не всегда дают адекватное описание сложных биологических систем. Будучи приспособленными для решения относительно простых задач регулирования со сравнительно небольшим числом управляемых переменных, эти методы подчас малоприменимы для исследования биологических проблем, где даже при грубом упрощении приходится иметь дело с десятками и сотнями переменных и параметров. Таковы, например, задачи анализа биохимических или экологических систем, где рассматривается взаимодействие сотен компонент — различных веществ, участвующих в биохимических реакциях, или видов растений и животных, образующих экологические системы. Несколько проще дело обстоит с анализом систем физиологического уровня, где для описания функционирования таких систем, как терморегуляция, регуляция кислородного режима, требуется обычно не более двух-трех десятков переменных (Новосельцев, 1978).

Поэтому, хотя процессы управления в биотических компонентах ЭГС в своей основе имеют много общего с управлением в абиотических компонентах ЭГС, включая технические подсистемы, сами конкретные методы классической теории управления должны применяться для анализа биосистем с большой осторожностью. Так, использование простой следящей системы в качестве модели гомеостаза в физиологических системах не позволяет дать сколько-нибудь полной картины процессов адаптации и приспособления (Новосельцев, 1978). Тем не менее, можно ожидать, что новые методы, разработанные в теории управления, в ряде случаев будут более адекватным аппаратом исследования биосистем. В частности, применение метода пространства состояний, разработанного в теории управления в последние годы, позволяет по-новому осветить вопросы гомеостаза в физиологических системах.

Экологические управление биотическими компонентами биосферы или биотическими компонентами ЭГС включает в себя две группы мероприятий: а) *регуляционные* и б) *биотехнические*.

Регуляционные мероприятия — это научно обоснованные действия, предпринимаемые на территориях заповедников, заказников, природоохранных зон и т.п. для изменения или сохранения численности отдельных биологических видов, сохранения и восстановления структуры природных экосистем, обеспечения на заповедных и особо охраняемых территориях экологического баланса и естественного хода природных процессов и явлений (Дёжкин, 1986).

Предложена следующая общая классификация регуляционных мероприятий по целям и задачам:

1. Мероприятия, направленные на предотвращение, уменьшение или нейтрализацию негативных антропогенных воздействий на экосистемы (ландшафты).

2. Мероприятия, способствующие минимально необходимой коррекции природных процессов в заповедниках.

3. Мероприятия, проводимые для восстановления коренных экосистем (ландшафтов) и организмов (растений, животных), свойственных заповедникам и утраченных вследствие негативных антропогенных воздействий.

4. Мероприятия, проводимые для устранения чуждых (привнесенных извне) компонентов охраняемых природных сообществ – так называемых *инвазивных видов* растений и животных. Чаще всего инвазивные виды попадают на ту или иную территорию случайно и неконтролируемо, в отличие от специально *интродуцированных видов*. В обоих случаях эти виды требуют к себе внимательного отношения и должны подвергаться регулированию с тем, чтобы инвазивные виды не вытесняли местные ценные виды. В последнем случае они становятся *вредными видами*. Примеров таких вредных инвазий во всем мире насчитывается довольно много. Годовые расходы в Европе на менеджмент инвазивных не местных видов превышают 12 миллиардов евро. Европейская комиссия разработала «Директиву по предупреждению интродукции известных инвазивных видов» и для помощи в выявлении, менеджменте и искоренения тех видов, которые уже присутствуют.

5. Мероприятия, смягчающие противоречия, возникающие между охраняемыми и окружающими их хозяйственными территориями (Дёжкин, 1988).

6. Для национальных парков. Мероприятия, способствующие улучшению условий регулируемой рекреации и удовлетворению обоснованных потребностей рекреантов.

7. Для федеральных заказников: Мероприятия, способствующие более полному выполнению уставных задач заказников разного профиля (помимо биотехнических мероприятий) (Дёжкин и др., 2006).

В официальных документах впервые термин «управление» применительно к экосистемам особо охраняемых природных территорий был применен в «Стратегии управления национальными парками России», к разработке которой приступила Федеральная служба лесного хозяйства России в 1998 году. В Стратегии были рассмотрены вопросы управления лесными и травянистыми экосистемами, водными объектами, животным миром (Стратегия… 2002). Разработка Стратегии предполагала также разработку комплекта дополнительных методических материалов, в том числе по управлению природными ресурсами и различными типами экосистем на территории национальных парков. Предлагалось мероприятия по управлению (регулированию) животным и растительным миром назначать на основе функционального зонирования территории национальных парков с учетом уникальности и уязвимости природных комплексов, а также возможных последствий допустимых видов хозяйственного использования в функциональной зоне. При этом, чем выше нагрузки использования допускались режимом функциональной зоны, тем предлагались более активные регуляционные мероприятия. В заповедных зонах национальных парков регуляционные мероприятия практически не предусматривались (Дёжкин и др., 2006).

Биотехнические мероприятия - с экологических позиций это целенаправленное перераспределение потоков вещества и энергии в экосистемах, включая ЭГС, привнесение в охотничье-рыболовные угодья новой биомассы и источников энергии с целью повышения их биологической продуктивности, увеличения биоразнообразия и биомассы промысловых животных.

С прикладной точки зрения – это совокупность приемов, предназначенных для спасения диких животных и улучшения условий их жизни, для сохранения, повышения и восстановления биологической продуктивности охотничье-рыболовных угодий. Они применяются в охотничьем (охотхозяйственная биотехния), рыбном (рыбохозяйственная биотехния) хозяйствах и в заповедном деле (можно трактовать как «заповедную биотехнию») (Дёжкин и др., 2006).

С позиций экологии заповедная биотехния - одна из важных форм управления охраняемыми экосистемами. В наше время обоснованные биотехнические мероприятия приобретают большое значение как один из действенных способов сохранить и увеличить генетическое, организменное и экосистемное биоразнообразие.

В целом удачные экологичные решения — это подходы к сохранению, устойчивому использованию и восстановлению природных и модифицированных экосистем, которые обеспечивает благосостояние людей и процветание биоразнообразия. Например, стоимость восстановления здоровья водно-болотных экосистем может быть меньшей, чем плата за очистку воды, поступающей от деградированных экосистем, особенно принимая во внимание рекреационную ценность восстановленной экосистемы.

Такие решения могут отличаться по масштабам от очень крупных и долгосрочных, таких, например, как восстановление лесной растительности с целью консервации углерода и уменьшения риска наводнений, до очень маленьких и непродолжительных, например, таких как высаживание полос растительности для хищных насекомых рядом с культурами, в которых обитают их жертвы, способные съесть урожай и т.п.

Эти решения включают методы, полезные прежде всего для экосистем, а не для отдельных видов или даже популяций. Например, использование нематод (*Nematoda* – тип первичноротых или круглых червей) вместо токсичных пестицидов для того, чтобы избавиться от слизней (брюхоногие моллюски класса *Gastropoda*), не только предотвращает отравление животных, питающихся слизнями, но и помогает избежать загрязнения воды, которое дорого обходится компаниям, поставляющим воду.

8.2. Методы управления микробоценозом ЭГС

Эта группа методов разработана наименее всего. Поскольку в биоценозе все компоненты (подсистемы) взаимосвязаны, то управление микробоценозами, как компонентами ЭГС и биоценоза, проводится в комплексе с мероприятиями по управлению фито- и зооценозами. Управление микробоценозом должно соответствовать общей цели управления данной ЭГС. Ему должны предшествовать научные исследования по выявлению особенностей данного микробоценоза, оценке его биоразнообразия, состояния микробных популяций и т.п.

Общая схема методов управления микробоценозами представлена на рис. 8.1. Эти методы делятся на три группы: 1) методы, основанные на активизации жизнедеятельности аборигенной фауны микроорганизмов; 2) методы, основанные на внесении культур микроорганизмов; и 3) методы удаления нежелательных микроорганизмов.

Методы первой группы применяются там, где уже есть в составе микробоценоза необходимые или полезные микроорганизмы, но их численность не велика. Для её увеличения применяются методы внесения питательных компонентов (удобрений, химических веществ и т.п.) и механической обработки почвы или иного грунта (рыхление, аэрирование и т.п.).

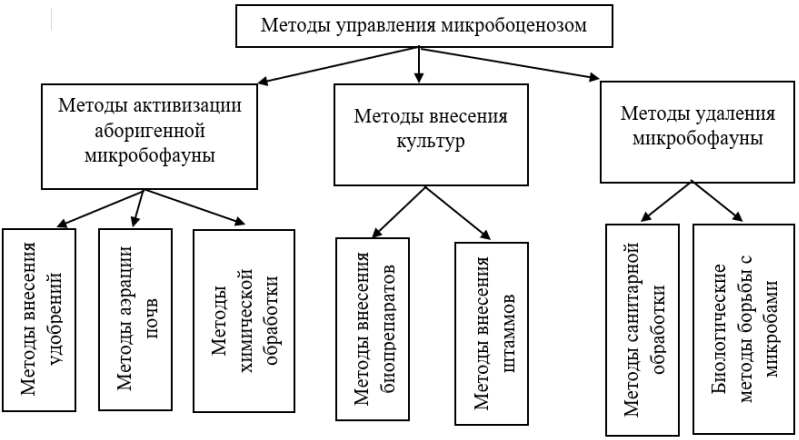


Рис.8.1. Схема методов управления микробоценозами

Методы второй группы применяются для целенаправленного создания благоприятного микробоценоза либо путём внесения специальных биопрепаратов, либо путем прямого внесения в грунт штаммов необходимых микроорганизмов.

Методы третьей группы применяются для удаления вредных (патогенных) или не нужных микроорганизмов. Для этого используются способы санитарно-токсикологической обработки почв и иных грунтов бактерицидными средствами, их дезинфекция, в том числе с помощью биологических методов.

Все указанные группы методов управления реализуются с обязательным ведением экологического мониторинга (концептуальную схему которого см. на рис. 4.5).

Микробоценозы играют большую роль в ЭГС: они определяют продуктивность сложной системы почва-растение-микроорганизмы, в большой степени определяют уровень плодородия почв, а также состояние и свойства подпочвенных грунтов.

Хотя первые данные о пользе микроорганизмов для повышения почвенного плодородия известны уже сотни лет, основной взгляд на взаимоотношение растений и микробов сводился к установлению между ними трофических связей, что в значительной мере верно и сейчас, но исследования последних лет показали, что эти связи гораздо сложнее, многообразнее и во многом определяют нормальное развитие и функционирование растений. С использованием современных молекулярно-биологических методов удалось показать, что растения обладают комплектом генов, определяющих успех растительно-микробного взаимодействия. Эти гены просто "молчат" при отсутствии микроорганизмов, многие из этих генов вообще уникальны и в других процессах не участвуют (Метод. рук-во…, 2005).

Со своей стороны микроорганизмы также содержат генетические факторы, которые функционируют только во взаимодействии с растениями. Другими словами - сосуществование микроорганизмов и растений — это результат установления общей генетической системы, которая является новой общностью организмов. Такое сосуществование не является случайным - в ходе эволюции растения приобрели возможности оптимизации своей жизнедеятельности за счёт использования потенциала микроорганизмов. Образно говоря, «растения решили доверить ряд своих функций микроорганизмам, при этом они выиграли, так как не несут все необходимые им гены, а только те, которые позволяют запускать и регулировать растительно-микробное взаимодействие».

С помощью микроорганизмов растение обеспечивает свои потребности в элементах питания (азот, фосфор и другие), гормонах, физиологически активных веществах, микроорганизмы способны защитить растение от наиболее опасных - почвенных инфекций, для борьбы с которыми пока нет эффективных средств. Список полезного воздействия микроорганизмов на растения далеко не исчерпывается только этим, но и упомянутого достаточного, чтобы заключить, что активизация фитобактериального взаимодействия является мощнейшим фактором повышения продуктивности агрофитоценоза, которое в настоящий момент используется крайне неудовлетворительно.

Показано, что полезное действие микрофлоры не приурочено только к определенной группе растений, но является всеобщим явлением (Метод. рук-во…, 2005).

Методы регуляционных мероприятий, направленных на управление микробоценозом, включают:

- регулирование численности популяций микроорганизмов;

- регулирование состава популяций микроорганизмов;
- охрана ценных и полезных популяций микроорганизмов.

Основным способом реализации регуляционных мероприятий является использование различных микробиологических биопрепаратов в сочетании с использованием химических удобрений.

Среди биопрепаратов на первом месте стоят биопрепараты на основе ризосферных микроорганизмов комплексного действия, например, таких как «Ризоторфин», препараты группы «Экстрасол» («Агрофил», «Флавобактерин», «Мизорин» и др.) (Метод. рук-во…, 2005).

Препарат ***«Ризоторфин»*** предназначен для обработки семян бобовых культур. Действующее начало - клубеньковые бактерии (рода *Rhizobium*), образующие на корнях растений клубеньки и индуцирующие процесс фиксации молекулярного азота из воздуха. Агрономическая эффективность «Ризоторфина» для бобовых культур составляет в среднем 10-30%, дополнительный сбор белка - 2-5 ц /га. При интродукции новых бобовых культур (козлятник, люцерна, люпин) эффективность бактеризации может составлять 50-100%, а повышение сбора протеина достигает 2-3 раз.Для каждого вида бобовых культур производится определённый вид препарата (с использованием специфичных именно для этой культуры микроорганизмов).

Группа биопрепаратов на основе ассоциативных микроорганизмов комплексного действия ***«Экстрасол»*** создана недавно, но уже хорошо зарекомендовала себя в России и за рубежом на широком спектре культур. Микроорганизмы, являющиеся основой этих биопрепаратов, тесно взаимодействуют с растениями (образуя «ассоциативный симбиоз») и способны выполнять ряд функций, полезных для растений:

- усиливать фиксацию атмосферного азота на корнях растения, заменяя при этом 30-50 кг/га минеральных азотных удобрений;

- стимулировать рост и развитие растений за счёт продуцирования физиологически активных веществ (ускоряя созревание продукции на 10-15 дней);

- подавлять развитие фитопатогенных микроорганизмов, обеспечивая снижение поражаемости растений болезнями в 1,5 – 10 раз, улучшая при этом фитосанитарную обстановку в почве;

- усиливать устойчивость растений к неблагоприятным условиям (засуха, заморозки, пониженные или повышенные температуры, повышенное содержание солей, неблагоприятная реакция почвенного раствора);

- повышать коэффициенты использования минеральных удобрений и питательных веществ из почвы;

- регулировать накопление в растениях тяжёлых металлов, радионуклидов, нитратов и других вредных соединений.

Перечисленные ниже биопрепараты имеют сходные функции и часто обладают широким спектром действия, что объясняется близкими по происхождению источниками их выделения (ризосфера, гистосфера или ризоплана растений) и их селекцией по однородным признакам (ростстимуляция, антифунгальная активность, азотфиксирующая активность и др.). В то же время каждый из них имеет свои особенности и определённый спектр действия. В этой группе препаратов используют:

Агрофил – биопрепарат, созданный на основе штамма *Agrobacterium radiobacter*-10 для овощных культур открытого и закрытого грунта. Применение агрофила в овощеводстве обеспечивает прибавку урожайности на 10-20%, ускоряет созревание урожая на 7-10 дней, гарантирует получение ранней продукции.

Флавобактерин - биопрепарат, созданный на основе штамма Flavobacterium sp.- 30. Повышает урожайность овощных культур (огурцы, томаты, перец, картофель, капуста, сахарная свёкла) на 3,0-10 т/га и улучшает качество продукции.

Мизорин - биопрепарат созданный на основе штамма *Arthrobacter mysorens–7*. Повышает продуктивность кормовых культур, просо, сорго и картофеля. Значительно повышает эффективность ризоторфина на бобовых при их совместном применении. Обеспечивает повышение урожайности зеленой массы кормовых трав на 2 – 4 т/га, картофеля – на 4 – 7 т/га. Повышает содержание переваримого протеина в кормах на 1-3%, улучшая при этом аминокислотный состав белка.

Экстрасол – биопрепарат создан на основе штамма *Pseudomonas fluorescens*. Обеспечивает повышение урожайности овощных культур на 4,0-8,0 т/га. Препарат способствует большему поступлению элементов минерального питания в растения, синтезирует ростовые и другие биологически активные вещества и образует соединения, снижающие активность фитопатогенных микроорганизмов.

Все препараты группы "Экстрасол" готовятся на основе стерильного торфа или жидкой питательной среды. Титр ризосферных бактерий в зависимости от штамма — 5...10 млрд. шт. в каждом грамме, который сохраняется на данном уровне в течение гарантийного срока годности — 6-12 месяцев.

Среди биопрепаратов фосфатмобилизующих микроорганизмов применяется «***Микофил»*** - микробиологический препарат на основе эндомикоризных грибов - облигатных симбионтов, обладающих уникальной способностью резко усиливать поступление фосфора,

калия, микроэлементов и воды практически во все сельскохозяйственные культуры. Микоризация саженцев плодовых деревьев и кустарников, овощей и трав заменяет внесение 40 - 60 кг/га фосфора. Особенно эффективен на почвах с низким содержанием доступных для растений соединений фосфора.

Большую группу составляют микробиологические препараты для получения биологически активных грунтов. Среди них выделяют «***Бактогумин***» - микробиологический препарат комплексного действия, действующим началом которого является ассоциация микроорганизмов агрофитоценоза. Представляет собой отселектированный комплекс микроорганизмов агрофитоценоза, участвующих в трансформации органических веществ почвы. Применение препарата улучшает корневое питание растений, способствует разрушению фитотоксичных веществ, ускоренному разложению пестицидов и оздоровлению грунтов за счет антагонизма почвенной микрофлоры и микроорганизмов - возбудителей болезней растений.

Бактогумин применяют для приготовления биологически активных грунтов, являющихся высококачественным и экологически чистым субстратом для выращивания растений в теплице. Его можно использовать как основной грунт или в смеси с корой, опилками и другими добавками, а также в качестве биологически активной подсыпки, особенно после пропаривания и химической стерилизации отработанного субстрата. В зависимости от культуры растений, выращиваемых в теплицах, биологически активный грунт требует внесения удобрений и микроэлементов. Экологически безопасен.

Также разработаны биопрепараты, ускоряющие деградацию фосфоорганических пестицидов и стимулирующие рост растений. Среди них – «*Бацифор»* и *«Экзофор»,* препараты, которые рекомендуются для ускорения детоксикации фосфорорганических пестицидов в условиях защищенного грунта. Бацифор и экзофор в два - пять раз ускоряют разложение гордоны, карбофоса и актеллика, снижают фитотоксичность торфов и грунтов длительного пользования. Эти препараты стимулируют интенсивный рост растений и мощное развитие корневой системы, ускоряют формирование генеративных органов, стимулируют биосинтез хлорофилла.

Микробоценозы активно используются для борьбы с тяжелыми металлами в почвах и иных грунтах. Установлено, что производственные штаммы *ассоциативных бактерий* способны иммобилизировать тяжелые металлы и препятствовать их накоплению в сельскохозяйственных растениях. Разработан метод селекции

эффективных штаммов ассоциативных ростостимулирующих бактерий, обладающих высокой устойчивостью к тяжелым металлам. Выделено и детально охарактеризовано более 30 штаммов ростостимулирующих бактерий, которые представляют большой интерес для изучения механизмов положительного влияния бактерий на рост растений в стрессовых условиях и являются перспективными для создания устойчивых к тяжелым металлам растительно-микробных ассоциаций. В результате исследований установлено, что бактеризация может повышать устойчивость растений к тяжелым металлам за счет иммобилизации токсичных металлов в ризосфере, стимуляции роста фитогормонами, снижения биосинтеза стрессового этилена и повышения усвоения растениями питательных элементов.

Особое значение имеет управление микробоценозами с **патогенными микроорганизмами и вирусами**, способными вызывать эпизоотии[1] и эпидемии[2]. Насколько сильный экономический, социально-политический и иной ущерб могут приносить человеку патогенные микроорганизмы показывают ситуации с эпидемиями чумы в Римской империи (погибло 100 млн. чел.) и в средние века (погибло 50 млн. чел.), эпидемия «гриппа-испанки» в начале XX в. (погибло 50-100 млн. чел.), а также с эпидемиями свиного и птичьего гриппа, пандемией[3] уханьского коронавируса 2020-го года (открыт в конце 2019 г. и зарегистрирован как COVID-19) и др. Ежегодно по данным ВОЗ от обычных форм вируса гриппа в мире погибает от 300 до 650 тыс. чел.

Мировая доля Китая в туризме составляла в 2020 году 9,1%, поэтому отмена в 2020 году из-за коронавируса туристических туров из Китая и закрытие авиасообщения нанесла гигантский экономический ущерб туркомпаниям практически всего мира. Например, Италия из-за закрытия в 2020 году авиарейсов из Китая, потеряла 4,5 млрд. евро. К сфере туризма надо добавить гигантские экономические потери в связи с падением цен на нефть и другие энергоресурсы, потери товарооборота, прежде всего сельхозпродуктов и т.п. В апреле 2020 года в США от коронавируса ежедневно погибало около 2 тыс. человек. Общий ущерб экономике Китая, США, стран Евросоюза и России из-за

---

[1] *Эпизоотия* – массовое распространение инфекционной болезни у какой-либо группы животных.

[2] *Эпидемия* – массовое распространение инфекционной болезни у большой группы людей, превышающее обычный уровень заболеваемости этой болезнью в данной местности.

[3] *Пандемия* - распространение нового заболевания в мировых масштабах, сильная эпидемия, распространившаяся на территории стран, континентов; высшая степень развития эпидемического процесса

коронавируса 2020 года сопоставим с самыми крупнейшими экономическими кризисами или потерями в войне.

Поэтому на территориях, где в составе ЭГС выявляются *патогенные микроорганизмы* (возбудители ботулизма, чумы, споры сибирской язвы, коронавирусы и т.п.), осуществляются ***медико-санитарные мероприятия,*** проводимые в России по самым строгим стандартам. Методы санитарно-токсикологических мероприятий, направленных на обеспечение действующих санитарных норм и удаление из микробоценозов токсичных, патогенных и экологически вредных микробов, включают:

- локализацию очагов патогенных микроорганизмов;
- дезинфекционные мероприятия;
- профилактические мероприятия (включая самоизоляцию и карантин, введение режима ЧС, прививки и т.п.).

В 2020 году беспрецедентные мероприятия по борьбе с коронавирусом Covid-19 были предприняты в Китае, когда медико-санитарной обработке подвергались огромные территории закрытых на карантин городов (эпицентра находился в г.Ухань), включая улицы, общественные здания и т.п. (рис. 8.2). Экономические, трудовые и политические затраты на эти мероприятия оказались огромны, но в Китае пандемия коронавируса была оперативно ликвидирована, в отличие от США, Индии, Бразилии и многих стран ЕС, где пандемия нанесла огромный ущерб и большое количество человеческих жертв.

Рис. 8.2. Дезинфекция улиц в Ухане от коронавируса в 2020 году

Конспирологические исследования в этой области свидетельствуют о возможности разработки новых форм применения биологического оружия (на основе вирусов), которые камуфлируются

под естественные эпидемии и осуществляются не враждебным государством, а враждебными (заинтересованными) частными компаниями или фирмами.

Все эти факты свидетельствуют об огромном значении методов управления микробоценозами в составе ЭГС. Они должны постоянно совершенствоваться и учитывать способность многих вирусов и другим патогенных микроорганизмов к относительно быстрым мутациям. Кроме того, ситуации в этой сфере, складывающиеся за последние десятилетия, показывают, что проблемы управления микробоценозами, перерастают в глобальные.

8.3. Методы управления фитоценозом ЭГС

> **«...**Не порти дерев его, от которых можно питаться, и не опустошай окрестностей, ибо дерево на поле не человек, чтобы могло уйти от тебя в укрепление».
>
> *Ветхий Завет*. (Второзаконие. Гл. 20:19)

> «Обязательно посади дерево, даже если завтра придет конец света».
>
> *Коран*

Управление фитоценозами ЭГС (включая лесные экосистемы) невозможно без их математического моделирования. Так, например, математическое моделирование процессов деградации и восстановления лесов под воздействием техногенной нагрузки невозможно без математического моделирования лесов как экосистемы. Большинство современных моделей лесов ограничены рамками разнопородных, разновозрастных древостоев. Однако математическое моделирование лесов невозможно без включения в модели процессов взаимодействия между собой таких компонентов лесной экосистемы как травяно-кустарничковый ярус, подстилка и верхние горизонты почвы. Эти процессы должны учитывать локальные биохимические циклы.

Важным результатом развития методов математического моделирования сложных экосистем явилось использование, так называемых базовых математических моделей, разработанных различными группами исследователей. Например, при моделировании биосферы, одной группе исследователей можно поручить строить модель атмосферы, другой океана, третьей биоценозов тундры и т.д. Затем эти куски-модули соединяются в единое целое и должна получиться модель биосферы. Провал нескольких крупных проектов

такого типа, показал, что результаты полученных таким образом больших математических моделей не имеют ясной прикладной интерпретации и трудно поддаются анализу.

Поэтому стратегия моделирования сложных лесных экосистем в настоящее время базируется в основном на следующей многоэтапной методологии. На первоначальном этапе выделяются основные, ключевые процессы, играющие главную роль в изучаемом явлении в данных пространственном и временном масштабах. Затем строиться еще более простая модель явления, учитывающая еще меньшее количество факторов. И так происходит до тех пор, пока не возникает простейшая модель, которая описывает простое явление или процесс. Только после того, как модель нижнего уровня изучена и понята, удается перейти на следующий более высокий уровень. Методика моделирования лесных экосистем описана в ряде работ (Мешалкин и др., 2016).

Управление фитоценозами, как компонентами ЭГС, проводится различными методами: рекультивационными, регуляционными, агротехническими, лесокультурными, административными и др. (табл. 8.1). Рекультивация фитоценозов проводится в интересах диких животных на участках, нарушенных прошлой хозяйственной деятельностью. Цель – по возможности полностью восстановить характер и состав фитоценозов, пострадавших от прошлой хозяйственной деятельности, и условия обитания входящих в эти фитоценозы животных. Проводится методами, исключающими трансформацию ландшафтов и заселение их чуждыми видами растений и животных. Рекомендуется для всех форм ООПТ, кроме заповедников (ЗП) с абсолютным режимом и заповедных зон НП.

Управление растительностью в пределах фитоценозов проводится путем организации ландшафтнообразующих рубок леса с целью улучшения экологической мозаики и условий обитания диких животных.

Осуществляются в основном в рекреационных зонах национальных парков (НП). Способствуют созданию высокопродуктивных и эстетически благоприятных лесных ландшафтов с обилием растительноядных и других видов животных. Увеличивают возможности наблюдения за дикими зверями и птицами в естественных условиях

Лесокультурные мероприятия на бывших вырубках и гарях для восстановления площади местообитаний и улучшения условий обитания диких животных. Они способствуют превращению обедненных антропогенных и пирогенных экосистем в типичные для

данной ООПТ лесные экосистемы, с соответствующим животным населением, повышают эстетические достоинства ландшафта. Применяются в НП (за исключением зон строгого режима) и в ФЗ. В качестве исключения – в ЗП с преобладанием сукцессионных процессов, вызванных прошлыми рубками леса.

Управление сукцессиями в травянистых сообществах, благоприятствующих их фаунистическому богатству и разнообразию применяется преимущественно в степных и лесостепных ПЗ, а также на степных участках НП для стимулирования естественных сукцессий и возвращения животных, свойственных типичным травянистым экосистемам.

Таблица 8.1

Перечень возможных регуляционных мероприятий, направленных на оптимизацию фитоценозов охраняемых экологических систем (по В.В.Дёжкину и др., 1986).

Компоненты экологических систем	**Регуляционные мероприятия**	**Примечания**
Флора и растительность	Предотвращение внедрения во флору заповедников не свойственных ей видов (подвидов) растений. Устранение растений, чуждых флоре заповедников. Сохранение состава и устойчивости растительных сообществ: а) предотвращение лесных пожаров и борьба с ними б) предотвращение массовых вспышек особо опасных энтомовредителей и борьба с ними. Меры по сохранению и восстановлению редких и	Проводится в исключительных случаях. при возникновении реальной опасности окружающим лесным массивам Имеется в виду ограниченный и строго регулируемый выпас скота и контролируемое сенокошение на отдельных участках степных заповедников

Рекультивация водно-болотных экосистем, разрушенных лесной гидромелиорацией, проводится при ликвидации гидромелиоративных сооружений, вызвавших избыточное осушение территории ООПТ. Рекультивация лесных водоемов и мочажин, пострадавших от осушения рекомендуется для всех категорий ООПТ, кроме абсолютных ЗП и заповедных зон НП.

Предупреждение вспышек размножения особо опасных энтомовредителей, разрушающих условия обитания охраняемых

животных, и борьба с этими вспышками – составная часть управления фитоценозами. Для этого осуществляется создание лесных насаждений из пород деревьев, устойчивых к поражению насекомыми-вредителями, а также культивирование и выпуск насекомых-энтомофагов. Использование этих методов возможно в НП и в некоторых ЗП.

Управление фитоценозами в природных и техногенных ЭГС различно, т.к. различны цели управления этими системами. Для природных ЭГС важно поддерживать биоразнообразие и сложившийся режим функционирования.

Для техногенных ЭГС, в том числе агроэкосистем (сельскохозяйственных ЭГС) важно обеспечить борьбу с сорными растениями. Сорный компонент агроландшафтов представлен 120 экономически значимыми видами растений, с которыми ведут борьбу.

Ежегодные потенциальные потери урожая от сорных растений культур в агроландшафтах оцениваются 39,3 млн. т. з. ед. Общие среднегодовые потери урожая от вредителей болезней и сорняков составляют 101,6 млн. з. ед. в среднем ежегодно. В связи с высокими потерями урожая от вредных организмов защитные мероприятия в агроландшафтах представляют одно из важнейших направлений повышения их продуктивности.

Для борьбы с сорняками применяются биопрепараты, химические средства (гербициды), ловчие контуры и т.п.

8.4. Методы управления зооценозом ЭГС

> «Птицы и звери, цветы и деревья взывают к человеку: сбереги, сохрани, где стоишь, где живешь, — на расстоянии взгляда и голоса, хотя бы на расстоянии вытянутой руки».
>
> *Д.С. Лихачев*

Д.Лэк (1957) впервые глубоко изучил и описал колебания численности животных в естественной среде обитания и механизмы регуляции этих колебаний, обеспечивающие их относительную стабильность и предотвращающие их деградацию. Его монография является отправной для экологов, изучающих закономерности движение численности диких животных и возможности целенаправленного изменения их численности.

К.Уатт обозначил рассматриваемую проблему в названии своей широко известной книги – «Экология и управления природными ресурсами» (Уатт, 1971). Ее перевод активизировал в СССР экологические исследования в области рациональной эксплуатации

биологических природных ресурсов, в том числе и с использованием сложных математических методов.

Из отечественных ученых необходимо упомянуть С.С.Шварца (1970), обратившего внимание на эколого-популяционные основы ведения охотничьего хозяйства, и Н.Ф.Реймерса (1992), оценившего с позиций биоэкологи место и роль регуляций в экосистемных и биосферных процессах. Необходимо также использовать взгляды и рекомендации, содержащиеся в книгах А.В.Яблокова (1987) и А.В.Яблокова и С.А. Остроумова (1983). Они относятся к «живой природе» и хорошо отражают специфику управления ее сложными системами, особенно – в условиях усиливающегося антропогенного воздействия (Дёжкин и др., 2006).

Можно также упомянуть работу А.Д.Арманд (1983). Значительной вехой является «Национальная стратегия сохранения биоразнообразия России» (2001), которую следует использовать в качестве главного методического документа при планировании и осуществлении всего спектра работ по сохранению и эксплуатации биологических ресурсов.

В научной литературе имеется работ, посвященных методам управления зооценозами, непосредственно тактике и технике управления популяциями диких животных, преимущественно – копытных (В.М.Глушков, 2001; А.А.Гусев, 1988; А.А.Данилкин, 2005; 2006; Д.Н.Данилов и др., 1966; В.В.Дёжкин, 1985, 1986, 1988; Рекомендации.., 2001; К.П.Филонов, 1977; 1978; 1989 и др.). Они свидетельствуют о возможности адекватного управления популяциями на охраняемых территориях.

Особую проблему составляет управление зооценозами и экосистемами в целом на особо охраняемых природных территориях (ООПТ). Типовым положением о государственных заповедниках 1981 года предусматривалось полное исключение этих особо охраняемых природных территорий из всех форм традиционного хозяйственного использования.

С этих позиций «*управление охраняемыми экосистемами» (в том числе экосистемами заповедников) можно считать частью общей концепции «управления биосферой*» (Дёжкин и др., 2006).

Вопросы «управления» в области природоохранных территорий начали впервые возникать в связи с деятельностью североамериканских, а затем и африканских национальных парков и необходимостью сбалансировать взаимодействие входящих в них экосистем и их компонентов. Известный американский эколог Д.Эренфелд, поддерживавший принцип управления природными сообществами, подчеркивал необходимость глубокого научного

обоснования каждой регуляции. По его мнению, управление сообществом, чтобы быть эффективным, должно быть гибким, непредвзятым, историчным, опирающимся на максимально широкую базу экологической информации.

В табл. 8.2 приводится перечень регуляционных мероприятий, направленных непосредственно на животных, обитающих на ООПТ и в их окрестностях (Дёжкин и др., 2006). Развернутые обоснования для проведения этих мероприятий и выдачи соответствующих разрешений органами Росприроднадзора приведены в подразделе «Разрешительная деятельность».

Таблица 8.2

Перечень возможных регуляционных мероприятий, направленных на оптимизацию зооценозов охраняемых экологических систем (по В.В.Дёжкину и др., 1986).

Компоненты экологических систем	**Регуляционные мероприятия**	**Примечания**
Фауна и животное население	• Предотвращение внедрения в фауну заповедников не свойственных ей чуждых видов (подвидов) животных • Устранение животных, чуждых фауне заповедников • Меры по сохранению и восстановлению редких и исчезающих животных, свойственных фауне заповедника • Восстановление видов (подвидов) животных, свойственных фауне заповедника, но утраченных вследствие антропогенных воздействий • Регулирование численности (плотности населения) и соотношение отдельных видов животных с целью восстановления экологического баланса и сохранения основных компонентов заповедных экосистем	а) Основные положения о проведении регуляционных мероприятий в государственных заповедниках (животный мир) б) Методические указания по управлению популяциями диких копытных животных в заповедниках в) Методические указания по управлению популяциями хищных животных в заповедниках г) Методические указания по контролю массовых особо опасных заболеваний диких животных в заповедниках Одобрены в 1983 г. Комиссией по заповедникам АН СССР, утверждены для системы Главохоты РСФСР

Особую проблему представляет ***управление популяциями*** охотничьих и промысловых животных, рассматриваемых как

возобновляемый природный ресурс, под которым понимается система взаимосвязанных мер, направленных на охрану, воспроизводство и рациональное использование ресурсов животных и получение максимума их продукции при минимизации ущерба окружающей среде и самим популяциям (Данилкин, 2014).

При этом оптимизация управления популяциями предполагает решение целого ряда вопросов и реализацию ряда способов и методов управления, таких как учет и определение оптимальной численности животных, планирование и нормирование добычи (в частности, для этих целей применяется «пороговое» нормирование численности популяции того или иного вида (рис.8.3)), обоснование сроков и способов охоты, сохранение животных, повышение их продуктивности и повышение трофейного качества популяций путем специальной подкормки, уменьшение негативного воздействия на биоценозы, регулирование численности крупных хищников, профилактика болезней, предотвращение потерь в агроценозах и на транспортных магистралях (например, путем строительства экодуков, рис. 8.4), акклиматизация и реакклиматизация, селекция и фермерское разведение (при необходимости).

Восстановление утраченных видов проводится за счет а) *реакклиматизации* животных, обитавших ранее непосредственно на ООПТ; б) *интродукции* видов животных, свойственных экологическим системам данного региона и в) *устранения* чуждых видов. При этом устранение и регуляция чуждых видов животных проводится в отношении видов, ошибочно акклиматизированных на ООПТ и не вписывающихся в нормальное функционирование экосистем, причиняющих ущерб основным экосистемам и их компонентам. Это сопровождается контролем инвазии на ООПТ видов животных, чуждых фауне ООПТ и вносящих возмущение в устоявшиеся экосистемные связи.

Замена местных видов и групп животных на виды и группы, имеющие большее эстетическое и хозяйственное значение, может использоваться только на ограниченных участках управления и не должно носить характера скрытой интродукции.

Изменение соотношения отдельных видов и подвидов в охраняемых экосистемах проводится путем контроля за численностью крупных хищников, нарушающих экологический баланс на ограниченных территориях ООПТ, а также путем поощрения роста численности и привлечения «полезных животных», уменьшающих или нейтрализующих негативные процессы в охраняемых экосистемах.

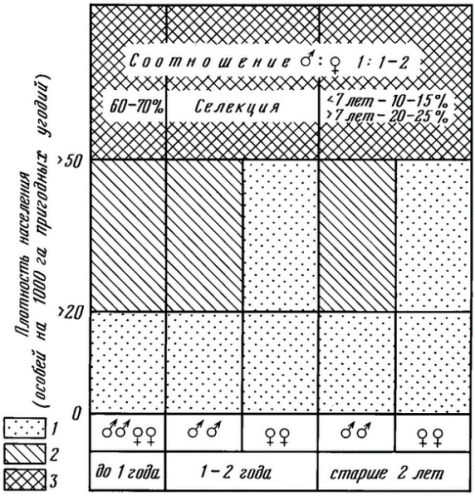


Рис. 8.3. Принципы «порогового» нормирования добычи европейской и сибирской косуль в зависимости от уровней плотности их популяций в конкретном охотничьем хозяйстве: 1 – запрет промысла; 2 – выборочный отстрел; 3 – регулирование численности (% - доля особей, планируемых к отстрелу от общего объема добычи) (по Данилкину А.А., 2014)

Рис. 8.4. Экодук на трассе М-1 под Смоленском

Профилактические и карантинные мероприятия проводятся для регулирования численности, плотности и размещения животных в популяциях, пораженных опасными инфекциями и инвазиями. Для

этого осуществляется массовая выкладка лекарств для профилактических и лечебных целей, организация карантина и применение соответствующих нормативных и технических средств, уничтожение бешенных и агрессивных (опасных) особей.

К биотехническим мероприятиям на ООПТ относятся: сохранение животных (спасение и предотвращение от гибели молодняка, гнезд, яиц и т.п.), улучшение кормовой базы животных, улучшение качества охотничьих животных, регулирование численности нежелательных видов животных, расселение диких животных (акклиматизация и т.п.), профилактика и лечение диких животных (Дёжкин и др., 2006).

Регулирование зооценозов в природных и техногенных ЭГС существенно различно. В природных ЭГС необходимо путем регулирования сохранить создавшийся зооценоз или улучшить его путем увеличения биоразнообразия.

В техногенных ЭГС (например, в сельскохозяйственных ЭГС) регулирование зооценозов осуществляется с целью поддержания продуктивности ЭГС путем уничтожения вредителей.

Среди вредителей широкое распространение получили виды многоядных вредных организмов, питающихся растениями различных ботанических групп и специализированные виды, повреждающие лишь отдельные группы растений. В группу многоядных отнесены вредители, которые быстро размножаются на бросовых землях или на пашне при низкой культуре земледелия. К группе многоядных вредителей относятся: луговой мотылек, стадные и нестадные саранчовые, мышевидные грызуны и суслики (на посевах озимых зерновых, в лесополосах), обыкновенная полевка (на посевах озимых, многолетних трав и в посадках плодовых), водяная полевка (на лугах, покосах, пастбищах), грызущие и подгрызающие совки, проволочники, кукурузный стеблевой мотылек. Специализированные вредные организмы приурочены к конкретным растениям (группам растений определенных семейств).

Для борьбы с вредными организмами применяют биопрепараты, химические методы (инсектициды, акарициды и т.п.) и иные способы.

Большую роль в управлении биценозами играют биологические методы. Одна из основных практических задач современной экологии насекомых - разработка такой системы защиты растений, которая была бы основана на постоянном контроле и корректировке явлений, а не только на срочных, "пожарных" мероприятиях при выходе системы за установленные рамки[1].

---

[1] *Чернышев В.Б.* Экология насекомых. Учебник. - М.: 1996. Изд-во МГУ, - 304 с.

Согласно В.Б.Чернышеву (1996)[1], эта система должна включать в себя как постоянное формирование желаемого агроценоза с помощью агротехнических мероприятий, например, подсева нектароносных растений, привлекающих многих паразитов, так и прямое регулирование численности прежде всего с помощью *биометода*. Это регулирование должно проводиться задолго до превышения численностью вида экономического порога вредоносности. Благодаря такому вмешательству уровень численности популяции останется на относительно низком уровне и не произойдет ее " ускользания" от пресса естественных врагов.

Большое природоохранное значение имеет создание *микрозаповедников* и иных *малоразмерных объектов охраны* птиц, шмелей, пчел, полезных энтомофагов и др. В процессе выделения конкретных малоразмерных объектов охраны необходимо стремиться к максимальной мозаичности, сопряжению контрастных открытых (степных, луговых) и закрытых (лесных) ландшафтов, между которыми возникают краевые, опушечные экосистемы и экотонные эффекты. Чем выше мозаичность, контрастность, тем больше экологических ниш для охраняемых объектов. При организации орнитологических малоразмерных объектов охраны важное значение имеет признание полезности всех видов птиц в агроландшафте. На первый взгляд бесполезные и даже вредные виды пользы приносят значительно больше, чем вреда (Метод. рекомендации…, 2005).

Целесообразно рекомендовать максимально возможное снижение «факторов беспокойства», особенно, в периоды гнездования и выведения потомства. В это время с апреля по август должны быть запрещены даже рубки ухода за лесом. В пределах каждого хозяйства необходима регулярная всесезонная работа по сохранению естественных и созданию искусственных укрытий для птиц в осеннюю непогоду, в зимние морозы.

В качестве мер по искусственному привлечению птиц в малоразмерные объекты охраны и агроландшафты в целом следует рекомендовать охрану естественных и создание различных вариантов и конструкционных типов дуплянок, синичников, скворечников, забетонированных с одной стороны асбестовых труб и т.д. Крупные хищные птицы для гнездования выбирают наиболее высокие и крупные деревья с хорошо сформированными кронами. Именно такие фрагменты леса подходят для создания малоразмерных объектов охраны для этих птиц.

Микрозаказник — это первичный очаг для сохранения и увеличения численности диких пчелиных семей и шмелей.

Необходимо, чтобы численность опылителей была под контролем человека. Опыление пчелами должно стать обязательным элементом в технологии энтомофильных культур, особенно люцерны.

Многие насекомые-опылители (андрены, эвцеры, галикты, мелитты, рофиты и др.) строят свои гнезда в уплотненной почве, хорошо прогреваемой солнцем, слабо заросшей травой или совсем обнаженной, предпочитая участки вдоль опушек леса, лесополос, склонов, оврагов с цветущей растительностью. Поэтому под микрозаказники следует отводить пологие склоны балок южных экспозиций, опушки древесных насаждений, обрывистые откосы оврагов, склоны гидрографической сети искусственного и естественного происхождения, склоны холмов, полосы отчуждения вдоль дорог

***

Глава 9
СОЗДАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ

9.1. Проектирование искусственных ЭГС

«С тех пор как человек пахать обрел уменье,
Украсить дом и двор он ощутил стремление
И стал вокруг себя сажать для красоты
По вкусу своему деревья и цветы».

Жак Делиль

С учетом всех вышерассмотренных экологических проблем, человечество давно задумывалось над созданием искусственных экосистем, в которых условия его существования были бы экологически наилучшими. Классической работой в этом отношении были труды Мак-Харга (McHarg,1969) по проектированию искусственных экосистем, согласованных с природными ландшафтами, как альтернативы неконтролируемого развития. Неконтролируемое развитие, распространяясь широко, уничтожает ландшафт вследствие перенаселения и загрязнения; оно необратимо разрушает все красивое и памятное независимо от того, насколько хорошо спланированы отдельные дома или участки территорий.

Главными особенностями искусственных экосистем от природных являются следующие:

1) искусственные ЭГС являются гетеротрофными, т.е. потребляющими готовую пищу;
2) все искусственные ЭГС являются незамкнутыми – в них осуществляется незамкнутый цикл обмена веществ;
3) все искусственные ЭГС являются системами со сниженным биоразнообразием.

При проектировании искусственных ЭГС можно использовать блоковые модели землепользования. Анализируя вопрос о том, каким образом принципы развития экосистемы связаны с ландшафтом в целом, рассмотрим блоковая модель, изображенная па рис. 9.1.

На рис. 9.1 изображены три типа окружающей среды, служащие системами жизнеобеспечения для четвертого блока, представляющего собой гетеротрофную ЭГС промышленно-городского типа. Продуктивная «окружающая среда» человека представлена экосистемами на ранних стадиях сукцессии, такими, как посевы,

пастбища, древесные плантации и интенсивно эксплуатируемые леса. Все эти экосистемы обеспечивают человека продуктами питания и волокном.

Рис. 9.1. Блоковая модель для планирования ЭГС в соответствии с теорией экосистем (по Ю.Одуму, 1986)

Зрелые экосистемы, такие, как старые леса, климаксные степи и океаны, выполняют в большей степени защитную, чем продуктивную функцию. Они стабилизируют субстраты, служат буферами в круговоротах воздуха и воды, смягчают колебания температуры н другие физические факторы и при этом часто дают полезные продукты. Третья категория естественных или полуестественных ЭГС принимает на себя главную нагрузку по ассимиляции большого количества отходов, производимых городскими промышленными и сельскохозяйственными ЭГС. Эти эколого-геологические системы представлены водными путями (континентальными и береговыми), болотами и другими местами, подвергающимися сильной нагрузке. ЭГС этой произвольной категории находятся преимущественно па промежуточных, эвтрофицированных или задержанных стадиях развития сукцессии. Все они непрерывно взаимодействуют, будучи объединены друг с другом входами и выходами (на рис. 9.1 показаны стрелками).

Важный вопрос о соотношении на Земле оставшейся ее природной составляющей и техногенной, или площадей, занятых природными и техногенными ЭГС. По разным оценкам это соотношение находится в пределах от 3:1 до 5:1 (Одум, 1986). При этом необходимо иметь ввиду следующие ограничения (Одум, 1986):

1. Поскольку уровень мощности городских промышленных ЭГС примерно в 100 раз выше уровня в любой природной ЭГС, то для рассеяния неупорядоченности на выходе городской системы малой площади нужна очень большая площадь природной системы, которая, должна обладать определенной диссипативной емкостью, чтобы могли развиваться и поддерживаться высокоорганизованные структуры.

2. Жизнеобеспечивающая способность природной среды может меняться на несколько порядков в зависимости от ее продуктивности (рабочего потенциала) и степени уже действующего стресса. Так, например, 1 га пустыни никогда не может быть столь же эффективным, как 1 га плодородного прибрежного болота, а уже сильно загрязнённое озеро имеет очень немного дополнительной возможности для жизнеобеспечения.

3. Страны с высокой плотностью населения и развитой промышленностью, например, такие, как Япония и многие европейские страны, зависят в обеспечении необходимого притока энергии, материалов, продуктов питания и общих благ и услуг от обширных пространств вне собственной территории.

Все это делает крайне трудным объективное определение того, как много природной среды нужно сохранить в пределах каждой административной политической единицы (района, области или страны в целом), чтобы обеспечить заданный уровень развития человеческого общества.

Один подход, предложенный в работе (Odum, Odum, 1972), состоит в построении такой модели землепользования, в которой можно было бы менять соотношение природных и окультуренных земель, как показано на рис. 9.2.

Если все входы и выходы компонентов модели количественно оценить в единицах энергии, то разные варианты планирования землепользования можно проигрывать на компьютере. «Природные земли» определяются в такой модели как часть ландшафта, которая сама себя обеспечивает и для поддержания себя нуждается лишь в минимальном вмешательстве человека. В функциональном отношении «природная среда» — это такая часть системы жизнеобеспечения человека, которая работает без включения на вход человеческой энергетики или экономики.

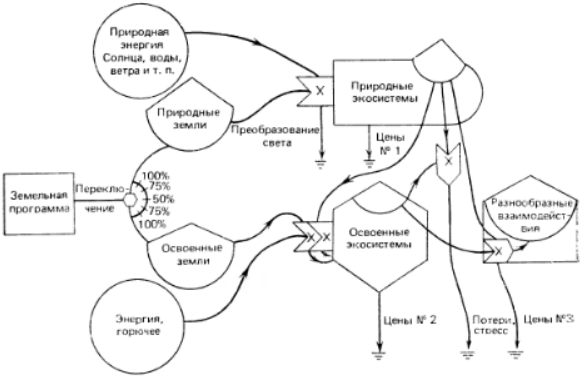


Рис. 9.2. Модель землепользования, допускающая изменение соотношения природных и освоенных земель для определения оптимального с точки зрения среды в целом их баланса (по Odum, Odum, 1972)

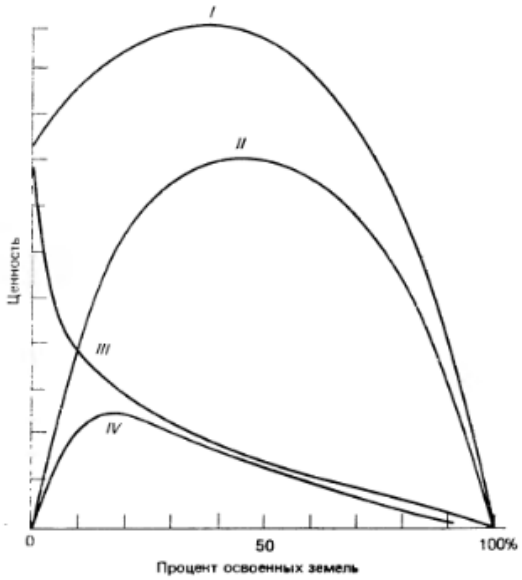


Рис. 9.3. Характеристические кривые, основанные па данных, полученных с помощью модели для гипотетического региона с экстенсивным развитием городов (по Odum, Odum, 1972**): *I* — общая стоимость; *II* — стоимость освоенных земель; *III* — стоимость природы; *IV* — стоимость взаимодействия.**

На рис. 9.3 показаны кривые, характеризующие (в величинах чистой энергии) одно из решений такой модели. Если площадь обрабатываемой и застроенной земли превышает 40%, то, как только возможности природного жизнеобеспечения оказываются не в состоянии удовлетворить потребности интенсивного городского и сельскохозяйственного развития, стоимость всего ландшафта резко падает.

В этой ситуации пропорционально уменьшился оборот. Таким образом, «даже простейшие модели ясно показывают, что высокоэнергетические системы, такие, как города, нуждаются в обильном природном жизнеобеспечении. Если для обеспечения необходимых входов от природы не сохраняются большие пространства природной среды, то качество жизни в городе снижается, и этот город не может больше экономически конкурировать с другими городами, где имеются мощные входы системы жизнеобеспечения. Часто именно это, а не энергия сама по себе становится лимитирующим фактором. При этом некоторые основные природные ресурсы нуждаются в высоком уровне потока энергии для своего поддержания» (Одум, 1986, т.2 с.222).

9.2. Ландшафтный дизайн

"Я природой живу и дышу,
Вдохновенно и просто пишу,
Растворяясь душой в простоте,
Я живу на земле в красоте"

И. Северянин

Подразделение ландшафта на три компонента окружающей среды — «природный», «освоенный» и «искусственный», как это традиционно делается в ландшафтной архитектуре (рис. 9.4), — открывает другой удобный подход к изучению потребностей и взаимосвязей нашего хозяйства.

Хотя урбанизированная, или искусственная, среда «паразитирует» на среде жизнеобеспечения (природной и «одомашненной»), получая биологическую продукцию для своих нужд, она создает и экспортирует другие, преимущественно небиологические ресурсы. Это удобрения, капитал, произведенная энергия и товары, которые могут быть как полезными, так и опасными для биологической среды. Можно было бы сделать значительно больше для увеличения полезных субсидий и снижения стрессовых воздействий на выходе с этой заряженной энергией и плотно населенной «горячей точки», и отныне это должно стать главной целью человечества. Неизвестно, может ли

соответствующая технология заменить в глобальном масштабе блага, предоставляемые биотическим комплексом жизнеобеспечения, и услуги, выполняемые природными ЭГС (Одум, 1986).

Рис. 9.4. Блоковая модель для планирования ЭГС в соответствии с представлениями ландшафтного дизайна (по Ю.Одуму, 1986)

В ландшафтном или экодизайне — человек максимально пытается приблизить свою среду обитания, свой дом к естественным природным условиям. Правильно составленный эко-интерьер дома позволяет его обитателям ощутить единение с природой, почувствовать гармонию окружающего мира, насладиться спокойствием вне суеты большого города. Единение с природой помогает человеку быстро восстанавливать силу и возвращает первоначальную гармонию. Все это благоприятно сказывается на физическом и психологическом здоровье человека и делает его дом уютней и гармоничней.

Экодизайн — это, в первую очередь, проектная и управленческая деятельность, характерными чертами которой являются: комплексность подхода к задачам проектирования (системное проектирование); сочетание в проектировании технико-экономических, экологических и иных критериев эффективности и эстетических требований (художественное конструирование); конечная ориентация на человека в совокупности его физиологических (эргономических) и духовных характеристик, разнообразных потребностей (Сосунова, 2015).

Основными принципами экодизайна являются следующие положения (Сырги, 2015).

1). *Больше света и простора*. Стремление приблизить дом человека к естественным условиям в экологическом дизайне проявляется через максимальное освобождение пространства от лишних вещей и использовании сложных комбинаций источников света

в сочетании с простыми формами и силуэтами мебели и предметов декора. В просторной комнате человек, как правило, чувствует себя более комфортно. Если комната небольшая, то можно прибегнуть к использованию зеркал, панно или картин с изображением, имеющих перспективу. Зеркала значительно «углубляют» пространство. Использование пастельных тонов в окраске стен поможет сделать комнату более светлой. Как известно, световые лучи имеют свойство отра- жаться. Чем больше возможностей для отражения вы предоставите, тем светлее будет казаться комната.

2) *Многофункциональность*. Она заключается в выполнении объектом нескольких различных функций. Экодизайн приветствует такие предметы, которые одинаково уместны и в городской квартире, и на даче. Чем меньше излишеств, тем больше природных ресурсов сберегается.

3) *Возобновляемость*. Данный стиль предполагает использование натуральных, нетоксичных материалов, которые перерабатываются и используются много раз. Это дерево, стекло, керамика, картон, металлы, в том числе драго- ценные. Камень и, в большей степени, дерево — возобновляемые материалы: при правильном использовании этих ресурсов они с течением времени полностью восстанавливаются. Основные источники токсичных веществ, попадающих в атмосферу городской квартиры, — вовсе не уличный воздух, а некачественные строительные и отделочные материалы.

4) *Долговечность*. Самые прочные и долговечные вещи, как правило, самые экологичные. Предметы интерьера из дерева и качественных натуральных тканей служат десятилетиями. Стремление уменьшить использование техники. Оставим дома только самую необходимую бы- товую технику. Экологи уверены: чем больше технологических инноваций, тем больше загрязняется планета.

5) *Энергосбережение*. Предпочтительнее бытовые приборы, экономично расходующие электричество и воду. Современные дома и квартиры прямо напичканы бытовой техникой — холодильники, стиральные и посудомоечные машины, электрические варочные панели и духовки, а также прочая техника имеет немалые мощности. В совокупности она потребляет огромное количество электроэнергии, снизить расход которой можно только одним способом — использовать энергосберегающую технику.

6) *Безопасность*. Различные изделия и предметы мебели для человека должны быть совершенно безопасными в использовании, отсутствии вреда здоровью, сведению к минимуму шумов, выбросов, излучения, вибрации и т. п.

7) *Использование отходов*. Обновить мебель, обшив старые кресла и диваны лоскутами ткани — сейчас это не показатель бедности, а модный тренд. Также это отличный вариант творчества для тех, кто хочет иметь дома оригинальные предметы, кото- рых не найти ни в одном магазине.

8) *Посадка растений*. Экодизайн подразумевает, что человек не только потребляет природные ресурсы, но и восстанавливает их. Полноценное восстановление предполагает посадку пяти саженцев взамен одного спиленного дерева. С помощью растений вы бесспорно получите нескучный интерьер, а грамотное из использование придадут квартире законченный вид и завершат задумку архитектора.

Искусственные экосистемы (нообиогеоценозы или социоэкосистемы) - агроценозы (поля с сельскохозяйственными культурами, фермы с прилегающими пастбищами, виноградники, рыбоводные пруды, огороды, тепличные хозяйства и др.) которые составляют в настоящее время около десяти процентов суши, но дают около 90% пищевой энергии. В отличие от природных экосистем они включает в себя дополнительный компонент – нооценоз, это часть искусственной экосистемы, включающая в себя средства труда, общество и продукты труда.

9.3. Искусственные водные эколого-геологические системы

«Воде дана волшебная власть стать соком жизни на земле».

Леонардо да Винчи

9.3.1. Общие положения. Создание искусственных водных эколого-геологических систем связано с обустройством множества типов искусственных водоёмов, используемых для различных нужд: запасов пресных вод, судоходства, рыборазведения, рекреационных зон и т.п. Это всевозможные пруды, озера, водохранилища, каналы различного размера и назначения. Во всех случаях их создание и эксплуатация требуют применения экологически приемлемых технологий их эксплуатации и восстановления (оздоровления). Любой искусственный водоем должен рассматриваться как специфическая эколого-геологическая система, требующая ухода и экологического контроля с целью его нормального функционирования, т.е. требует управления.

В настоящее время, когда водные объекты и их водосборы подвержены значительному антропогенному воздействию,

восстановление следует понимать не как возврат экосистемы к ее начальному состоянию в далеком прошлом, а прежде всего как снижение антропогенной нагрузки на водоем, удаление биогенных и загрязняющих веществ, повышение самоочищающей способности.

Именно антропогенное воздействие формирует облик современных водных экосистем. Антропогенное влияние, оказываемое на водоемы, различается как по характеру, так и по степени проявления. Воздействие на водные экосистемы может складываться из токсического влияния поступающих веществ на существующие популяции, а также из изменения основных структурно-функциональных показателей водных сообществ, за счет дополнительного привноса биогенных веществ, в первую очередь азота и фосфора, т.н. антропогенное *эвтрофирование*[1], связанное с развитием синезеленых водорослей.

Основным фактором, определяющим биологическую продуктивность водоемов и как следствие интенсивность процессов эвтрофирования, является содержание биогенных элементов и в первую очередь содержание фосфора.

Методика моделирования и разработки статических и динамических концептуальных математических моделей водных ЭГС (рис.9.5), а также математических моделей процессов эвтрофикации описана в ряде работ (см. например, Мешалкин и др., 2016).

Источники поступления веществ, ответственных за загрязнение и эвтрофикацию, подразделяются на организованные и диффузные, которые связаны, главным образом, с такими основными видами хозяйственной деятельности, как организация населенных пунктов и зон рекреации, промышленное производство и сельское хозяйство. Также следует учитывать поступление веществ с атмосферными осадками. При отсутствии антропогенного влияния естественные пресноводные высокопродуктивные сообщества могут устойчиво существовать долгое время, однако интенсивная урбанизация водосборов приводит к значительному росту и ускорению продукционных процессов в водных экосистемах. Сокращение поступления основных биогенов приводит к быстрым и заметным обратным эффектам (Никитин, Латыпова, 2014).

---

[1] *Эвтрофирование* (эвтрофикация) вод - процесс повышения биологической продуктивности водных объектов в результате накопления в воде биогенных элементов под действием антропогенных или природных факторов. Процесс эвтрофикации стимулируется восстановлением питательных веществ в воде из донных отложений. Результатом образования метана вследствие разложения органических остатков в донных отложениях является увеличение азота и фосфора.

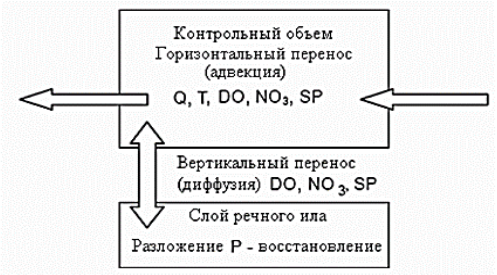


Рис.9.5. Концептуальная модель восстановления фосфора из осадков *(SP* - растворенный фосфор, *DO* - растворенный кислород, *N0₃* - нитратный азот, *Q* - расход воды в реке, *T*- температура воды, *P* - фосфор) (Мешалкин и др., 2016)

В открытых водоемах основное количество биомассы поддерживается на втором трофическом уровне. При этом в данных экосистемах не три, а четыре основных трофических уровня: 1) микроводоросли; 2) питающийся ими зоопланктон; 3) животные, питающиеся зоопланктоном, и 4) хищные животные. Этому факту можно дать следующее объяснение. При крайне низком содержании растворенных питательных (биогенных) веществ в открытых водах из растений могут существовать только микроводоросли благодаря тому, что у них высокое отношение поверхности к объему. Эти микроводоросли способны глубоко утилизировать питательные вещества, но по той же самой причине – высокое отношение поверхности к объему – у них высокие удельные затраты на поддержание жизнедеятельности. Возникает такой парадокс, несмотря на то что эффективность передачи энергии на следующий трофический уровень не превышает 10% (закон Линдемана), затраты на подержание жизнедеятельности на первом трофическом уровне в десять и более раз выше, чем на втором. Поэтому экосистеме (которая, как мы знаем, стремится к максимально возможному содержанию биомассы и информационных связей) энергетически выгоднее, несмотря на закон Линдемана, поддерживать большую биомассу не на первом, а на последующих уровнях. Причем по теории естественного равновесия Хейрстона, Смита и Слободкна (согласно которой в экосистемах с нечетным количеством трофических уровней, четные уровни подавлены, а в экосистемах с четным количеством трофических уровней “провалы” в биомассе наблюдаются на нечетных уровнях), основные пищевые цепи экосистемы открытых вод должны содержать четное количество трофических уровней (Келль, 2009).

Поэтому эвтрофикация водоемов в результате неразумной хозяйственной деятельности человека может приводить к «цветению» водоёмов – перераспределению биомассы в сторону увеличения основного её содержания на первом трофическом уровне. Это в свою очередь ведёт к повышению мутности, появлению аноксидных зон, деградации и гибели водных экосистем. Данные закономерности относятся и к искусственным водным экосистемам, в частности – к биопрудам-охладителям, используемым при организации на производствах замкнутого цикла водопользования.

Исходя из этого к наиболее эффективным механизмам поддержания гомеостаза водных экосистем относятся (Келль, 2009):

а) чётное количество основных трофических уровней, равное 4, что согласно теории естественного равновесия Хейрстона, Смита и Слободкина приводит к подавлению биомассы первого трофического уровня;

б) организмы фильтраторы – представители различных классов животного мира;

в) высокие скорости роста организмов первого и второго трофических уровней;

г) возможность быстрой структурной перестройки экосистемы с заменой экологически эквивалентными видами.

При выборе представителей различных классов растительного и животного мира как факторов влияния на технофитон пруда-охладителя перспективным представляется:

а) подавление фитотехнофитона представителями 2 трофического уровня (фильтраторы - зоопланктон, двухстворчатые моллюски, фитопланктоноядные рыбы);

б) подавление зоо- и фитотехнофитона представителями 4 трофического уровня (хищные рыбы, рыбоядные черепахи);

в) конкурентное подавление фитотехнофитона (свет, биогенные элементы, аллелохимические факторы) высшими водными растениями и водорослями.

В свою очередь водные организмы, интродуцируемые в пруд-охладитель должны удовлетворять следующим требованиям:

а) по своим физиологическим параметрам быть способными к существованию и размножению в конкретном пруде-охладителе, являющемся эфтрофной водной экосистемой;

б) обладать способностью к подавлению бурного роста водных организмов, вызывающих биообрастание технологического оборудования (технофитона);

г) не ухудшать качества воды с точки зрения ее последующей подачи на охлаждение технологического оборудования. В частности, не попадать в водозабор (реотаксис, прикрепление к грунту, нахождение не в водозаборной зоне водоёма) (Келль, 2009).

9.3.2. Защитные и восстановительные мероприятия. Первым шагом, к восстановлению озера или водохранилища, является *снижение поступления* промышленных, ливневых и т.п. сточных вод, так называемой внешней нагрузки. Эти источники обычно вносят наибольший вклад в содержание фосфора, азота, других биогенов и загрязняющих веществ в водоеме. Если этого не предпринять, то любые восстановительные процедуры не приведут к сколь-нибудь значимому и устойчивому улучшению состояния. Иногда, одно лишь снижение внешней нагрузки, уже может быть достаточной мерой, для возвращения водной экосистемы к нормальному функционированию. Однако в большинстве случаев, другие источники поступления биогенов, могут быстро восполнять эти потери и требуют проведения дополнительных восстановительных мероприятий (Королев, 2019а).

Вторым способом борьбы с эвтрофированием ***является химическая инактивация фосфора***. Инактивация фосфора, его цель – удаление доступного фосфора из водной толщи и замедление обменных реакций между донными отложениями и придонными слоями воды. Связывание свободного фосфора осуществляется внесением химических добавок с его последующим осаждением. Добавки вносят непосредственно в воду с плавсредств (рис.9.6), распыляют с самолетов или же рассыпают по льду. Наиболее широкое применение нашли в основном соединения алюминия и железа, в меньшей степени кальция. По способности удерживать фосфор, связывающие вещества расположены в следующей убывающей последовательности: Al>Fe>Ca. Стоимость реализации подобных мероприятий составляет порядка 300 тыс. руб. на гектар акватории.

Аэрация и ***оксигенация*** (насыщение воздухом или кислородом) применяются для восстановления нормального кислородного режима в водоеме (рис. 9.7). Эти методы активно используют как быстрое средство для устранения дефицита кислорода или как временное решение, до тех пор, пока не окажутся эффективными другие восстановительные мероприятия. Аэрация и оксигенация также очень хорошо подходят для улучшения условий существования рыб и других гидробионтов. Кроме того, обогащение придонных слоев кислородом, предохраняет от поступления из донных отложений железа, марганца,

аммонийного азота, сероводорода, а также снижает интенсивность высвобождения фосфора.

Рис.9.6. Внесение препарата PHOSLOCK™ для борьбы с синезеленым цветением на водоеме, используемом для питьевого водоснабжения (www.aquatechnex.wordpress.com)

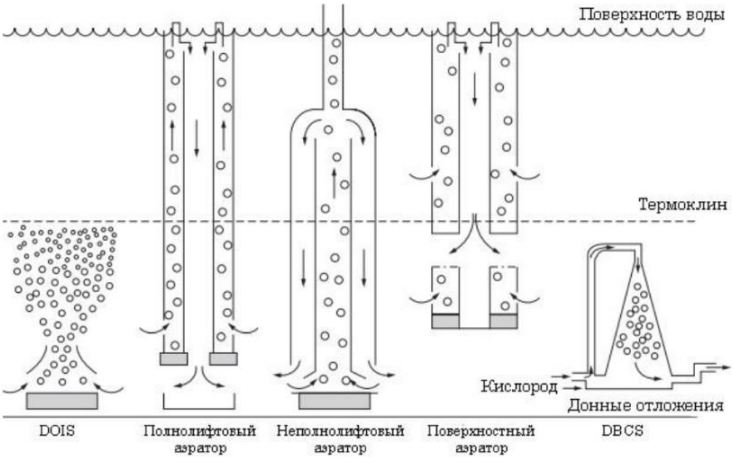


Рис.9.7. Варианты схем устройств для аэрации водоемов (Cooke, 2005)

Самый обычный способ –использование глубоководного аэратора, с его размещением в самой глубокой точке водоема. Снабжение

аэратора осуществляется из расположенных на берегу баллонов с кислородом. Насыщение кислородом осуществляется при помощи инжектора или диффузора, при этом с максимальной осторожностью, чтобы не разрушить термоклин. В качестве примера можно привести систему ECO_2SuperOxygenation™ – инженерное решение на основе конуса Списа для насыщения воды кислородом (рис. 9.8).

Рис. 9.8. Установка конуса Списа для оксигенации водных масс водоема
(www.wvconstructioncompany.com/portfolio/oso-reservoir)

Наряду с этим широко используется искусственная циркуляция вод в водоемах, что особенно важно для непроточных водных объектов, замкнутых водоёмов. Для создания циркуляции вод используются различные устройства, в том числе, работающие на солнечных батареях (рис.9.9). Разнообразные модели таких устройств работают на солнечной энергии и обеспечивают различные варианты водной циркуляции, как поверхностной в эпилимнионе[1], так и глубоководной в гиполимнионе. Можно отметить, что работа устройств возможна даже в зимних условиях.

[1] *Эпилимнион* — верхний наиболее прогреваемый, богатый кислородом слой водоема, в котором происходит сезонная вертикальная циркуляция воды и сосредоточена основная масса фитопланктона; *гиполимнион* — (от гипо... и лимнион), характерный для глубоких озер холодный, бедный кислородом слой воды, лежащий ниже зоны быстрого перепада температуры термопланы.

Кроме эвтрофирвания на некоторых искусственных водоёмах приходится бороться с ***закислением***. Закисление водоемов может быть вызвано как природными, так и антропогенными причинами. Как и в случае с антропогенной эфтрофикацией, антропогенное закисление поверхностных вод (за счет кислотных дождей, нерационального землепользования, вымывания серы из пород и т.д.) протекает довольно стремительно (годы и десятилетия) и, как правило, носит более жесткий характер, по сравнению с большинством природных причин. Для устранения закисления в водоёмах применяют способы ***химической нейтрализации*** – внесение карбоната кальция ($CaCO_3$), доломита $CaMg(CO_3)_2$, кальцинированной соды (Na_2CO_3), оливин (Mg_2SiO_4), гашеная известь ($Ca(OH)_2$ и др.

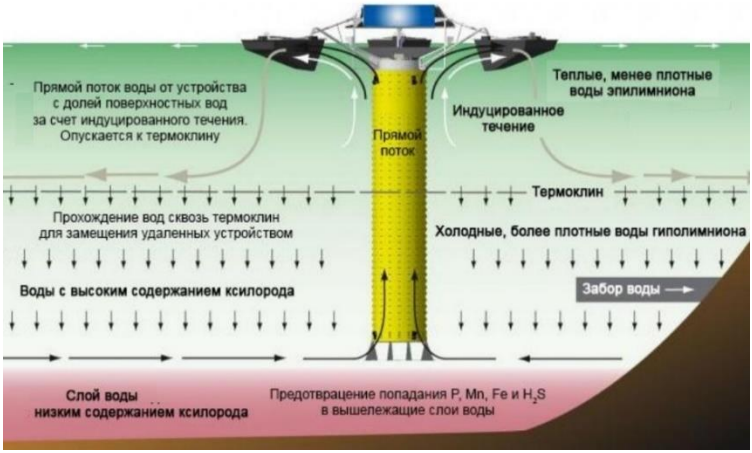


Рис.9.9. Схема работы устройства на солнечных батареях для аэрации и циркуляции водных масс гиполимниона SOLARBEE™ (www.medoraco.com)

Биологическая нейтрализация сильно закисленных водоемов обеспечивается стимулированием биологических процессов, повышающих щелочность среды: денитрификации и сульфатредукции (Никитин, Латыпова, 2014). Предпосылкой для такого подхода является факт, что в бескислородных условиях в качестве акцепторов электронов могут использоваться NO_3^-, SO_4^{2-}, что ведет к снижению концентрации кислотных анионов и образованию щелочных катионов (NH_4^+, Fe^{2+}). Важной составляющей является обязательное соблюдение анаэробных условий. Для того чтобы этот процесс протекал активно, в большом количестве требуется органический субстрат, выступающий в роли

донора электронов. Поэтому при осуществлении процедуры биологической нейтрализации, в водоем вносят биодоступное органическое вещество (т.н. сапробизация), например: этанол, метанол, глюкозу, солому, картофельные очистки, навоз. Как вариант, органическое вещество может быть получено непосредственно в водоеме, в результате т.н. контролируемой эвтрофикации, за счет внесения фосфорсодержащих удобрений.

Кардинальным улучшением экологического состояния искусственных водоёмов является ***выемка донных отложений***. Однако этот метод не применим для водоёмов большого объема. Выемка донных отложений предполагает полное или частичное удаление путём драгирования слоя наносов, содержащих большое количество биогенных элементов, тяжелых металлов и других опасных веществ. Наряду с драгами применяются мощные пневмонасосы и иные земснаряды.

Откачиваемую пульпу с донными осадками сбрасывают в специальные контейнеры и подвергают обезвоживанию (рис. 9.10).

Рис.9.10. Один из способов обезвоживания изъятых донных отложенийс помощью технологии Geotube™ (www.dewateringsolutions.net)

Принудительное обезвоживание можно особо рекомендовать для донных отложений, загрязненных тяжелыми металлами. Без этого, перекачиваемая пульпа оказывается на берегу в окислительных условиях, при этом величина pHможет понизиться до 3,5 единиц за

небольшой промежуток времени (до 20 суток), все это приводит к высвобождению значительных количеств ранее связанных металлов: Zn, Ni, Cd, Co, Cu, Pb и Cr, которые могут попасть обратно в водоем с возвратными водами.

После извлечения донных отложений и первичных работ по их обезвоживанию, остро встает вопрос по их дальнейшему размещению. Условно чистый грунт без предварительной обработки может быть оставлен на берегу и использован при планировке территории, устройстве дамб и обваловок, рекультивации нарушенных земель, строительстве дорог, засыпке углублений и пустот ландшафта для нужд садово-паркового хозяйства и т.п.

Утилизация и очистка загрязненных отложений зависит от токсических свойств, содержащихся в них веществ. Так, нефтяные углеводороды способны к саморазрушению в ходе хранения в естественных условиях (Caliman F.A. et al., 2011; Королев В.А., 2001, 2019). Продукты их химических превращений могут ассимилироваться природной средой без ущерба для нее.

Полиароматические углеводороды отличаются большей устойчивостью к воздействию температуры и химических реагентов, слабо подвержены биохимической переработке бактериальными культурами. Наиболее радикальным способом их ликвидации является термоокислительная деструкция, т.е. высокотемпературная обработка грунта при избыточном количестве кислорода воздуха. Стойкие органические загрязнители представляют наиболее опасную и проблематичную группу веществ в донных отложениях.

Важным этапом экологического восстановления водоёмов является применение различных вариантов биологической очистки. Для этого используются биоплато (или ветланды), работающие как биофильтры. Биоплато представляют собой блоки с почвенно-грунтовой смесью и водными растениями. Они устанавливаются в прибрежной зоне в точках поступления в водоем поверхностного стока и осуществляют очистку поступающей воды. За счет потери скорости водного потока в осадок выпадают взвешенные частицы, а за счет фильтрации через грунтово-растительный слой, а также благодаря микробному сообществу из воды удаляются загрязняющие вещества и биогенные элементы (Королев, 2019). Вариантов конструкций биоплато предложено достаточно много. Один из них представлен на рис. 9.11 и 9.12.

Кроме того, организуются работы по удалению плавающей по поверхности растительности или ***удаления водорослей*** со дна водоёма. Для этого разработаны различные технологии, в том числе

специализированные плавающие комбайны-амфибии для удаления водных и прибрежных растений (рис. 9.13), искусственные затенения поверхности черной плёнкой и т.д.

Рис.9.11. Схема организации биоплато по типу поверхностного потока и пример использования для доочистки муниципальных сточных вод (Kadlec, Wallace, 2008)

Рис.9.12. Схема организации плавающих биоплато и пример их использования на практике: a) запуск биоплато; b) установка ограждений от растительноядных птиц; c) биоплато через 4 месяца; d) биоплато через 13 месяцев (Winstonetal., 2013)

Рис.9.13. Комбайн для сбора водных растений AquariusSystems™ 320 серии
(www.aquarius-systems.com)

Среди ***физических методов*** из последних инновационных разработок по борьбе с водорослями и цветением водоёмов является *ультразвуковое облучение* водоёма. Как показал опыт работы с ультразвуковыми облучателями, эти приборы, установленные на водоеме, решают две основные задачи: уничтожают синезеленые водоросли и блокируют возможность последующего развития водорослей в водоеме.

Ультразвуковое излучение, например приборов серии SS, ограничивает рост большинства планктонных, нитевидных водорослей, а также мешает образованию биопленки. В зависимости от модели приборов (модельный ряд от SS100 до SS600) диапазон воздействия ультразвука на синезеленые водоросли составляет от 200 до 700 метров. Ультразвуковые частоты излучаются в воду в диапазоне частот от 20 до 60 килогерц, потребляемая мощность составляет 25 Вт от сети 220 вольт переменного тока или 24 вольта постоянного. Вес прибора с излучателем не превышает 8,5 килограмм. Как показывают испытания всего модельного ряда приборов от SS100 до SS600, ультразвуковое излучение эффективно воздействует на водоросли и не наносит вреда

другим сообществам водоема, а также рыбам, водоплавающим птицам и людям.

Из ***химических методов*** для борьбы с водорослями, включая синезеленые, применяются специализированные гербициды. Кроме того, экологическими методами является биологические способы борьбы с зарастанием водоёмов и водорослями путём разведения в водоемах растительноядных животных – членистоногих и рыб (белый амур и др.).

9.4. Искусственные сухопутные эколого-геологические системы

> «Благо людей и мира на Земле, безопасность планеты и торжество «царства разума» — это дело всех и каждого».
>
> *В.И. Вернадский*

9.4.1. Общие понятия. Искусственные сухопутные эколого-геологические системы — это ЭГС, созданные человеком, например, в пределах агроценозов, городских ЭГС, природно-хозяйственных систем и т.п.

В соответствии с этим выделяются следующие искусственные сухопутные ЭГС:

1) сельскохозяйственные (подразделяются по видам производимого продукта);

2) городские (подразделяются по численности населения: деревенские, поселковые, городские);

3) рекреационные (парки, скверы);

5) промышленные (подразделяются по видам промышленности);

6) горнодобывающие;

7) природоохранные зоны.

Все искусственные эколого-геологические системы имеют тот же набор компонентов, что и естественные экосистемы: продуценты, консументы и редуценты, но есть существенные отличия в перераспределении потоков вещества и энергии. В частности, созданные человеком экосистемы отличаются от естественных следующим:

1. Меньшим числом видов и преобладанием организмов одного или нескольких видов (низкая выравненность видов);

2. Невысокой устойчивостью и сильной зависимостью от энергии, вносимой в систему человеком;

3. Короткими цепями питания из-за небольшого числа видов;

4. Незамкнутым круговоротом веществ вследствие изъятия урожая (продукции сообщества) человеком, тогда как естественные процессы, наоборот, стремятся включить в круговорот как можно большую часть урожая.

Без поддержания энергетических потоков со стороны человека в искусственных ЭГС с той или иной скоростью восстанавливаются естественные процессы и формируется естественная структура компонентов экосистемы и вещественно-энергетических потоков между ними.

9.4.2. Сельскохозяйственные эколого-геологические системы – искусственные агроэкосистемы, создаваемые человеком с целью производства сельскохозяйственных продуктов. Они подразделяются по видам производимого продукта.

Уникальными агро-экосистемами являются так называемые «гиперионы» (от англ. hyperions) – искусственные агро-экосистемы, способные противостоять влиянию окружающей среды, изменениям климата и т.п., благодаря умной системе экономики и охраны окружающей среды.

Проект одного из таких гиперионов был разработан фирмой «Vincent Callebaut Architectures» для Нью-Дели в Индии. Они представляют собой уникальные архитектурные сооружения и состоят из шести 36-этажных башен, построенных с использованием дерева, в каждой из которых есть жилые и офисные помещения, а также установлены экологичные системы выращивания растений (рис. 9.14). Башни соединяются пешеходными мостами и большой оранжереей, где жители «деревни» могут собираться вместе, плавать в бассейне, собирать фрукты, наблюдать за играющими на площадках детьми.

Свое название проект получил благодаря самому высокому дереву в мире – секвойе Гиперион высотой 115,55 м, обнаруженной в Северной Каролине. Авторы проекта видят его своеобразным культурным узлом, который способствует озеленению города, развитию мини-фермерства, охране окружающей среды.

Это своего рода вертикальная деревня. Помимо жилых помещений, здесь предоставляется пространство для бизнес-инкубаторов, лабораторий, коворкингов и т.д. Конструкции покрыты садами, созданными в соответствии с принципами органической аквапоники – здесь выращиваются овощи. Замкнутая система водоснабжения позволяет экономить до 90% воды, потребляемой жителями.

Рис. 9.14. Прект гипериона в Нью-Дели (Индия)

В ближайшем будущем технологии сельского хозяйства перейдут на точное земледелие, в основе которого лежит создание искусственных полностью автоматизированных и управляемых агроэкосистем, важная роль в которых будет отводиться ЭГС.

Такую систему можно представить в виде связки ряда элементов (рис. 9.15).

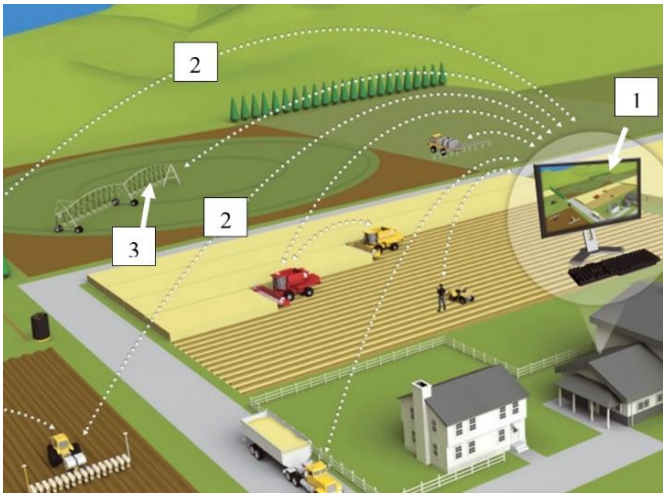


Рис.9.15. Искусственная агроэкосистема при точном земледелии: 1 – центральный компьютер, ОУ; 2 – информационные сигналы датчиков управления; 3 – управляющие устройства

В неё входят: органы детектирования в виде датчиков, центральный компьютер (1), который в связке с навигационной системой (например, ГЛОНАСС) позволяет принять сигналы с датчиков (2), и зная их координаты, после соответствующего анализа привести в действие исполнительные функциональные мелиоративные системы (3) для добавления удобрений или воды. Система работает в полностью автоматизированном режиме на всех стадиях производства сельхозпродукции, начиная от подготовки полей, посева, выращивания и сбора урожая.

Определённым технологическим прорывом являются так называемые «вертикальные фермы» (рис. 9.16), в которых растения выращиваются на многоярусных этажах либо на вертикальных стенках, оборудованных гидропонной системой и светодиодным освещением в нужном для растения диапазоне волн. Выращивание растений в таких фермах полностью автоматизировано на всех стадиях производства, а сокращенные площади позволяют собирать урожаи в сотни раз превышающие аналогичные в традиционных фермах.

Рис.9.16. Крупнейшая вертикальная ферма «РусЭко» на Каширском шоссе в Москве

9.4.3. Городские эколого-геологические системы – самые распространенные в настоящее время, в которых сосредоточено более половины населения Земли. В то же время урбанизация привела к возникновению и обострению большого количества проблем, в том числе инвайронментальных. Стихийные, малопродуманные и необоснованные решения по организации и управлению взаимосвязями

между сообществом урбанизированных территорий и природной окружающей средой могут иметь необратимые последствия в самом ближайшем будущем. Жизнь на урбанизированных территориях усложняется с каждым годом и будет усложняться далее (Бондарев, 2013)[1].

Урбанизированные или ***городские территории*** являются специфической эколого-геологической системой. По Ю.Одуму (1986) город, особенно промышленный, — это неполная или гетеротрофная экосистема, получающая энергию, пищу, волокнистые материалы, воду и другие вещества с больших площадей, находящихся за его пределами.

Именно в городских экосистемах сосредотачивается наибольшее количество населения (табл. 9.1).

Таблица 9.1

Динамика роста городского населения по регионам мира
(Хомич, 2002)

Регионы мира	Годы		
	1950	1986	2000
Северная Америка	64	74	78
Европа	56	73	79
Восточная Азия	43	70	79
Латинская Америка	41	65	77
Китай	12	32	40
Африка	15	30	42
Южная Азия	15	24	35
Российская Федерация	48	72	73

Как показано на рис. 9.17, город отличается от любой природной гетеротрофной экосистемы: 1) гораздо более интенсивным метаболизмом на единицу площади, для чего требуется больший приток концентрированной энергии извне (в наше время поступающей главным образом в виде горючих ископаемых); 2) большими потребностями в поступлении веществ извне, например металлов для торговли и промышленности, не считая тех металлов (и сверх тех их количеств), которые необходимы для поддержания жизни; и 3) более мощным и более ядовитым потоком отходов, многие из которых —

[1] *Бондарев В.П.* Социологическая урбанистика. // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 18. Социология и политика. 2013, № 4, с. 119-134

синтетические соединения, более токсичные, чем естественное сырье, из которого они получены. Следовательно, среда на входе и среда на выходе (см. рис. 9.17) для системы города значительно важнее, чем для такой автотрофной системы, как, например, лес и т.п.

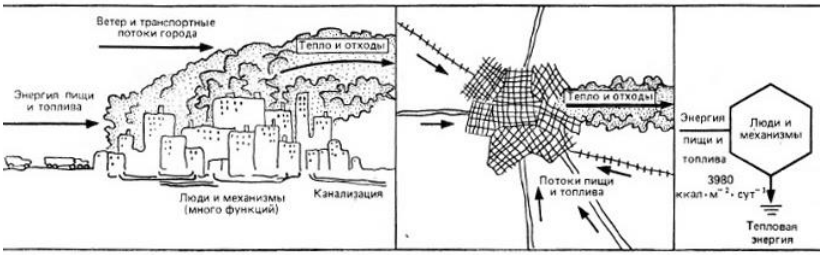


Рис.9.17. Город как гетеротрофная экосистема с приходными и расходными вещественно-энергетическими потоками (по Ю.Одуму, 1986)

Выход вещественно-энергетических потоков в окружающую среду города огромен. По оценкам Ю.Одума (1986) индустриальный город выделяет за сутки тепловой энергии более 3980 ккал/м^2, а средние потребности 1 м^2 города в поступающей энергии составляют около 4 тыс. ккал/сут, что за год составляет около 1,5 млн. ккал.

О масштабах теплопотерь в городах от зданий, теплосетей и т.п. источников можно судить по тепловизионной съемке (рис.9.18).

Рис.9.18. Тепловизионная съемка городского района: слева – обычное фото, справа – тепловая съемка (температура тем выше, чем светлее цвет)

Не менее впечатляют ночные снимки территорий Земли из Космоса, иллюстрирующие масштабы потребления электроэнергии и

искусственного освещения, в том числе городов и магистралей (рис.9.19 и 9.20).

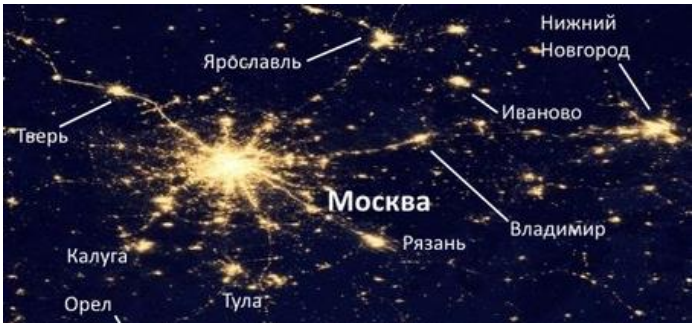


Рис.9.19. Космоснимок некоторых ночных городов центральной России

Рис.9.20. Космоснимок ночной Европы

Ночные снимки со спутника наглядно показывают, что потребление энергии делает города «горячими точками» планеты. Один гектар города потребляет в 1000 или более раз больше энергии, чем такая же площадь сельской местности (Одум, 1986). Образующиеся в результате функционирования города тепло, пыль и другие вещества,

загрязняющие воздух, заметно изменяют микроклимат городов по сравнению с климатом окружающей местности. Как правило, в городах теплее на несколько градусов, в них повышена облачность, меньше солнечного света, больше мороси и тумана, чем в прилежащей сельской местности. Строительство городов становится ведущей причиной эрозии почвы в ряде районов, угрожающей свести к нулю результаты мер по сохранению почв в сельскохозяйственных районах. Проблемы городских экосистем требуют для своего решения значительных усилий.

Инвайронментальные подходы к изучению урбанизированной территории имеют свои традиции. Так, широкое распространение получила концепция города-сада, идея которого впервые прозвучала еще в конце позапрошлого века в книге британского социолога Э. Говарда “Города-сады будущего” (1898). Говард считал, что современный (на момент написания книги) город изжил себя.

Такого рода города имели популярность в первой половине XX в. в Великобритании, особенно яркий пример — города-спутники Лондона. Также проводились попытки внедрить элементы города-сада в других странах (Бельгия, Германия, Испания). В России при-мерами могут быть город-сад в Барнауле, поселок Сокол в Москве, Красный город-сад в Ростове-на-Дону.Во второй половине XX в. идеи города-сада потеряли популярность, многие пригородные районы, в которые закладывалась эта концепция, превратились в обычные спальные.

Однако начиная с 80-х гг. XX в. описанная концепция получила развитие в современной градостроительной практике — в направлении, известном как “новый урбанизм”, в рамках которого происходит отказ от “авто-мобильных” пригородов в пользу небольшого компактного “пешеходного” района или города7. В основе заложен отказ от сложившегося пригородного стиля жизни в пользу небольших, компактных жилых кварталов, где все необходимые жителям службы (магазины, бытовые услуги и т.п.) находятся на пешеходном расстоянии от жилья, а передвижение внутри застройки осуществляется не на автомобиле, а с помощью велосипедов, самокатов и пешком. Новый урбанизм возник и получил наибольшее распространение в США, однако примеры проектов, созданных в этом стиле, появляются и в других странах, в частности в Великобритании, Австралии, Канаде, России. Другая важная инвайронментальная идея в области урбанистки была высказана Я. Дугласом8. Он предложил рассматривать город как экосистему, которая вбирает в себя одни вещества, а выделяет другие. Данная концепция получила распространение как в географической, так и в социологической

литературе9. В рамках этой концепции урбанизированные территории рассматриваются как экологическая ниша (местообитание) человека. При этом исследуется комплекс показателей и пороговых значений оптимальных условий, отражающих количественные характеристики представлений о “цветущем крае” (Бондарев, 2013).

Что касается стратегий решения инвайронментальных проблем на урбанизированных территориях, то здесь также просматривается необходимость сочетания натуралистической, технократической и коадаптационной стратегий. Если традиционно архитекторы предлагали сделать акцент на технократических решениях улучшения экологии города11, то представители естествознания, в первую очередь биологи, геологи и географы, предлагали обратить внимание на природный каркас городов12, представители же общественных наук настаивали на необходимости сконцентрироваться на психологическом и социальном климате урбанизированных территорий в зависимости от окружающей среды13. Много было сделано для понимания целостности урбанизированных территорий и окружающей среды в рамках геоурбанистики14. Однако в каждом случае можно увидеть в том или ином виде включение всех трех подходов (Бондарев, 2013).

Городская экосистема - это пространственно-ограниченная природно-техногенная система, сложный комплекс взаимосвязанных обменом вещества и энергии автономных живых организмов, абиотических элементов, природных и техногенных, создающих городскую среду жизни человека, отвечающую его потребностям: биологическим, психологическим, этническим, трудовым, экономическим, социальным (Колотвин, Зинюхин, 2003). Состоит она из взаимосвязанных и взаимопроникающих подсистем (сред): квазиприродной (преобразованной геологической среды), ландшафтно-архитектурной, социально-экономической, общественно-производственной. Связь между ними столь велика, что практически ни одна из них в отдельности не может выполнять свои функции и в то же время отсутствие одной из подсистем влечет разрушение этой экосистемы в целом.

Урбанизация породила новые виды экологических проблем, получившие название природно-техногенных или инженерно-геологических опасностей. Под природно-техногенными опасностями понимают процессы и явления, которые развиваются в геологической среде города в результате техногенных воздействий. В пределах городских ЭГС это: опускание территории, подтопление, карстово-суффозионные провалы, техногенные физические поля (вибрационное,

тепловое, электромагнитное и др.) и др. Природно-техногенные процессы могут приводить к преждевременной деформации зданий и сооружений, ускоренному разрушению подземных коммуникаций, а в ряде случаев представлять угрозу для жизни людей.

Устойчивое развитие городов предполагает решение социально-экономических задач общества и в первую очередь обеспечение населения качественным и комфортным жильем. Создание благоприятных экологических условий жилой среды включает эффективное функционирование систем жизнеобеспечения города.

Градоэкологическая деятельность предполагает:

1) включение в планировочную структуру города природных ландшафтов – гор, водоемов, лесопарков;

2) установление баланса между урбанизированными и природными площадями территории города;

3) увеличение площади зеленых насаждений общего пользования за счет городских лесов и лесопарков;

4) формирование озелененных санитарно-защитных зон между жилыми районами и промышленными предприятиями с учетом данных о фактическом загрязнении окружающей среды;

5) вынос из жилых районов предприятий с вредными и опасными производствами;

6) строительство окружных автомобильных дорог, скоростных магистралей для уменьшения транспортных потоков в черте города;

7) строительство набережных, организация рекреационных зон на берегах водоемов и водотоков;

8) освоение подземного пространства – строительство метрополитена;

9) строительство природоохранных объектов;

10) проведение экологического мониторинга (концептуальную схему которого см. на рис. 4.5), окружающей природной среды, а также целого комплекса мероприятий природоохранного значения.

Расчет индекса устойчивого развития города ($И_{ург}$) проводится по формуле (Хомич, 2002):

$$И_{ург} = \sum_{1}^{n} \frac{Р_{ср}}{Р_{н}} \cdot K_i, \tag{9.1}$$

где n – число показателей, $Р_{ср}$ – средний или фактический показатель, $Р_{н}$ – нормативный показатель, K_i – весовой коэффициент *i*-го показателя. В качестве показателей рекомендуется рассматривать степень загрязнений атмосферного воздуха (воды, почвы,

растительности), среднюю продолжительность жизни, уровень среднедушевого дохода населения, отношение расходов на социальные программы к ВВП.

В пределах городской ЭГС путем зонирования выделяются следующие подсистемы: 1) жилые (селитебные) зоны; 2) общественно-деловые зоны; 3) производственные зоны; 4) зоны инженерной и транспортной инфраструктур; 5) рекреационные зоны; 6) зоны сельскохозяйственного использования; 7) зоны специального назначения; 8) зоны военных объектов, иные зоны режимного назначения.

Градостроительные объекты воздействуют на окружающую среду, изменяя ее состояние. Оценка этого воздействия проводится при разработке градостроительной документации и проектной документации строительного объекта. По результатам оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) выбираются приоритетные направления использования, развития и реконструкции территории; определяются условия и ограничения реализации проектных решений и хозяйственной деятельности на территории.

Важнейший элемент городских ЭГС – сами жилые и общественные здания и их внутренняя среда. Среда помещений жилых и общественных зданий должна отвечать действующим санитарно-гигиеническим нормам: 1) по параметрам микроклимата; 2) по содержанию химических и биологических веществ в воздухе помещений; 3) по уровню воздействия физических факторов; 4) по уровню радиационного фона и активности радона; 5) по качеству питьевой воды. Соблюдение этих норм является экологическим требованием к качеству жилой среды.

Наиболее значимые и общепризнанные экологические требования для проектирования городской среды можно представить в следующем виде: 1) повышение энергоэффективности жилых зданий и застройки за счет применения автономных систем энергообеспечения, использующих возобновляемые источники энергии (солнце, ветер); 2) компенсация недостающих элементов природной среды при озеленении и обводнении территории общественных зон и приквартирных двориков, а также озеленение открытых террас, крыш и стен зданий; 3) применение экологических систем для снижения антропогенного воздействия процессов жизнедеятельности человека на окружающую среду (экономное бытовое потребление воды, замкнутые циклы для очистки канализационных стоков и переработки твердых бытовых отходов) и т.д.

В силу этих обстоятельств возникновение экодизайна как ответвления, специализированной области дизайна в целом, было закономерным и достаточно ожидаемым результатом общественной практики (Сосунова, 2015).

В последние годы получают развитие интегрированные системы автоматического контроля и управления функционированием жилой среды здания, так называемые технологии «**умного дома**» или «экодома». Управление потреблением энергии и коммуникациями может осуществляться через Интернет или по телефону. Интегрированные системы обеспечивают контроль над потреблением и регулирование отопления, освещения, холодного и горячего водоснабжения, электрической нагрузки. Интегрированные системы обеспечивают также безопасность жилища (контроль над задымленностью, утечкой газа на кухне, превышением содержания угарного газа в гараже и т.п.) и выполняют другие функции. Технологии «умный дом» служат для экономии энергии и других ресурсов, для повышения комфорта.

Французский архитектор Венсан Калебо (Vincent Callebout) разрабатывает оригинальный проект восьми типов жилых домов-башен, которые должны будут появиться в центре столицы Франции в рамках проекта «2050: Париж –умный город» (рис.9.21).

Рис. 9.21. Проект экодомов «Париж – умный город»

Они не только будут аккумулировать кислород, благодаря зеленым насаждениям практически по всей внешней стороне каждого дома. Эти

биоклиматические сооружения будут также оснащены тремя типами источников возобновляемой энергии. Кроме того, у каждого здания будет свой собственный водозабор и станции фильтрации и нагрева воды (рис. 9.21 – 9.22).

Рис. 9.22. Башни экодомов проекта «Париж – умный город»

Максимальное использование природных процессов, возобновляемых видов энергии и природных ресурсов при функционировании жилой среды является основным содержанием концепции «***Экодом***». Экодом – это современный комфортабельный дом с автономными системами жизнеобеспечения (рис. 9.23).

Для строительства экодома кроме традиционных материалов (кирпич), используются материалы, изготовленные по энерго- и ресурсосберегающим технологиям (блоки из неавтоклавного ячеистого бетона и грунта, вынимаемого при строительстве). Для обогрева дома и горячего водоснабжения используется солнечная энергия, поглощаемая воздушным коллектором. Когда этой энергии недостаточно, вступает в действие автономная система отопления. Экономия энергии обеспечивается за счет: 1) компактности объема и ориентации дома; 2) поддержания рационального температурного режима (снижение температуры ночью); 3) оптимального распределения тепла по объему дома (циркуляция воздуха с помощью принудительной вентиляции); 4) утилизации тепла с помощью

тепловых аккумуляторов (щебеночных и грунтовых), запасающих солнечную энергию на зимние месяцы (Хомич, 2002).

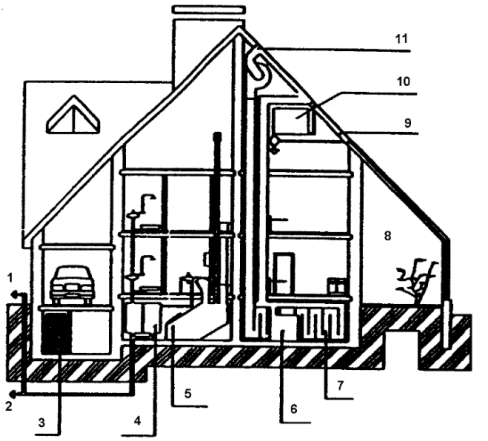


Рис.9.23. Схема инженерных систем экодома (по Хомичу, 2002): **– на полив; 2 – в дренажную кассету; 3 – намораживатель льда; 4 – установка водоочистки; 5 – контейнер биотуалета; 6 – печь; 7 – тепловой аккумулятор; 8 – зимний сад; 9 – водяной коллектор; 10 – бак горячей воды; 11 – воздушный солнечный коллектор**

9.4.4. Промышленные эколого-геологические системы – одни из самых многочисленных и подразделяются по видам промышленности. Они представляют собой специализированные ГИС мониторинга (концептуальную схему которого см. на рис. 4.5), позволяющие отслеживать в автоматическим режиме состояние различных компонентов все промышленной зоны.

Важнейшую роль в них играют системы контроля качества окружающей среды: атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, почв и подпочвенных грунтов. Не менее важное значение в этой системе играет контроль за всевозможными выбросами и отходами.

Создаваемые на таких промзонах АСУ позволяют существенно оптимизировать как производственный процесс, так и улучшить экологическое состояние, доводя контролируемые показатели до допустимых уровней.

9.4.5. Горнодобывающие эколого-геологические системы – это искусственные ЭГС, создающиеся в пределах горнодобывающих и горно-обогатительных комбинатов. Традиционно ГОКи рассматривались как наиболее серьезные источники негативного техногенного воздействия на окружающую среду (Тальгамер, 2012).

В будущем такие искусственные ЭГС будут создаваться как автоматизированные экологичные горнодобывающие комплексы, в которых все производственные процессы автоматически управляются, что позволяет не только оптимизировать производство, но и снизить до требуемых уровней негативные экологические воздействия (Fox, 2002).

Уже сейчас появляются «ростки» подобных производств. Например, на Качканарском ГОКе в 2019 году была внедрена АСУ и система мониторинга транспорта (рис. 9.24). Это позволило более чем на 8% увеличить производительность автосамосвалов в карьерах благодаря цифровизации работы горнотранспортного оборудования. Проект был реализован совместно с компанией ВИСТ Групп (входит в ГК «Цифра»).

Рис. 9.24. Карьер Качканарского ГОКа, оборудованный АСУ

Здесь автоматизированная система управления (АСУ) «Карьер» объединяет геологические показатели и блочную модель месторождения с работой горного транспорта. Это позволило по-новому управлять качеством добываемой руды. Показатели горной массы в каждом забое стали доступны всем участникам рабочего процесса, эти данные стали включать в сменные наряд-задания.

Все самосвалы и экскаваторы ЕВРАЗ КГОКа оборудованы интеллектуальными панелями. Машинисту экскаватора это позволяет видеть блочную модель месторождения: где находится руда, а где

вскрыша. Если ему дано задание грузить вскрышу, он видит ее границы в системе и не погрузит руду. Данные о работе техники по Wi-Fi также передаются диспетчерам и руководителям предприятия. Система непрерывно анализирует их и выбирает для карьерных самосвалов самый оптимальный маршрут следующей погрузки, что позволяет избежать простоев, а для автоматического определения качества руды в каждой точке черпания установлено оборудование высокоточного позиционирования ковша экскаватора, что позволило интегрировать в единую систему геологическую модель месторождения.

Система в режиме реального времени отслеживает и отображает информацию о местонахождении и параметрах работы самосвалов, бульдозеров, экскаваторов, автопогрузчиков и передвижных столовых.

По беспроводной сети Wi-Fi, развернутой в четырех карьерах, все данные о скорости техники, пробеге, уровне топлива, весе загруженной горной массы, положении передвижных столовых оперативно передаются на компьютеры диспетчеров и главных специалистов комбината. Данные также видят машинисты экскаваторов и водители самосвалов на интеллектуальных панелях в кабинах машин.

В систему интегрирована блочная геологическая модель месторождения, позволяющая анализировать качество железной руды и регулировать движение самосвалов у экскаваторов. В случае непредвиденной остановки система перенаправит БелАЗ на погрузку к другому экскаватору.

Аналогичные автоматизированные системы создаются и во многих других карьерах, в том числе – системы автоматизированного водопонижения и водоотлива.

9.4.6. Рекреационные эколого-геологические системы – ЭГС на особо охраняемых природных территориях (ООПТ). Особо охраняемые природные территории (ООПТ) относятся к объектам общенационального достояния и представляют собой участки земли, водной поверхности и воздушного пространства над ними, где располагаются природные комплексы и объекты, которые имеют особое природоохранное, научное, культурное, эстетическое, рекреационное и оздоровительное значение, которые изъяты решениями органов государственной власти полностью или частично из хозяйственного использования и для которых установлен режим особой охраны.

С учетом особенностей режима и статуса находящихся на них природоохранных учреждений обычно различают следующие категории указанных территорий: 1) государственные природные

заповедники, в том числе биосферные; 2) национальные парки; 3) природные парки; 4) государственные природные заказники;- памятники природы; 5) дендрологические парки и ботанические сады; 6) лечебно-оздоровительные местности и курорты.

Эколого-геологические системы природоохранных зон представляют собой особо охраняемые объекты (заповедники, заказники, природоохранные зоны), в которых значительная роль принадлежит природным компонентам, но в то же время та или иная часть экосистем регулируется искусственно.

Вопросы управления в области природоохранных территорий начали впервые возникать в связи с деятельностью североамериканских, а затем и африканских национальных парков и необходимостью сбалансировать взаимодействие входящих в них экосистем и их компонентов. Известный американский эколог Д.Эренфельд, поддерживавший принцип управления природными сообществами, подчеркивал необходимость глубокого научного обоснования каждой регуляции.

Следует иметь ввиду, что большинство заповедников России создано на территориях, первоначальный облик которых сильно изменен прошлой хозяйственной деятельностью. Площади и границы значительной части заповедников установлены произвольно, без учета необходимости заповедания цельных природных общностей и сохранения их экологической автономности. Все без исключения заповедники испытывают многочисленные и подчас очень мощные, все возрастающие антропогенные воздействия. Все эти обстоятельства искажают типичность экосистем, приводят к их антропогенной трансформации, влияют на круговорот вещества и энергии. «Возмущающие воздействия» затрудняют выполнение системой заповедников присущих только ей важнейших природоохранных и исследовательских задач, обедняют возможности объективного сопоставления хода природных процессов на охраняемых и неохраняемых (хозяйственно эксплуатируемых) территориях и разработку рекомендаций прикладного характера. Создать необходимые предпосылки для устранения или определения смягчения этих воздействий может теория управления охраняемыми экосистемами (Дёжкин, 1986, 1988).

Применительно к заповедникам регуляционные мероприятия –это виды и методы целенаправленного воздействия на охраняемые экосистемы и их компоненты с целью поддержания биоразнообразия и их функционирования, максимально приближенного в природному.

Разработана следующая общая классификация *регуляционных мероприятий* по целям и задачам:

1.Мероприятия, направленные на предотвращение, уменьшение или нейтрализацию негативных антропогенных воздействий на экосистемы (ландшафты).

2.Мероприятия, способствующие минимально необходимой коррекции природных процессов в заповедниках.

3.Мероприятия, проводимые для восстановления коренных экосистем (ландшафтов) и организмов (растений, животных), свойственных заповедникам и утраченных вследствие негативных антропогенных воздействий.

4.Мероприятия, проводимые для устранения чуждых (привнесенных извне) компонентов охраняемых природных сообществ.

5.Мероприятия, смягчающие противоречия, возникающие между охраняемыми и окружающими их хозяйственными территориями (Дёжкин, 1988).

***

Заключение

«Мир достаточно велик, чтобы удовлетворить нужды любого человека, но слишком мал, чтобы удовлетворить людскую жадность»
Махатма Ганди

Теоретико-методологической базой экологической геокибернетики являются концепции ноосферы и коэволюции, предусматривающие разумное компенсационное взаимодействие с природой и активное вмешательство человека в её процессы лишь с целью сохранения гомеостаза биосферы, а не неограниченного преобразования биосферы и её компонентов под собственные нужды. Важную роль в решении этой проблемы и реализации этой концепции отводится ***экологической геокибернетике*** - разделу общей теории природно-технических систем (в том числе – эколого-геологических систем) о закономерностях управления и передачи в них информации, рассматривающего их с позиций экологии и экологической геологии в рамках концепции ноосферы и коэволюции.

Выполненный в монографии комплексный анализ вопросов управления эколого-геологическими системами позволяет говорить о формировании основ теории экологической геокибернетики – направления будущего, от разработки которого во многом будет зависеть развитие человеческой цивилизации.

Теория экологической геокибернетики включает: 1) цель и задачи управления эколого-геологическими системами; 2) информационное обеспечение процесса управления; 3) принципы управления (принципы экологической геокибернетики), учитывающие особенности состава и свойств эколого-геологических систем разных типов и иерархических рангов организации, а также базирующиеся на законах и закономерности их функционирования.

В рамках концепции экологических функций литосферы, экологическая геокибернетика играет важную роль по обоснованию практических *методов управления этими функциями* (ресурсной, геодинамической, геохимической и геофизической) с целью реализации представлений о ноосфере и коэволюции. В то же время экологическая геокибернетика выходит за рамки учения об экологических функциях литосферы, поскольку рассматривает вопросы управления не только литотопами, но и биотопами.

***

Список литературы

1. *Алексеенко В.А.* Новейшие теории биотической устойчивости как отражение кризиса мировоззрения. – Общественные науки и современность, №3, 1999, с. 161-170.
2. *Арманд А.Д.* Устойчивость (гомеостатичность) географических систем к различным типам внешних воздействий // Устойчивость экосистем. - М.: Наука. 1983. С.14-32
3. *Арнольд В.И.* Теория катастроф /3-е изд. – М., Наука, 1990. – 128 с.
4. *Артамонов Д.В., Семёнов А.Д.* Основы теории линейных систем автоматического управления: Уч. пособие. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. -135 с.
5. *Афанасьева Н.*Б., Березина Н.А. Введение в экологию растений: уч. пособие. – М.: Изд-во Московского университета, 2011. – 800 с.
6. *Базовые понятия* инженерной геологии и экологической геологии: 280 основных терминов / Колл. авторов: Трофимов В.Т., Королев В.А., Харькина М.А. и др. // Под ред. В.Т.Трофимова. — М.: ОАО «Геомаркетинг», 2012. - 320 с
7. *Берг Л.С.* Климат и жизнь. – М., Госиздат, 1922. – 196 с.
8. *Бондарик Г.К.* Общая теория инженерной (физической) геологии. - М.: Недра,1981. - 256 с.
9. *Бондарик Г.К.* Управление природно-техническими системами. Возможности и ограничения. - Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1994. № 1. С. 42–47
10. *Бондарик Г.К.* Теория геологического поля (философские и методологические основы геологии). - М.: Изд-во ВИМС, 2002. 129 с.
11. *Бондарик Г.К.* Экологическая проблема и природно-технические системы. - М.: Изд-во ИКАР, 2004. - 152 с.
12. *Бондарик Г.К.* Диагностика и прогнозирование состояния неоднородных природных и природно-технических систем - функция геокибернетики // Известия вузов. Геология и разведка. - 2010. № 1. - С. 78-79
13. *Бондарик Г.К.,* Иерусалимская Е.Н., Ярг Л.А. Научные основы информационного обеспечения управления состоянием окружающей среды на региональном уровне. - Инженерная геология. 2011. № 4. С. 74–80
14. *Бондарик Г.К.* Геокибернетика - инструмент диагностики и прогнозирования состояний природных и природно-технических систем. – Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2012, №4, с. 364-370

15. *Бондарик Г.К.*, *Ярг Л.А.* Инженерная геология. Вопросы теории и практики. Философские и методологические основы геологии: уч. пособие. – М.: ИД КДУ, 2015. - 296 с.
16. *Бриллюэн Л.* Наука и теория информации /Пер. с англ. А.А.Харкевича. – М., Физматгиз, 1960. - 392 с.
17. *Будыко М.И.* Глобальная экология. – М., Мысль, 1977. – 328 с.
18. *Винер Н.* Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. - М.: Советское радио, 1958, 325 с. (2-е изд. – М., Наука, 1983)
19. *Виноградов Б.В.* Аэрокосмический мониторинг экосистем. – М.: Мысль, 1984. – 320 с.
20. *Вишняков Я.Д., Радаев Н.Н.* Общая теория рисков: уч. пособие для вузов. – М.: Изд. центр «Академия», 2008. – 368 с.
21. *Воронкевич С.Д.* Основы технической мелиорации грунтов. — М.: «Научный мир», 2005, - 498 с.
22. *Второв П.П., Дроздов Н.Н.* Биогеография: уч. для вузов – М.: Изд-во ВЛАДОС-Пресс, 2001. – 304 с.
23. *Галеев К.Р.* Теория гидравлического государства К.Виттфогеля и её современная критика. – Социологическое обозрение, 2011, т.10, №3, с. 155-179.
24. *Галкин А.Н.* Методологические основы инженерно-геологического обоснования управления литотехническими системами – Инженерная геология, 2012, апрель, с. 63-72.
25. *Галкин А.Н., Жогло В.Г., Ковалева А.В.* Инженерно-геологические аспекты управления состоянием подземных вод при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений на примере г. Минска. - Инженерная геология. 2008. № 4. С. 74–80
26. *Гальперин М.В.* Экологические основы природопользования: учебник. – М.: Форум: Инфра-М, 2003. – 256 с.
27. *Голубев В.С.* Введение в синтетическую эволюционную экологию. – М.: Папирус Про, 2001. – 320 с.
28. *Горшков В.Г.* Структура биосферных потоков энергии. – Ботанический журнал, № 11, т. 65, 1980, с. 1579-1590.
29. *Горшков В.Г.* Экология человека / Учеб. пособие – Л.: изд. ЛПИ, 1984. – 71 с.
30. *Горшков В.Г.* Физические и биологические основы устойчивости жизни / Отв. ред. К.С.Лосев – М., ВИНИТИ, 1995, - 470 с.
31. *Горшков В.Г., Курочкина Л.Я., Есекин Б.К. и др.* Научные основы стратегических направлений природоохранной политики. – Экология и образование, № 1-2, 2004, с. 2-9.

32. *Грумм-Гржимайло Г.Е.* Рост пустынь и гибель пастбищных угодий и культурных земель в Центральной Азии за исторический период. - Изв. ВГО, 1933, т.65., вып.5.
33. *Гумилев Л.Н.* Этногенез и биосфера Земли. – М.: Рольф, 2002. – 560 с.
34. *Данилкин А.А.* Управление ресурсами охотничьих животных: принципы и методы. – Вестн. охотоведения. Т.6, № 1, 2009. С.56-64
35. *Данилкин А.А.* Как организовать управление в сфере возобновляемых природных ресурсов. – Охота – нац. охотничий журн., 2013, №2, с. 4-7
36. *Данилкин А.А.* Косули (биологические основы управления ресурсами). – М., Товарищество научных изданий КМК, 2014. – 316 с.
37. *Данилов Д.Н., Русанов Я.С., Рыковский А.С. и др.* Основы охотоустройства. – М.: Лесн. промышленность, 1966. – 331 с.
38. *Дёжкин В.В.* О необходимости управления охраняемыми экосистемами // Проблемы охраны генофонда и управления экосистемами в заповедниках лесной зоны. Тез. докл., ч 1. 1986 С.26-29.
39. *Дёжкин В.В*. Проблемы управления охраняемыми экосистемами // Актуальные вопросы заповедного дела: Сб. науч. Тр. ЦНИЛ Главохоты РСФСР. М., 1988. С. 23-40.
40. *Дёжкин В.В., Авданин В.О., Буйволов Ю.А., Синицын М.Г.* Об управлении охраняемыми экологическими системами. // Использование и охрана природных ресурсов России. Бюлл. нац. информац. агентства (Природные ресурсы). №5 (89), 2006, с. 104-112
41. *Дзекцер Е.С.* Оценка вероятности возникновения ущерба от подтопления застроенных территорий грунтовыми водами. // Анализ и оценка природного и техногенного риска в строительстве / Минстрой России. – М.: ПНИИИС, 1995. С. 83-84.
42. *Евстифеев Ю.Г., Рачковская Е.И., Гунин П.Д.* Основные типы экосистем Заалайского Гоби // Пустыни Заалайского Гоби.- М.: Наука, 1986, с. 157-164.
43. *Заиканов В.Г., Минакова Т.Б.* Методические основы комплексной геоэкологической оценки территорий – М.: Наука, 2008. – 81 с.
44. *Зинюков Ю.М*. Методология управления природно-техническими системами при организации мониторинга на основе их структурно-иерархических моделей. // Тр. Межд. научной конф. «Актуальные вопросы инженерной геологии и экологической геологии».

Москва, МГУ, 25–26 мая 2010 г. / Под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. - М.: Изд-во МГУ, 2010. С. 247–248
45. *Ильичев В.Г.* Устойчивость, адаптация и управление в экологических системах. – М.: Физматлит, 2009, - 230 с.
46. *Калесник С. В.* Проблемы географической среды //Вестник ЛГУ. 1968. № 12. С. 91- 96
47. *Калыгин В.Г.* Промышленная экология: учеб. пособие для студ. вузов - М.: Академия, 2004. – 430 с.
48. *Кац Д.М., Пашковский И.С.* Мелиоративная гидрогеология. -М., Агропром, 1988, - 256 с.
49. *Келль Л.С.* Управление структурной организацией искусственных водных экосистем – как фактор улучшения качества воды. // Экологическая безопасность, 2009, №1, с. 36-39
50. *Колесников А.А*. Синергетическая теория управления. – Таганрог: ТРТУ, М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
51. *Колотвин А.В., Зинюхин Г.Б.* Модель городских экосистем. – Вестник ОГУ, 2003, № 7, с. 164-167.
52. *Кондратьев В.Г.* Новые методы и технологии управления сотоянием грунтов тела и основания земляного полотна дорог в криолитозоне. // Тр. Межд. научной конф. «Актуальные вопросы инженерной геологии и экологической геологии». Москва, МГУ, 25–26 мая 2010 г. / Под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. - М.: Изд-во МГУ, 2010. С. 253–256
53. *Королев В.А.* Очистка грунтов от загрязнений. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 365 с.
54. *Королев В.А.* Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем: учеб. пособие / под ред. В.Т. Трофимова. - М.: КДУ, 2007. 416 с.
55. *Королёв В. А.* Актуальные эколого-геологические проблемы рационального недропользования в Российской Федерации // Геориск. 2010*а*. № 2. С. 30–36.
56. *Королев В.А.* Актуальные вопросы геологического обоснования управления эколого-геологическими системами техногенно-нарушенных территорий // Тр. Межд. научной конф. «Актуальные вопросы инженерной геологии и экологической геологии». Москва, МГУ, 25–26 мая 2010 г. / Под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. - М.: Изд-во МГУ, 2010*б*. С. 239–242.
57. *Королев В.А.* Полигоны ТБО: есть ли альтернатива? // Инженерная геология. № 1. 2010. С. 46–56.
58. *Королёв В. А.* Инженерная защита территорий и сооружений / Учебное пособие. — КДУ г. Москва, 2013. — 470 с.

59. *Королёв В. А.* Обоснование управления эколого-геологическими системами – амбициозная проблема современности // Мат-лы Межд. молодежн. научной конф. "Экологические проблемы недропользования (школа Экогеология-2016)". — СПб ГУ СПб, 2016. — С. 118–126.
60. *Королев В.А*. Очистка и восстановление геологической среды: уч. пособие. – М., ООО Сампринт, 2019а. – 430 с.
61. *Королёв В. А.* Управление эколого-геологическими системами в связи с концепцией устойчивого развития // Экологические проблемы природо- и недропользования: Тр. Межд. молодежной научной конференции. — Т. 19. — СПб: СПб ГУ 2019б. С. 33–37
62. *Королёв В. А., Минина М.В.* Обоснование типовых схем противооползневой защиты // Вторая научно-практич. конф. и выставка «Инженерные изыскания для объектов транспортной инфраструктуры» (19-20 октября 2017 года). — М.: ИГИИС, 2017. — С. 143–154
63. *Красовский А.А., Поспелов Г.С.* Основы автоматики и технической кибернетики. – М., Госэнергоиздат, 1962.
64. *Кузьмин А.П.* Моделирование природно-технических систем. – Вестник МАНЭБ, 2006, т. 11, № 6, с. 69-72
65. *Ларионов Н.М., Рябышенков А.С.* Промышленная экология: учебник для бакалавров / Московский ин-т электронной техники. - М.: Юрайт, 2013. – 495 с.
66. *Лоусон Г.* Путешествие по системному ландшафту / Пер. с англ. под ред. В.К.Батоврина. – М.: ДМК Персс, 2014, - 368 с.
67. *Лэк Д.* Численность животных и ее регуляция в природе. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1957.- 404 с.
68. *Мазур И.И., Молдаванов О.И.* Курс инженерной экологии: учеб. для втузов. - М.: Высшая школа, 1999. - 447 с.
69. *Макарьева А.М., Горшков В.Г., Вильдерер П.А*. О научном анализе эволюции, прогресса и будущего человечества. // Энергия: экономика, техника, экология, 2014, №9, с. 65-70
70. *Машинцов Е.А.* Оценка влияния экологических факторов окружающей среды на состояние здоровья населения антропогенно нагруженных территорий на базе системного подхода. // Автореф. дисс… доктора т. наук. - Тула, ТГУ, 2007. - 40 с.
71. *Машинцов Е.А., Кузнецов А.А., Лебедев А.М., Новосельцев В.Н.* Математические модели и методы оценки экологического состояния территорий –М.: Физматлит, 2010. - 228 с.

72. *Мелконян Д.В., Черкез Е.А.* Применение метода натурного моделирования для обоснования управления эколого-геологическими системами. // Тр. Межд. научной конф. «Актуальные вопросы инженерной геологии и экологической геологии». Москва, МГУ, 25–26 мая 2010 г. / Под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. - М.: Изд-во МГУ, 2010. С. 249–250.
73. *Методическое руководство* по агроэкологической оценке земель, проектированию адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий / Под ред. В.И.Кирюшина, и А.Л.Иванова. – М.: РАСХН, 2005. – 763 с.
74. *Мешалкин В.П., Бутусов О.Б., Гнаук А.Г.* Основы информатизации и математического моделирования экологических систем / Уч. пособие. – М.: Инфра-М, 2016. – 358 с.
75. *Моисеев Н.Н.* Экология человечества глазами математика: человек, природа и будущее цивилизации. – М.: Молодая гвардия, 1988. – 254 с.
76. *Никитин О.В., Латыпова В.З.* Экотехнологии восстановления водных объектов. / Конспект лекций. – Казань, 2014, - 151 с. [электронный ресурс] http://zilant.kfu.ru/course/view.php?id=367
77. *Новик Г.Я., Зильбершмидт М.Г.* Управление свойствами горных пород в процессах горного производства. - М., Недра, 1994, - 224 с.
78. *Новиков Д.А.* Теория управления организационными системами. – М., МПСИ, 2005, - 584 с.
79. *Новосельцев В.Н.* Теория управления и биосистемы. Анализ сохранительных свойств. – М.: Наука, 1978. – 320 с.
80. *Об управлении охраняемыми* экологическими системами // Дёжкин В.В. и др. / Использование и охрана природных ресурсов России. Бюллетень национального информационного агентства (Природные ресурсы). №5 (89), 2006, с. 104-111.
81. *Одум Ю.* Экология: в 2-х т. / Пер. с англ. – М., Мир, 1986. Т.1. – 328 с.; Т.2. – 376 с.
82. *Осипов В.И.* Управление природными рисками. /Вестник РАН, т.72, №8, 202, с. 678-686
83. *Пегов С.А.* Устойчивое развитие биосферы. – Вестник РАН, 2007, т.77, № 12, с. 1069-1076
84. *Пендин В.В., Дубина Т.П.* Научно-методические основы управления актуальными литотехническими системами. // Тр. Межд. научной конф. «Актуальные вопросы инженерной геологии и экологической геологии». Москва, МГУ, 25–26 мая 2010 г. / Под

ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. - М.: Изд-во МГУ, 2010. С. 245-246.
85. *Половников А.В.* Рекультивация и мелиорация нарушенных земель - Пермь: изд-во Пермской ГСХА, 2016. - 51 с.
86. *Поплавский Р.П.* Термодинамика информационных процессов. – М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит-ры, 1981. – 255 с.
87. *Реймерс Н.Ф.* Надежды на выживание человечества. Концептуальная экология. М.: Россия молодая. 1992. 362 с.
88. *Реймерс Н.Ф.* Экология (теория, законы, правила, принципы и гипотезы). – М.: Журнал «Россия Молодая», 1994. – 367 с.
89. *Руководство по управлению засоленными почвами* /Под ред. Р.Варгаса, Е.И. Панковой, С.А. Балюка, П.В. Красильникова и Г.М. Хасанхановой. – М.-Рим: МГУ, 2017. – 153 с.
90. *Садовский В.Н.* Основания общей теории систем. Логико-методологический анализ. – М.: Наука, 1974, - 278 с.
91. *Самарин Е.Н.* Кислотно-основная буферность дисперсных грунтов как основа физико-химического регулирования вяжущими их поглотительной способности // Автореф. дисс. ….. докт. г.-м. наук. – М., геологический факультет МГУ, 2017, 50 с.
92. *Семёнов Ю.И.* Философия истории. (Общая теория, основные проблемы, идеи и концепции от древности до наших дней). – М., «Современные тетради», 2003. – 776 с.
93. *Симонова-Лобанок М.П.* Управление функционированием экосистем. // Сб. мат-лов Межд. научно-практ. конф. «Роль женщины в развитии современной науки и образования». – Минск, БГУ, 2016, с. 97-98
94. *Современная геодинамика* литосферы и её экологические последствия / В. Т. Трофимов, М. А. Харькина, Т. А. Барабошкина и др. — Москва: Изд-во Московского ун-та, 2019. – 256 с.
95. *Сосунова И.А.* Экодизайн в России: социально-технологические аспекты и проблемы развития. // Вестник международной академии наук (Русская секция), 2015, № 1, с.66-69.
96. *Стратегия управления* национальными парками России // М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2002. 36 с.
97. *Сырги А.В.* Экодизайн – современное направление в архитектуре. – Архитектура, №6, 2015, с. 7-8.
98. *Тальгамер Б.Л., Коробкова Е.А.* Классификация и обоснование схем консервации карьеров. – Вестник ИрГТУ, №3 (62), 2012, с. 56-60.
99. *Тарко А.М.* Устойчивость биосферных процессов и принцип Ле Шателье //Доклады РАН. 1995. Т. 343. № 3. С.393-395.

100. *Тарко А.М.* Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. Математическое моделирование. – М.: Физматлит, 2005. – 232 с.
101. *Тейяр де Шарден П.* Феномен человека. — М.: Наука, 1987. – 240 с.
102. *Теория автоматического управления*: Уч. для вузов / Душин С.Е., Зотов Н.С., Имаев Д.Х. и др.; // Ппод ред. В.Б.Яковлева – М.: Высшая школа, 2003. - 567 с.
103. *Теория и методология* экологической геологии // Под ред. В.Т. Трофимова. - М.: Изд-во МГУ, 1997. - 368 с.
104. *Трофимов В.Т.* Эколого-геологическая система, ее типы и положение в структуре экосистемы // Вестник Моск. ун-та. Серия 4. Геология. 2009, №2. С.48-52.
105. *Трофимов В.Т.* Актуальные вопросы геологического обоснования управления эколого-геологическими системами // Труды Международной научной конференции «Актуальные вопросы инженерной геологии и экологической геологии». Москва, 25–26 мая 2010 г. / под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. - М.: Изд-во МГУ, 2010. С. 235–238.
106. *Трофимов В.Т.* Теоретические аспекты геоэкологии. – М.: КДУ, Университетская книга, 2020, - 148 с.
107. *Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г.* Экологическая геология. - М.: Геоинформмарк, 2002. – 415 с.
108. *Трофимов В.Т., Королев В.А.* Новые, ноосферные представления о геологической среде // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2014. № 3. С. 61–65
109. *Трофимов В.Т., Королев В.А.* Массивы песчаных грунтов как объекты эколого-геологических исследований. // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2018. № 2. С. 59–65.
110. *Уатт К.* Экология и управление природными ресурсами. - М.: Мир, 1971. – 463 с.
111. *Урманцев Ю.А.* Общая теория систем в доступном изложении. – Ижевск.: Регулярная и хаотическая динамика, 2014. – 408 с.
112. *Хомич В.А.* Экология городской среды / Уч. пособие. – Омск, Изд-во СибАДИ, 2002, – 267 с.
113. *Цветков В.Ф.* Лесной биогеоценоз / 2-е изд., доп. – Архангельск, 2004. - 267 с.
114. *Чибрик Т.С.* Основы биологической рекультивации: Учеб. пособие. - Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2002. - 172 с.

115. *Шварц С.С.* Эколого-популяционные основы ведения охотничьего хозяйства //Тр. IX Междунар. конгр. биологов-охотоведов.- М., 1970. С.74-77.
116. *Шеннон К.* Работы по теории информации и кибернетике. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. — 830 с.
117. *Шешеня Н.Л.* Актуальные вопросы методики изучения и управления устойчивостью склонов городов. // Тр. Межд. научной конф. «Актуальные вопросы инженерной геологии и экологической геологии». Москва, МГУ, 25–26 мая 2010 г. / Под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. - М.: Изд-во МГУ, 2010. С. 257–258.
118. *Щедровицкий Г.П.* Проблемы методологии системного исследования. — М., 1964. — 48 с.
119. *Щепетова В.А.* Основы математического моделирования в экологии. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 122 с
120. *Эколого-геологические условия* России. Экологические функции литосферы как природное геологическое образование и их пространственное распределение на территории России: уч. пособие. Т.1 / В. Т. Трофимов, М. А. Харькина, Т. А. Барабошкина и др. — М.: "КДУ", "Университетская книга", 2016а. — 302 с.
121. *Эколого-геологические условия* России. Трансформация экологических функций литосферы территории России под влиянием антропогенного воздействия и ее экологические последствия: уч. пособие. Том 2 / В. Т. Трофимов, М. А. Харькина, Т. А. Барабошкина и др. — "КДУ", "Университетская книга" Москва, 2016б. — 280 с.
122. *Эколого-геологические условия* России. Эколого-геологические условия крупнейших регионов России как современное проявление экологических функций литосферы: уч. пособие. Т. 3 / В. Т. Трофимов, М. А. Харькина, Т. А. Барабошкина и др. — М.: Изд-во "КДУ", "Университетская книга", 2016в. — 238 с
123. *Экосистемы Монголии:* Распространение и современное состояние / Востокова Е.А. и др. – М.: Наука, 1995. – 223 с.
124. *Эшби У.Р.* Введение в кибернетику. / Пер. с англ. – М., Изд-во Иностранной литературы, 1959, - 432 с.
125. *Яблоков А.В.* Популяционная биология. - М.: Высшая школа. 1987. - 302 с.
126. *Яблоков А.В., Остроумов С.А*. Охрана живой природы: проблемы и перспективы. - М.: Лесная промышленность. 1983. - 269 с.

127. *Agee J.K., Johnson D.R.* Ecosystem Management for Parks and Wilderness. - University of Washington Press, Seattle, Washington, 1988, - 237 p.
128. *Alshawabkeh A.N.* Electrokinetic soil remediation: challenges and opportunities. – Sep. Sci. Technol., 2009. V. 44, pp. 2171–2218
129. *Axelrad D.M.* Viewpoint: Sustainable development and ecosystem management. - Environmental Exchange Point, Florida Department of Environmental Protection, Office of Intergovernmental Programs, 1994, 4(2), pp. 3–6.
130. *Baird R.C.* On sustainability, estuaries, and ecosystem restoration: the art of the practical. - Rest Ecol. 2005; v.13, pp. 154–158
131. *Bautista P., Mohedano A.F., Gilarranza M.A., Casasa J.A., Rodrigue J.J*. Application of Fenton oxidation to cosmetic wastewaters treatment. – J. Hazard. Mater., 2007. V.143, pp. 128–134
132. *Bertalanffy L. von*. General System Theory: Foundations, Development, Applications - New York, George Braziller, 1968, - 289 p.
133. *Boardman J*., *Sauser B.* System Thinking – Coping with 21st Century Problems. – CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2008. - 240 p.
134. *Boyce M.* 'Populations Viability Analysis: Adaptive Management for Threatened and Endangered Species', in M.S.Boyce and and A. Haney (eds), Ecosystem Management: Applications for Sustainable Forest and Wildlife Resources - Yale University Press, New Haven, 1997, pp. 226–236.
135. *Brady W.W., Aldon E.F. and Cook J.W*. 'Monitoring and Rangeland Ecosystems to Make Sustainability Operational', in Making Sustainability Operational: Fourth Mexico/U.S. Symposium, April 19–23, Santa Fe, New Mexico. - USDA Department of Agriculture, National Forest Service, Rocky Mountain Forest and Experiment Station, Fort Collins, Colorado 80526, General Technical Report RM-240, 1993, pp. 181–184.
136. *Bramley M.* Future issues in environmental protection: A European perspective. - Water and Environmental Management Journal, 1997, 11(2), 79–86.
137. *Burger J.* Environmental management: Integrating ecological evaluation, remediation, restoration, natural resource damage assessment and long-term stewardship on contaminated lands. – Science of the Total Environment, 2008, v. 400, № 1-3, pp. 6-19
138. *Burger J., Leschine T.M., Greenberg M., Karr J., Gochfeld M., Powers C.W.* Shifting priorities at the department of energy's bomb factories: protecting human and ecological health. – Environ. Manage., 2003; № 31, pp. 157–167

139. *Burger J., Powers C.W., Greenberg M., Gochfeld M.* The role of risk and future land use in cleanup decisions at the Department of Energy. - Risk Anal. 2004; v. 24, pp. 1539–1549
140. *Cabezas H, Pawlowski C.W., Mayer A.L., Hoagland N.T.* Simulated experiments with complex sustainable systems: ecology and technology. – Resour. Conserv. Recycl., 2005; № 44, pp. 279–291.
141. *Cairns J.,* Jr*,* editor. The recovery process in damaged ecosystems. - Ann arbor, Michigan: Ann Arbor Service; 1980.
142. *Cairns J.,* Jr, editor. Rehabilitating damaged ecosystems. - Boca Raton, FL: CRC Press; 1994.
143. *Caliman A., Gavrilescu M*. Personal care compounds, pharmaceuticals and endocrine disrupting agents in the environment—a review. - CLEAN Soil Air Water, 2009. V.34, pp. 277–303
144. *Caliman F.A., Robu B.M., Smaranda C., Pavel V.L., Gavrilescu M*. Soil and groundwater cleanup: benefits and limits of emerging technologies. – Clean. Techn. Environ. Policy, 2011, v.13, pp.241–268
145. *Cena F*. The farm and rural community as economic systems. In: Golley FB, Gellot J, editors. Rural planning from an environmental systems perspective. - New York: Springer; 1999. - pp. 229–86.
146. *Checkland P*. System Thinking, System Practice – Includes a 30 year Retrospective. – JohnWiley, Chichester, UK, 1999. – 424 p.
147. *Cooke G.D.* Restoration and management of lakes and reservoirs. –Boca Raton: CRC Press, 2005. –P. 459-502
148. *Couffignal L*. «Essai d'une définition générale de la cybernétique», *The First International Congress on Cybernetics*, Namur, Belgium, June 26-29, 1956, Gauthier-Villars, Paris, 1958, pp. 46—54.
149. *David C.A.* 'Managing the Invisible: Ecosystem Management and Macronutrient Cycling', in M. S. Boyce and A. Haney (eds), Ecosystem Management: Applications for Sustainable Forest and Wildlife Resources. - Yale University Press, New Haven, 1997, pp. 94–129.
150. *Ehrenfeld J., Toth L.A.* Restoration ecology and the ecosystem perspective. - Rest Ecol. 1997; № 2, pp. 307–317.
151. *Encyclopedia of Environmental Management* // Ed. by Jorgensen S.E. / Four Volume Set. – CRC Press, 2012, - 3512 p.
152. *Esplugas S., Bilab D.M., Krausec L.G.T., Dezottic M.* Ozonation and advanced oxidation technologies to remove endocrine disrupting chemicals (EDCs) and pharmaceutical sand personal care products (PPCPs) in water effluents. - J Hazard. Mater. 2007. V.149, pp. 631–642
153. *Fox F.D.* Mining and sustainable development Flambeau and Ridgeway mines – lessons learned. 2002. Presented at SME Annual Meeting, 24–

26 February 2003, Cincinnati, Ohio. http://www.mining.ubc.ca/mlc/presentations_pub/sme/FoxPaper.pdf (accessed 26 October 2012).
154. *Frost T.M., Carpenter S.R., Ives A.R. and Kratz T.K.* 'Species Compensation and Complementarity in Ecosystem Function', in C.G. Jones and J.H. Lawton (eds), Linking Species and Ecosystems. - Chapman and Hall, New York, 1995, pp. 224–235.
155. *Gavrilescu M.* Removal of heavy metals from environment by biosorption. – Eng. Life Sci., 2004. V. 4, pp.219–232
156. *Gavrilescu M.* Fate of pesticides in the environment and its remediation. – Eng. Life Sci. 2005. V. 5, pp. 497–552
157. *Grumbine R.E.* What is ecosystem management? - Conservation Biology, 1994, v. 8(1), pp. 27–38.
158. *Haeuber R., Franklin J.* Ecological Applications, 1996, v. 6(3), pp. 692–693.
159. *Haney A., Boyce M.S.* 'Introduction', in M.S. Boyce and A. Haney (eds), Ecosystem Management: Applications for Sustainable Forest and Wildlife Resources. - Yale University Press, New Haven, 1997, pp. 21–53.
160. *Hardisty P.E., Ozdemiroglu E.* The economics of groundwater remediation and protection. - CRC Press, Boca Raton, 2005.
161. *Hobbs R.J., Harris J.A.* Restoration ecology: repairing the Earth's ecosystems in the new millennium. – Restor. Ecol., 2001; № 9, pp. 239–246
162. *Kessler J.J., Ginniken P. van, Cornelissen W., Romijn B*. Environmental Management: Towards a Conceptual Framework for Environmental Governance. – Washington, D.C., 2001. - 26 p.
163. *Kohler J., Hilt S., Adrian R., Nicklisch A., Kozerski H.P., Walz N.* Long-term response of a shallow, moderately flushed lake to reduced external phosphorus and nitrogen loading // Freshwater Biology. 2005. Vol. 50(10). –P. 1639-1650.
164. *Krishna I.V.M., Manickam V.* Environmental Management / Science and Engineering for Industry // 1st ed. – USA, BSP, 2017. – 664 p.
165. *Krishnamoorthy B.* Environmental management: text and cases / 2nd ed. – New Delhi, PHL Learning, Private Limited, 2012, - 269 p.
166. *Leffler J. W*. Ecosystem responses to stress in aquatic microcosms. In: Energy and Environmental Stress in Aquatic Systems. // J. H. Thorp and J. VV. Gibbons, eds. - U. S. Dept. of Energy, Springfield, Va., National Technical Info. Center., 1978. – pp. 102-119

167. *Lehr J., Hyman M., Gass T.E., Seevers W.J.* Handbook of complex environmental remediation problems. - New York: McGraw-Hill; 2002, - 640 p.
168. *Leitao A.B., Ahern J.* Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning. - Landscape Urban Plan. 2002; № 59, pp. 65–93
169. *Lovei M. and Weiss C.* Environmental Management and Institutions in OECD Countries. - World Bank Technical paper № 391. 1998. Pollution Management Series. The World Bank, Washington. Section 2.1.
170. *McHarg I.L.* Design with Nature. - Garden City, N. Y., Natural History Press, 1969. 107 pp.
171. *Montgomery D.R., Gordon G.E. and Sullivan K.* Watershed analysis as a framework for implementing ecosystem management. - Water Resources Bulletin, 1995, 31(3), pp. 1–18.
172. *Mowrer T.H.* Decision Support Systems for Ecosystem Management: An Evaluation of Existing Systems/ - U.S. Department of Agriculture, National Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, Colorado 80526, General Technical Report RM-GTR-296, August, 1996, - 155 p.
173. *Neace M.B.* 'Sustainable Development in the 21st Century: Making Sustainability Operational', in C.A. Brebbia and J.L. Uso (eds), Ecosystems and Sustainable Development II, Proceedings of the International Conference ECOSUD 99, 31 May–2 June, Lemnos, Greece, - WIT Press, 1999, pp. 175–184.
174. *Noss R.F., Cooperrider A.Y.* Saving Nature's Legacy: Protecting and Restoring Biodiversity. - Island Press, Washington D.C. 1994.
175. *Odum H.T.* Energy analysis, energy quality, and environment. // In: Energy Analysis: A New Public Policy Tool, Martha Gilliland, ed. // AAAS Selected Symp., 9, Washington, D. C., American Association for the Advancement of Science, 1978. pp. 55—87.
176. *Odum E.P., Odum H.T.* Natural areas as necessary components of man's total environment. - Proc. 37th N. A. Wildl. and Nat. Res. Conf. Washington, I). C., Wildlife Mgmt. Institute, 1972, pp.178—189.
177. *Pallister J.* Environmental Management: A Core Text for O Level and IGCSE. – Oxford University Press, 2006. - 226 p.
178. *Pavel V.L., Bulgariu D., Bulgariu L., Hlihor R.M., Gavrilescu M.* Analysis of factors determining the behavior of chromium in some Romanian soils. – Environ. Eng. Manag. J. 2010. V. 9, pp. 89–94

179. *Pavlikakis G.E., Tsihrintzis V.A.* Ecosystem Management: A Review of a New Concept and Methodology - Water Resources Management, 2000, 14. Pp. 257–283. DOI: 10.1023/A:1008139011867
180. *Peternel I.T. et al.* Comparative study of UV/TiO_2, UV/ZnO and photo-Fenton processes for the organic reactive dye degradation in aqueous solution. – J. Hazard. Mater., 2007. V. 48, pp. 477–484
181. *Prach K.* The restoration and management of derelict land: modern approaches. – Restor. Ecol. 2004; v. 12, pp. 310–317
182. *Rauscher H.M.* Ecosystem management decision support for federal forests in the United States: A review. - Forest Ecology and Management, 1999, v.114, pp. 173–197.
183. *Sankar A.* Environmental Management / Textbook. - Oxford University Press, 2015, - 512 p.
184. *Schindler D.W.* 'Linking Species and Communities to Ecosystem Management: A Perspective from the Experimental Lakes Experience', in C. G. Jones and J. H. Lawton (eds), Linking Species and Ecosystems. - Chapman and Hall, New York, 1995, pp. 313–325.
185. *Scott J.M., Davis F., Csuti B. and Noss R.* Gap analysis: A geographical approach to protection of biological diversity. - Wildlife Monographs, 1993, v. 123, pp. 1–4
186. *Skinner G., Crafer K., Turner M., Skinner A., Stacey J.* Environmental Management: Coursebook. // Cambridge IGCSE® and O Level. - Cambridge University Press, 2017.- 272 p.
187. *Sulphey M.M., Safeer M.M.* Introduction to Environment Management / 4th ed. – Dehli, PHL Learning, Private Limited, 2017, - 434 p.
188. *Tansley A.G.* The use and abuse of vegetation concepts and terms // Ecology, 1935, vol.16, №3, pp. 284-307
189. *Tarr M.* Chemical degradation methods for wastes and pollutants: environmental and industrial applications. - CRC Press, Boca Raton, 2003.
190. *Theodore M.K., Theodore L.* Introduction to Environmental Management // Textbook. – CRC Press, 2009, - 564 p.
191. *Tratnyek P.G., Johnson R.L.* Nanotechnologies for environmental cleanup. – Nanotoday, 2006. V. 1, pp. 44–48
192. *Tsihrintzis V.A., Vasarhelyi G.M. and Lipa J.* Hydrodynamic and constituent transport modeling of coastal wetlands. - Journal of Marine Environmental Engineering, Gordon and Beach Publishing Co., 1995, v. 1(4), pp. 295–314.
193. *Tsihrintzis V.A., Hamid R. and Fuentes H.R.* Use of Geographic Information Systems (GIS) in water resources: A review. - Water Resources Management, EWRA, 1996, v. 10(4), pp. 251–277.

194. *Tsihrintzis V.A. and Hamid R.* Modeling and management of urban stormwater runoff quality: A review. - Water Resources Management, EWRA, 1997a, v. 11(2), pp. 137–164.
195. *Tsihrintzis V.A. and Hamid R.* Urban stormwater quantity/quality modeling using the SCS method and empirical equations. - Journal of the American Water Resources Association, AWRA, 1997b, v. 33(1), pp. 163–176.
196. *Tsihrintzis V.A., John D.L. and Tremblay P.J.* Hydrodynamic modeling of wetlands for flood detention. - Water Resources Management, EWRA, 1998, v. 12(4), pp. 251–269.
197. *UN* (United Nations) *Report* of the World Commission on Environment and Development. [accessed 21 February 2008]; General assembly resolution 42/187/11. 1987 Dec; http://www.un.org/documents/ga/res/42/ares42-187.htm.
198. *Wiener N.* Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine. - Hermann & Cie Editeurs, Paris, The Technology Press, Cambridge, Mass., John Wiley & Sons Inc., New York, 1948. – 206 p.
199. *Wilcove D.S., Blair R.B.* The ecosystem management band wagon. - Trends in Ecology and Evolution, 1995, № 10, - 345 p.
200. *Wilson D.J., Clarke A.N.* Hazardous waste site soil remediation: theory and application of innovative technologies. - Boca Raton: CRC Press; 2019. – 584 p.
201. *Wittfogel K. A.* Oriental despotism: a comparative study of total power. - New Haven, London: Yale University Press. 1957. – 556 p.
202. *Zhang W.-X.* Nanoscale iron particles for environmental remediation: an overview. – J. Nanopart. Res., 2003. V. 5, pp. 323–332

***

Указатель имен

Авданин В.О. - 420
Аковецкий В.Г. - 45
Александров Г.А. – 41
Алексеев В.В. – 42
Алексеенко В.А. – 57,418
Ампер А.М. – 33
Анохин П.К. - 231
Аристотель – 15,16
Арманд А.Д. – 41,227,228, 231,373,418
Арнольд В.И. – 43,418
Артамонов Д.В. – 36,48,77, 80,178,193,201-204,212, 213,216,218,418
Артюхов В.В. – 37
Афанасьева Н.Б. – 100,418
Барабошкина Т.А. - 424, 426
Баранов А.Н. – 42
Беляев С.С. - 294
Берг Л.С. – 15,418
Бергсон А. – 27
Березина Н.А. – 100, 418
Бернар К. - 227
Берталанфи К.Л. – 35,37
Блямкман Л.М. – 281,283, 284
Богатырев Б.Г. - 42
Боден Ж. – 15,16
Бокль Г.Т. - 23
Болотов А.Т. - 22
Большакова И.С. - 301
Бондарев В.П. – 403,407
Бондарик Г.К. – 12,38,39, 45,46,95,133,135-139, 141,236,418,419
Бордмэн Д. – 34
Боронина Д.П. – 168
Браун К. - 246
Бриллюэн Л. – 185-187,197, 419
Будыко М.И. – 248,419
Буйволов Ю.А. - 420
Бутусов О.Б. - 42,423
Бухарин Н.И. - 25
Бэкон Ф. – 16,32
Вавилов Н.И. – 21
Варгас Р. - 424
Вернадский В.И. – 28,29, 176,259,399
Вильдерер П.А. - 422
Винер Н. – 32,33,35, 185,419
Виноградов Б.В. – 84,85, 419
Виттфогель К. – 18,19,20
Вишняков Я.Д. – 98,99, 101,111,118,119,120,122, 125-131,419
Волькенштейн М.В. - 259
Вольтерра В. – 39,40
Воронкевич С.Д. - 271,419
Второв П.П. - 94,419
Галеев К.Р. – 19,20,419
Галкин А.Н. – 12,45,342, 343,419
Гальперин М.В. – 61,350, 351,419
Ганди М. - 417
Гиппократ – 15
Глушков В.М. - 373
Гнаук А.Г. – 42,423
Головлева Л.А. -294
Голодковская Г.А. - 45
Голубев В.С. - 61,419
Гончаров Н.П. – 20
Горшков В.Г. – 42,56,57, 58,62,63,64,228,229,231, 246,248,254,255,259,262, 263,268,269,419,422
Графкина М.В. - 45
Гребенкин Н.Н. – 42
Гроздинский М.Д. - 231
Грумм-Гржимайло Г.Е. - 15,420
Гуман О.М. - 45
Гумилев Л.Н. – 15,17,18, 420
Гунин П.Д. - 420
Гусев А.А. - 373
Данилкин А.А. – 373,375, 376,420
Данилов Д.Н. - 373,420
Девлин Т. - 293
Дёжкин В.В. – 55,352,359, 360,374,377,415,416,420, 423
Делиль Ж. - 380
Джонсон Р. - 289
Дзекцер Е.С. – 45,120,121,420
Доронина Н.В. – 294
Дроздов Н.Н. - 94,419
Дубина Т.П. – 423
Душин С.Е. - 425
Дюбо Ж.-Б. - 16
Евстифеев Ю.Г. – 84,85, 420
Есекин Б.К. - 419
Желязко – 309
Жогло В.Г. - 419
Заборина О.Е. - 294
Заиканов В.Г. – 142,420
Зилинг Д.Г. – 12,66,67, 103,107,270,425
Зильбершмидт М.Г. – 271, 273,423
Зинюков Ю.М. – 12,420
Зинюхин Г.Б. – 42,407,421
Иванов А.Л. - 423
Иванов И.П. - 331
Иерусалимская Е.Н. - 418
Ильичев В.Г. – 227,421
Кабезас Г. – 231
Калесник С.В. – 15,421
Калыгин В.Г. – 109,421
Камышев А.П. - 45
Карл Великий – 24
Каутский К. – 25
Кац Д.М. – 305,308,421
Кащеев Е. – 305
Келль Л.С. – 389-391,421
Кена Ф. - 231
Киреева Н.А. – 292,293,296
Кириленко А.П. – 42
Кирюшин В.И. - 423
Климонтович Ю.Л. - 259
Ковалева А.В. - 419
Ковда В.А. – 353
Колесников А.А. - 421
Колмогоров А.Н. – 33,40
Коломенский Н.В. - 323
Колотвин А.В. – 42,407,421
Кондратьев В.Г. – 12,339, 340,421
Коробкова Е.А. - 424

Королёв В.А. – 11,12,29, 45,90,92,107,112,168,182, 245,267,268,277,279,281-287,297,308,316,318,321, 323-327,330-335,337,339-341,352,391,396,421,422, 425
Королев В.С. - 325
Корте - 247
Костарев С.Н. - 45
Костицын В.А. – 29,40
Кофф Г.Л. – 54,327,328
Краснитский А.М. - 55
Красносельский М.А. – 231
Красовский А.А. – 204,422
Кузнецов А.А. - 422
Кузнецов В.Д. - 294
Кузубова Л.И. - 301
Кузьмин А.П. - 42,422
Кули М. – 277
Куличевская И.С. - 293
Кульпин Э.С. – 25
Курочкина Л.Я. - 419
Куффиньяль Л. – 33
Кэннон У. – 227
Кюри М.П. – 231
Лагун - 309
Ланге О. – 37
Ларионов Н.М. – 98,422
Латыпова В.З. – 388,394, 423
Ле Шателье А.Л. - 245
Лебедев А.М. - 422
Лебель - 282
Левич А.П. – 231
Леонардо да Винчи - 387
Леруа Л.Э. – 25,27
Линдеман Р. – 40
Лихачёв Д.С. - 372
Лотка А. – 40,260
Лоусон Г. – 37,69,70,89,422
Лузин В.Ф. - 283
Луканин В.Н. – 45
Лэк Д. - 372,422
Ляпунов А.А. – 235,248,250,251
Ляпунов А.М. – 234
Мазур И.И. – 43,422
Мак Харг - 380
Макарьева А.М. - 263,422
Маккиндер Х.Дж. – 24
Мако Д. - 83
Максвелл Д.К. – 32,33
Маретина С.А. – 25
Маркстрём В. - 312
Машинцов Е.А. – 221-223, 422
Медоуз Д. – 30
Медоуз Д.Л. – 30,41
Мелконян Д.В. – 12,423
Мельникова М.К. - 302
Месарович М. – 36,83
Мечников Л.И. – 23,24
Мешалкин В.П. – 42,109, 110,111,131,142,143,146, 188,210,211,216,220,389, 423
Минакова Т.Б. – 142,420
Минина М.В. - 321,422
Мичурин И.В. – 9,26
Моисеев В.Ю. - 329
Моисеев Н.Н. – 41,42,61, 423
Молдаванов О.И. - 422
Монтескье Ш. – 15,16,17
Морозов С.В. - 301
Невечеря В.Л. - 45
Нерпин С.В. – 357
Никитин А.В. – 388,394, 423
Новик Г.Я. – 271,273,423
Новиков Д.А. – 185,423
Новосельцев В.Н. – 69,206, 207,231,243,358,422,423
Новохацкий В.Н. - 41
Одум Г. – 260,266,382,383
Одум Ю. – 34,35,58,71,72, 73,83,84,194,232,249,252, 261,262,264,266,381-385, 403-405,423
Осипов В.И. – 45,423
Остроумов С.А. - 373,426
Пашковский И.С. – 305, 308,421
Пегов С.А. – 61,62,423
Пендин В.В. – 12,45,423
Перминова - 291
Пешекль М. - 259
Писаренко Н.Ф. - 42
Плеханов Г.В. - 24
Подборская В.О. - 45
Полибий – 15,16
Половников А.В. – 356,424
Пономарев В.Г. - 284
Поплавский Р.П. - 35,424
Попов В.Н. - 45
Поспелов Г.С. – 204,422
Потапов А.Д. - 45
Пригожин И.Р. – 231,259
Прусаков Д.Б. – 25
Пэтти Г. - 83
Рагозин А.Л. - 45
Радаев Н.Н. – 98,99,101, 111,118,119,122,125-131, 419
Рандерс Й. - 30
Распутин В.Г. - 99
Ратцель Ф. – 24
Раутиан А.С. – 230,231
Рачковская Е.И. - 420
Рашевский Н. - 207
Ревель – 293
Реймерс Н.Ф. – 55,61,88, 181,187,208,238,243,373, 424
Ржаницын Б.А. - 298
Роева Н.Н. – 42
Русанов Я.С. - 420
Руссо Ж.-Ж. - 62
Рустамов Н.А. – 42
Рыковский А.С. – 420
Рябышенков А.С. – 98,422
Саакян - 353
Садовский В.Н. – 36,37,70, 73,76,424
Самарин Е.Н. – 303,304,424
Свирежев Ю.М. - 41
Северянин И. - 384
Семёнов А.Д. – 48,77,80, 178,193,201-204,212,213, 216,218
Семёнов Ю.И. – 15,16,24, 25,29,31,424
Семёнов-Тян-Шанский В.П. - 24
Семпл Э. – 24
Сеченов И.М. - 227
Симонова-Лобанок М.П. – 55,58,424
Синицын М.Г. - 420
Скурлатов Ю.И. - 244
Слепенькин А.В. - 294
Смирнова Н.Л. - 284
Смит Дж. - 42
Сорокин Д.Ю. - 295
Сосер Б. - 34

Сосунова И.А. – 385, 410,424
Стюард Дж. – 25
Субботина Н.П. – 301
Сукачёв В.Н. – 65,84
Сырги А.В. - 385,424
Такахара И. - 83
Тальгамер Б.Л. – 413,424
Тарко А.М. – 41,42,61, 246,248,259,424,425
Тейяр де Шарден П. - 27, 425
Темпл У. - 16
Титлянова А.А. – 249,250, 251
Тратник Р. – 289
Тржцинский Ю.Б. - 331
Трофименко Ю.В. – 45
Трофимов В.Т. – 11,12,13, 29,43,45,47,59,66,67,68, 92,103,107,132,144,168, 182,185,270,424,425,426
Трубецкой Е.Н. - 24
Уатт К. - 372,425
Уёмов А.И. – 37
Уиттикер Р. – 166,167
Урманцев Ю.А. – 37,70, 83,84,425
Файстель Р. - 259
Фёдорова Е.А. - 45
Филонов К.П. – 56,373
Финкельштейн З.И. - 294
Фонтанель Б. – 16
Форрестер Дж. – 41
Фридланд В.М. - 159
Хаггет П. - 42
Харрис М. - 25
Харькина М.А. – 103,104, 105,106,424,426
Хи В.И. - 294
Ховрычев М.П. - 295
Хомич В.А. – 132,403,408, 412,425
Цветков В.Ф. – 165,166, 250,254,425
Цинберг М.Б. - 294
Цицерон М.Т. – 243,247
Чан Мань Л. - 45
Чекланд П. – 34
Черданцев А. - 293
Черкез Е.А. – 12,423
Чернышев В.Б. - 378
Чибрик Т.С. – 328,425
Чорли Р. - 42
Чудновский А.Ф. - 357
Шварц С.С. - 373,426
Шеннон К.Э. – 37,186,426
Шешеня Н.Л. – 12,426
Шиятый Е.И. – 153
Шредингер Э. - 260
Штильмарк – 55
Шустер П. - 259
Щедровицкий Г.П. – 36,37, 38,70,426
Щепетова В.А. – 29,40,42,426
Эбелинг В. - 259
Эйген М. – 259
Эренфелд Д. – 373,415
Эшби У.Р. – 35,37,426
Яблоков А.В. - 373,426
Ягафарова Г.Г. - 294
Яковлев В.Б. - 80
Ярг Л.А. – 12,418,419

Agee J.K. – 44,427
Ahern J. - 209,430
Aldon E.F. - 427
Alshwabkeh A.N. - 281,427
Axelrad D.M. – 44,427
Baird R.C. - 209,427
Bautista P. -285,427
Bertalanffy L. von - 427
Billings J.F. - 292
Blair R.B. - 180,432
Boardman J. - 34,427
Boyce M.S. – 180,427,429
Brady W.W. – 182,427
Bramley M. - 183,427
Burger J. – 43,44,122, 124,133,208,209,228,428
Cabezas H. – 228,231,427
Cairns J. - 208,428
Caliman F.A. – 107,109, 110,245,277,281,285,287, 289,291-293,296,297,305, 396,428
Cena F. – 228,231,428
Checkland P. - 34,428
Clarke A.N. – 208,432
Cooke G.D. - 392,428
Cooperrider A.Y. – 180,430
Couffignal L. - 428
Cury P.M. – 231
David C.A. - 180,428
Ehrenfeld J. - 209,428
Entry J.A. - 295
Enzien M.V. - 292
Esplugas S. - 285,428
Fox F.D. – 413,428
Franklin J. – 44,429
Frost T.M. - 180,429
Garcia S.M. – 231
Gavrilescu M. – 281,285, 427,429
Gochfeld - 124
Grumbine R.E. – 43,44,58, 61,181,429
Haeuber R. – 44,429
Hamid R. - 181,431,432
Haney A. - 180,427,429
Hardisty P.E. - 305,429
Harris J.A. – 209,429
Hoagland N.T. - 231
Hobbs R.J. - 209,429
Imamura T. - 294
Johnson - 289
Johnson D.R. – 44,427,431
Joshi M.M. – 294
Kadlec – 397
Kessler J.J. – 43,429
Kirshner M. - 283
Kohler J. – 293,429
Krishna I.V.M. – 43,429
Krishnamoorthy B. – 43,429
Lee S. 294
Leffler J.W. - 233,429
Lehr J. - 208,430
Leitao A.B. - 209,430
Lotka A. - 260
Lovei M. – 44,430
Manickam V. – 43,429
Marks R.E. - 292
Mayer A.L. - 231
McHarg I.L. - 380,430
Mensinger M.C. - 285
Mitchell – 31
Mohedano A.F. - 427
Montgomery D.R. – 181,430
Mowrer T.H. - 182,430
Mullon C. – 231
Neace M.B. – 44,181,430
Noss R.F. - 180,430,431
Novikoff – 83
Odum E.P. - 430
Odum H.T. – 260,266,430

Ozdemiroglu E. - 305,429
Pallister J. – 43,44,57, 58,179,430
Pavel V.L. - 281,430
Pavlikakis G.E. – 44,45,57, 179,183,184,431
Pawlowski C.W. – 231,427
Peternel I.T. – 285,431
Peters R.W. - 292
Prach K. - 208,431
Pressly N.C. - 283
Rauscher H.M. - 182,431
Ringold - 182
Roth R. - 283
Safeer M.M. - 43
Sankar A. – 31,43,431
Sauser B. - 34,427
Schindler D.W. - 180,431
Schrodinger E. - 260
Scott J.M. - 181,431
Shannon L.J. - 231
Shannon C.E. – 186
Sidan – 181
Skinner G. – 31,43,44,179, 181,431
Sulphey M.M. – 43,431
Tansley A.G. - 431
Tarr - 285
Theodore L. - 31
Theodore M.K. – 31,431
Toth L.A. – 209,428
Tratnyek P.G. – 289,431
Tsihrintzis V.A. – 44,45,57, 178,181,183,184,431,432
Wallace - 397
Weiss C. - 44,430
Wiener N. – 32,432
Wilcove D.S. – 180,432
Wilson D.J. - 208,432
Winstonetal - 397
Wittfogel K.A. - 432
Weaver W. – 186
Yano T. - 294
Zhang W.-X.– 289,432

***

Предметный указатель

Антропоцентризм - 60
Атмотоп – 68,93
Барьеры:
- геохимические - 303
- защитные - 297
- механические – 257
- сорбционные - 257
Биогеоценоз - 65
Биопоглощение - 296
Биопрепараты - 295
Биоценоз - 68
Биоцентризм - 60
Водопонижение - 305
Водосток - 310
Воздействие на ЭГС:
- источники - 108
- классификация – 112
- конструктивное – 107
- косвенное - 108
- прямое - 107
- разрушительное - 107
- стабилизирующее - 107
Детерминизм:
- географический – 15
- преобразующий – 17
- экологический - 24
Дренирование - 307
Геокибернетика
- определение – 12
- экологическая – 12,38, 39
Геологическая среда – 11,29,267
Гидромелиорация - 308
Гидротоп - 68
Заболачивание - 156
Загрязнение
- баланс - 267
- воздуха – 9
- грунтов - 277
- сточными водами – 10
- среды - 30
Засоление - 354
Зооценоз – 68,91,168
Известкование - 301
Кибернетика – 32
Климатоп - 68
Коэволюция – 60
Ландшафтный дизайн - 384
Литосфера:
- параметры – 68
- экологические функции - 66
Литотоп – 91,148
- состояние - 148
Методы:
- мелиоративные - 352
- очистки – 277,281
- сорбционные - 302
- технической мелиорации - 273
- управления ЭГС - 270
Микробоценоз – 68,91,164
Модель ЭГС:
- структурированные - 77
- типы – 73
- формальные - 76
Мониторинг ЭГС – 182, 197
Ноосфера – 27,28
Обратная связь - 193
Окружающая среда – 215, 224
Опасность – 97
- источники – 99,110
- природная – 102
- техногенная - 107
Опасные явления:
- распределение – 125, 128
Организмы - 221
Очистка
- грунтов - 277
- от мусора – 10
- сточных вод - 312
Подтопление – 156,332
Польдер - 308
Почва - 158
Принцип:
- геокибернетики - 189
- Ле-Шателье - 246
Промывка - 352
Процессы:
- геологические – 152
- круговые - 247
Рекультивация:
- агротехническая - 356
Риск - 121
Самовосстановление – 258
Саморегуляция - 258
Свалки – 9,10
Системный анализ – 37,70
- правила - 70
Управление
- абразией - 327
- биосферой – 55
- водостоком – 310
- геологическими процессами – 317
- гляциальными процессами - 326
- грунтами – 270,280
- дефляцией - 337
- закон – 176,201
- заболачиванием - 335
- затоплением – 332
- зооценозом - 372
- камнепадами – 323
- карстом – 333
- криогенными процессами - 339
- лавинами – 323
- литотехническими системами - 342
- методология – 179,183
- методы - 270
- механизмы – 207
- микробоценозом - 361
- многократное - 51
- модели – 51,209
- наводнением - 332
- объекты – 49
- однократное – 51
- оползнями – 321
- осыпями - 323
- план – 181
- подземными водами - 305
- подтоплением - 335

- понятие – 46
- принципы - 189
- процесс- 47
- рельефом - 316
- руслом рек - 313
- селями – 331
- системы – 200
- склоновыми процессами - 320
- структура – 54,207
- суффозией - 335
- теория – 53
- фитоценозом - 369
- эдафотопом - 346
- эрозией – 328,330,337
Управляемость - 48
Урбоэкология - 26
Устойчивое развитие – 60,61
Устойчивость – 227
- виды – 237
= загрязнителей - 256
- порог - 238
Фитодеградация - 296
Фитостабилизация - 296
Фитоценоз - 68,91,165
Фитоэкстракция - 296
Эдафотоп – 68,158
Экодизайн - 385
Экологическая геокибернетика:
- задачи – 64,176
- цель – 59,61
- объект – 64
- предмет - 65
Экологический менеджмент - 43
Эколого-геологическая система:
- баланс - 261
- водные – 92,387
- горнодобывающая - 413
- городская - 402
- деградация - 240
- диагностирование – 133
- законы оптимальности - 242
- иерархия – 82,86
- искусственная – 92,170, 380
- классификация – 92
- компоненты – 72,205
- модель – 72,171,172, 216
- мониторинг – 182,197
- неоднородная - 95
- однородная – 95
- описание -142
- оценка - 182
- понятие – 48,65
- принципы - 189
- природная – 93
- природно-техническая - 170
- проектирование – 380
- промышленная – 412
- рекреационная - 414
- саморегуляция - 258
- самовосстановление – 243,258
- свойства – 148
- сельскохозяйственная - 400
- систематика – 88
- состав – 144,146
- состояние – 132,133, 147
- структура – 67,68,146
- сухопутные – 92,399
- техно-природная - 170
- типы моделей – 73
- управление – 141
- устойчивость - 227
Экотоп - 68
Экосистема – 42,65
Экотуризм – 10
Эродируемость - 154
Эрозия - 153

***

Научное издание

Королёв Владимир Александрович

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОКИБЕРНЕТИКА
Теория управления эколого-геологическими системами

Оригинал-макет, оформление и верстка *В.А.Королёв*

Подписано в печать 15.09.2020 г.
Формат 62x94 1/16. Бумага офсет №1, 80 г/м
Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 22,5. Тираж 500 экз. (по требованию)
Заказ № 93911

Отпечатано в типографии «OneBook.ru»
ООО «Сам Полиграфист»
129090, г.Москва, Протопоповский пер., дом 6.
www.onebook.ru

***

КОРОЛЁВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, Заслуженный работник высшей школы РФ, Заслуженный профессор МГУ, член-корр. РАЕН.

Основные направления исследований: инженерная геология, грунтоведение, термодинамика грунтов, экологическая геология, мониторинг, очистка геологической среды от загрязнений, методология науки. Автор около 700 научных работ, включая 47 монографий, учебников и учебных пособий по различным вопросам инженерной и экологической геологии

ISBN 978-5-00166-183-2