

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ИХ СИСТЕМАТИЗАЦИЯ

INDETERMINACIES IN THE ENVIRONMENTAL-GEOLOGICAL SYSTEMS AND THEIR SYSTEMATIZATION

БУСЛАЕВА О.В.

Аспирант геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,
buslova@yandex.ru

Профессор геологического факультета МГУ
им. М.В. Ломоносова,
d.r.-m.v., buslova@geol.msu.ru

BUSLAeva O.V.

Postgraduate student of the geological faculty of the Lomonosov Moscow
State University, buslova@yandex.ru

Professor of the geological faculty of the Lomonosov Moscow State
University, PhD (doctor of sciences in Biology and Mineralogy), Moscow,
buslova@geol.msu.ru

Ключевые слова:

неопределенности; опасность; риск; эколого-геологическая
система; экологическая геология; прогнозирование.

Key words:

Indeterminacy; danger; risk; environmental-geological systems;
environmental geology; prediction.

Аннотация

В статье анализируется новое понятие — «неопределенности в эколого-геологических системах (ЭГС)». Вводится его определение, рассматриваются виды неопределенностей, обуславливающие риск развития экологических в ЭГС. Предлагаются варианты систематизации факторов неопределенности в ЭГС, кратко характеризуются возможные (в основном математические) методы прогнозирования развития ЭГС в условиях неопределенности.

Введение

Моделирование процессов самой разной природы становится, как правило, с проблемой приближенности, неточности и некомплектности данных о моделируемой системе. В частности, эта проблема возникает при моделировании процессов, происходящих в эколого-геологических системах (ЭГС), сложных по структуре и возникающих в тех явлениях [22].

Эколого-геологическая система состоит из сообщества живых организмов и геологического компонента как среды их обитания, включающей в себя множество связей между отдельными элементами и характеризующейся рядом происходящих в ней процессов, таких как обмен веществом и энергией и др.

Недостаток знаний об ЭГС часто носит объективный характер и является следствием сложности этих систем, составные которых составляют одну из основных задач экологической геологии [21]. Отсутствие полноты информации об эколого-геологической системе и законов ее функционирования значительно усложняет задачу прогнозирования тех или иных явлений, происходящих в ее пределах.

Если о механизме формирования (возникновения, распространения) процесса мало что известно, то этот процесс рассматривается как подверженный влиянию неопределенных факторов.

Описание развития ЭГС в условиях неопределенности — актуальная, важная, трудная и до сего времени не исследованная задача. Ближайшие по характеру задачи рассматривались в работах, посвященных в основном общей теории риска и его прогнозированию [2, 4, 5, 7, 9, 11–14, 22–24 и др.]. Однако в области экологической геологии большинство работ по анализу процессов в ЭГС и их явлениям базируется на детерминированных закономерностях, выделенных в них и описанных. Что же касается описания эколого-геологических систем в условиях неопределенности, то таких работ практически нет.

Поэтому цель настоящей статьи — характеристика неопределенностей в ЭГС и их систематизация для последующей разработки методов прогнозирования развития ЭГС в условиях неопределенности.

Понятие «неопределенность в эколого-геологической системе»

Понятие «неопределенности» применимо к различным объектам, системам и процессам окружающего нас мира, отражает отсутствие определенности в развитии процесса, а также отсутствие или недостаточность информации о чем-либо. Неопределенность наряду с другими качествами обуславливает риск развития тех или иных опасностей [5], а применительно к ЭГС — риск развития процессов, описанных для экосистем.

С философской точки зрения понятие «неопределенность» тесно связано с такими значительными философскими категориями, как «случайность» и «необходимость» или «случайное» и «закономерное», анализу взаимосвязи которых посвящено значительное количество философских работ от Гегеля и К. Маркса до современных авторов. По проблеме соотношения этих категорий были высказаны, по крайней мере, три разные точки зрения (послужат): (1) отрицательная случайность процессы и окружающий нас мир и отчасти всякая детерминированность (И. Лавинский и др.); (2) допускательная одновременное протекание и случайных (стохастических), и закономерных процессов, вероятность наличия которых может быть разной; (3) рассматриваемая случайность процессы как особые, имеющие совершенно иную природу, чем детерминированные.

Неопределенность существует как проявление случайности, случайных (стохастических) процессов, для которых, однако, может быть выделена не детерминированная причинно-следственная связь, а закономерность особого рода — вероятности.

В эколого-геологических системах осуществляются как детерминированные, так и вероятностные процессы. Изучению первых уделяется основное внимание в геологии и экологической геологии, а вторые остаются практически неизученными. Тем не менее их понятие имеет огромное значение, в т.ч. для прогнозирования многих опасных процессов в ЭГС и оценки их риска.

Поэтому для целей экологической геологии и геологии в целом авторами выдвинуто понятие «неопределенности в эколого-геологической системе», учитывающее и отражающее специфические особенности ЭГС, связанные со стохастическими процессами.

Неопределенность в эколого-геологической системе — это ее особое свойство (качество), обуславливающее стохастическим характером возникающих в ней явлений и процессов и/или недостаточностью информации о них и проявляющееся в возможности возникновения различных данных системы, экологически как безвредных, так и опасных.

Неопределенность обуславливается двумя основными причинами: (1) отсутствием или недостаточностью знаний о закономерностях возникновения явлений; (2) стохастическим характером факторов, влияющих на развитие процесса [5]. С первой из указанных причин исследователь сталкивается всегда

раз, приступая к изучению ЭГС или к оценке ее состояния. Эта причина устраняется путем получения и анализа необходимой информации об ЭГС на базе использования тех или иных постоянно совершенствующихся методов и технологий. В итоге ЭГС все больше и больше теряет исходную неопределенность, обуславливающую первую причину.

С устранением же второй причины дело обстоит гораздо сложнее. Описание развития эколого-геологической системы в условиях, когда на нее действуют разнообразные неопределенные факторы, предполагает многозначность и многовариантность большого множества возможных сценариев ее развития, экологически как благоприятных, так и неблагоприятных.

Одной из причин экологически неблагоприятных изменений в ЭГС является нестабильность условий функционирования данной системы, которая возрастает с усложнением территории и ее неконтролируемостью (а потому вероятностью) развития.

Неопределенность в ЭГС как категория экологической геологии может быть проанализирована на базе «теории понятий» [3]. В ее основе, как известно, лежат логические анализ объема понятий и их содержания. Применяя логические приемы сравнения понятий неопределенности, различающихся по объему и содержанию, можно систематизировать категорию «неопределенность в ЭГС» так, как показано на рис. 1. «Неопределенность в ЭГС» как понятие наибольшего объема делится в данном случае на два понятия меньшего объема: (I) «природная неопределенность в ЭГС»; (II) «природно-технологическая неопределенность в ЭГС». На следующем, более низком по объему уровне, в каждом из них выделяются еще по два понятия меньшего объема — «внешняя неопределенность» и «внутренняя неопределенность», первая из которых обуславливается внешним влиянием и воздействием на ЭГС, а вторая — внутренними процессами, происходящими в пределах ЭГС. Таким образом, на третьем уровне выделяются следующие четыре понятия: (1) «внешняя природная неопределенность в ЭГС»; (2) «внутренняя природная неопределенность в ЭГС»; (3) «внешняя природно-технологическая неопределенность в ЭГС»; (4) «внутренняя природно-технологическая неопределенность в ЭГС». На четвертом уровне эти понятия подразделяются по природе обуславливающих их процессов на два типа категорий еще меньшего объема: (а) случайные (стохастические) явления вероятностный характер; (б) послучайные (песточастические). Таким образом, на этом уровне выделяется восемь понятий неопределенности в ЭГС — меньшего объема, но большего содержания, чем предыдущие (см. рис. 1). Далее пирамида понятий «неопределенности в ЭГС» может достигаться или в соответствии с логическими принципами определения понятий.

Систематизация неопределенных факторов

Неопределенные факторы в ЭГС можно систематизировать, используя различные признаки, характеризующие те или иные стороны неопределенности [5]. На взгляд автора, наиболее естественным является классификация, построенная: (1) по происхождению

ложности; (4) неопределенность с неизвестными функциями протекания. При уточнении и логическом делении понятий (1) и (2) можно далее выделить еще один уровень, в который войдут понятия: (1а) *статистическая неопределенность* с известными законами распределения случайной величины; (2а) *статистическая неопределенность* с неизвестным законом распределения случайной величины, но его известным типом (индикатор); (2б) *нестатистическая неопределенность*, при которой ничего не известно о законе распределения случайной величины.

Можно выделить следующие виды неопределенностей по *источникам их возникновения* в ЭГС (см. таблицу):

- связанная с недостаточной изученностью явлений в ЭГС;
- ответных реакций в ЭГС;
- восстановительных процессов в ЭГС;
- метеорологическая;
- связанная с невозможностью получения информации;
- временная;
- экономическая;
- политическая.

Дадим краткие комментарии к основным видам неопределенностей, фигурирующим в таблице.

В качестве примера недостаточной изученности природных явлений, происходящих в ЭГС, можно привести недостаточную изученность строения геологической среды, свойства горных пород, геологических процессов, эволюция земной коры, геологических явлений, явления геомагнитного поля на биосферу и др. К этому же виду неопределенностей можно отнести

и недостаточную изученность экологических функций литосферы [20].

К недостаточной изученности антропогенных процессов можно отнести недостаточную изученность техногенных химических, физических и биологических процессов, происходящих в ЭГС. Этот вид неопределенности, как отмечалось выше, — самый распространенный и устраняется известными методами геологии и экологической геологии. При этом получение необходимой информации во многих случаях позволяет оценить состояние ЭГС на базе детерминированных закономерностей.

Неопределенность ответных реакций в эколого-геологической системе объясняется диспропорциональностью причинно-следственных явлений и ней. Слабые воздействия на ЭГС могут иметь сильные непредвиденные экологические последствия и наоборот.

Неопределенность восстановительных процессов в эколого-геологической системе имеет очень большое значение для оценки ее функционирования и эволюции и обусловлена различными взаимосвязанными механизмами обеспечения ее устойчивости при различных воздействиях. В неопределенности восстановительных процессов включается, в частности, неопределенность перехода ЭГС в новое состояние после того, как система была выведена по тем или иным причинам из положения равновесия. Неопределенность этого вида проявляется в многозначности как путей перехода, так и новых состояний ЭГС, а также в случайности их реализации. С ней исследователи сталкиваются всякий раз, например, оценивая устойчивость ЭГС при техногенных воздействиях.

Таблица

Виды неопределенностей по источнику возникновения в ЭГС		
Вид неопределенности	Проявление неопределенности	
	природный	природно-техногенный
Связанная с недостаточной изученностью явлений в ЭГС	Недостаточная изученность природных процессов и явлений в ЭГС	Недостаточная изученность антропогенных процессов и механизмов их проявления в ЭГС
Ответных реакций в ЭГС	Недостаточная изученность прямых и обратных связей в природной ЭГС	Недостаточная изученность прямых и обратных связей в природно-техногенной ЭГС
Восстановительных процессов в ЭГС	Недостаточная изученность самоорганизации и саморегулирования ЭГС	Многовариантность принятия решений по восстановлению природно-техногенной ЭГС
Метеорологическая	Неопределенность, связанная с необходимыми обширными результатами наблюдений, характеризующими природные компоненты ЭГС	Неопределенность, связанная с необходимыми обширными результатами наблюдений, характеризующими функционирование природно-техногенной системы в ЭГС
Связанная с невозможностью получения информации	Объективная невозможность получения информации о состоянии ЭГС в труднодоступных для исследования районах	Зеркальность информации для ряда техногенных объектов
Временная	Неопределенность времени и места регулярно происходящих природных опасных событий в ЭГС	Неопределенность времени и места регулярно происходящих природно-техногенных опасных событий в ЭГС
Экономическая	Неопределенность экономической оценки природных ЭГС и экономического ущерба от опасных природных процессов	Неопределенность экономической оценки природно-техногенных ЭГС и экономического ущерба от опасных природно-техногенных процессов
Политическая	Неопределенность влияния политических событий на развитие природных ЭГС	Неопределенность влияния политических событий на развитие природно-техногенных ЭГС

Метеорологическая неопределенность в ЭГС проявляется, например, в погрешностях при измерении значений факторов, относящихся к данной системе.

Неопределенность, связанная с невозможностью получения информации об эколого-геологической системе и ее компонентах, — также один из распространенных видов неопределенностей, с которыми сталкиваются геолог или геолог: Часто за «закрытой» информацией о тех или иных техногенных объектах их руководители скрываются различные факты экологических нарушений и материального ущерба. Устранить эту неопределенность, к сожалению, во многих случаях бывает сложно без привлечения прокуратуры или экологической полиции.

Временную неопределенность природных процессов в ЭГС можно выделить, когда развитие природных процессов в ЭГС контролируется, по времени, месту и силе их проявления определены лишь в некоторых приближенных диапазонах. Такого рода неопределенность характерна, например, для наводнений, паводков, землетрясений, оценки риска проявления которых имеет огромное экологическое значение.

Временная неопределенность в природно-техногенной ЭГС включает в себя и компонент, обусловленный неопределенным развитием во времени техногенеза, техногенной, вероятностными характером научно-технического прогресса в целом.

Экономическая неопределенность в ЭГС имеет большое значение при оценке ущерба от экологически опасных процессов и риска их возникновения и развития. Она обусловлена общей неопределенностью экономического развития как в глобальном масштабе, так и в рамках отдельного государства. Неопределенность колебаний курса валют, стоимости природных ресурсов и пр. затрудняет длительное экономическое прогнозирование ущерба, экологического риска и др.

В политическую неопределенность включается отсутствие четко сформулированной экологической политики государства, возможность влияния политических кризисов, проявлений сепаратизма, экстремизма, терроризма и пр. на состояние и функционирование ЭГС.

Неопределенность в ЭГС стохастической и нестохастической природы была уже выше частично упомянуты по степени (мере) их неопределенности. Более полный классификации неопределенностей по степени их выраженности была предложена К. Борком [19], который выделяет следующие семь степеней неопределенности (по мере ее возрастания):

- нулевая, отражающая отсутствие неопределенности (система полностью определена на базе детерминированных закономерностей) и чаще всего встречается в допустимых, применимых для упрощения расчетов;
- квазидетерминированная (система определена лишь частично);
- стохастическая «дисперсионного» типа;
- с известным типом распределения, но неизвестным параметром;
- с неизвестной функцией распределения при достаточно большой накопленной статистике;
- с неизвестной функцией распределения при малой накопленной статистике;
- нестохастическая, непостоянная вероятностная закономерность.

В этой классификации степень выраженности неопределенности возрастает от позиции 1 к позиции 7. Последняя характеризуется самой высокой неопределенностью и, соответственно, самым ее полным отсутствием.

Возможные методы прогнозирования развития ЭГС в условиях неопределенности

Наиболее желательный способ определения вероятности случайных событий — это использование объективной информации. В этом случае вероятности называются объективными, и их значения вычисляются с помощью математических методов на основе известной функции распределения случайной величины либо путем обработки статистической информации. Однако в геологии и экологической геологии последователь часто сталкивается с субъективной информацией, к которой трудно применить математические методы.

Степень неопределенности природных и природно-техногенных явлений в ЭГС можно понизить путем более глубокого и детального изучения механизмов возникновения и развития процессов (а т.е. и опасных), происходящих в ЭГС. Этому и посвящено большинство работ в области экологической геологии. Более глубокое и детальное изучение ЭГС позволяет сделать процессы менее случайными и, соответственно, более закономерными. Решение этой задачи проводится в рамках исследований в соответствующих областях знаний [1, 2, 6, 8, 10, 15, 16, 18, 19].

Для получения достаточно достоверных прогнозов развития ЭГС в условиях неопределенности можно использовать и значительность от задачи те или иные, главным образом математические, методы:

- вероятностно-статистические;
- основанные на теории вероятностей;
- основанные на теории принятия решений и теории игр;
- основанные на теории расположения объектов;
- эвристические.

Вероятностно-статистический метод позволяет оценить вероятность возможной реализации процесса в пределах ЭГС в условиях неопределенности чаще всего случайной природы. Его основные ограничения связаны с периодичностью статистической длины об особенностях ЭГС. Тем не менее вероятностный метод в настоящее время считается одним из наиболее перспективных для целей прогнозирования как в инженерной, так и в экологической геологии. Используются следующие методы прогнозирования в зависимости от имеющейся исходной информации об особенностях ЭГС в условиях неопределенности:

- **статистический**, когда вероятности определяются по имеющимся статистическим данным (при их наличии) об особенностях ЭГС;
- **математико-вероятностный** для получения редких событий в отсутствие статистических данных об особенностях ЭГС;
- **метод Монте-Карло** (метод случайности), основанный на создании последовательности псевдослучайных чисел и моделирующий развитие того или иного процесса в пределах ЭГС.

Методы теории нечетких множеств состоят в том, что в отличие от классической теории множеств функции принадлежности $\mu_A(x)$ в них могут принимать не только значения 0 (если x не принадлежит множеству A) или 1 (если x принадлежит множеству A), но и промежуточные из отрезка $[0, 1]$. Функции принадлежности $\mu_A(x)$ определяются теми или иными критериями, которые обосновываются для конкретной ЭГС. При помощи методов нечетких множеств также можно формально определить нечеткие и многозначные понятия ЭГС в условиях неопределенности. Методы теории нечетких множеств применяются к неопределенным факторам нестационарной природы.

В дополнение к вероятностно-статистическому и основанному на теории нечетких множеств могут быть использованы методы теории принятия решений и теории игр, теории распознавания образов, а также эвристический.

Методы теории принятия решений и теории игр позволяют построить математическую модель, рассмотреть некоторые проблемные ситуации и выбрать наиболее оптимальное из решений (в соответствии с некоторыми критериями оптимальности — эвристическими или качественными, который обосновывается для данной ЭГС).

Методы теории распознавания образов позволяют классифицировать эколого-геологические системы в условиях неопределенности или их компоненты, а также картографические модели ЭГС по некоторым категориям и классам, основанным на прецедентах — ранее классифицированных объектах, принимаемых как образцы при решении задач классификации.

Эвристический метод (экспертное оценивание) заключается в логико-интуитивном анализе ЭГС в условиях неопределенности, разработке альтернатив и качественной оценке их качества на базе прогнозируемых экологических критериев. Обобщенное мнение экспертов служит основанием для осуществления выбора. Эвристический метод применяется при отсутствии как статистических данных, так и адекватных математических моделей и реализуется в виде логической экспертизы. В методе основано использование субъективных вероятностей, получаемых с помощью экспертного оценивания.

Заключение

Процессы в сложных эколого-геологических системах носят, как правило, случайный характер и развиваются в условиях неполноты (или даже отсутствия) объективной информации о причинах их возникновения, условиях и закономерностях протекания под влиянием недостаточно контролируемых и неопределенных факторов. В этом случае говорят о развитии ЭГС в условиях неопределенности.

В статье введено понятие «неопределенность в эколого-геологической системе» и дано его определение. Исходя из результатов проведенного анализа таких неопределенностей предложены возможности выявления систематизации неопределенных факторов в ЭГС (в соответствии с природой, происхождением и источниками неопределенностей, со степенью выраженности их факторов и др.). Кроме того, указаны и кратко описаны возможные (в основном математические) методы прогнозирования ЭГС в условиях неопределенности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумов А.И. Неопределенность данных в математической статистике // *Дальневосточный математический журнал*. 2000. Т. 1. № 1. С. 38–42.
2. Акимов В.А., Лискин В.В., Радков Н.Н. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах. М.: ФПД «Дальний экспресс», 2004. 352 с.
3. Базовые понятия инженерной геологии и экологической геологии: 280 основных определений / Трофимов В.Т., Коркин В.А., Харькин М.А. и др. (под ред. В.Т. Трофимова). М.: ООО «Геоинформинг», 2012. 328 с.
4. Базинин П.А. Экологические риски. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001. 152 с.
5. Вильямов Я.Д., Радков Н.Н. Общая теория рисков: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Академия, 2008. 368 с.
6. Горский В.Г., Моткин Г.А., Печурин В.А., Тереховский Г.Ф., Шивалов А.А., Шестерин-Шивалов Т.Н. Научно-методические аспекты анализа аварийного риска. М.: Экоинформ и информатика, 2002. 260 с.
7. Дубров А.М. Моделирование рискованных ситуаций в экономике и бизнесе. М.: Финансы и статистика, 2000. 176 с.
8. Кошмаров А.А. Основы: информатизации-математических систем / под ред. В.А. Садовникова. М.: Изд-во МГУ, 1998. 571 с.
9. Кузьмин Н.Н., Мазурин Н.А., Халатников С.В. Безопасность и риск: эколого-экономический аспект. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского гос. ун-та экономики и финансов, 1997. 163 с.
10. Мазурин Н.А. и др. Особенности применения методов анализа опасностей систем человека — машина — среда на базе нечетких множеств // *Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях*. 2001. № 1. С. 99–110.
11. Мельник А.Н., Бахматов Л.С., Харькин С.Я. Ситуационные ситуационные системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.
12. Моткин Г.А. Теория природного риска. М.: Изд-во МГУ, 1995. 224 с.
13. Печурин В.В., Радков Н.Н. Экологический природный и техногенный риск. М.: Дальний экспресс, 2001. 514 с.
14. Радков Н.Н. Оценка и управление природными рисками. М.: КРУК, 2003. 320 с.
15. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1: Долгосрочное прогнозирование элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 357 с.
16. Савчук В.П. Выводение методов статистического оценивания: Надежность технических объектов. М.: Наука, 1989. 328 с.
17. Савчук В.П., Лозовый Д.О. Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978. 352 с.
18. Соболь Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
19. Ткаченко Н.П., Поповичев Н.М., Ткаченко Т.М. Методы анализа и управления эколого-экономическими рисками. М.: ЮНИПТИ-ДАНА, 2003. 350 с.
20. Трофимов В.Т., Зыков Д.Г. Экологическая геология: учебник. М.: ЗАО «Геоинформинг», 2002. 415 с.
21. Трофимов В.Т. Эколого-геологическая система, ее типы и положение в структуре экосистем // *Вестник Московского университета. Сер. 4. География*. 2009. № 2. С. 48–52.
22. Харькин М.А., Акимов В.В. Ретроспектива международного опыта анализа рисков // *Международная экономика*. 2008. № 6. С. 61–69.
23. Шивалов А.Г. Факторы экологической опасности и экологические риски. Бронницы: Изд-во МП «ИКИ ВНИИ», 2010. 191 с.
24. Шивалов А.Г. Теория риска. Выбор при неопределенности и моделирование риска: учеб. пособие для студ. вузов. М.: Изд. дом ГУ «ВШЭ», 2005. 400 с.