

*Кафедра гидрологии суши
МГУ им. М. В. Ломоносова*

*Институт водных проблем
Российской Академии наук*



**СБОРНИК ТРУДОВ
ТРЕТЬЕЙ ОТКРЫТОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА
«РЕЧНОЙ СТОК: ПРОСТРАНСТВЕННО-
ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ И ОПАСНЫЕ
ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ»**

13 ноября 2014 г.
Москва, Россия

**Ответственный редактор –
д. г. н. Алексеевский Н.И.**

Москва
2014

Речной сток: пространственно-временная изменчивость и опасные гидрологические явления. Сборник трудов Третьей открытой конференции Научно-образовательного центра. 13 ноября 2014 г. / М.: Кафедра гидрологии суши МГУ имени М. В. Ломоносова, ИВП РАН, 2014. — 192 с.

В сборник включены материалы Третьей открытой конференции Научно-образовательного центра «**Речной сток: пространственно-временная изменчивость и опасные гидрологические явления**», объединяющего специалистов кафедры гидрологии суши МГУ имени М. В. Ломоносова и ИВП РАН.

Для студентов, аспирантов, преподавателей и научных сотрудников профильных учреждений.

© Кафедра гидрологии суши
Географический факультет МГУ, 2014
© Институт водных проблем РАН, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Алексеевский Н.И., Кузьмина Е.О.</i> Особенности водного режима рек на юге ЕТР.....	5
<i>Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Георгиади А.Г., Долгов С.В., Зайцева И.С., Кашутина Е.А., Мельник К.С., Ясинский С.В.</i> Природные и антропогенные изменения речного стока	24
<i>Базелюк А.А., Лурье П.М.</i> Катастрофические паводки и наводнения на юге России: Причины возникновения и оценка последствий.....	44
<i>Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Киреева М.Б., Молчанова Т.Г., Повалишников Е.С.</i> Современные особенности внутригодового распределения стока рек бассейна Волги.....	61
<i>Гагарина О. В., Кицигина Н. В., Корытный Л. М.</i> Особенности гидрологического режима рек Сибири.....	83
<i>Двинских С.А., Китаев А.Б., Михайлов А.В.</i> Причины наводнений в бассейне Камы и мероприятия по их предотвращению (на примере г. Кунгур).....	100
<i>Дмитриев В.В.</i> Развитие методологии интегральной оценки экологического благополучия водного объекта.....	112
<i>Земцов В.А., Паромов В.В., Копысов С.Г.</i> Динамика гидрологических опасностей в западной Сибири в условиях современных изменений климата.....	131
<i>Гельфан А.Н., Мотовилов Ю.Г.</i> Развитие методов оценки риска и долгосрочного прогноза весеннего половодья на основе динамико-стохастической модели его формирования.....	145
<i>Гармаев Е.Ж., Борисова Т.А., Цыдытов Б.З., Аюржанаев А.А.</i> Разработка рекомендаций по предотвращению негативного воздействия вод в бассейне реки Селенга.....	164
<i>Ефимов В.А.</i> Химический состав озер западного побережья Кандалакшского залива Белого моря.....	169
<i>Горин С.Л., Коваль М.В., Сазонов А.А., Терский П.Н.</i> Исследование гидрологического режима гиперприливного устья реки Пенжина.....	171
<i>Сучилина Э.А.</i> Расчет притока воды в Чебоксарское водохранилище с незарегулированных территорий.....	173

<i>Телегина Е.А.</i> Пространственно-временная изменчивость зимнего стока рек европейской территории России	175
<i>Жбаков К. К.</i> Максимальный сток рек Камчатки (на примере р. Авача) и факторы его формирования	176
<i>Лошакова Н.А.</i> Расчленение гидрографа стока ледниковой реки с помощью гидролого-гидрохимических методов	177
<i>Григорьев В.Ю.</i> Сравнение запасов воды в снежном покрове по данным снегомерных съёмки и спутниковой системы измерения поля гравитации земли (GRACE)	179
<i>Фингерт Е.А.</i> Моделирование русловых деформаций в узле слияния рек Сухоны и Юга	180
<i>Морозова Е.А.</i> Исследование распределения донных отложений и изменения морфометрических характеристик Красновидовского плёса Можайского водохранилища	181
<i>Камышев А.А.</i> Гидролого-морфодинамический анализ и русловые процессы на малых и средних реках Московской области	183
<i>Белякова П. А.</i> Особенности прогнозирования опасных паводков на реках Черноморского побережья Кавказа (в пределах России)	184
<i>Фатхи М.О.</i> Особенности наводнений в период половодья на реках центральной части ЕТР	186
<i>Василенко А.Н.</i> Колебания мутности воды и диаметра взвешенных наносов р. Гарфалайок (Северная Швеция) летом 2014 г.	187
<i>Пожидаева Д.С.</i> Катастрофические паводки в горных и предгорных районах краснодарского края и республики Адыгея	188
<i>Ефремова Н.А.</i> Поля естественных ортогональных составляющих как метод установления действующих факторов формирования весеннего стока в бассейне Дона	190
<i>Василенко А.Н.</i> Исследование колебаний уровней воды в озерах западного побережья Белого моря в зимний период	191

ОСОБЕННОСТИ ВОДНОГО РЕЖИМА РЕК НА ЮГЕ ЕТР¹

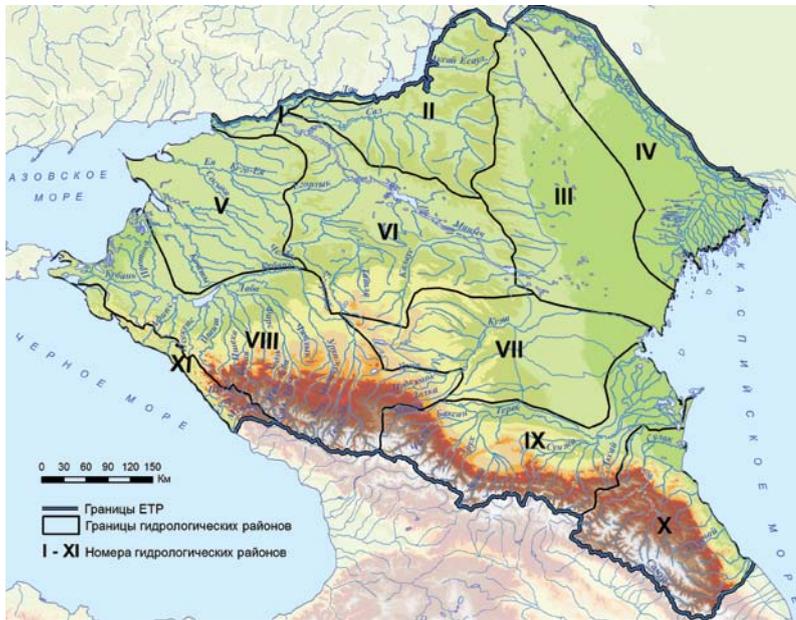
Алексеевский Н.И., Кузьмина Е.О.

Водный режим рек любой территории характеризует типовое внутригодовое распределение расходов воды, характеризующее устойчивое (из года в год повторяющееся примерно в одинаковые календарные сроки) чередование фаз повышенного и пониженного стока. Формирующаяся при этом вариация расходов и уровней воды является фактором природного ограничения условий развития водных биоценозов, хозяйственного использования ресурсов рек. На шкале внутригодовой изменчивости основных гидрологических характеристик представлены интервалы времени, для которых они соответствуют экстремальным годовым и многолетним значениям, реальной (или потенциальной) угрозе для гидробионтов, населения и хозяйства в условиях минимального или максимального стока. Продолжительность их влияния на указанные угрозы зависит от типа водного режима. В зависимости от характера внутригодового распределения стока воды находится продолжительность межени (T_1) и периода формирования минимальных (Q_{mn}) и максимальных расходов воды (Q_{mx}), соотношение между характерными расходами (Q_{mx}/Q_o , Q_{mn}/Q_o , где Q_o – средний многолетний расход воды) и уровнями воды (H_{mx}/H_o , H_{mn}/H_o , где H_o – средний многолетний уровень воды). Очевидно, что наиболее благоприятные условия для водных обитателей, а также для разнообразных водопользователей в бассейне реки или в пределах региона складываются при относительно равномерном внутригодовом распределении стока воды. Чем ближе отношение характерных расходов воды к единице, меньше коэффициент вариации годового и экстремального стока воды, тем меньше вероятность опасных гидрологических явлений, проще организовать экономически эффективное и экологически безопасное водопользование.

¹ Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00155).

Исследование особенностей водного режима рек с этой точки зрения только начинается, хотя изучение закономерностей внутригодового распределения водного стока в нашей стране насчитывает многие десятки лет [Давыдов, 1955; Зайков, 1946, а,б; Кузин, 1960; Львович, 1938 и др.]. Оно особенно актуально для плотно населенных регионов страны с аридным климатом, для которых характерна повышенная степень влияния экстремального стока на безопасность населения, хозяйства и гидробионтов. К числу таких регионов, безусловно, относится и юг ЕТР.

Регион исследований. В качестве региона исследований рассматривается Прикаспийская низменность, ограниченная



Сектора: I – Нижнедонской; II – Сальско-Аксацкий; III – Прикаспийский; IV – Нижневолжский; V – Приазовский; VI – Маньчский; VII – Кумский; VIII – Кубанский; IX – Терский; X – Дагестанский; XI – Черноморский

Рисунок 1 – Речная сеть и гидрологические сектора региона (границы проведены с учетом рекомендаций [Давыдов, 1955; Лурье, 2002])

Волго-Донским водоразделом на западе, руслом Волги – на востоке и Кумо-Манычской впадиной на юге, левобережье Нижнего Дона от Волго-Донского канала на севере до Азовского моря на западе. В пределах Северного Кавказа в его пределах находится Предкавказье и северный склон горной системы Большого Кавказа (от Керченского пролива на северо-западе до р. Самур на юго-востоке), а также часть южного склона горной системы к северо-западу от р. Мзымта.

В пустынной части Терско-Кумской низменности речная сеть практически не развита. Часть Прикаспийской низменности вообще лишена речной сети. Кума, небольшие реки Прикаспийской низменности заканчиваются «слепыми» устьями вследствие больших потерь стока на испарение, фильтрацию и орошение. Это характерно и для рек, берущих начало на восточных склонах Ергенинской возвышенности (Яшкуль, Аршань-Зельмень, Амгуста). Слабо развита речная сеть и на левобережье Нижнего Дона. Она представлена небольшими степными реками (Аксай Есауловский, Аксай Курмоярский, Сал).

Наиболее развита речная сеть в северо-западных и центральных районах юга ЕТР. К западу от меридиана Ставрополя густота речной сети составляет 0,3–0,7 км/км², а к востоку – 0,1–0,5 км/км². В пределах Большого Кавказа густота речной сети возрастает с повышением отметок местности от 0,96 до 1,15 км/км². К востоку от бассейна Терека густота речной сети значительно уменьшается вследствие уменьшения увлажненности территории. В пределах Дагестана густота речной сети достигает наибольших значений (до 1 км/км² и более) на высотах 1500–2500 м. На высотах 3500–4000 м густота сети уменьшается в направлении с севера на юг и с запада на восток в соответствии с изменением климатических факторов.

Таким образом, можно считать, что наиболее общие черты изменения стока (и водных ресурсов) характеризует наличие или отсутствие рек в разных частях региона. Климатические и орографические факторы создают природные предпосылки для изменения характерных расходов воды и сложности строения речной сети. Водотоки отсутствуют, их мало или они су-

шествуют очень короткое время при условии $Q_{mx}/Q_o = k_{mx} > 4$ и $0 \leq Q_{mn}/Q_o = k_{mn} \leq 0,2$ (обозначения приведены выше). Наоборот, густота речной сети достигает максимальных региональных значений, если $2,2 \leq Q_{mx}/Q_o \leq 4$ и $0,2 < Q_{mn}/Q_o \leq 0,7$ (таблица 1).

Таблица 1 – Средние значения нормированных годовых максимальных и минимальных расходов воды

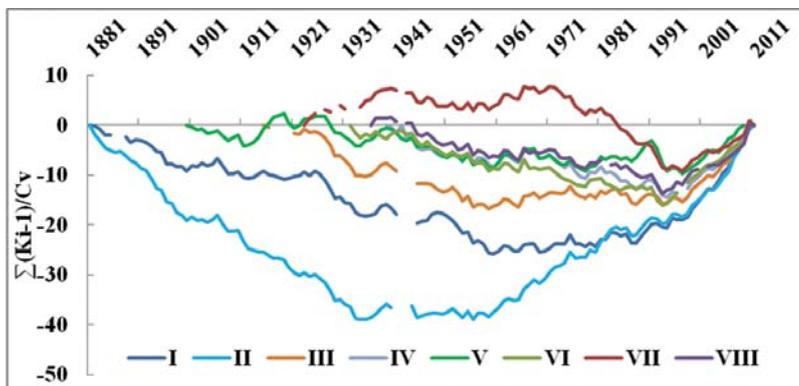
Номер сектора	Название сектора	$Q_{mx}/Q_o = k_{mx}$	$Q_{mn}/Q_o = k_{mn}$
I	Нижнедонской	сток зарегулирован	сток зарегулирован
II	Сальско-Аксацкий	7,74	0,03
III	Прикаспийский	мало данных	мало данных
IV	Нижневожский	сток зарегулирован	сток зарегулирован
V	Приазовский	3,51	0,23
VI	Маньчский	4,57	0,23
VII	Кумский	3,44	0,47
VIII	Кубанский	3,07	0,43
IX	Терский	3,02	0,67
X	Дагестанский	2,81	0,58
XI	Черноморский	2,27	0,58

Крупнейшие реки региона (Дон, Волга, Кубань, Терек, Кума, Сулак, Самур) осуществляют транзит стока, сформированного за пределами региона и (или) под влиянием орографических эффектов. Их сток и внутригодовое распределение соответствуют полизональным рекам. В горах эта особенность свойственна и их крупным притокам. Малые и средние реки Большого Кавказа, верховья Кубани, Терека, Сулака и Самура, Кумы – типичные горные реки, формирующие сток на отметках выше климатической снеговой линии. Их сток отражает закономерное изменение роли источников питания рек при переходе от горных к равнинным частям бассейна. На равнине (почти все левобережные притоки Нижнего Дона, реки в пределах Азово-Кубанской и Прикаспийской низменностей, реки

в средней и нижней частях бассейна Кубани, Терека, Кумы) условия формирования стока в основном имеют зональный характер, что определяет специфику их гидрологического режима. В устьях сток крупных рек региона рассредоточивается по системам менее крупных естественных и искусственных дельтовых водотоков (исключение – дельта Сулака). На гидрологический режим многих рек региона оказывают влияние водохранилища [Лурье и др., 2001; Шикломанов, 1979]. Большая часть водохранилищ осуществляет сезонное регулирование речного стока. На северной границе территории исследования расположены Волгоградское и Цимлянское водохранилища, водный режим которых оказывает существенное влияние на сток Волги и Дона, его внутригодовое распределение. Водоохранилища – важный фактор трансформации внутригодового распределения стока рек Азово-Кубанской и Кумо-Маньчской низменности [Лурье и др., 2001], в бассейне Кумы, Маньча и Кубани [Лурье и др., 2005]. Пролетарское и Веселовское (р. Маньч), Краснодарское водохранилище (р. Кубань), а также Чиркейское (р. Сулак) водохранилища осуществляют многолетнее регулирование стока рек.

Особенности термического режима и увлажнения региона. Особенности изменения стока воды в существенной мере формируются под влиянием климатических характеристик: температуры воздуха и осадков. Для анализа их пространственно-временной изменчивости использованы данные наблюдений Северо-Кавказского управления Росгидромета по 63 метеостанциям, относительно равномерно распределенным по территории региона.

Средняя годовая температура воздуха закономерно изменяется при переходе от северных к южным районам ЕТР, а также в зависимости от средней высоты водосборов. Она также изменяется во времени (рис. 2). В период с 1936 по 1959 гг. средняя годовая температура воздуха была понижена по сравнению со средними условиями. В секторах VII–XII этот период продолжался до 1993 г. (с некоторым повышением температуры воздуха до средних показателей в 1960–1977 гг.). После 1960 г.



I – Волгоград; II – Ростов-на-Дону; III – Приморско-Ахтарск; IV – Минеральные Воды; V – Махачкала; VI – Сулак, высокогорная; VII – Кисловодск; VIII – Красная Поляна

Рисунок 2 – Многолетние тренды изменения среднегодовой температуры воздуха в разных секторах юга ЕТР

в регионе температура воздуха стабилизировалась на значениях, соответствующих средним условиям. В III–V секторах эта ситуация сохранялась до 1990 г., затем началось устойчивое потепление климата [Кислов и др., 2011]. С 1994 г. во всех районах юга ЕТР среднегодовая температура воздуха устойчиво повышалась (в секторах III–IV она повысилась на 14 %). Положительные статистически достоверные тренды характерны для среднегодовых, зимних и весенних температур воздуха. В меньшей степени потепление отразилось на температурах воздуха в летне-осенний период.

Основной особенностью распределения годовой суммы осадков в равнинных районах юга ЕТР является их уменьшение с запада на восток (табл. 2). Наименьшее количество осадков (несколько больше 200 мм) свойственно для III и IV секторов (рис. 1). Большая увлажненность характерна для I и II секторов. В их пределах количество осадков увеличивается с востока на запад и достигает максимума в районе г. Ростов-на-Дону (611 мм). В V–VII секторах (рис. 1) сумма осадков изменяется

Таблица 2 – Сезонное распределение и сумма осадков по районам юга ЕТР (1960–2008 гг.)

Район	Метеостанция	Характеристика	Месяцы				Год
			XII–II	III–V	VI–VIII	IX–XI	
I	Яшкуль	мм	43	67	84	63	268
		%	16,8	26,1	32,7	24,4	100
II	Ростовна-Дону	мм	164	139	157	141	611
		%	27,3	23,1	26,1	23,5	100
III	Краснодар	мм	180	168	181	167	719
		%	25,9	24,1	26,0	24,0	100
IV	Ставрополь	мм	89	141	181	133	560
		%	16,4	25,8	33,3	24,5	100
V	Махачкала	мм	88	73	74	130	364
		%	24,2	19,9	20,3	35,6	100
VI	Сулак, высокогорная	мм	102	317	385	191	980
		%	10,2	31,9	38,7	19,2	100
VII	Владикавказ	мм	97	293	372	171	945
		%	10,4	31,4	39,9	18,3	100
VIII	Теберда	мм	137	186	211	209	745
		%	18,4	25,1	28,4	28,2	100

от более 700 до менее 400 мм. Незначительный максимум осадков формируется в пределах Ставропольской возвышенности (VI сектор). В предгорной зоне северного склона Большого Кавказа количество осадков на крайнем востоке территории не превышает 392 мм. На южном склоне Большого Кавказа (XI сектор) количество осадков увеличивается с северо-запада на юго-восток (от 552 мм в Анапе до 1657 мм – в Сочи). Еще больше вариация годового количества осадков в горной и высокогорной зонах Большого Кавказа (районы VIII–X). В пределах северного склона Большого Кавказа количество осадков изменяется от 610–2155 мм в год при увеличении высоты местности в диапазоне от 2000 до 3800 м БС. Годовая сумма осадков в ледниковой зоне постепенно уменьшается на восток от 2000–2500 мм в бассейнах рек Белой и Лабы до 1000–1200 мм

в бассейнах рр. Череха и Уруха и до 800–1150 мм в бассейнах рек Самура [Панов, 1993].

Географическое положение речных бассейнов определяет пространственные различия температуры воздуха. Для нее характерна значительная сезонная контрастность. Пространственную неоднородность региона по характеристикам термического режима и засушливости климата можно оценить по индексу континентальности климата K [Хромов, 1957]:

$$K = \frac{A - 5,4 \sin \varphi}{A}, \quad (1)$$

где $A = \theta_{\max} + |\theta_{\min}|$ – годовой диапазон изменения температуры воздуха, θ_{\max} и $|\theta_{\min}|$ – абсолютные средние значения максимальной и минимальной температур воздуха соответственно; φ – географическая широта местности. Континентальность климата в регионе возрастает с юго-запада на северо-восток и с окраин региона к центру. Для равнинной территории наименьшее значение индекса характерно для приморских частей секторов V, VII–VIII и X района (рис. 1). Величина индекса достигает максимума во II–IV секторах, а также в северной части VII и IX секторов. Таким образом, контрастность климата существенно возрастает с удалением от моря. Контрастность климата изменяется и под влиянием рельефа. С увеличением абсолютной высоты местности ($H_{\text{абс}}$) до 2500–3000 м БС индекс континентальности K уменьшается по степенному закону. Для VIII–IX и X секторов соответствующие зависимости имеют вид ($r=0,92$ и $r=0,96$):

$$K = 0,99 H_{\text{абс}}^{-0,014}, \quad (2)$$

$$K = 0,97 H_{\text{абс}}^{-0,011}. \quad (3)$$

Водный режим рек. Для исследования водного режима рек региона использованы данные Северо-Кавказского управления Росгидромета по 237 гидрологическим постам, неравномерно распределенным по территории исследований за период с 1936 по 2008 гг. Основная их часть (70 %) характеризует водный режим малых горных и полугорных водотоков, 30 % – равнинных крупных, средних и малых рек. Анализ пространственных особенностей внутригодового распределения стока

воды этих рек выполнен с учетом идей Л.К.Давыдова [Давыдов, 1955]. Информация анализировалась и обобщалась по секторам, границы которых совпадают с водоразделами бассейнов крупных рек (рис.1). В регионе выделяются три гидрологических района: Предкавказье, Северный склон Большого Кавказа, Южный склон Большого Кавказа [Лурье, 2002], которые включают характерные гидрологические части (сектора): Приазовский, Маньчский, Кумский и Кубанский, Терский, Дагестанский, Северо-Черноморский и Южно-Черноморский. Гидрологические особенности рек Северо-Черноморского и Южно-Черноморского секторов мало отличаются между собой, что позволяет анализировать их содержание в границах одного сектора – Черноморского. Для целей исследования потребовалось ввести дополнительные гидрологические районы: Левобережье Нижнего Дона и Правобережье Нижней Волги (Волго-Донская территория). Волго-Донская территория включает четыре гидрологических сектора: Нижнедонской, Сальско-Аксайский, Прикаспийский и Нижневолжский. Водотоки каждого из этих секторов имеют особые черты водного режима. Водотоки Нижнедонского и Нижневолжского секторов, например, испытывают влияние регулирования стока. Наиболее существенные отличия водного режима характерны для горных и равнинных рек, а также для водотоков, начинающихся на северном и южном склонах Большого Кавказа. Наиболее общие черты водного режима равнинных рек иллюстрируют данные по левобережью Нижнего Дона, правобережью Нижней Волги и Предкавказью.

В целом слой годового стока возрастает с севера на юг и уменьшается с северо-запада на юго-восток и северо-восток (табл. 3). Наименьшие значения годового стока характерны для рек Прикаспийского и севера Маньчского секторов (310 мм). Величина слоя стока для рек равнинной части в Приазовском и Нижнедонском секторах слабо зависит от высоты водосбора. В большей мере зависимость между переменными проявляется для рек Кумского и Маньчского секторов. Максимальный слой стока характерен для рек Ставропольской возвышенности

Таблица 3 – Средний многолетний сток равнинных рек юга ЕТР

Река – пост	Период осреднения, годы	Площадь водосбора, F , км ²	Средняя высота водосбора, H , м	Расход воды, Q , м ³ /с	Слой стока, y , мм
Прикаспийский сектор					
Балка Бургуста – п. Советский	1959–2008	99,2	120	0,045	14
балка Аршань-Зельмень – п. Аршань-Зельмень	1958–1970	122	100	0,2	41
Сальско-Аксацкий сектор					
Аксай Есауловский – п. Абганерово	1948–2008*	246	110	0,19	25
Аксай Есауловский – х. Водянский	1948–2008	2110	110	1,47	22
Аксай Курмоярский – клх им. Ленин	1948–2008*	1180	110	0,65	17
Кагальник – клх им. М. Горького	1948–2008*	1960	93	1,06	17
Сал – п. Никольский	1951–1963	5610	130	1,84	10
Сал – х. Моисеев	1948–2008*	10600	110	2,96	8,8
Сал – ст-ца Батлаевская	1950–2008*	19500	100	9,61	16
р.Сал – х. Балабинка	1985–2008	21000	97	15,8	24
Кара-Сал – х. Сарпинский	1948–2008*	1030	120	0,46	14
Акшибай – с. Киселевка	1948–2008*	409	130	0,31	24
Балка Водяная – х. Терновой	1954–1969	39	130	0,045	36
Приазовский сектор					
Ея – ст-ца Незамаевская	1977–2008*	1900	82	1,54	26
Челбас – ст-ца Ново-Платнировская	1948–1955	2820	80	2,33	26
Челбас – ст-ца Каневская	1977–2008	4080	66	6,00	46
Албаша – ст-ца Новоминская	1953–1959	159	40	0,13	25
Бейсуг – ст-ца Батуриная	1950–1957	1880	74	2,42	41
Бейсужек – г. Кореновск	1953–1962	725	77	0,77	33
Кирпили – ст-ца Медведовская	1946–1964	1820	49	2,02	35
Кирпили – ст-ца Раздольная	1948–1959	281	72	0,50	56
Ея – ст-ца Кущевская	1949–1959	4520	72	2,60	18

Река – пост	Период осреднения, годы	Площадь водосбора, F , км^2	Средняя высота во- досбора, H , м	Расход воды, Q , $\text{м}^3/\text{с}$	Слой стока, y , мм
Маньчский сектор					
Балка Гучунгу – с. Соленое	1949–1964	35	55	0,004	3,5
Егорлык – с. Новый Егорлык	1951–2008	14600	170	3,4	7,4
Ср Егорлык (пруд) – с. Шаблиевское	1936–1997	2270	77	0,406	5,6
Чибрик – ст-ца Рождественская	1959–1997	25	400	0,025	31
Ташла – с. Донское	1939–2008	428	310	0,655	48
Балка Горькая – с. Сергиевка	1936–1957	108	390	0,07	20
Калаус – с. Сергиевка	1936–2008	1590	380	2,6	51
Калаус – г. Светлоград	1936–2008	4540	340	5,1	36
Калаус – с. Воздвиженское	1936–2008	9100	190	6,4	22
Горькая – х. Грачевка	1955–1971	831	400	1,00	38
Ула – с. Старомарьевка	1951–2008	273	440	0,67	78
Кумский сектор					
Мокрая Буйвола – пос. Прогресс	1953–2008	2180	260	0,9	13
Кума – с. Отказное	1966–1989	7980	930	17,4	69
Кума – г. Зеленокумск	1936–2008	9960	820	19,69	62
Кума – с. Стародубское	1936–1962	11200	780	11,80	33
Кума – г. Буденновск	1936–2008	15000	610	15,49	33
Кума – с. Владимировка	1951–1999	20000	590	10,65	17
Томузловка – с. Новоселицкое	1966–2008	815	360	1,32	51

* Период, за который приведены значения слоя стока по восстановленным значениям

(50–80 мм) и для среднего течения Кумы (62–69 мм). Величина слоя стока горных притоков Кумы (Подкумок, Аликановка, Боргуста, Золка) и в верховьях Кума (до ст-цы Новозаведенная) примерно совпадает со слоем стока рек северного склона Большого Кавказа.

Для большинства равнинных рек региона характерно современное увеличение годового стока. Для некоторых из них оно

связано с влиянием хозяйственной деятельности. Во внутригодовом распределении стока данных рек отмечается увеличение доли летне-осенней составляющей. Лишь для р. Аксай (Есауловский) характерно некоторое естественное уменьшение годового стока. Специфику территориальных типов внутригодового распределения стока воды характеризуют неравенства: $2,58 \leq Q_{mx}/Q_o \leq 3,51$ и $0 < Q_{mn}/Q_o \leq 0,23$ (Приазовский сектор), $1,85 \leq Q_{mx}/Q_o \leq 3,44$ и $0,05 < Q_{mn}/Q_o \leq 0,47$ (Кумский сектор), $3,53 \leq Q_{mx}/Q_o \leq 4,57$ и $0 < Q_{mn}/Q_o \leq 0,23$ (Маньчский сектор). нной территории Предкавказья свойственны

Внутригодовое распределение рек в левобережье Нижнего Дона, правобережье Нижней Волги и на территории Предкавказья отличает наличие бессточного периода, совпадающего с продолжительностью их пересыхания в течение значительной части года. Для рек Маньчского, Приазовского, Кумского секторов региона характерно преимущественное, а рек Прикаспийского и Сальско-Аксайского секторов – исключительное снеговое питание. Уменьшение доли снегового питания происходит в направлении с запада на восток. Для левобережных притоков Дона (Сал, Есауловский и Курмоярский Аксай), немногочисленных водотоков Прикаспийского сектора доля талых вод в годовом стоке превышает 80 %, а доля дождевого питания меньше 10%. Подземные воды формируют 15–30 % годового стока. Доля подземного питания относительно мала для малых рек, что приводит к их пересыханию в летний период. Ежегодно здесь пересыхают реки с площадью водосборов от 500 до 1500–2000 км² [Лурье, 2002]. Средняя продолжительность отсутствия стока в реках составляет от суток до 365 дней в зависимости от размера рек. Наиболее часто их пересыхание происходит в осенне-зимний период; наблюдается в среднем один раз в несколько лет. Наиболее подвержены пересыханию (в конце весны – начале лета) реки Прикаспийского сектора.

Отсутствие речного стока связано и с промерзанием рек. Оно возникает в наиболее холодные годы на участках малых рек и ручьев. Для некоторых рек (Калаус, Томузловка, Егорлык) искусственное увеличение стока в зимний период при-

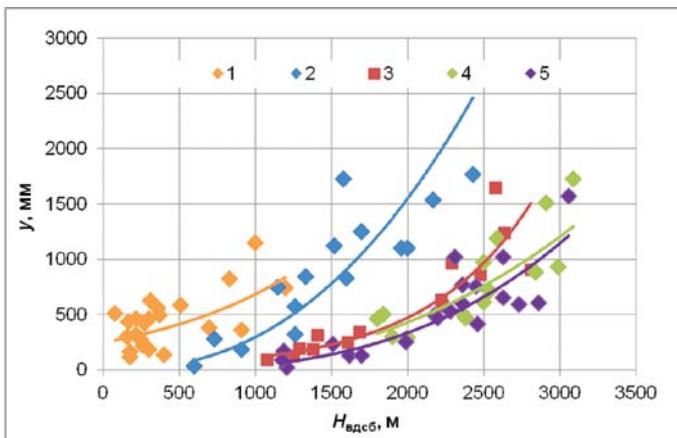
вело к сокращению продолжительности этого периода или исключению явления промерзания рек [Лурье, 2002].

По характеру водного режима равнинные реки региона относятся к восточноевропейскому типу с весенним половодьем и паводками в летне-осенний период. Продолжительность весеннего половодья на этих реках зависит от размера их водосборов. В низовьях Дона и Волги продолжительность многоводной фазы водного режима значительно превышает продолжительность половодья для левобережных притоков Дона и средних рек Предкавказья. Это создает особый ритм изменения расходов воды. Внутригодовое распределение расходов воды отличается крайней неравномерностью. Большая часть стока проходит в весенний период (от 65 до 80 %), летне-осенний сток не превышает 20 %, зимний – 15 % годового стока.

Реки Сальско-Аксайского и Прикаспийского секторов имеют меньшее увлажнение по сравнению с другими секторами равнинной территории юга ЕТР. Поэтому до 80 % годового стока здесь формируется весной в период таяния сезонных снегов. Для данных секторов характерны неравенства $5,44 \leq Q_{mx}/Q_o \leq 7,74$ и $0 < Q_{mn}/Q_o \leq 0,03$. В Приазовском, Маньчском и Кумском секторах внутригодовое распределение стока имеет более равномерный характер: 52 % стока проходит в весенний сезон, 23 % – в летне-осенний и 25 % – в зимний период года.

Реки в пределах северного склона Большого Кавказа относятся к трем гидрологическим секторам: Кубанскому, Терскому и Дагестанскому (рис.1). Кубанский сектор охватывает бассейн Кубани и участок верхнего течения Кумы с горными притоками. В Терский сектор входит бассейн Терека, а в Дагестанский – бассейны малых рек, впадающих в Каспийское море, а также р. Акташ (на севере) и р. Самур (на юге). Распределение величины годового стока в пределах северного склона Большого Кавказа характеризуется уменьшением слоя стока в направлении от Кубанского сектора к Дагестанскому, что обусловлено уменьшением суммы осадков с запада на восток региона. Слой годового стока возрастает с увеличением высоты водосборов (в диапазоне ее изменения от 0 до 3000 м). В изу-

ченном диапазоне высот изменение слоя стока с высотой носит нелинейный характер и различается для выделенных гидрологических секторов (рис. 3). Для секторов северного склона Большого Кавказа характерны неравенства следующего вида: $1,95 \leq Q_{mx}/Q_0 \leq 3,07$ и $0,05 < Q_{mx}/Q_0 \leq 0,43$ (Кубанский сектор), $1,59 \leq Q_{mx}/Q_0 \leq 3,02$ и $0,22 < Q_{mx}/Q_0 \leq 0,67$ (Терский сектор), $1,77 \leq Q_{mx}/Q_0 \leq 2,81$ и $0,22 < Q_{mx}/Q_0 \leq 0,58$ (Дагестанский сектор).



1 – реки Северо-Западного Кавказа; 2 – реки бассейна Белой и Лабы; 3 – верховья Кубани и Кумы; 4 – реки бассейна Терека; 5 – реки Дагестанского сектора

Рисунок 3 – Изменение слоя годового стока рек по территории северного склона Большого Кавказа

Годовой сток рек испытывает многолетние изменения. В первом приближении (и с учетом уже имеющихся исследований [Глазовский и др., 1991; Фащевский, 1996]) отклонения годового стока рек от нормы в пределах 5–10 % можно считать безопасными для водопользования и водных биоценозов региона. При увеличении этих отклонений (до 25 % от нормы) могут возникать кризисные явления, связанные с возможностью нарушениями гидрологической безопасности для населения, хозяйства и гидробионтов в периоды повышенных или пони-

женных расходов воды. Они приобретают характер бедствия, если средний годовой сток изменяется в диапазоне от 25 до 50 % нормы. Чрезвычайной ситуации соответствует изменение нормы стока на 50 и более процентов, поскольку в этих условиях резко возрастает риск опасных гидрологических явлений.

Водность рек на северном склоне Большого Кавказа изменяется асинхронно для разных гидрологических секторов. В Кубанском секторе даже в соседних бассейнах рек возможна асинхронность колебаний их стока. На многих реках Кубанского сектора (Большая Лаба, Малая Лаба, Уруп, Белая, Фарс) уменьшение годового стока происходило с конца 1950-х годов до 1986 г. В дальнейшем сток воды возрастал. Сток рек Псекупс и Уллу-Кам в период до 1968 г. был близок к средним многолетним значениям, а в 1974–2000 гг. – превосходил эти значения. В дальнейшем он постепенно сокращался. Годовой сток рр. Убинка и Адагум отличался повышенными значениями в 1936–1947 гг. и 1993–2002 гг., а в 1970–1993 гг. и 2003–2008 гг. водность рек была пониженной. На реках Терского сектора с ледниковым питанием (Цея, Чегем, Баксан) колебания годового стока носили сложный характер. Значительное увеличение стока происходило в 1998–2000 гг. При отсутствии ледников сток рек (Камбилеевка, Нальчик) возрастал в период с 1958 по 2008 гг. Для рек Дагестанского сектора повышенный сток оказался больше нормы в 1987–1994 гг. и с конца 1998–2008 гг. На многих реках рассматриваемого подрайона пониженный годовой стока формировался в период с 1936 г. до конца 1950-х годов. В 1960-е годы началась фаза повышенного стока. Сток достиг максимальных значений на большинстве рек в 1994–2008 гг. Исключение составляют рр. Ахтычай, Кара-Самур, Уллучай, Казикумухское Койсу, для которых максимум годового стока пришелся на 1978–1993 гг. На многих реках с паводочным режимом (Фарс, Афипс, Убинка, Адагум (Кубанский сектор)) произошло существенное увеличение стока. Прирост годового стока за 1994–2008 гг. составил от 16 до 44 % (по сравнению с нормой стока). Осенний сток р. Убинка возрос на 26 %, р. Адагум – на 51 %, р. Фарс – на 86 %, а на р. Афипс – на 143%. На реках

Дагестанского сектора с преобладанием снегового и дождевого питания (рр. Уллучай, Курах, Ахтычай), наоборот, годовой сток уменьшился, а сток ледниковых рек, наоборот, возрос.

Реки северного склона Большого Кавказа отличает разнообразие типов гидрологического режима [Важнов, 1966; Комлев, Мельникова, 2008]. Для притоков нижнего течения Кубани (западнее р. Пшиш) водный режим характеризуется интенсивными паводками в период с ноября по март, когда проходит 75–90 % годового стока, устойчивой летней меженью. Для рек в бассейне Белой, Чамлыка и Фарса половодье сочетается с формированием дождевых паводков (в период с марта по август). Сток за период половодья составляет около 50 % годового. У некоторых правобережных притоков Белой (Курджипс, Пшеха, Лучка) водный режим характеризуется слабо выраженным весенним половодьем, возникающим за счет таяния сезонного снега, летними (Курджипс) или зимними паводками (Лучка, Пшеха). Остальные реки Кубанского сектора и высокогорных районов Терского и Дагестанского секторов отличает высокое половодье в теплую часть года, дождевые паводки в течение летне-осеннего сезона, низкая зимняя межень. В период половодья проходит 50–80 % годового стока.

У рек Терского (Куркужин, Камбилеевка, Нальчик) и Дагестанского (Акса́й) секторов, не имеющих ледникового питания, хорошо выражено весенне-летнее или весеннее половодье (в зависимости от средней высоты водосбора). Оно формируется за счет таяния сезонного снега. Для них характерны летне-осенние паводки, в период прохождения которых достигаются максимальные расходы и уровни воды. Для рек Дагестана с высотой водосбора до 1500 м характерен паводочный режим в весенне-летне-осенний период.

Слой годового стока рек на южном склоне Большого Кавказа (Черноморский сектор) возрастает от 109 мм (р. Гастогай) до 2090 мм (р. Мзымта). Максимальный слой годового стока характерен для р. Шахе – 2165 мм. Изменение слоя стока с высотой происходит по нелинейному закону, соответствующему эмпирическому уравнению

$$y = 817 \ln(H_{\text{вдсб}}) - 3640. \quad (4)$$

Сток рек этой части региона испытывает многолетние флуктуации, несовпадающие по фазе колебаний для различных рек [Панов и др., 2012]. В 1998–2008 гг. годовой сток и водность зимне-весеннего периода уменьшались (при некотором увеличении стока за осенний сезон года). Исключение составляют рр. Хоста, Мзымта и Шахе, для которых характерно увеличение стока во все сезоны года. Водный режим рек Черноморского сектора характеризуют неравенства: $1,46 \leq Q_{\text{mx}}/Q_0 \leq 2,27$ и $0,13 < Q_{\text{mn}}/Q_0 \leq 0,58$.

Существенное влияние на внутригодовое распределение стока равнинных рек на юге ЕТР оказывает хозяйственная деятельность: регулирование стока и межбассейновое перераспределение водных ресурсов. Наиболее значимые изменения этого типа характерны для участков рр. Волга, Дон, Кубань и Сулак [Шикломанов, 1979]. Для р. Дон оно началось в 1952 г., для Нижней Волги – в 1961 г., Кубани – с 1973 г., Сулака – с 1974 г. После ввода в эксплуатацию Волгоградского, Цимлянского, Краснодарского и Чиркейского гидроузлов сток речных вод изменился соответственно на 5,88; 20,5; 6,89 и 2,34 %. Условно естественный сток рек при этом возрастал или уменьшался [Гидрология дельты..., 2010; Лурье, Панов, 1999; Полонский, Горелиц, 1997; Устьевая область..., 1998; Устья рек..., 2013]. Ниже водохранилищ произошло существенное выравнивание внутригодового распределения стока воды. Переброска кубанской воды в русло рр. Егорлык и Калаус привела не только к увеличению средних месячных расходов воды, но и к увеличению их наибольших и наименьших значений. Искусственное увеличение стока вод рр. Чибрик и Ташла привело к уменьшению доли стока в месяц с максимальным стоком на 15 % и менее.

Водотоки в устьях Волги, Дона, Кубани, Терека и Сулака имеют особый водный режим. Он находится под сильнейшим воздействием формирования и изменения стока воды в бассейнах этих рек, а также хозяйственной деятельности. Наиболее мощное влияние на сток рек оказало регулирование стока воды.

В условиях нестабильного климата роль регулирования стока может возрастать или быть неочевидной [Устья рек..., 2013].

Выводы:

В пределах юга ЕТР выделяются 11 гидрологических районов (секторов), отличающихся по густоте речной сети и особенностям водного режима. Для каждого из них характерны районные значения слоя стока и относительные величины максимального и минимального расхода воды. Чем больше относительная величина максимального расхода и меньше относительная величина минимального расхода воды, тем сильнее выражены гидрологические ограничения для водопользования в конкретном гидрологическом районе ЕТР.

В целом слой годового стока рек региона возрастает с севера на юг и уменьшается с северо-запада на юго-восток и северо-восток. Водотоки Нижнедонского и Нижневолжского секторов уникальны по величине стока и относительным характеристикам максимального и минимального стока вследствие регулирующего влияния водохранилищ. Наиболее существенные отличия слоя стока и водного режима характерны для горных и равнинных рек региона, а также для водотоков, начинающихся на северном и южном склонах Большого Кавказа.

Сток рек на юге ЕТР испытывает многолетнюю изменчивость. Наибольшие изменения характерны для рек с паводочным режимом стока (Фарс, Афипс, Убинка, Адагум и др.). Прирост годового стока за 1994–2008 гг. изменяется от 16 до 44 % (по сравнению с нормой стока). На горных реках с преобладанием снегового и дождевого питания годовой сток уменьшился, при этом сток ледниковых рек, наоборот, возрос. Для большинства равнинных рек региона характерно современное увеличение годового стока.

Литература

Важнов А.Н. Анализ и прогнозы стока рек Кавказа. – М.: Гидрометеоздат, 1966. – 275 с.

Гидрология дельты и устьевого взморья Кубани / Под ред. Михайлова В.Н., Магрицкого Д.В., Иванова А.А. – Москва: ГЕОС, 2010. – 728 с.

Глазовский Н.Ф., Коронкевич Н.И., Кренке А.Н., Кочуров Б.И., Сдасюк Г.В. Критические экологические районы: географические под-ходы и принципы изменения // Изв. ВГО, 1991. Т. 123. Вып. 1. – С. 9–17.

Давыдов Л.К. Гидрография СССР (воды суши). Часть II. Гидрография районов. – Л.: Издательство Ленинградского Университета, 1955. – 600 с.

Зайков Б.Д. Средний сток и его распределение в году на территории Кавказа //Труды научно-исследовательских учреждений ГУГМС СССР. Серия IV. Вып. 40. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1946, а. – 64 с.

Зайков Б.Д. Средний сток и его распределение в году на территории СССР //Труды научно-исследовательских учреждений ГУГМС СССР. Серия IV. Вып. 24. Л.: Гидрометеиздат, 1946, б. – 148 с.

Кислов А.В., Гребенец В.И., Евстигнеев В.М., Конищев В.Н., Сидорова М.В., Суркова Г.В., Тумель Н.В. Последствия возможного потепления климата в XXI веке // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2011. №3. – С. 3–8.

Комлев А.М., Мельникова Т.Н. Водный режим рек Северо-Западного Кавказа. – Пермь: изд-во Пермского госуниверситета, 2008. – 112 с.

Кузин П.С. Классификация рек и гидрологическое районирование СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 455 с.

Лурье П.М. Водные ресурсы и водный баланс Кавказа. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 506 с.

Лурье П.М., Панов В.Д. Влияние изменений климата на гидрологический режим р. Дон в начале XXI столетия // Метеорология и гидрология, 1999. – №4. – С. 90–97.

Лурье П.М., Панов В.Д., Саломатин А.М. Река Маныч: гидрография и сток. – СПб.: Гидрометеиздат, 2001. – 160 с.

Лурье П. М., Панов В. Д., Ткаченко Ю. Ю. Река Кубань: гидрография и режим стока. – СПб.: Гидрометеиздат, 2005. – 498 с.

Львович М.И. Опыт классификации рек СССР // Труды ГГИ, 1938. Вып. 6. – С.58–108.

Львович М.И. Реки СССР. – М.: Изд-во «Мысль», 1971. – 352 с.

Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее, будущее. – М.: ГЕОС, 1997. – 413 с.

Панов В. Д., Базелюк А. А., Лурье П. М. Реки Черноморского побережья Кавказа: гидрография и режим стока. –Ростов-на-Дону.: Донской издательский дом, 2012. – 607 с.

Полонский В.Ф., Горелиц О.В. Сток воды и его распределение в дельте Волги // Метеорология и гидрология, 1997. – №4. – С.84–95.

Полонский В.Ф., Горелиц О.В. Уровни воды в дельте Волги и влияние на них изменений уровня Каспийского моря // Метеорология и гидрология, 1997. – Вып. 5. – С. 90–102.

Устьевая область Волги: гидролого-морфологические процессы, режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря. Под ред. В.Ф. Полонского, В.Н. Михайлова, С.В. Кирьянова. – М.: ГЕОС, 1998. – 280 с.

Устья рек Каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления. – М.: ГЕОС, 2013. – 703 с.

Фащевский Б.В. Основы экологической гидрологии. – Минск: Эковест, 1996. – 240 с.

Хромов С.П. К вопросу о континентальности климата // Изв. ВГО, 1957. Т. 89. Вып. 3. – С. 221–225.

Шикломанов И.А. Антропогенные изменение водности рек. – Л.: Гидрометеоздат, 1979. – 302 с.

ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЧНОГО СТОКА ²

Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Георгиади А.Г., Долгов С.В., Зайцева И.С., Кашутина Е.А., Мельник К.С., Ясинский С.В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия*

Изучение пространственных и временных изменений речного стока под влиянием природных и антропогенных факторов – одна из основных задач гидрологии. Особую сложность представляет определение вклада тех или иных факторов в итоговое изменение стока ввиду их тесной взаимосвязи. В полной мере разделить вклад отдельных природных и антропогенных факторов в изменение речного стока практически невозможно. Можно говорить лишь об относительном участии

² Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 12-05-00838, 13-05-41437 и 14-05-00761

природных и антропогенных факторов в рассматриваемых изменениях, например, в отклонениях от неких средних значений, от «нормы». Если в пространственных изменениях стока среди природных факторов трудно выделить наиболее значимые, то во временных безусловное лидерство принадлежит климатическим, которые, безусловно, наиболее динамичны, и по существу определяют изменение водности рек. Прокомментируем это на примере Русской равнины на основе ранее выполненных расчетов [17].

По данным [5; 22] в пределах каждой природной зоны выполнено попарное сопоставление отдельных административных областей в составе бывшего СССР по величине среднего многолетнего годового стока – вначале близких по годовым осадкам, но существенно различающихся по годовой температуре воздуха, а затем – близких по годовой температуре воздуха, но существенно различающихся по годовым осадкам. Выбор в качестве операционных единиц административных областей обусловлен наличием по ним достаточно надежной гидрометеорологической информации, а периода исчисления нормы стока (конец XIX – 1960-ые годы) – установившимися относительно однородными условиями формирования стока, в частности, в отношении состояния биоты и воздействия антропогенных факторов.

В результате получены средние для каждой природной зоны Русской равнины градиенты изменения годовых значений стока на 1° изменения годовой температуры воздуха (при равенстве осадков) и 1 мм изменения годовых осадков (при равенстве температуры воздуха). Так, для лесной зоны первый из градиентов оказался равным -21 мм, а второй $+0,84$ мм. Для степной зоны соответственно $-8,8$ и $+0,41$ мм. Привязка этих градиентов к средним значениям годовых осадков для каждой природной зоны как показателя комплекса природно-климатических условий позволила построить графические зависимости, отражающие зональный характер их распределения по территории Русской равнины и позволяющие определить соответствующие градиенты на границах зон.

Разумеется, для целей прогноза подобные зависимости можно использовать при условии сохранения и впредь сложившейся внутригодовой структуры осадков и температуры воздуха, а также влияния неклиматических факторов, что сложно ожидать.

Дальнейшее развитие этот подход получил в работах [11; 18 и др.], в которых были учтены совместное изменение осадков и температуры воздуха, в т.ч. по сезонам, и их влияние на составляющие речного стока. Можно привести и множество других примеров на основании исследований различных авторов об очевидном влиянии климатических факторов на гидрологические процессы. В настоящее время эта тема стала особенно актуальной в связи с современными и ожидаемыми климатическими изменениями [1; 6; 7; 9; 12; 14; 23; 24; 26].

В тоже время следует иметь в виду, что климатические явления преломляются в гидрологические через почву, биоту и другие составляющие окружающей среды, которые играют отнюдь не пассивную роль и часто тоже весьма динамичны (например, биологическая продуктивность биоценозов в процессе их сукцессии). Влияние неклиматических природных факторов, в частности, проявляется в саморегулировании гидрологических систем, например, через перераспределение стока во времени в подземных структурах водосбора.

Изменения стока, обусловленные антропогенными факторами, в общем случае как бы накладываются на обусловленные природными факторами. Они чрезвычайно разнообразны по характеру воздействия на речной сток, но в целом могут быть разделены на две основные группы. В первую группу входят изменения, вызванные непосредственным воздействием на сток, а во вторую – косвенным воздействием через климат, почву, биоту и другие элементы окружающей среды. Среди факторов первой группы особенно значимы гидротехническое регулирование стока и водозабор на различные хозяйственные нужды, которые в основном приводят к уменьшению речного стока в месте воздействия и ниже по течению реки. Из факторов второй группы следует выделить целенаправленные или непред-

намеренные воздействия через атмосферу, сельскохозяйственное (без забора воды из источников) использование земель, лесное хозяйство, урбанизацию территории. Для большинства факторов второй группы характерно непреднамеренное воздействие на сток, причем результатом этого воздействия может быть неоднозначное изменение речного стока. Наиболее ярко это проявляется при сравнении таких видов хозяйственной деятельности, как агротехнические мероприятия (например, зяблевая пахота), направленных на задержание поверхностного стока на полях, и урбанизация территории, способствующая увеличению поверхностного стока.

При всем разнообразии проявлений различных антропогенных факторов для большинства из них довольно отчетливо выделяются две фазы изменения стока – сравнительно непродолжительная начальная и последствие. Первая характеризуется быстрым, взрывным изменением стока в ходе и сразу же после антропогенного воздействия, что отражается в хорошо выраженной нестационарности этого процесса. Второй фазе присуще сравнительно медленное, эволюционное изменение стока. Такое двухфазное изменение присуще факторам второй группы. Значения изменившегося стока могут вернуться в первоначальное состояние после окончания антропогенного воздействия.

Оценке влияния антропогенных факторов на речной сток стало уделяться повышенное внимание со второй половины XX столетия, когда оно стало особенно заметным [2; 6; 16; 20; 21; 25 и др.]. С течением времени появляются новые данные, требующие анализа и осмысления. С учетом этих данных, рассмотрим роль природных и антропогенных факторов в изменении стока на разных территориальных уровнях.

Бассейн р. Москвы. На основании данных о структуре ландшафтов и данных воднобалансовых станций, а также натурных наблюдений за стоком с урбанизированных площадей прослежена динамика речного стока и отдельных его составляющих за последние 150 лет. Наиболее существенно изменилась площадь урбанизированных территорий. Если в середине

XIX в. общая площадь урбанизированных территорий (города, сельские населенные пункты, дороги) занимала около 3 % всей площади водосбора р. Москва, то в начале XXI в. – почти 20 %, из которых треть приходится на долю г. Москва. С учетом последнего расширения Москвы доля урбанизированных площадей и самого города еще больше, но основную часть вновь присоединенной к Москве территории в полной мере пока нельзя считать урбанизированной. Площадь водонепроницаемых участков (крыши, дороги и др.) возросла за последние 150 лет с 0,3 до 6 %, т.е. в 20 раз.

Расчеты показывают, что слой общего годового поверхностного стока в бассейне р. Москва за рассматриваемый период и в результате ландшафтных трансформаций возрос в 1,4 раза (с 82 до 114 мм) в основном за счет летне-осеннего периода. Вместе с тем слой стока инфильтрационного происхождения (сток верховодки и их основных водоносных горизонтов) уменьшился с 87 до 82 мм или немногим более чем на 5 %. Таким образом, слой полного речного стока возрос со 169 до 196 мм или на 16 %. Гораздо более существенные гидрологические изменения произошли на территории г. Москва, где водонепроницаемые площади (2010 г.) составляли 50 %. За последние 150 лет годовой поверхностный сток возрос почти в 3,4 раза, сток инфильтрационного происхождения снизился более чем в 1,5 раза, а полный речной сток возрос в итоге в 1,8 раза.

Если отнести произошедшие ландшафтно-обусловленные изменения стока к влиянию в основном урбанизации, то получается, что увеличение урбанизированных площадей на 1 % приводит к увеличению годового речного стока в среднем на 1 %. В отношении водонепроницаемых площадей получается, что однопроцентное их увеличение способствует росту полного речного ориентировочно на 2–3 %.

Весьма вероятно, что влияние урбанизированных площадей на сток, особенно в пределах г. Москва, может быть еще больше, если учитывать, что над городами возрастает количество осадков. В работе [4] показано, что на территории крупных го-

родов в результате образования ядер конденсации, увеличения шероховатости земной поверхности годовое количество осадков возрастает на 5-8 %. Сопоставление величин годовых осадков за 1991–2010 гг. в г. Можайск (где влияние крупной агломерации практически не сказывается) и в г. Москва (ВДНХ), показывает, что они равны соответственно 658 и 713 мм, т.е. разница равна 55 мм или более 8 % по отношению к осадкам в районе г. Можайск. При общем коэффициенте годового стока с территории Москвы, равном 0,5 (2010 г.) до расширения городской территории, получаем, что среднегодовой сток возрос более чем на 20 мм. Оценка гидрологических последствий современного изменения климата для бассейна р. Москва и территории г. Москва требует дальнейшего уточнения. Отметим лишь, что годовой сток этой реки в районе Звенигорода (в условиях сравнительно небольшого антропогенного воздействия) в 1986–2005 гг. увеличился по сравнению со средними многолетними значениями в 1,4 раза. В последующие годы он был близок к норме.

Еще большие изменения стока р. Москва связаны с гидротехническими преобразованиями (создание водохранилищ и переброска воды по Вазузской системе и каналу им. Москвы), а также с водозабором на различные хозяйственные нужды. Создание водохранилищ мало повлияло на годовой сток, но кардинально изменило внутригодовое распределение стока. Так, доля половодья после создания Можайского водохранилища уменьшилась в 2 раза, а меженный сток соответственно возрос. Регулирование стока р. Москва сделало невозможными наводнения, аналогичные тому, что случилось в 1908 г., когда была затоплена значительная часть г. Москва.

Подача воды из р. Вазуза и Иваньковского водохранилища по каналу им. Москвы увеличили располагаемые ресурсы речного стока р. Москва в 2 раза. Интересно, что уменьшение стока этой реки в результате безвозвратного изъятия воды на различные хозяйственные нужды в значительной мере компенсируется объемом сточных вод, образующихся в результате забора и использования воды из глубоких водоносных гори-

зонтов, слабо связанных с рекой, а также стоком с урбанизированных площадей.

Реки Волга и Дон. Эти реки несоизмеримо больше р. Москва и существенно отличаются от нее по характеру влияния природно-климатических и антропогенных факторов на сток. При этом важно учитывать, что основная зона формирования стока Волги расположена в лесной зоне, а Дона – в лесостепи и степи. Большая часть водосбора Волги сравнительно мало изменена хозяйственной деятельностью в отличие от бассейна Дона. Сток обеих рек, особенно Волги, в значительной мере преобразован гидротехническими сооружениями. Изменения стока этих рек оценивались на основе двух подходов. Первый заключался в анализе гидрометеорологических рядов, в т. ч. фактического стока и восстановленного по связям со стоком рек в их бассейне (индикаторами климатических изменений), сравнительно мало затронутыми хозяйственной деятельностью. Второй подход исходил из анализа результатов балансовых расчетов и данных воднобалансовых станций и водохозяйственной статистики [8].

Анализ кривых нарастающих сумм отклонений фактического (наблюденного) годового и сезонного стока от восстановленного (условно-естественного) стока показывает динамику изменения интегрального эффекта антропогенного воздействия (рис. 1). На Волге влияние антропогенных факторов в наибольшей степени сказывается на стоке половодья (объем суммарного снижения стока за весь рассматриваемый период, начиная с 1930 г., составил 2620 км^3) и годовом стоке (суммарное уменьшение – 1044 км^3). Зимний сток в общей сложности увеличился на 1487 км^3 , а интегральный эффект антропогенного воздействия на сток за летне-осенний период (приведший к его возрастанию) оказался относительно невелик (около 196 км^3).

Наибольшее интегральное снижение стока на Дону (рис. 1б) также характерно для годового (196 км^3) стока и стока за период половодья (340 км^3). В отличие от Волги на Дону наибольшим суммарным увеличением стока характеризуется

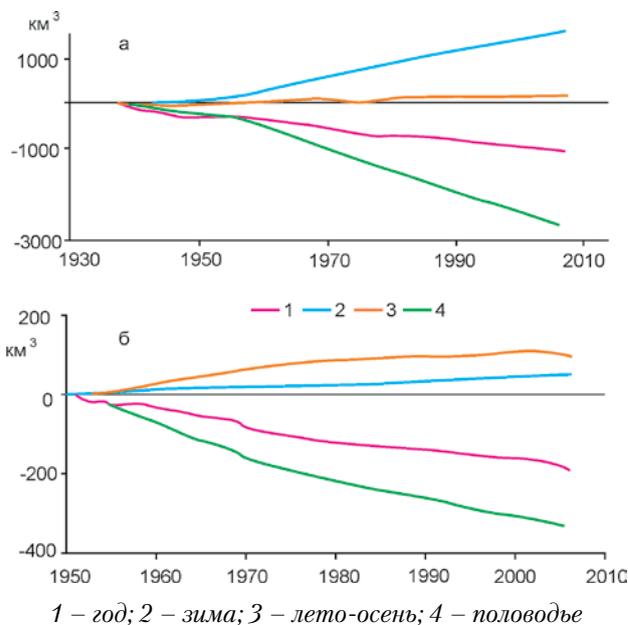


Рисунок 1 – Нарастающая сумма отклонений фактического годового и сезонного стока Волги, км³ у Волгограда (а) и Дона у Раздорской (б) от восстановленного (условно-естественного стока)

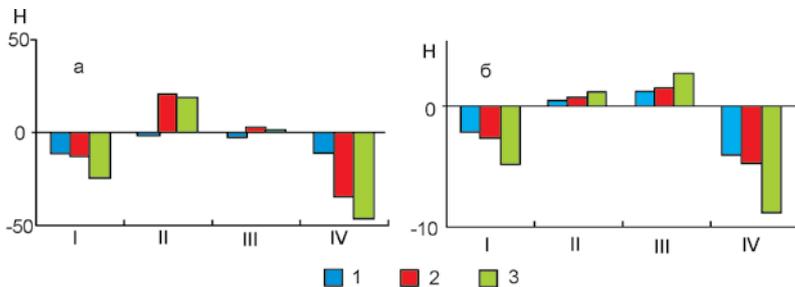
сток за летне-осенний период (144 км³). Он возрос в два раза больше по сравнению с зимним стоком. Для Волги же характерно прямо противоположное соотношение, что связано, прежде всего, с региональными особенностями регулирования стока водохранилищами.

Полученные данные об условно-естественном годовом и сезонном стоке позволяют выявить соотношение вклада антропогенных и природно-климатических факторов в его общие изменения.

Сравнение фактического среднего многолетнего годового и сезонного стока за 1882–1929 гг. (принят в качестве условно-естественного периода с относительно небольшим антропогенным влиянием) и восстановленного по уравнениям регрессии за 1930–2006 гг. позволяет оценить вклад изменений климата

и антропогенных факторов в изменения стока. Оказалось, что на Волге и на Дону природно-климатические и антропогенные факторы, действуя в одинаковом направлении, снижали сток половодья, а, следовательно, и годовой сток (рис. 2). При этом вклад в изменения стока каждого из факторов был примерно одинаков для годового стока, а в снижении стока половодья существенно более заметную роль сыграли антропогенные факторы. В то же время соотношение вклада этих факторов в изменения меженного (зимнего и летне-осеннего) стока на Волге и на Дону характеризуются значительными различиями, но в целом они компенсировали снижение стока половодья. На Дону они вносят одинаковый вклад в повышение стока каждого из меженных сезонов (более значительного в летне-осенний период). На Волге увеличение стока зимней межени целиком обусловлено антропогенным влиянием, а суммарное мало заметное повышение стока летне-осенней межени было обусловлено антропогенными факторами.

Изменения стока в период 1930–1980 гг. происходили на фоне снижения среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы атмосферных осадков, а в 1981–2006 гг. на фоне их повышения. Для Дона оба рассматриваемых периода характери-



1- климатические изменения; 2 – антропогенные изменения; 3 – суммарные изменения. I – год; II – зима; III – лето-осень; IV – половодье

Рисунок 2 – Климатические и антропогенные изменения стока (W , км³/год) Волги у Волгограда (а) и Дона у Раздорской (б) за период 1930–2006 гг. по сравнению с 1891–1929 гг.

зуются однонаправленными воздействиями климатических и антропогенных факторов. Они обусловили увеличение летне-осеннего и зимнего стока (климатические условия во второй период привели к его едва заметному снижению), уменьшение стока половодья и суммарного годового стока. В первом периоде более значительным оказался вклад антропогенных факторов, которые обусловил снижение стока половодья и компенсирующее повышение стока летне-осенней и зимней межени.

С 1981 г. относительно большее значение в изменениях стока приобретают климатические факторы. При этом суммарные изменения стока Дона после 1980 г. для всех сезонов оказались больше по сравнению с предшествующим периодом. Масштаб изменения стока половодья до и после 1980 г. был больше по сравнению с изменениями стока межени.

На Волге в оба рассматриваемых периода антропогенные воздействия увеличивают зимний и летне-осенний сток и сокращают сток половодья и годовой сток, во втором периоде интенсивнее, чем в первом. Направление климатических воздействий – различно. До 1980 г. происходило климатически обусловленное сокращение стока во все сезоны, а с 1981 г. климатические изменения привели к увеличению стока всех сезонов, кроме половодья. Однако вклад климатических изменений в суммарное изменение стока для всех сезонов в целом меньше по сравнению с вкладом антропогенных факторов.

Проанализируем теперь, что дают непосредственные оценки антропогенного воздействия на сток Волги у Волгограда и Дона у Раздорской на основе использования воднобалансовых методов и анализа водохозяйственной статистики.

Анализ водохозяйственной статистики, а также ориентировочных оценок за те годы, когда эта статистика отсутствовала, свидетельствует, что безвозвратное водопотребление в водохозяйственном комплексе (разность между водозабором и объемом сточных вод) возросло с 0,2–0,3 % от среднего годового стока Волги (в период условно естественного стока) до 5–6 % в период наибольшего антропогенного воздействия в середине 1980-х годов. В 1990–2005 гг. это воздействие уменьшилось в

среднем в 1,3 раза, а в самые последние годы почти в 2 раза. Потери водных ресурсов за счет дополнительного испарения с акватории водохранилищ и подтопленных ими земель, а также заполнения их мертвого объема возросли практически с нуля в период условно-естественного стока до 8-9 % от годового стока во время самого активного гидротехнического строительства в бассейне Волги в 1956–1960 гг., а сейчас составляют в среднем 2–3 % стока Волги. Совместное воздействие традиционного водного хозяйства и водохранилищ привело к уменьшению стока Волги к 2005 г. по сравнению с условно-естественным периодом (до 1930-х годов) почти на 480 км³.

Расчет изменения стока мероприятиями агротехники показал, что нарастание влияния этого фактора шло от практически нулевого в условно-естественный период до 2–3 % от стока Волги в 1980-е годы, а затем снизилось до 1–1,5 % после 1990-х годов.

Осушение земель также имело незначительное влияние на сток в условно естественный период, но в дальнейшем (на уровне 1980-х годов) привело к увеличению речного стока до 0,5–1 % в 1980-е годы. В настоящее время масштаб проведения осушительных мелиораций резко уменьшился; многие ранее осушенные земли пришли в запустение.

Оценка влияния рубок леса и его восстановления на речной сток показала, что в условно-естественный период сток был повышен из-за наличия в бассейне реки больших массивов перестойных лесов, испарение с которых было относительно небольшим. Последовавшие затем рубки леса и замена перестойных лесов более молодыми и продуктивными привели в целом к увеличению испарения и снижению стока. Этот процесс продолжается и сейчас, приводя к уменьшению стока Волги в среднем на 2 %.

Урбанизация земель, напротив, способствует увеличению стока по сравнению с условно-естественным периодом на 1,5–2 %. Современная площадь урбанизированных территорий в бассейне Волги реально превысила 2 %, из которых 0,5–0,7 % занимают водонепроницаемые участки.

В бассейне Дона антропогенное воздействие существовало постоянно. Это относится и к хозяйственной деятельности на водосборах. Наименьшим оно было в 1881–1930 гг. – в период, принятый за естественно-условный, причем влияние агротехники, в первую очередь зяблевой пахоты, которая занимала менее 10 % общей площади и приводила к уменьшению стока, уравновешивалось воздействием на сток (в сторону его увеличения) быстро растущей площадью уплотненных поверхностей под населенными пунктами и дорогами. В дальнейшем и вплоть до начала 1990-х годов влияние агротехнических мероприятий на водосборах на сток превышало влияние урбанизированных площадей, поскольку только площадь зяблевой пахоты достигла в бассейне Дона 40-50 % общей площади водосбора. Сток же с нее в лесостепных районах в 1,5–2, а в степных в 2–4 раза меньше, чем с полей с почвой, уплотненной к началу весеннего половодья. Под влиянием агротехнических мероприятий сток Дона снизился к середине 1980-х годов более чем на 10 % (в среднем на 3,3 км³). После 1990 г. (в связи с кризисными явлениями в сельском хозяйстве) влияние этого фактора на сток уменьшилось. Общее снижение стока Дона под влиянием агротехнических мероприятий с 1881 по 2005 гг. оценивается в 185 км³, в т.ч. по сравнению с периодом условно-естественного стока в 170 км³.

Воздействие на сток Дона урбанизированных площадей вначале отставало от темпов воздействия на сток агротехнических факторов, но в самые последние годы, когда их площадь превысила 3 % (а по некоторым данным 4 %), это воздействие стало преобладающим. Оно достигло максимума в самые последние годы. Общее влияние увеличения урбанизированных площадей за 1881–2005 гг. выразилось в возрастании стока Дона более чем на 120 км³, из которых около 110 км³ приходится на период после 1930 г.

Крупным антропогенным фактором с начала 1950-х годов стало создание Цимлянского водохранилища с заполнением его «мертвого» объема, с дополнительными потерями воды на испарение с его акватории, с забором, правда небольшого объ-

ема воды, в Волгодонской канал. В дальнейшем было создано Воронежское водохранилище и ряд других водоемов, мало повлиявших на общую картину гидротехнического воздействия на годовую сток. Более того, с конца 1980-х годов имеет место некоторое снижение потерь воды с акватории вследствие уменьшения дефицита влажности воздуха. Суммарно за 1881–2005 гг. воздействие водохранилищ на уменьшение стока Дона составляет около 90 км³/год, из которых большая часть приходится на период после 1930-х годов.

На основные виды водопотребления безвозвратно затрачено за 1881–2005 гг. примерно 220 км³, в т.ч. после 1930 г. – 205 км³. Из них около 65 % приходится на орошение, около 25 % на промышленное водопотребление и около 10 % на хозяйственно-бытовое водоснабжение. Все эти виды антропогенного воздействия имели тенденцию нарастания до начала 1990-х годов (медленнее в хозяйственно-бытовом секторе и гораздо быстрее в орошении и промышленном секторе). В последние годы произошла стабилизация водопотребления в хозяйственно-бытовом секторе и резкий его спад в промышленности и орошаемом земледелии.

Таким образом, в бассейне Волги хозяйственная деятельность на водосборах разнонаправлено воздействует на годовую сток; в значительной мере разные виды этой деятельности взаимно компенсируют влияние на сток. В целом можно говорить о преобладании снижения стока (на 1,5–2 %) за период 1931–2005 гг. по сравнению с 1880–1930 гг. Наибольший вклад в это снижение вносят неорошаемое земледелие (мероприятия по задержанию стока на сельскохозяйственных полях) и лесное хозяйство (в результате омоложения лесов и роста их биологической продуктивности). Основное влияние на сток Волги оказывали традиционное водное хозяйство и водохранилища. Что касается сезонных воздействий, то вопрос влияния хозяйственной деятельности на водосборах на сток нуждается в дальнейшем исследовании.

Наибольшее общее антропогенное воздействие на сток Волги пришлось на период 1981–1990 гг., когда оно выразилось

в среднем в уменьшении годового стока на 10 % и больше. До этого, начиная с 1930-х годов, был период нарастания изъятий стока, сменившийся с 1990-х годов уменьшением объема этого изъятия. В период с 1930 по 2005 гг. комплекс антропогенных воздействий на сток Волги был уменьшен (по сравнению с периодом до 1930 г.) примерно на 1090 км^3 . Основной вклад в это снижение стока внесли безвозвратное изъятие вод на различные нужды, главным образом орошаемого земледелия, и влияние водохранилищ (потери на заполнение мертвого объема, дополнительное испарение с акватории).

В бассейне Дона антропогенное воздействие на сток в бассейне Дона постоянно существовало в XIX–XXI вв. Наименьшим оно было в период 1881–1930 гг., составляя в совокупности примерно 1 % годового стока реки; максимальным – в период 1981–1990 гг., когда привело к уменьшению стока на 15–33 %. Общее уменьшение стока с 1881 по 2005 гг. составило 372 км^3 , в т.ч. по сравнению с периодом условно-естественного стока – 352 км^3 . Наибольший вклад в это уменьшение вносят орошаемое земледелие (около 38 %) и водохранилища (24 %). Хозяйственная деятельность на водосборах в совокупности дает около 18 %, промышленное водопотребление – около 15 %, хозяйственно-бытовой сектор – несколько более 5 % этого уменьшения.

Россия и мир. Можно полагать, что современный речной сток постепенно увеличивается. Косвенным подтверждением этому предположению является факт повышения уровня Мирового океана на 2,5 мм/год (в 1980–2000 гг.) [15]. Более определенно можно говорить о современном увеличении стока с территории России. Согласно данным [10], средний многолетний речной сток с территории России в 1930–1980 гг. составлял $4262 \text{ км}^3/\text{год}$, в 1991–2010 гг. – $4430 \text{ км}^3/\text{год}$, т.е. на 4 % больше. Причем особенно многоводной ($4509 \text{ км}^3/\text{год}$) была первая половина последних 20 лет (рис. 3).

Увеличению стока способствовало и уменьшение безвозвратного изъятия стока (по меньшей мере на $10\text{--}15 \text{ км}^3/\text{год}$ за последние 20 лет). Эта величина, кажущаяся незначительной в

масштабе всей страны, формируется в наиболее обжитых районах России, где она весьма оцутима.

Что касается мирового водопотребления, то оно в целом увеличивается: в 1990 – 2010 гг. с 3466 до 3860 км³. Учет дополнительных потерь воды на испарение увеличивает мировое водопотребление до 4000 км³/год и больше (50 % из них- безвозвратные потери воды [19]). Водозабор и безвозвратные потери воды в России составляют менее 2 % соответствующих мировых показателей, как и объем сточных вод – важный показатель качественного состояния водных ресурсов. Если сравнивать крупные страны мира, то по кратности разбавления сточных вод полным речным стоком (70 раз) Россия уступает лишь Бразилии (более 200 раз), но в 10 раз превосходит США и в 3 раза - планетарные показатели.

Выше рассматривалось влияние на водные ресурсы России и мира лишь водного хозяйства и гидротехнических сооружений. Существенное значение может иметь и влияние, оказываемое такими видами хозяйственной деятельности, как неорошаемое земледелие, лесное хозяйство, урбанизация территории и др. Приведем некоторые предварительные расчеты гидрологической роли неорошаемого земледелия и урбанизации в мире. Для расчета водопотребления неорошаемым зем-

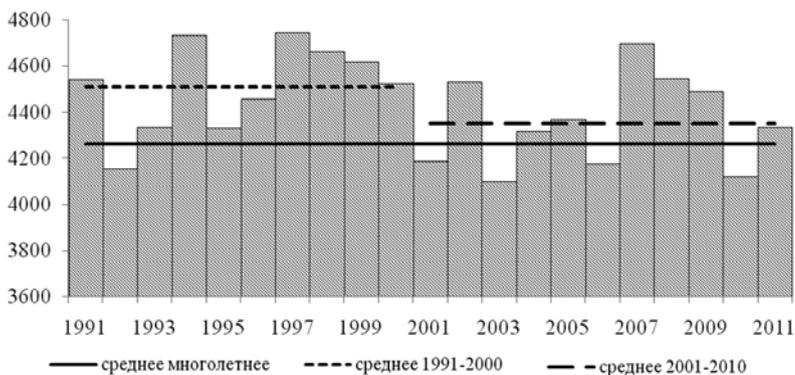


Рисунок 3 – Изменение годового стока рек Российской Федерации, км³

леделием использованы выявленные связи удельного водопотребления (мм/ц) с общей биологической продуктивностью земель и урожаем зерна (рис. 4). Чем больше биологическая продуктивность и урожай зерна, тем более экономно используются ресурсы почвенной влаги. При этом общий расход воды (суммарное испарение) возрастает вплоть до достижения значений испаряемости. По [13], при урожайности зерновых 10 ц/га достигается испарение, равное 44 % испаряемости, при 30 ц/га – 72 %, при 50 ц/га – 96 %. Рост урожайности практически всех возделываемых культур во всем мире – очевидный факт. Если в 1700 г. урожайность зерновых на неорошаемых землях составляла в мире немногим более 5 ц/га, то к 1950 г. она приблизилась к 13 ц/га. К настоящему времени она практически удвоилась, а в таких странах, как Великобритания, Франция, Германия превысила 70 ц/га. Если предположить, что вся площадь неорошаемой пашни и посевов в 1950–1960 гг. занята зерновыми (пшеницей), то в результате роста урожайности к настоящему времени расход воды за вегетационный

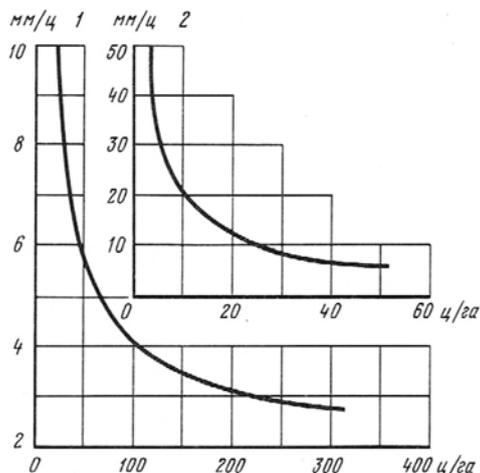


Рисунок 4 – Удельное водопотребление (мм/ц) в связи с общей биологической продуктивностью естественной растительности (1) и урожаем зерна (2) (по [3, 13])

период возрос на 400 км^3 – до 2600 км^3 . Фактически же этот расход воды еще больше, учитывая увеличение площади неорошаемой пашни. Уже в 1985 г. она была равна 1256 млн. га, из которых на Европу приходилось 174 млн. га, Азию – 382, Африку – 174, Северную Америку – 131, Австралию – 48 млн га. Соответствующий расход ресурсов почвенной влаги во всем мире составил 2980 км^3 , а по отдельным континентам - 705, 885, 320, 650,310 и $110 \text{ км}^3/\text{год}$ соответственно.

Рост пашни происходит за счет лесных площадей, лугов, других видов сельскохозяйственных земель, продуктивность которых нередко больше по сравнению с урожайностью культурных растений (с учетом их общей биомассы, включая корневую систему). В результате на площади, занимаемой пашней и посевами в мире, в 1985 г. увеличение потерь воды по сравнению с 1950 г. составило 235 км^3 , в Европе – 130, в Азии – 50, в Северной Америке, Австралии – 15 км^3 , а в Африке и Южной Америке, где происходил наибольший прирост площади пашни за счет лесных и других угодий, потери почвенной воды даже уменьшились на 25 и $15 \text{ км}^3/\text{год}$. Изменение расхода воды по континентам на уровне 2010 г. еще предстоит рассчитать, но, если допустить, что биологическая продуктивность естественных угодий существенно не изменилась, то в Европе, Азии, Северной Америке и Австралии можно ожидать дальнейшего роста испарения и уменьшения стока вследствие опережающего роста урожайности по сравнению с выявившейся тенденцией снижения площади неорошаемых пашни и посевов. Менее очевидна ситуация в Африке и Южной Америке, где происходит нарастание площади пашни за счет естественных угодий, а темпы роста урожайности относительно невелики.

Если же сравнивать изменения расхода воды на площади, занятой современной пашней, с тем, который был на этой площади в естественных условиях, то он существенно уменьшился к 1985 г. В результате поверхностный сток с суши должен был возрасти на $3500 \text{ км}^3/\text{год}$ и больше. Вместе с тем пока еще не ясно, как на эти оценки, а, следовательно, и на величину стока оказывает изменение испарения во вневегетационный период.

Допущение о неизменности состояния естественной растительности, конечно, достаточно условно, поскольку оно может существенно меняться под влиянием природных и антропогенных факторов. Причем, имеют место диаметрально противоположные тенденции. Одна способствует снижению биологической продуктивности и уменьшению испарения, увеличению стока в результате растущего антропогенного пресса, другая – росту биологической продуктивности под влиянием мелиоративных мероприятий и омоложения лесов в результате их эксплуатации. Выше приведены результаты расчета для бассейна Волги, согласно которым современное омоложение лесов приводит на современном этапе к ежегодному увеличению ее стока на 2 %. Очевидно, что в различных регионах мира действуют обе эти тенденции, но какая из них преобладает, оценить пока весьма проблематично.

Гораздо более очевидно увеличение стока в результате роста урбанизированных территорий. Детальный расчет, выполненный для бассейна р. Москва показал, что 1 % увеличение урбанизированных площадей приводит к аналогичному увеличению речного стока, а возрастание площади водонепроницаемых участков на 1 % сопровождается 3-4 % увеличением стока. Если исходить из этих величин и допустить, что площадь урбанизированных территорий в последние десятилетия возросла на 1 %, то речной сток в мире возрос приблизительно на 400 км³, т.е. на величину, соизмеримую с приведенной выше величиной изменения стока под влиянием неорошаемого земледелия, но противоположной по знаку. Очевидно, что оценка влияния на сток ландшафтных изменений требует для большинства районов мира дополнительных и весьма тщательных исследований.

В заключение отметим, что проблема выявления гидрологической роли природных и антропогенных факторов в изменениях речного стока и особенно их соотношения в этих изменениях – одна их ключевых во взаимоотношениях человека и природы. Пока она далека от сколько-нибудь исчерпывающего решения. Полученные оценки, в т.ч. представленные в данной статье, требуют дальнейшего уточнения, тем более, что время

вносит в них свои коррективы. Тем не менее, ее содержание характеризует специфику и масштабы воздействия на речной сток рассматриваемых факторов. Конечно, необходимо совершенствовать методы исследования, в т.ч. проведения натуральных экспериментов, максимально приближенных к реальным условиям. Особенно актуальна в этой связи «реанимация» сети воднобалансовых станций, позволяющих проследить процесс формирования стока в различных ландшафтах, начиная с элементарных водосборов и до замыкающих створов рек. Необходимо, наконец, решить вопрос о доступности исходной гидрометеорологической и водохозяйственной информации, без которой сложно ожидать прогресса в рассматриваемой тематике.

Литература

1. Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М., Игоница М.И. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // Вода: химия и экология, 2013. – № 4. – С. 3–12.
2. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия. – М.: Наука, 2003. – 367 с.
3. Булавко А.Г., Логинова Н.И. Основы комплексной оценки динамики испарения сельскохозяйственных культур и интенсификации земледелия // Труды IV Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1976. – С. 337–344.
4. Влияние урбанизации на гидрологический режим и качество воды. Методическое пособие. – СПб: Гидрометеиздат, 1991. – 64 с.
5. Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза. – Л.: 1967. – 200 с.
6. Водные ресурсы России и их использование. – СПб: Гос. Гидрол. Ин-т, 2008. – 599 с.
7. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А., Зайцева И.А., Долгов С.В. О соотношении природно-климатических и антропогенных факторов в многолетних изменениях речного стока // Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2012. – С. 41–47.

8. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милокова И.П., Кашупина Е.А., Барабанова Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Часть 2. Бассейны рек Волги и Дона: – М.: МАКС Пресс, 2014. – 214 с.

9. Глобальные изменения климата и их последствия для России. – М., 2002. – 467 с.

10. Государственный водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. – СПб: Гидрометеиздат.

11. Долгов С.В. Климатические изменения годового речного стока и его составляющих в Европейской части России // Изв. РАН. Сер. геогр., 2011. – № 6. – С. 66–74.

12. Евстигнеев В.М., Акименко Т.А. Возможные изменения стока рек северного склона Восточно-Европейской равнины к середине XXI века // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2005. – №5. – С. 34–39.

13. Зубенок Л.И. Испарение на континентах. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 264 с.

14. Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М. и др. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-европейской равнины в условиях потепления XXI века. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 292 с.

15. Клите Р.К. Глобальные изменения природных условий и воздействие на них гелиокосмических факторов // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 5. Человек и три окружающие его среды. – М.: «Янус-К», 2013. – С. 19–51.

16. Коронкевич Н. И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. – М.: Наука, 1990. – 205 с.

17. Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С. О влиянии изменений годовых значений температуры воздуха и осадков на сток рек Русской равнины// Изв. РАН, сер. геогр., 2007. – № 5. –С. 64–70.

18. Коронкевич Н.И., Долгов С.В., Барабанова Е.А., Зайцева И.С. Гидрологические и гидроэкологические последствия изменения температуры воздуха на территории России // Труды III Всероссийской конференции «Ледовые и термические процессы

на водных объектах России», г. Онега Архангельской обл., Россия 6–11 июня 2011 г. – М.: Институт водных проблем РАН, 2011. – С. 305–311.

19. Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Бибикова Т.С., Зайцева И.С. Россия на водохозяйственной карте мира // Изв. РАН, сер. Географ., 2014. – № 1. – С. 7–18.

20. Львович М.И. Человек и воды. – М.: Географгиз, 1963. – 568 с.

21. Львович М. И. Мировые водные ресурсы и их будущее. – М.: Мысль, 1974. – 448 с.

22. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер 3. Многолетние данные.

23. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том. II. Последствия изменения климата. – М.: Росгидромет, 2008. – 289 с.

24. Региональные эффекты глобальных изменений климата (причины, последствия, прогнозы). – Воронеж: Научная книга, 2012. – 577 с.

25. Шикломанов И.А. Антропогенные изменения водности рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 303 с.

26. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Современные и перспективные изменения стока рек России под влиянием климатических факторов // Водные ресурсы суши в условиях изменяющегося климата. – СПб: Наука, 2007. – С. 20–32.

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ПАВОДКИ И НАВОДНЕНИЯ НА ЮГЕ РОССИИ: ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ

Базелюк А.А., Лурье П.М.

ФГБУ «Северо-Кавказское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» Росгидромета, Ростов-на-Дону, Россия

Одним из негативных последствий изменения климата является увеличение повторяемости опасных гидрометеорологических явлений. Опасными считаются такие гидрометеорологических явления, воздействие которых может привести к

гибели людей, нанести значительный ущерб отраслям экономики. К числу таких явлений относятся паводки. На юге России эти явления характерны для всех рек, но наиболее типичны для рек в бассейнах Кубани, Терека, Кумы и Черноморского побережья Кавказа. Паводки на указанных реках наблюдаются ежегодно и неоднократно. Характеристики паводков весьма значительно изменяются год от года, одновременно возрастает частота наводнений.

По размеру ущерба от наводнений юг России занимает первое место в Российской Федерации [2, 9, 10, 12]. На юге России опасность наводнений существует для подавляющего большинства субъектов Федерации. Воздействию паводков подвержено более 190 муниципальных образований, около 50 городов, более 900 населённых пунктов, 160 000 домов, в которых проживает более 630 тыс. человек, около 1500 тыс. га сельскохозяйственных земель [1].

На реках юга России максимальные в году расходы воды формируются в основном в период половодья и дождевых паводков. В последние годы на реках Черноморского побережья Краснодарского края и в бассейне Кубани максимальные расходы воды в период паводков существенно возросли (по сравнению со средними многолетними условиями) [3]. Значительный ущерб ежегодно наносится дождевыми паводками, формирующимися в горных районах Северного Кавказа и Черноморского побережья. Причинами наводнений являются ливни, ливневые дожди, реже обложные дожди, интенсивное снеготаяние, заторы и зажоры на реках, нагонные явления в устьях рек и побережий морей, прорывы плотин, запруд и завалов. Прогнозировать возникновение стоковых наводнений исключительно сложно вследствие малой длины и больших уклонов водотоков, локальности выпадения осадков большой интенсивности [2].

Ливни отличает большая интенсивность выпадения осадков, малая продолжительность и небольшая площадь распространения. Дождевые паводки обычно охватывают малые бассейны с площадью 100–200 км², реже до 1000 км². Реже

сильные дожди продолжаются от нескольких часов до нескольких суток, охватывают обширные пространства площадью от десятков до сотен тысяч квадратных километров. При наложении волн дождевых паводков и половодья нередко возникают наводнения. Дожди обложного характера отличаются большой продолжительностью (3–5 суток) и относительно слабой интенсивностью. Они выпадают на значительной территории, что создает предпосылки для формирования паводков и возникновения наводнений в долинах средних и больших рек.

К катастрофическим относятся наводнения, в результате которых из хозяйственного использования исключаются пойменные угодья, наносится значительный ущерб населенным пунктам, элементам инфраструктуры, включая шоссейные и железные дороги, линии электропередач, газопроводы и др. Эти наводнения характерны для значительной части речного бассейна и даже бассейнов нескольких рек. Их периодичность – один раз в 100–200 лет. Рассмотрим генезис некоторых (наиболее выдающихся) наводнений последних десятилетий в бассейнах рр. Кубань, Терек, Кума, а также в долинах рек Черноморского побережья Краснодарского края.

Зимнее наводнение в низовьях р. Кубань в январе 2002 г.

Оно было вызвано двумя метеорологическими факторами, которые начали проявляться уже в начале декабря 2001 г. К ним относятся морозы, чередовавшиеся с оттепелями, и значительные осадки, связанные с южными средиземноморскими циклонами. Наиболее низкие температуры воздуха установились в первой декаде декабря, что привело к ледоходу с образованием ледовых заторов у ст-цы Варениковская и в районе Зайцева Колена (19 декабря) и у х. Ханьков (24 декабря). Эти первые заторы разрушились сами или были взорваны. В связи с интенсивными осадками и таянием снега после 21 декабря начался повышенный сброс воды из Краснодарского и Варнавинского водохранилищ. Он превышал 1000 м³/с, что привело к подъёму уровней воды в реке и дельтовых водотоках. Резкое понижение температуры воздуха привело к формированию полей льда и шуги, заполнивших русло в

пределах междамбового пространства. На устьевых барах рукавов Кубань и Протока началось торошение морского льда, выносимого северо-западным ветром из Таганрогского залива. Валы торосов достигали 5 м над уровнем воды и 1–2 м ниже свободной поверхности, т.е. практически до дна. Поступающие по реке лёд, снежура и шуга скапливались у этой плотины, смерзались с морским льдом, что препятствовало выходу речных вод в Азовское море [6].

На фоне больших сбросов воды из Краснодарского водохранилища (700–750 м³/с) и понижения температуры воздуха до –20 °С к 9 января произошёл резкий подъём уровня воды в рукавах дельты: Кубань, Протока, Казачий Ерик. Максимальные уровни были отмечены 10 января. Понижение уровня воды после 10 января стало следствием выхода воды на пойму, отгороженную от русла прирусловыми валами, а не прорыва ледяного затора. Вода переливалась через валы, насыпи дорог, поступала в прораны, образовавшиеся в ограждающих валах.

Поскольку в устье рукавов сохранялся ледовый затор, уровень воды после кратковременного понижения вновь стал повышаться, и началась вторая фаза наводнения в зоне, прилегающей к Петрушиному рукаву. Максимум уровней воды наблюдался в г. Темрюк 18 января и в с. Слобода – 26 января. После разрушения заторов, уровень воды устойчиво понижался и к 20–31 января 2002 г. достиг сезонного минимума [6, 8].

В результате январского наводнения 2002 г. были затоплены: часть г. Темрюк, посёлки, хутора, земельные угодья, прилегающие к р. Кубань и рук. Протока в Анапском, Темрюкском, Крымском, Славянском и Калининском районах. В начале наводнения в Темрюкском районе была осуществлена эвакуация населения. Из зоны затопления было эвакуировано 3283 человека. В зоне наводнения оказались 984 дома (полностью разрушено 325) и 19 тыс. га сельхозугодий. Пострадало 3283 человека. С 15 января население постепенно возвращалось к местам проживания. Материальный ущерб составил 1,7 млрд рублей [8].

Для предотвращения наводнения и уменьшения его негативных последствий осуществлялись работы по разрушению заторов. Заторы пробивались судами и подрывами взрывчатки. Взрывные работы производились в районах Чайкинского и Среднего гирл. На Голинском гирле производились бомбометание с вертолетов и минометный обстрел. Для ускорения таяния льда в приустьевой части Голинского гирла, рукавах Казачий Ерик и Протока с 15 января 2002 г. на его поверхность наносилась смесь из угольной пыли, сажи, шлака и соли. За несколько дней в местах ее нанесения пятисантиметровый слой льда стал рыхлым и пористым. К 17 января маломерные суда свободно кололи ослабленный ледяной покров.

Наводнения 1969, 2001 и 2002 годов показали, что дельта р. Кубани хорошо защищена от дождевых и хуже от заторных и нагонных наводнений. Поэтому основное внимание при разработке схем защиты дельты от наводнений должно быть уделено предотвращению заторных наводнений и уменьшению ущерба от нагонных [6, 8]. Зажорные наводнения случаются реже, поскольку повышение уровней воды при формировании зажоров составляет 20-40 см и очень редко 60–130 см. Возникающие при этом затопления освоенной местности захватывают незначительные участки речных долин. Они обычно непродолжительны (не больше 1–2 дней). Мощные зажоры на Кубани формировались в 1950, 1956 и 1963 гг.

Катастрофическое наводнение на юге России (20 июня –29 июля 2002 г.) произошло одновременно в бассейнах рр. Кубань, Терек и Кума (рис. 1). Негативные последствия наводнения проявились на территории девяти субъектов Российской Федерации.

Причиной наводнения стали сильные (и очень сильные) дожди, начавшиеся 18 июня и охватившие большую часть предгорной и частично горной территории Северного Кавказа. В результате в бассейнах больших рек и их притоков сформировались мощные дождевые паводки. Суммарное количество осадков, выпавших за период с 18 по 21 июня, в

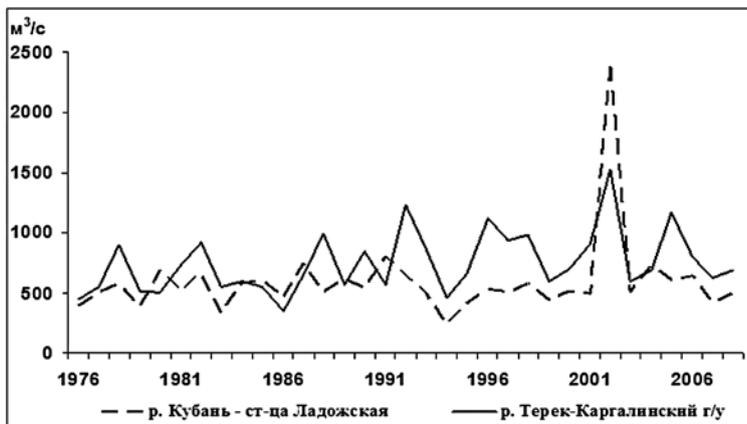


Рисунок 1 - Максимальные расходы воды за 1976–2008 гг.

большинстве районов составило 40–90 мм; в Ингушетии – до 116 мм; в предгорных районах Адыгеи, на западе и юго-западе Ставропольского края и в Карачаево-Черкесии – до 80–150 мм. По отношению к месячной норме это составило: по юго-западу Ставропольского края – до 189 %; Карачаево-Черкесии – 113–148 %. Дождевые паводки на реках в бассейне Кубани, Терека и Кумы совпали с прохождением волны половодья горноледниковых рек. К утру 21 июня опасные отметки были превышены на р. Кубань (выше г. Невинномыск), притоках Белая, Лаба и Уруп. Это привело к быстрому увеличению притока воды в Краснодарское водохранилище (с 798 (19 июня) до 1280 (21 июня) и 2480 м³/с (28 июня)). Максимальные уровни на реках в бассейне Кубани наблюдались 20 июня у с. Коста Хетагурова, 21 июня – у х. Дегтяревский и г. Невинномыск, 22 июня – у г. Армавир, 27 июня у ст-цы Ладожская. Уровни воды на 112–410 см превысили исторические максимумы за последние 70–80 лет наблюдений (табл. 1).

Наибольшему затоплению подверглись г. Невинномыск, ст-ца Барсуковская, с. Успенское, окраины г. Армавир и г. Новокубанск. Глубина затопления достигала 300–400 см в г. Невинномыск и ст-це Барсуковская, что было связано в основном

Таблица 1 – Максимальные уровни воды на реках в бассейнах Кубани, Кумы и Терека

Река-пункт	Максимальный уровень за период наблюдений		Максимальный уровень на 20–27.06.2002, см
	см	дата	
Кубань – Коста Хетагурова	610	25.VI.61	940
Кубань – х. Дегтяревский	690	25. VI.61	941
Кубань – г. Невинномысск	775	29. VI.91	1144
Кубань – г. Армавир	568	25. VII.80	620
Кубань – ст-ца Ладожская	737	4. VII.91	861
Уруп – ст-ца Удобная	512	18. VIII.78	780
Лаба – х. Догужиев	538	22. VIII.44	621
Белая – п. Грозный	590	26. X.97	635
Кума – ст-ца Александрийская	875	1. VI.84	1025
Кума – с. Новозаведенное	524	1. VI.84	534
Подкумок – г. Кисловодск	258	6. VII.92	349
Терек – ст-ца Котляревская	366	30. V.84	410
Терек – г. Моздок	436	14. VII.58	520
Малка – ст. Прохладная	300	7. VIII.67	480
Баксан – с. Заюково	271	6. VIII.67	289

с попуском 1700–2000 м³/с воды из Усть-Джегутинского водохранилища. Затопление аулов Хатукай, Свободный и Лесной, расположенных на левом берегу р. Кубань в устье р. Лаба произошло вследствие прорыва береговых валов, защищающих эти населенные пункты, со стороны Кубани и Лабы [7].

Максимальные расходы воды во время июньского паводка 2002 г. составили на Кубани: 4760 м³/с (г. Армавир); 4120 м³/с (с. Успенское); 2780 м³/с (х. Дегтяревский). Для р. Уруп (х. Стеблицкий) он был равен 1700 м³/с, р. Большая Лаба (Азиатский мост) – 669 м³/с, р. Малая Лаба (с. Бурное) – 560 м³/с. (табл. 2).

С 23 июня уровни и расходы воды на реках стали уменьшаться, однако выпадение ливней на большей части бассейнов рек 26–29 июня привело к формированию второй волны паводков. В горных районах Карачаево-Черкесии 21, 26–30 июня, 1–3, 5-8 и 13 июля сформировались селевые потоки, которые усилили негативные последствия наводнения. Продолжительность этого события в разных частях бассейна Кубани изменялась от 11 до 268 часов. С 1 по 5 июля уровни воды на всех реках бассейна стали понижаться и достигли нормы к 15–20 июля. В результате наводнения пострадали четыре субъекта Российской Федерации. В зоне затопления оказались 213 населенных пунктов с населением около 230 тыс. человек. Было разрушено 10269 и повреждено 27202 жилых домов, 205 км газопроводов, 134 моста, 354 км автомобильных дорог, 221 км ЛЭП, 263 км водопроводов. Погибло 113 человек. Общий ущерб составил 8,2 млрд рублей [7,8].

В бассейнах Кумы и Терека максимальные уровни на реках стали формироваться ночью 20–21 июня, когда на притоках начался интенсивный рост уровней. На р. Кума они достигали отметок, на 10–150 см превышавших наблюдавшиеся максимумы последних 70 лет. Дополнительному подъему уровней воды, особенно на р. Подкумок (правый приток Кумы), способствовал подпор от мостовых переходов, подмостовое пространство которых было сильно уменьшено вследствие скопления мусора и заломов. В ряде случаев негативную роль играли разрушенные защитные сооружения. Вымытые бетонные плиты создавали дополнительное препятствие на пути движения водных потоков. Общий материальный ущерб от наводнения в бассейне р. Кума в Ставропольском крае составил 3,319 млрд руб.

В верховьях р. Терек и на его притоках, в среднем течении реки (Моздокский район Республики Северная Осетия-Алания) резкое повышение уровней воды вызвали сильные ливни 19–21 июня. Они сформировали высокую и продолжительную волну паводка с превышением максимальных исторических уровней и расходов воды. Наибольший расход воды в верхнем бьефе Терско-Кумского гидроузла составил 1880 м³/с. Такой

Таблица 2 – Максимальные расходы воды рек региона в июне-июле 2002 г.

Река-пункт	Максимальный расход, м ³ /с	
	До 2002 г.	В паводок 2002 г.
Кубань – Коста Хетагурова	897	2495
То же – х. Дегтяревский	601	2780
То же – с. Успенское	776	4120
То же – г. Армавир	1160	4760
Уруп – х. Стеблицкий	867	1700
Большая Лаба – Азиатский мост	414	669
Малая Лаба – с. Бурное	412	560
Белая – х. Грозный	835	1200

расход воды соответствует повторяемости не чаще 1 раза в 200 лет. Сильные ливневые дожди 26–28 июня привели к образованию второй волны паводков на реках республики. Подъём уровня начался 26 июня в 22 часа и достиг максимальной отметки 30 июня. Величина подъёма составила 130 см. Наибольший расход воды в районе Терско-Кумского гидроузла составил 1540 м³/с [7].

В нижнем течении р. Терек максимальные уровни достигали отметок 410–520 см, превышая исторические максимумы на 44–180 см. В нижнем бьефе Каргалинского гидроузла расход воды достиг опасных значений 22 июня (1000 м³/с) и оказался максимальным 23 июня – 1530 м³/с. Это привело к прорыву оградительных валов и затоплению больших массивов сельскохозяйственных полей и населённых пунктов в дельте р. Терек. С 23 июня уровни и расходы воды стали медленно понижаться, однако вторая волна паводков (26–29 июня) привела к повторному затоплению местности. Максимальные уровни воды на Тереке наблюдались у г. Прохладный 29 июня и у г. Моздок – 30 июня, превышая отметки опасных событий на 35–92 см. Наиболее сложная обстановка сложилась в дельте р. Терек, куда поступало 1320–1450 м³/с воды. Создалась угроза дальнейшего размыва оградительных дамб, при этом зона

затопления ниже гидроузла постоянно расширялась. Расходы воды выше опасных значений наблюдались с 27 июня по 4 июля. Паводок закончился к 22 июля, когда в нижний бьеф Каргалинского гидроузла стало поступать около 700 м³/с.

В результате катастрофического паводка на р. Терек было разрушено 1840 п.м основных и дублирующих водоохранительных валов. Вследствие прорыва валов были затоплены 11 хозяйств отгонного животноводства, животноводческие комплексы, сельхозугодья и сельхозобъекты; частично пострадали селения в Кизлярском и Бабаюртовском районах Дагестана; за автодорога республиканского значения Махачкала – Крайновка; дороги и линии электропередач в районе Аликазгана, заилены оросительные каналы в дельте Терека, переполнены Нижнетерские озера [5]. Эти последствия были бы менее значимыми при наличии в бассейне р. Терек противопаводочного водохранилища.

Катастрофическое наводнение в долине р. Адагум (Краснодарский край). В ночь с 6 на 7 июля 2012 г. в бассейне р. Адагум сформировался катастрофический паводок, который привел к частичному затоплению г. Крымск и других населённых пунктов. Река Адагум – левый приток р. Кубань, в настоящее время впадающая в Варнавинское водохранилище. В результате наводнения в Крымском районе погибло 153 человека, разрушено 749 домов, из них 202 полностью, было нарушено электро-, газо- и водоснабжение.

Выпавшие в течение 6-7 июля осадки оказались экстремально большими за весь период наблюдений. Сумма суточных осадков по м/с Крымск ранее не превышала 80 мм, а в ночь с 6 на 7 июля она составила 156 мм. Максимальные суточные суммы осадков по м/с Новороссийск составляли 180 мм (1988 г.), что соответствует их повторяемости один раз в 100 лет. За сутки (с 6 июля по 7 июля 2012 г.) в районе метеостанции выпало 275 мм осадков. Исторический максимум суточных осадков (105 мм) был также превышен по м/с Геленджик, где за 24 часа выпало 311 мм (рис. 2). Исключительно высокие осадки, выпавшие в бассейне р. Адагум, для которого характерны высокая густота

речной сети, значительные уклоны склонов и русел водотоков, сформировали исключительно мощный паводок. Он охватил все основные водотоки в бассейне Адагума: р. Баканка и её притоки, р. Неберджайка, р. Богаго и др.

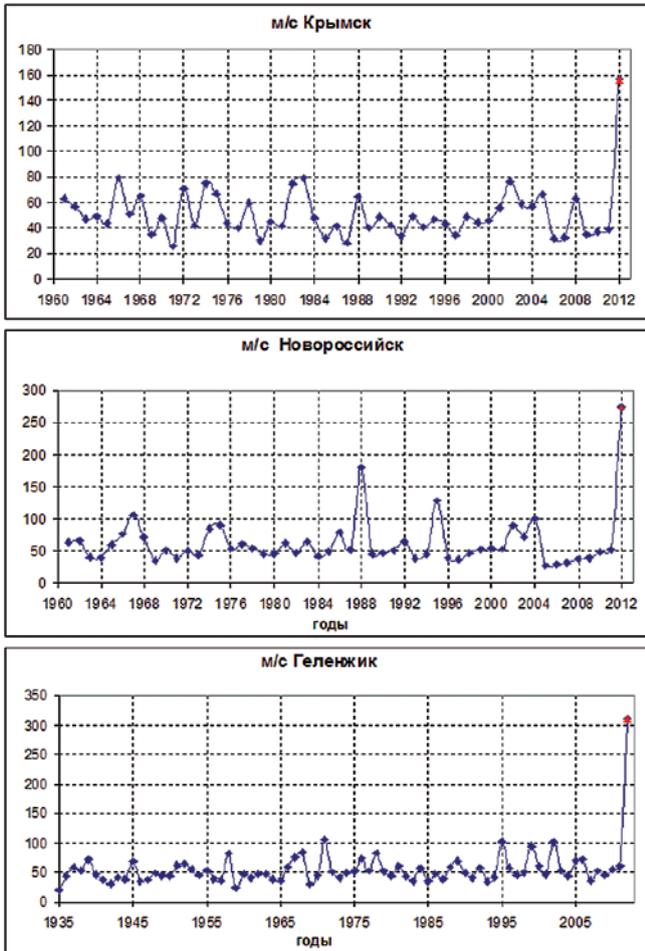


Рисунок 2 – Максимальные суточные осадки по м/с Крымск, Новороссийск и Геленджик

Значительный и быстрый подъём уровня воды был обусловлен следующими причинами. Паводочные волны, передвигавшиеся по руслам основных притоков Адагума (Баканки и Неберджайка) сформировались за счёт интенсивного притока воды со склонов их водосборов. Поток переносил большое количество, растительного и бытового мусора, что создало условия для образования заломов в створах мостов, встречавшихся на пути паводка. После слияния рр. Баканка и Неберджайка поток воды следовал по сильно заросшему руслу и прилегающей территории, ограниченной насыпями автомобильной и железной дорог. Поскольку ширина участка долины между насыпями на этом участке сужается в сторону г. Крымск, это привело к значительному повышению уровня воды (до 8 м над меженными отметками). Поток смещался к левому склону долины и быстро перемещался к г. Крымск.

Следующее значительное препятствие на пути потока создал автомобильный мост в центре города, который превратился в искусственную плотину из-за того, что пролеты между опорами моста были забиты карчем и бытовым мусором. В результате этого вода стала переливаться через мост, а значительная её часть обошла моста преимущественно по улицам правобережной части города. После 23 ч 30 мин 6 июля началось интенсивное повышение уровня воды, составившее к 01 ч 00 мин 7 июля 81 см. В течение следующего одного часа он возрос на 355 см, что привело к затоплению значительной части города и трагическим последствиям. Дамбы обвалования, расположенные на городском участке реки, не смогли предупредить затопление городской территории. 7 июля 2012 г. максимальный расход воды составил $1460 \text{ м}^3/\text{с}$, что существенно превышает исторический максимум стока в створе р. Адагум – г. Крымск (2002 г.) – $940 \text{ м}^3/\text{с}$.

На условия прохождения паводочной волны оказали влияние антропогенные факторы. Так, пропускная способность большинства мостов, построенных на реках бассейна, оказалась недостаточной для пропуска паводочных вод, несущих большое количество древесного материала и бытового мусора.

В результате этого мосты явились подпорными сооружениями, в верхних бьефах которых аккумулировалась часть паводочного стока с последующими прорывами и изменением направления потока в обход создаваемых препятствий. Насыпи автомобильных и железных дорог, проходящих по поймам рек, препятствуют естественному растеканию паводочных вод, в результате чего максимальные уровни воды на отдельных участках существенно возросли. Пропускная способность русла и поймы р. Адагум в пределах г. Крымск недостаточна для пропуска паводочных расходов: прилегающая к реке пойма застроена, в том числе и в водоохраннх зонах, а русло реки замусорено, не расчищается и на отдельных участках сильно заросло.

Неберджаевское водохранилище, построенное в верховьях р. Неберджайка, предназначено для водоснабжения г. Новороссийска. Водоохранилище имеет шахтный водосброс с диаметром шахты 4,3 м с максимальным расходом 130 м³/с. В период прохождения паводка Неберджаевское водохранилище выполнило свою аккумулирующую функцию, снизив поступление паводочных вод в р. Адагум примерно на 130 м³/с.

В последние 30–40 лет число паводков на реках Черноморского побережья Кавказа существенно возросло. Одновременно возросли максимальные расходы воды. На реках Северо-Черноморского сектора (Вулан, Туапсе), например, расходы воды в 1977–2002 гг. достигли 1050–2300 м³/с, что превысило исторические максимумы в 3–8 раз [11]. Наиболее мощные паводки в регионе сформировались в бассейне р. Туапсе в 1991, 2002 и 2010 гг. Особенно разрушительными оказались паводки 1991 и 2010 гг., имевшие ливневой (дождевой) генезис.

Катастрофический паводок в бассейне р. Туапсе в 1991 г. наблюдался с 1 по 5 августа. Паводки прошли одновременно на всех реках к юго-востоку от бассейна р. Туапсе до бассейна р. Хоста включительно, а также на р. Пшиш (приток р. Кубань), бассейн которой расположен к северу от бассейна р. Туапсе. Ливневые осадки на побережье и в горах за период 31 июля – 1 августа 1991 г. составили в различных пунктах от 50,2 до 241 мм.

Максимальные расходы воды изменялись от 118 м³/с (р. Западный Дагомыс) до 2300 м³/с (р. Туапсе). Уровень воды на р. Туапсе превышал средний многолетний на 3–5 м, а в местах сужения русла до 11–12 м. Ширина разлива воды на поймах некоторых рек изменялась от 100–200 м до 1,5–2,0 км (рр. Туапсе, Аше). В результате прибрежные территории были затоплены на глубину 3–7 м, а в п. Кирпичном – 11–12 м. Ширина зоны затопления составляла по р. Туапсе: у с. Кривенковское – 100–300 м, в 1 км ниже с. Кривенковское – 350–400 м, в районе г. Туапсе – 200–500 м. Паводки привели к значительным разрушениям населенных пунктов, автомобильных дорог, мостов в долинах рек. Значительный ущерб был нанесен 13 населённым пунктам и 62 предприятиям; разрушено 18 автомобильных мостов, 189 жилых домов, нефтепровод, 2 км железной дороги; снесена 81 опора контактной сети, нанесён значительный ущерб заводам и другим предприятиям [11].

Катастрофические паводки в октябре 2010 г. охватили бассейны рек Черноморского побережья от п. Джубга до п. Макопсе. Они были вызваны сильными ливнями 15 и 16 октября. Количество осадков изменялось от 52 до 126 мм. Подъём уровня на реках достигал 4–10 м относительно меженных уровней воды. Наиболее значительный паводок 15–16 октября 2010 г. был в бассейне р. Туапсе, но он охватывал не весь бассейн, а только его среднюю и нижнюю части. Высота подъёма уровня за паводок составила 353 см. Расход воды ниже с. Кривенковское составлял 158 м³/с; к г. Туапсе он возрос до 1625 м³/с [10]. Наводнение в пределах городского участка реки было не только паводком, но и формированием местного стока в условиях городской застройки (при значительных уклонах местности и недостаточной пропускной способности городской ливневой канализации). В результате формирования местного стока отдельные части города были затоплены глубиной до одного метра.

Паводок 15–16 октября 2010 г. нанёс существенный ущерб населению и объектам экономики. В зоне подтопления оказались 7 сельских поселений и 17 населённых пунктов Туапсинского района. Непосредственно в зоне затопления оказались

больше 500 домов с населением более 2000 человек. Погибли 14 человек.

На юге России отмечаются нагонные наводнения. Нагоны – подъём уровня воды, вызванный ветрами, имеющими преимущественно направление со стороны моря. Наиболее значительные нагоны на юге России наблюдаются в устьях Дона, Кубани, Терека, Кумы и некоторых других рек, а также на западном побережье Каспия и восточном побережье Азовского моря. Наводнения, вызванные нагонами, нередко наносят значительный ущерб. При нагонном наводнении на побережье Азовского моря 14 марта 1914 г. было разрушено до 100 рыбных и консервных заводов, снесены бараки рабочих, размыт железнодорожный путь, погибло около 3000 человек [7].

В последние 50-70 лет наиболее значительным оказалось нагонное наводнение 28–29 октября 1969 г. Оно охватило побережье Азовского моря в пределах от Темрюкского залива на юге до Ясенского на севере. Уровни воды на побережье повысились на 240-400 см. Влияние нагона распространялось по дельтовым рукавам Кубань и Протока на расстояние до 75 км. Оно проявилось в огромных разрушениях инфраструктуры поселков Пересыпь, Чайкино, Кучугуры и Ачуево, где было уничтожено много домов, пострадали Темрюкский рыбзавод и морской порт. Погибло около 200 человек. Последнее значительное нагонное наводнения произошло в дельте Дона в марте 2013 г., когда за 36 часов уровень воды в дельте поднялся на 2–7 м. Был затоплен 21 населённый пункт, где проживает более 5000 человек.

На побережье Каспийского моря наиболее значительное нагонное наводнение наблюдалось 10–13 ноября 1952 г. Причиной наводнения стал 10–12-балльный шторм, временами переходящий в ураган (скорости ветра достигали 30–40 м/с). Глубина затопления местности изменялась от 450 см у побережья до 100 см на расстоянии 30-40 км от моря. В результате нагонного наводнения была затоплена приморская зона шириной до 10–40 км вглубь территории. Населённым пунктам Лагань, Лиман, Белое Озеро и Яндыки был нанесен значительный ущерб. В трёх местах оказалось размытым полотно желез-

ной дороги Астрахань – Кизляр. Территория, затопленная при нагоне, составила около 5500 км² [6, 7].

Заключение

В последние десятилетия участились катастрофические паводки и наводнения на юге России. Особенно часто они случаются в бассейнах рек Кубань, Терек, Кума и на Черноморском побережье Краснодарского края. Основными причинами паводков являются климатические особенности и хозяйственная деятельность. В последние десятилетия особенно быстро изменяются климатические условия, в частности, сумма и интенсивность атмосферных осадков, часто выступающие в качестве основной причины формирования паводков и возникновения наводнений. В связи с потеплением климата в последние десятилетия произошло увеличение количества атмосферных осадков и в то же время уменьшилось число дней с малым количеством осадков. Одновременно увеличилось число дней с большим количеством осадков. При этом максимальное суточное количество осадков практически на всех метеорологических станциях возросло в два-три раза. На ряде станций, особенно на Черноморском побережье оно превысило 200 мм/сут. (Геленджик – 311 мм/сут.; Новороссийск – 275 мм/сут.; Сочи – 245 мм/сут.). Выпадение такого количества осадков – причина возникновения катастрофических паводков в регионе.

Помимо природных факторов, на паводки, генезис и последствия наводнений большое влияние оказывают антропогенные факторы. В их число входят: застройка на затопляемых территориях и в поймах рек, строительство инженерных сооружений в руслах рек без должного учета генезиса максимальных уровней и расходов, строительство мостов с зауженными мостовыми пролётами и резким сужением русла реки.

Литература

1. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций. Российская Федерация. Южный федеральный округ. Под общей редакцией С.К. Шойгу. М.: МЧС России, 2007. – 381 с.

2. Базелюк А.А. Опасные гидрометеорологические явления на Черноморском побережье, связанные с выпадением сильных осадков //Сборник научн. статей. Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей. – М.: Географический ф-т МГУ, 2012. – С. 33–45.

3. Георгиевский В.Ю., Коронкевич Н.И., Алексеевский Н.И. Водные ресурсы и гидрологический режим рек РФ в условиях изменения климата // Тезисы пленарных докладов VII Всероссийского гидрологического съезда. 19–21 ноября 2013 г. – СПб.: Государственный гидрологический институт, 2013. – С. 26–32.

4. Георгиевский В.Ю., Яковлева Т.И., Базелюк А.А., Лурье П.М., Катастрофические паводки в бассейнах рек Черноморского побережья и Кубани в конце 20-го – начале 21 века // Материалы VII Всероссийского гидрологического съезда. 19–21 ноября 2013 г. – СПб.: Государственный гидрологический институт, 2013.

5. Горелиц О.В., Землянов И.В., Павловский А.Е., Артемов А.К., Яготинцев В.Н. Катастрофический паводок в дельте Терека в июне – июле 2002 г. //Метеорология и гидрология, 2005. – № 5. – С. 62–71.

6. Иванов А.А., Михайлов В.Н., Магрицкий Д.В. Причины, хроника событий и последствия наводнения в низовье реки Кубани зимой 2001–2002 гг. //Сборник «Безопасность энергетических сооружений», 2003. – Вып. 11. – С. 275–283.

7. Лурье П.М. Водные ресурсы и водный баланс Кавказа. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. – 506 с.

8. Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю. Река Кубань: гидрография и режим стока. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2005. – 498 с.

9. Лурье П.М., Базелюк А.А. Проблемы наводнений на юге России. Причины возникновения и оценка последствий // Сб. докладов междунар. конф. «Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях». – М.: 2008. – С. 131–137.

10. Магрицкий Д.В., Иванов А.А. Наводнения в дельте Кубани //Водные ресурсы, 2011. – Т. 38. – № 4. – С. 387–406.

11. Панов В.Д., Базелюк А.А., Лурье П.М. Реки Черноморского побережья Кавказа: гидрография и режим стока. –Ростов-н/Д: Донской издательский дом, 2012. – 606 с.

12. Таратунин А.А. Наводнения на территории Российской Федерации. – Екатеринбург: Издательство ФГУП РосНИИВХ, 2008. – 432 с.

СОВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВНУТРИГОДОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТОКА РЕК БАССЕЙНА ВОЛГИ³

**Фролова Н.Л., *Агафонова С.А., *Киреева М.Б.,
**Молчанова Т.Г., *Повалишников Е.С.*

**Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
**ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,
Санкт-Петербург
frolova_nl@mail.ru*

Введение. Исследование внутригодового распределения стока рек (ВРС) – важная научная и практическая проблема в области организации экономически эффективного и экологически безопасного водопользования. Круг вопросов, относящихся к данной тематике, представляет интерес как с точки зрения научного познания, так и для разнообразных прикладных задач. Это утверждение находит многочисленные доказательства с одной стороны в виде фундаментальных гидрологических трудов, обобщающих данные исследований и создающих теоретические основы для дальнейшей работы в этой области (например, [3, 5–7]), с другой – существованием нормативной документации, задающей строгий алгоритм расчётов ВРС для целей применения полученной информации в различных практических областях [13]. На основе расчётов внутригодового распределения стока устанавливаются водохозяйственные параметры: гарантированная отдача воды, выработка электроэнергии, регулирующая ёмкость водохранилищ и др. Задача учета внутригодовой изменчивости стока воды часто возникает на этапах планирования мероприятий

³ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-00113-а, № 14-05-31278 мол_а), гранта Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских ВУЗах (проект № 11.Г.34.31.0007), ФЦП «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012-2020 годах»

по улучшению экологического состояния малых и средних рек, при рационализации использования их водных ресурсов. Эта потребность также диктуется необходимостью адаптации сложного водохозяйственного комплекса к сезонным изменениям стока под влиянием климата. Последние комплексные исследования ВРС проводились в начале семидесятых годов прошлого столетия – в период выпуска «Ресурсов поверхностных вод СССР». За время, прошедшее с момента выпуска справочников, внутригодовой режим стока рек европейской территории России претерпел существенные изменения. К настоящему моменту назрела насущная необходимость обновления расчетных схем, построения современных карт, поиска новых зависимостей и закономерностей формирования сезонного распределения стока. Цель данной работы – изучение современного внутригодового распределения стока рек бассейна Волги для расчета характеристик сезонного стока, определения расчетного внутригодового распределения для различных периодов времени; подготовки картографических обобщений и соответствующего районирования территории.

Материалы и методы. Определение расчетного ВРС рек строго регламентировано и производится согласно целому ряду нормативных документов [13 и др.]. Основным методом обобщения данных по внутригодовому распределению стока является составление районных схем межсезонного и внутрисезонного распределения стока, необходимых для определения расчетного календарного распределения месячного стока в характерном по водности году исследуемой неизученной реки. Межсезонное распределение стока выражается в долях от годового стока, а внутрисезонное распределение стока – в долях от стока соответствующего сезона. В настоящей работе определение расчетного ВРС производится методами среднего распределения стока за годы характерной градации водности и реального года.

При расчетах внутригодового распределения стока рек использовались данные, полученные из соответствующих выпусков гидрологических ежегодников и фондов ФГБУ

«ВНИИГМИ-МЦД», о среднемесячных расходах воды на отобранных репрезентативных постах: для бассейна Нижней Волги (37 постов), Камы (68 постов), Верхней Волги (102 поста) для 1946–1977 гг., 1978–2010 гг. и для всего периода 1946–2010 гг. Выбор границ расчетных периодов основан на результатах выполненного ранее в ФГБУ «ГГИ» анализа многолетних колебаний месячного стока рек бассейна Волги и собственных исследований [4, 14]. Гидрологические расчеты проведены с использованием сертифицированной системы инженерно-гидрологических расчетов «Гидрорасчеты», представляющей комплекс основных вычислительных программ, разработанных в ФГБУ «ГГИ», статистический анализ проведен также с помощью стандартных пакетов Statistica и Excel, карты построены с помощью пакета ArcGis.

При исследовании сезонного стока возникает необходимость назначения определенных и постоянных сроков начала и конца сезонов для рек района. Принятие постоянных сроков – условная мера, вызванная требованиями практики. Разделение на сезоны гидрологического года зависит от типа внутригодового режима стока. Для рек с весенним половодьем (реки бассейна Волги) в качестве основных сезонов принимаются весна, лето-осень и зима. В зависимости от типа водного режима реки и преобладающего вида ее использования водохозяйственный год делят на два различающихся по длительности периода: лимитирующий (ЛП) и нелимитирующий (НП), а лимитирующий период соответственно на два сезона: лимитирующий (ЛС) и нелимитирующий (НС). Границы сезонов были определены для бассейна Волги в пятидесятых годах прошлого века [3, 10–11] на основе имевшейся тогда ограниченной гидрометрической информации. В настоящее время существует большое количество постов с продолжительными периодами наблюдений за стоком. Изменение климатических условий, наблюдающееся в последние десятилетия, также требует обновления и уточнения принимаемых для расчета внутригодового распределения стока соответствующих характеристик. Анализ гидрографов более чем 200 рек за 1946–2010 гг. позволил обо-

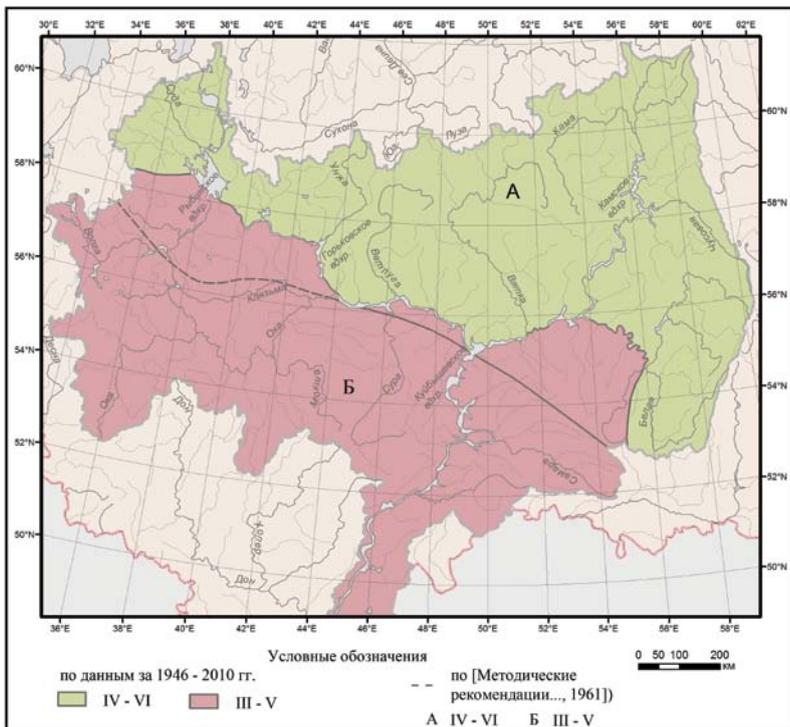
снова для рек в бассейне Волги границы гидрологических сезонов года (табл. 1, рис. 1–2).

Таблица 1 – Сроки гидрологических сезонов для рек бассейна Волги*

Район	Сезон		
	Весна	Лето-осень	Зима
Верховья Оки – район 1а	III-V	VI-XI	XII-II
Нижняя Волга – район 2а	III-V	VI-XI	XII-II
Верхняя Волга (правобережные притоки) – район 2а	III-V	VI-XI	XII-II
Верхняя Волга (левобережные притоки) – район 3а	IV-VI	VII-XI	XII-III
Кама – район 2б	III-V	VI-X	XI-II
Кама – район 3б	IV-VI	VII-X	XI-III

Примечание. Районы (1,...,3) выделены по датам начала весны; области (а и б) – по датам начала зимы.

Пространственно-временная изменчивость характеристик внутригодового распределения стока. Гидроклиматические условия на Русской равнине в последней четверти XX в. характеризуются повышенным увлажнением территории и увеличением регионального стока. Изменение циркуляционных и связанных с ними других климатообразующих процессов в последней четверти XX в. привело к существенному улучшению условий формирования стока на Восточно-Европейской равнине. Отмечаемые за последние десятилетия климатические изменения в бассейне Волги, несомненно, влияют на особенности водного режима рек, величину их годового и межennaleго стока, объем и высоту весеннего половодья [12, 2]. ВРС рек заметно меняется по территории в соответствии с изменением климатических условий как в широтном направлении, так и с высотой местности. Помимо климатических факторов большее влияние на распределение стока внутри года оказывают местные особенности речных водосборов: гидрогеологические

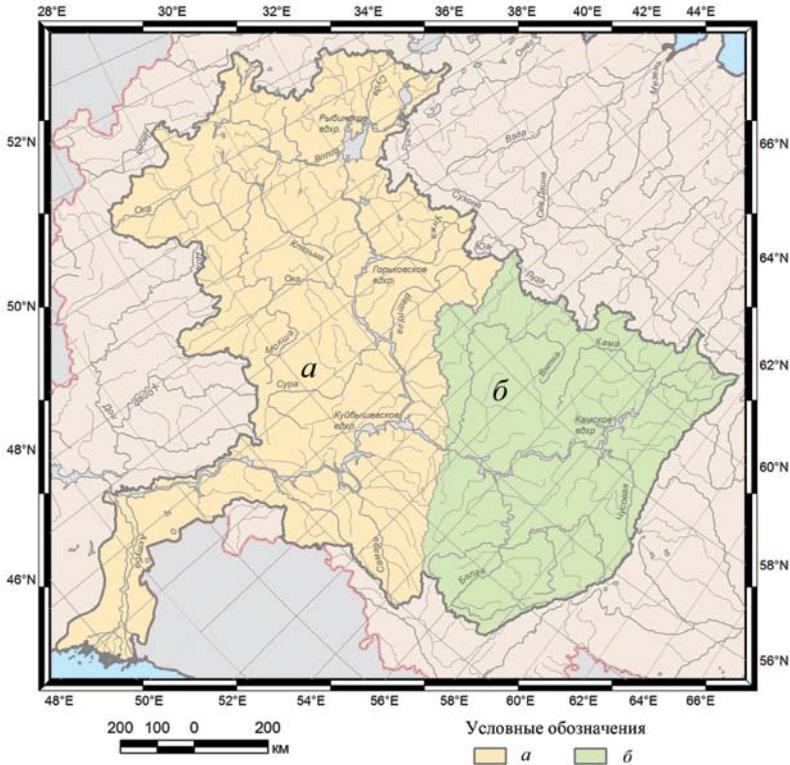


A – IV–VI; B – III–V; 1 – II–IV; 2 – III–V; 3 – IV–VI. Пунктиром показаны границы районов по [1, 9]

Рисунок 1– Районы с различными сроками весеннего гидрологического сезона

условия и связанные с ними карстовые явления, озерность, заболоченность и физические свойства почвогрунтов.

Ниже представлены результаты исследований с учетом данных наблюдений до 2010 г. Для этого произведена статистическая обработка ежегодных данных о стоке за НП, ЛП и зимний ЛС, в результате которой общепринятыми приемами получены параметры кривых обеспеченности (средние значения, C_v и C_s) для всех пунктов наблюдений с рядами наблюдений за 1946–2010, 1946–1977, 1978–2010 гг. Для получения более устойчивых оценок коэффициент асимметрии определялся за



а – начало сезона – декабрь; б – начало сезона – ноябрь

Рисунок 2 – Районы с различными сроками зимнего гидрологического сезона

весь период наблюдений. Карты сезонного стока (слой (мм) и коэффициент вариации), определенные для современного периода (1978–2010 гг.), представлены на рис. 3, 7, 9. Распределение долей сезонного стока (в % от годового) за тот же период (1978–2010 гг.) представлено на рис. 4, 8, 10.

Весеннее половодье – главная фаза и отличительная черта водного режима рек в бассейне Волги. В весенний сезон формируется большая часть годового стока рек. Слой стока за весен-

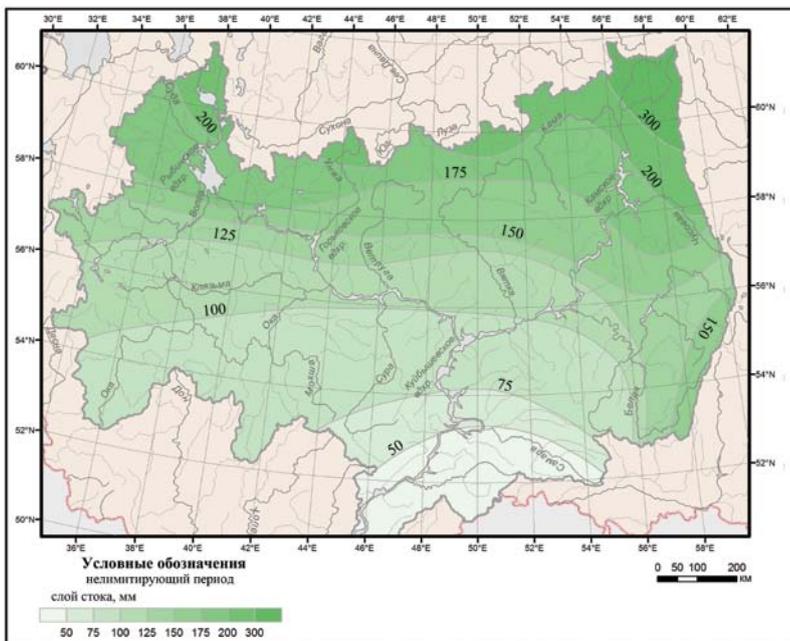


Рисунок 3 – Слой стока за нелимитирующий период (апрель-июнь) для рек бассейна Волги (мм) за 1978–2010 гг.

ний (НП) в бассейне Волги закономерно увеличивается с юга на север, достигая наибольших значений в бассейнах Вишеры, Язьвы и Колвы (р.Язьва – с.Нижняя Язьва – 365 мм) (рис. 3). Соответственно доля стока за НП равна 65–70 %. В верховьях Камы, Вятки эта величина составляет 180–190 мм, около 200 мм в верховьях Унжи и в бассейне Кемы. В бассейне р. Белая величина слоя стока заметно меняется в зависимости от высоты местности, достигая 150–200 мм в верховьях и уменьшаясь до 80–90 мм в бассейне Демы, Чермасана и Сюни. В бассейне Самары эта величина равна 45–60 мм. Соответственно доля стока за НП равна 65–70 %, а в бассейнах Бузулука, Чапаевки, Чагры в течение весеннего сезона проходит практически весь сток за год (85–90 %). За последние тридцать лет доля стока за НП для

большей части бассейна Камы уменьшилась на 10 %, в низовьях р. Белая уменьшение составило 10–20 %. Для самых северных рек (Колва, Вишера) наблюдается незначительное (до 5 %) увеличение доли стока за весенний период. На всех реках Нижней Волги наблюдается снижение объема стока за весеннее половодье и уменьшение его доли в годовом стоке (от 5 % на юге до 15–20 % в северной части бассейна). В бассейне Верхней Волги доля стока за НП увеличивается с запада на восток от 50 % в верховьях Волги, Тверцы, Шошы, Тьмы до 70 % и более для рр. Теша, Сережа и левобережных притоков Суры – Пьяны, Алатыря. В верховьях Оки доля стока за НП составляет 50–60 %, а в пределах остальной части бассейна Верхней Волги – 60–65 %. На всех реках территории наблюдается сниже-

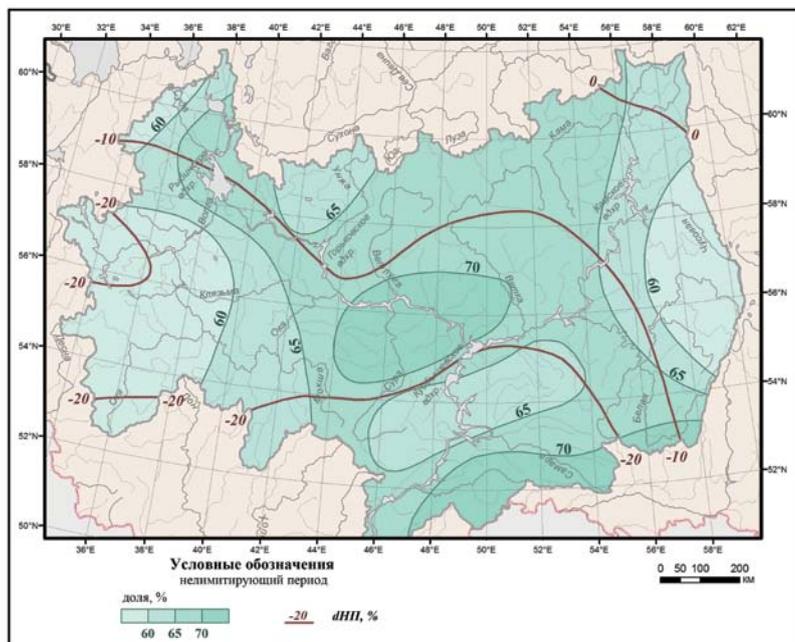


Рисунок 4 – Доля стока за нелимитирующий период (в % от годового) за 1978–2010 гг. и ее изменение в 1978–2010 гг. по сравнению с 1946–1977 гг. (%)

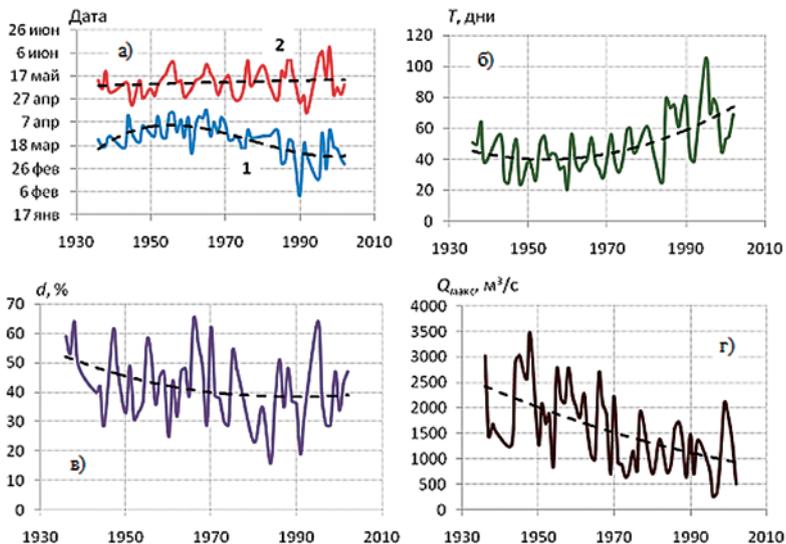


Рисунок 5 – Изменение даты начала (1) и окончания (2) весеннего половодья (а), его продолжительности T (дни) (б), доли стока за половодье d в годовом объеме стока (%) (в), максимальных расходов весеннего половодья $Q_{\text{макс}}$ ($\text{м}^3/\text{с}$) (г) (Волга – г. Старица)

ние объема стока за весеннее половодье и уменьшение его доли в годовом стоке (от 5–10 % на севере до 20 % на юге) (рис. 4).

Для бассейна Волги характерно уменьшение максимальных расходов весеннего половодья. Оно прослеживается для всего рассматриваемого периода наблюдений (1946–2010 гг.) в бассейне Оки и Нижней Волги. Хорошо выражены сдвиг сроков начала весеннего половодья в сторону более ранних дат на 5–10 дней и увеличение продолжительности половодья (рис. 5–6) [1–2].

Изменение максимальных расходов составляет для Оки и ее притоков 20–40 %, для рек Нижней Волги – 40–70 %. Эта тенденция обусловлена повышением температуры воздуха зимой, которое сопровождается увеличением числа и продолжительности оттепелей и, следовательно, уменьшением предвесенних запасов воды, максимальных расходов весеннего половодья.

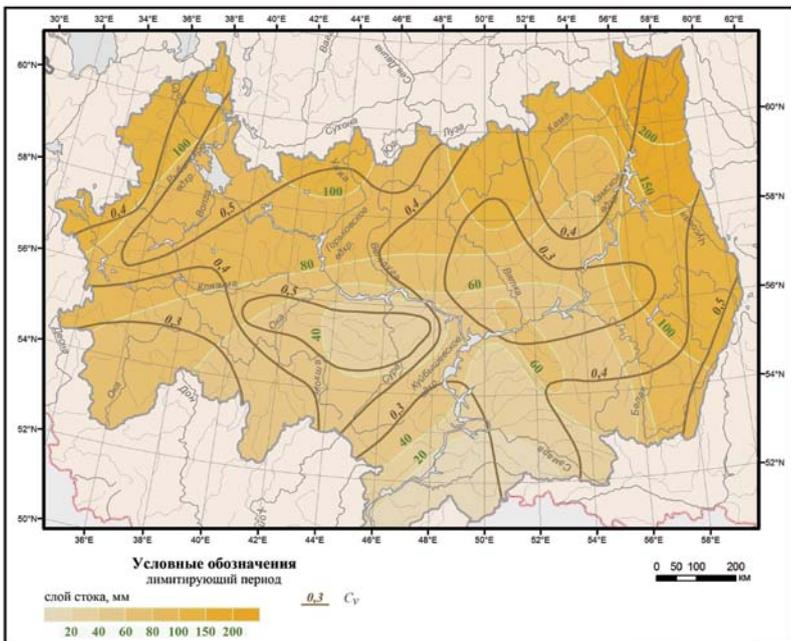


Рисунок 7 – Слой стока (мм) и коэффициент вариации за лимитирующий период (июль–октябрь) для рек бассейна Волги за 1978–2010 гг.

ритории и несколько больше 40 % в бассейне Чусовой, Уфы, рек в верховьях Волги и Оки, для которых характерен карст (рис. 8). Доля стока за меженный период уменьшается с запада на восток, составляя 40–45 % на западе, где велика доля паводочного стока, до 30–35 % на востоке. Изменение доли стока за последние десятилетия колеблется от нуля (и даже небольших отрицательных значений) на северо-востоке (бассейн Вишеры и Язьвы) до 40–60 % и более в бассейне Оки и Нижней Волги.

Наиболее низкий сток наблюдается зимой, когда реки почти полностью переходят на подземное питание. Зимний сток на реках региона меньше летне-осеннего. На малых водотоках зимой сток нередко почти отсутствует. Величина слоя стока за зимний ЛС (рис. 9) колеблется от 15 до 25 мм в равнинной

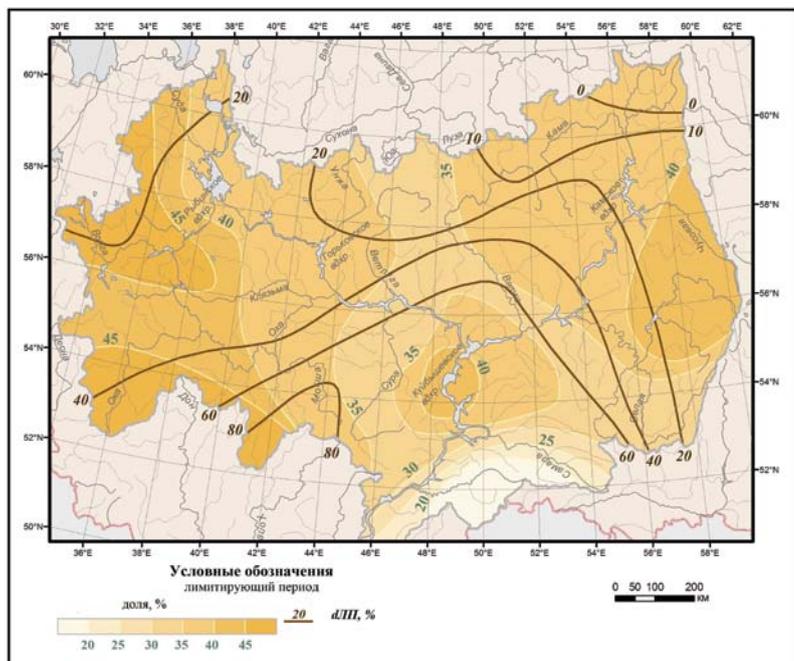


Рисунок 8 – Доля стока за лимитирующий период (в % от годового) за 1978–2010 гг. и ее изменение в 1978–2010 гг. по сравнению с 1946–1977 гг. (%)

части бассейна Камы, составляет около 15–20 мм в верховьях Белой, Чусовой и достигает максимальных значений (40–50 мм) в районе расположения проявления карста (бассейн Уфы, Быстрого Таныпа, Сылвы и других рек). На реках бассейна Нижней Волги он составляет от 3–5 мм (крайний юг) до 10–15 мм на севере. Для рек бассейна Верхней Волги сток за ЛС составляет от 10–15 мм на юго-востоке (бассейн Суры) до 35–40 мм на северо-западе. Доля зимнего стока колеблется от 5 % на юге территории до 10–15 % на северо-западе и северо-востоке (рис. 10). Доля зимнего стока максимальна для Верхней Оки (до 16–18 %) и уменьшается в направлении на северо-восток до 5–10 % в верховьях Ветлуги. Изменение (увеличение) доли

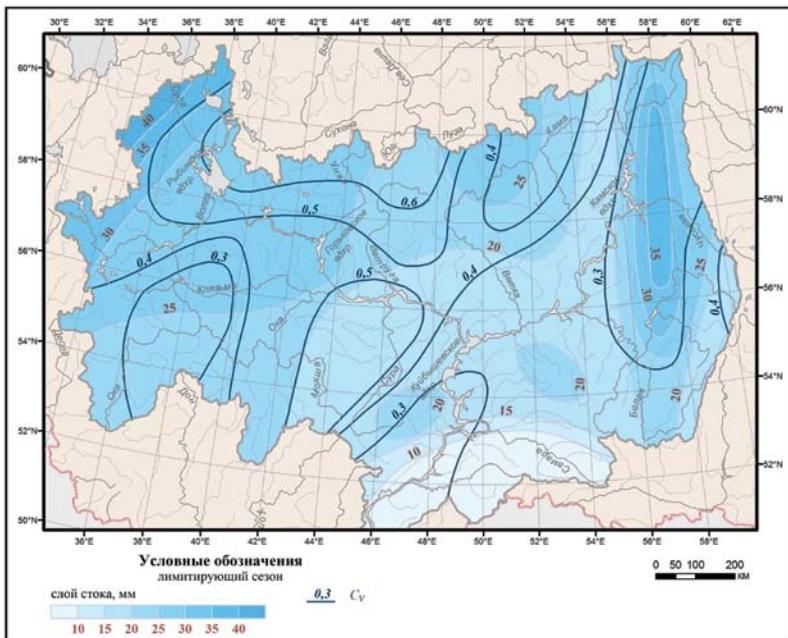


Рисунок 9 – Слой стока (мм) и коэффициент вариации за лимитирующий сезон (ноябрь–март) для рек бассейна Волги за 1978–2010 гг.

зимнего стока за последние тридцать лет составляет 40–60 % и более.

Таким образом, распределение сезонного стока по территории в общих чертах следует закону географической зональности, однако влияние местных аazonальных факторов (озерности, карста, песчаных почв и т. д.) нередко нарушает эту закономерность.

Естественная зарегулированность стока рек бассейна Волги. При изучении внутригодового распределения стока рек (кроме хронологического (календарного) описания распределения стока) используется анализ его некалендарного распределения в форме кривых продолжительности суточных расходов воды. Они дают возможность оценить продолжительность

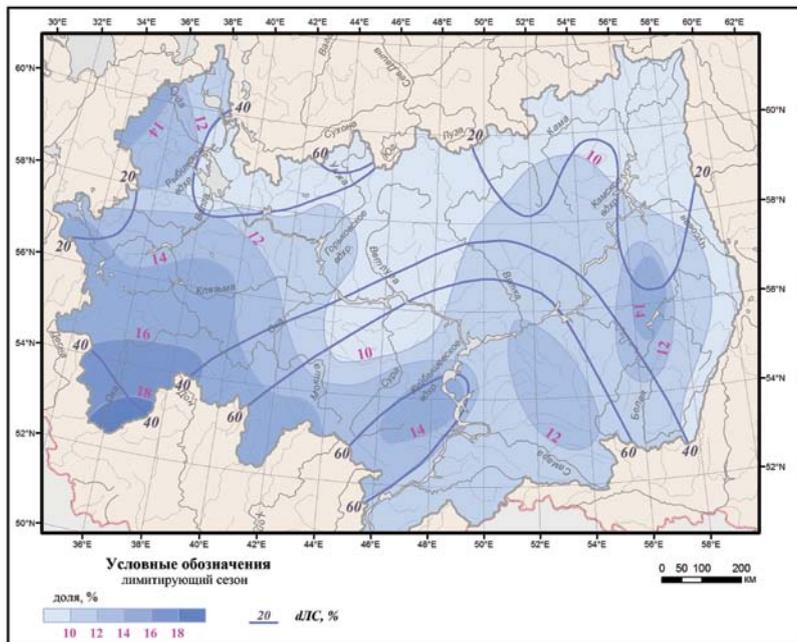


Рисунок 10 – Доля стока за лимитирующий сезон (ноябрь–март) (в % от годового) за 1978–2010 гг. и ее изменение в 1978–2009 гг. по сравнению с 1946–1977 гг. (%)

расходов воды, равных или превышающих заданную величину.

Часто для этой цели используется анализ изменения коэффициента естественной зарегулированности ϕ , характеризующий неравномерность ВРС. Он соответствует доле «базисного» стока в годовом объеме стока. Базисная часть стока отражает естественную зарегулированность водосбора и его аккумуляционную способность, поэтому значение коэффициента ϕ уменьшается при уменьшении озерности, а также при переходе от лесной к полупустынной зоне. Для конкретной реки величина ϕ меняется год от года в зависимости от особенностей в основном многоводной фазы водного режима [3]. Доля весеннего половодья в годовом стоке фактически определяет его внутригодовую неравномерность (коэффициент корреляции R более

0,95). Вследствие этого закономерный характер имеет и связь годового коэффициента естественной зарегулированности ϕ с максимальными расходами весеннего половодья. По мере убывания доли стока половодья эта связь выражена слабее. Общий характер изменения коэффициента естественной зарегулированности стока по территории России рассмотрен в работе [4].

Для бассейна Верхней Волги величина ϕ , рассчитанная за период 1978–2010 гг., постепенно увеличивается с севера на юг от 0,55 до 0,8, достигая максимальных значений на юге (верховья Оки, Мокши) и западе (верховья самой Волги) (рис. 11).

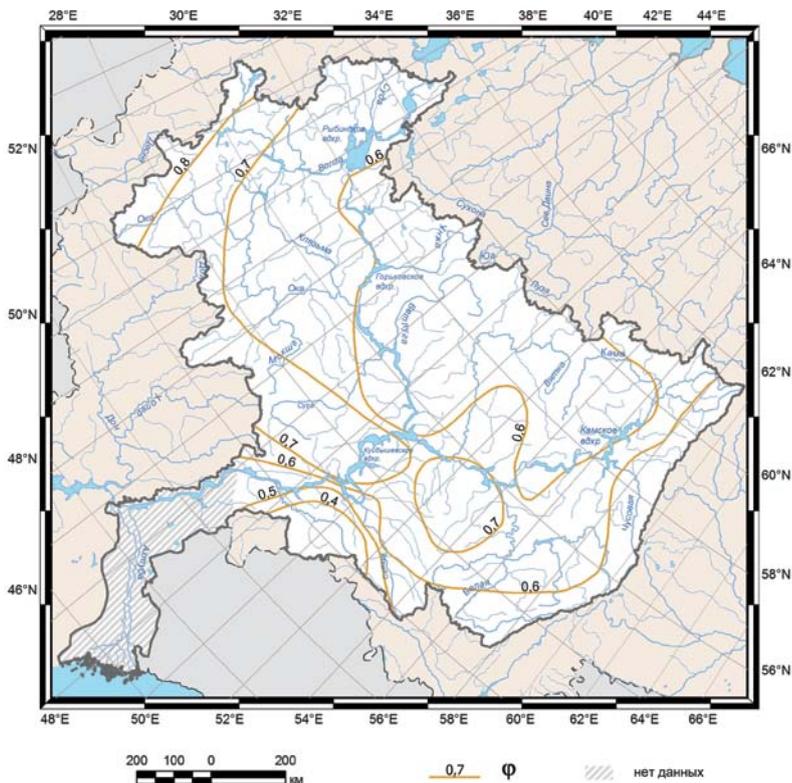


Рисунок 11 – Среднее значение коэффициента ϕ за 1978–2010 гг.

В среднем величина ϕ равна примерно 0,65. В 25 % случаев наблюдается статистически значимый тренд увеличения коэффициента ϕ за 1946–2010 гг. Увеличение коэффициента естественной зарегулированности стока в последние десятилетия в наибольшей степени характерно для бассейна Мокши и Суры (более 30 %), верховьев Оки и Волги (до 20–30 %), в меньшей степени – для бассейна Мологи, среднего и нижнего течения Ветлуги, Унжи – 10–20 %. Оно практически отсутствует в самой северной части бассейна. Такие изменения произошли за счет уменьшения доли талого стока и значительного увеличения доли подземной составляющей (рис. 12–13). Наиболее сильные изменения произошли в южной части бассейна (рис. 14). Для рек бассейна Нижней Волги (исключение – р. Чапаевка (с. Подъем-Михайловка)) все тренды за период наблюдений являются статистически значимыми. Изменение (увеличение) величины ϕ за последние тридцать лет (по сравнению с аналогичным предыдущим периодом) составляет около 30 %. Эта тенденция сопровождается уменьшением доли стока весеннего

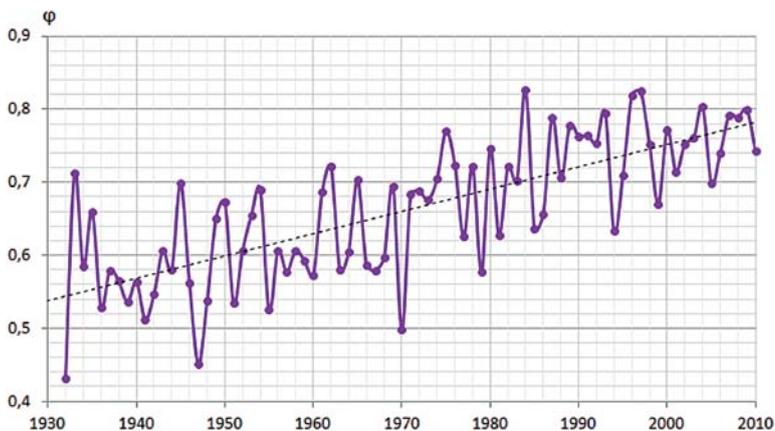


Рисунок 12 – Изменение коэффициента естественной зарегулированности стока ϕ в бассейне Оки за 1930–2010 гг.
(р. Ока – г. Горбатов)

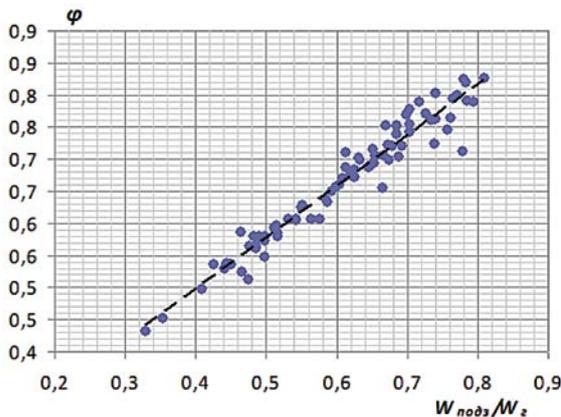


Рисунок 13 – Связь коэффициента естественной зарегулированности стока φ с долей подземного стока в суммарном речном стоке

половодья. Для некоторых постов (р. Цивиль – д. Тувси; р. Б. Караман – пгт. Советское; р. Крымза – г. Сызрань и др.) эта величина оно превышает 40 %. Анализ данных по стоку весеннего половодья и величине подземного стока показывает, что такое изменение величины φ произошло за счет сокращения стока весеннего половодья и возрастания роли подземного стока. За последние 30 лет доля стока половодья уменьшилась для рассматриваемых рек примерно на 15 %.

Наибольшие значения φ (0,7–0,8) приурочены к возвышенностям с большей глубиной эрозионного вреза – Приволжской и Бугульминско-Белебеевской. Для этих территорий характерно распространение карста и повышенная доля подземного питания. Наименьшие значения φ (0,3–0,4) отмечены для крайнего юга территории – бассейна Большого Иргиза, Чагры, Чапаевки. Здесь же отмечается наибольшая доля весеннего половодья в годовом стоке (70–80 %). В отличие от Нижней и Верхней Волги (рис. 12–13) для бассейна Камы случаи статистически значимых возрастающих трендов (1946–2010 гг.) единичны (рр. Ай, Белая, Вятка, Дема). Это связано с незначительным изменением характера водного режима и постоян-

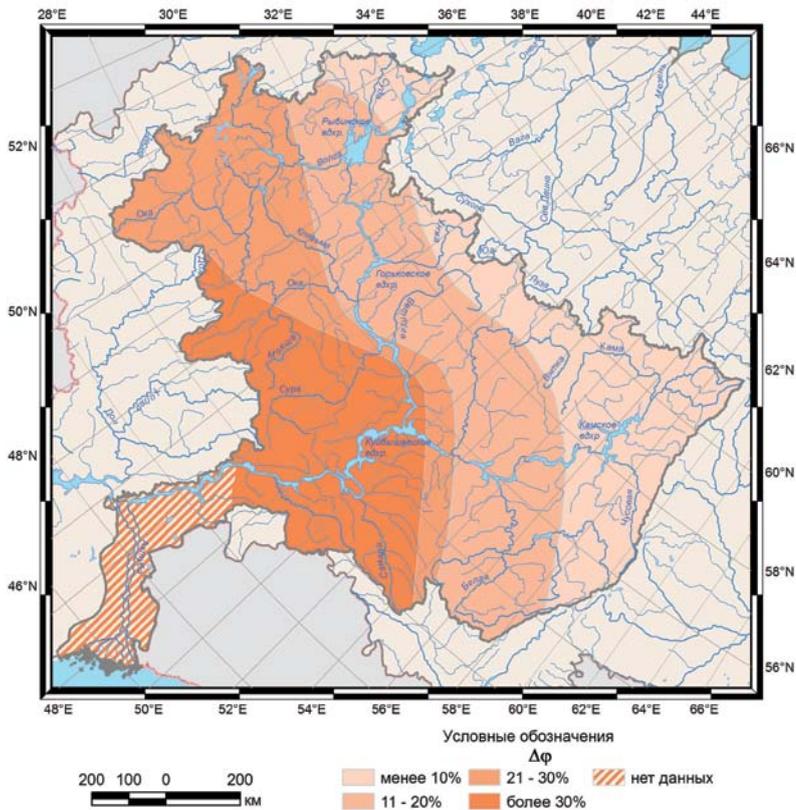


Рисунок 14 – Изменение коэффициента φ за 1978–2010 гг. по сравнению с 1946–1977 гг. (%)

ством доли стока за половодье. Для исследуемых рек бассейна Камы диапазон изменения величины φ находится в пределах 0,55–0,7, достигая максимальных значений в районах распространения карста.

Районирование территории по характеру внутригодового распределения стока. Результатом анализа пространственной изменчивости характера внутригодового распределения стока стало гидрологическое районирование бассейна Волги (рис. 15).

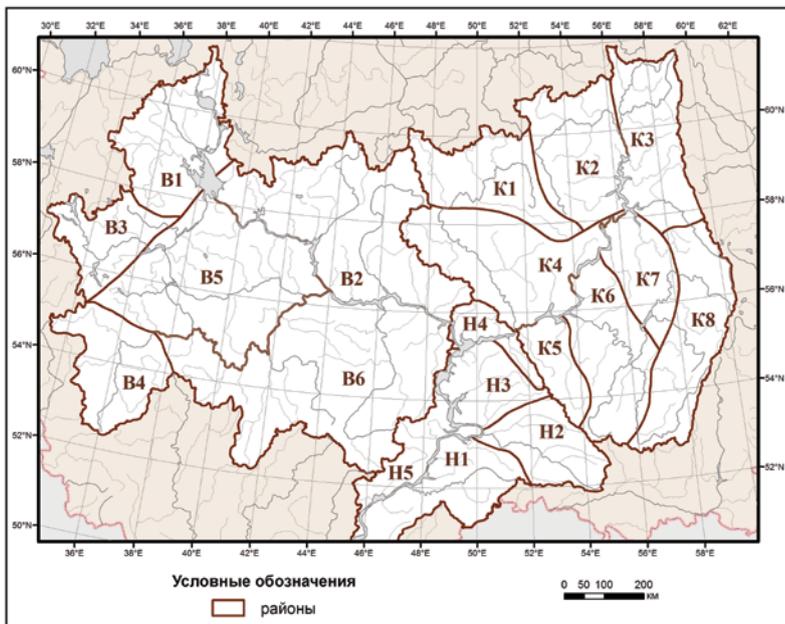


Рисунок 15 – Гидрологическое районирование бассейна Волги

В качестве критериев отнесения рек к тому или иному району использована схожесть формы гидрографов стока, рассчитанных в относительных единицах (%), абсолютные величины слоев стока за НП, ЛП и ЛС и доли сезонов в годовом стоке, физико-географические и гидрогеологические особенности территории (климатические характеристики, рельеф, озерность, заболоченность, карст). Схожесть гидрографов стока определялась с помощью кластерного анализа (программа «Статистика»). При уточнении границ районов использованы результаты районирования, приведенного в [12].

Оценка внутригодового распределения стока при недостаточности или отсутствии гидрометрических наблюдений. Основной метод расчета ВРС при недостаточности или отсутствии гидрометрических наблюдений – метод гидрологи-

ческой аналогии. Это является следствием не только необходимости учета факторов естественной зарегулированности стока, характеризующих совокупностью не интерполируемых в пространстве показателей (заболоченность, закарстованность, озерность, лесистость, положение по отношению к гидрогеологическим структурам, площадь и формы водосбора и т. д.), но и многопараметричностью календарного внутригодового распределения. Положение усложняется еще тем, что относительное распределение по частям года неодинаково в годы с различной обеспеченностью суммарного объема стока. Метод географической интерполяции в этих условиях имеет ограниченное применение и направлен на решение отдельных задач расчета – определение стока за сезоны (средние многолетние значения, коэффициенты вариации). Применение метода гидрологической аналогии возможно в трех вариантах: а) по аналогии с одной изученной рекой; б) по групповой аналогии с помощью региональных зависимостей параметров внутригодового распределения от физико-географических факторов; в) по районным схемам внутригодового распределения стока.

Полное описание возможности использования тех или иных методов приведены в [9–11, 13]. Ниже даны предварительные оценки точности расчетов сезонного стока по картам, приведенным на рис. 3–10, путем выбрасывания отдельной точки. Рассмотрим, например, ошибки определения слоя и коэффициента вариации стока за зимний ЛС. Для Нижней Волги ошибка определения слоя стока (без учета знака) равна около 40 %, а коэффициента вариации – около 30 %. Для условий с экстремально низким зимним стоком и площадью водосбора менее 2000 км² использовать данные карты для определения характеристик ЛС не имеет смысла. Для остальных же условий величина ошибки для слоя стока составляет 25–30 % и для коэффициента вариации 20–25 %. При определении слоя стока за ЛП ошибка составляет в среднем 30 %, включая реки с малой площадью водосбора и низкими величинами слоя стока и 24 % для коэффициента вариации. Для большинства рек слой стока может быть определен с точностью около 20 %, а коэффициент

вариации – 15 %. Для бассейна Камы ошибка определения по карте слоя стока за зимний ЛС равна в среднем 22 % (без учета площади водосбора). При площади водосбора более 2000 км² точность оценки увеличивается. Ошибки более 40 % возникают при значениях стока за ЛС менее 12 мм. Для ЛП ошибки определения слоя стока несколько меньше – в среднем 16 %.

Выводы. Внутригодовое распределение стока рек бассейна Волги заметно меняется по территории в соответствии с изменением климатических условий в широтном направлении и с высотой местности. Помимо климатических факторов большое влияние на распределение стока внутри года оказывают местные особенности речных водосборов: гидрогеологические условия и связанные с ними карстовые явления, озерность, заболоченность и физические свойства почв и грунтов. Для большинства рек бассейна Волги существует статистически значимое уменьшение неравномерности стока за период после 1946 г. Это выражается в увеличении коэффициента естественной зарегулированности стока ϕ , изменении величин сезонного стока, в первую очередь за лимитирующий период и лимитирующий сезон. В зависимости от особенностей рельефа, природной зоны и типа водного режима рек в пределах бассейна Волги представлено 19 гидрологических районов, в которых естественная зарегулированность стока примерно одинакова.

Список литературы

1. Агафонова С.А., Айбулатов Д.Н., Фролова Н.Л., Козлов Д.В. Современное изменение ледового режима рек бассейна Волги // Природообустройство, 2014. № 3. С. 60–62.

2. Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М., Игонина М.И. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // Вода: химия и экология, 2013. № 4. С. 3–12.

3. Андреев В. Г. Внутригодовое распределение речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 328 с.

4. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. Шикломанова И.А. – СПб: ГГИ, 2008.

5. Евстигнеев В. М. Речной сток и гидрологические расчеты. М.: Издво МГУ, 1990. 304 с.
6. Евстигнеев В. М., Зайцев А. А., Сваткова Т. Г. и др. Водный режим рек СССР (карта для высшей школы масштаба 1:8 000 000) // Вестн. Моск. унта. Сер. 5. География. 1990. № 1. с. 10–16.
7. Кузин Л. С., Бабкин В. И. Географические закономерности гидрологического режима рек. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 200 с.
8. Методические рекомендации к составлению справочника по водным ресурсам СССР. Л.: ГГИ, 1961. Вып. 6. 101 с.
9. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений. Ротопринт ГМЦ РФ ААНИИ, СанктПетербург, 2007. 66 с.
10. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. СПб: НесторИстория, 2009. 193 с.
11. Методические указания по расчетам внутригодового распределения стока при строительном проектировании. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 80 с.
12. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 1012. Л.: Гидрометеиздат, 1972–1973.
13. СП 331012003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. 73 с.
14. Фролова Н. Л., Агафонова С. А., Нестеренко Д. П., Повалишников Е. С. Естественная зарегулированность стока рек бассейна Волги в условиях меняющегося климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление», 2013. № 6. С. 32–49.
15. Фролова Н. Л., Нестеренко Д. П., Шенберг Н. В. Внутригодовое распределение стока рек России // Вестн. Моск. унта. Сер. 5. География. 2010. № 6. С. 8–16.

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЕК СИБИРИ

Гагарина О. В., Кичигина Н. В., Корытный Л. М.

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

Сибирь в гидрографическом понимании – азиатская часть бассейна Северного Ледовитого океана. И по количеству, и по протяженности сибирские реки – это более половины рек России (табл. 1) [3].

Структурно-гидрографические особенности. Рассматриваемая территория имеет в основном хорошо развитую речную сеть. В некоторых горных районах густота речной сети составляет более 1,0 км/км² (в верховьях Индигирки, в горах Бырранга, в западной части хр. Хамар-Дабан). Минимально развита речная сеть в низовьях бассейнов рр Джиды, Чикой, Малый Енисей, в Центрально-Якутской низменности, Обь-Иртышском междуречье и бессточных областях (коэффициент густоты составляет 0,1–0,3 км/км²).

Для характеристики состава речной сети Сибири выбрана нисходящая порядковая бонитировка Р. Хортона – А Стралера [14, 16]. Эта схема стала основой базовой классификации речных систем по их величине для Сибири [9]. В качестве критерия использован порядок речной системы, определенный по этой схеме, ввиду ее простоты и отсутствия субъективизма в определении порядка. На основе топографических карт масштаба 1:300 000 построен граф речной сети Сибири; выделены системы девяти порядков, объединенные в пять классов (табл. 2). Речная сеть Сибири насчитывает 20 крупнейших систем, включая три

Таблица 1 - Количество и протяженность рек Сибири по бассейнам морей

Бассейн	Количество рек	Протяженность, км
Всего по России	2562489 / 100%	8373606 / 100%
Карское	475187 / 18,5%	2278219 / 27,2%
Лаптевых	421786 / 16,5%	1641138 / 19,6
Восточно-Сибирское	483672 / 18,9%	997980 / 11,9%

Таблица 2 – Порядковая структура речной сети Сибири

Речная система	Порядок	Количество систем порядка					
		IV	V	VI	VII	VIII	IX
Обь, в т.ч.	IX	1587	354	74	13	4	1
Иртыш	VIII	440	84	23	3	1	
Кеть	VIII	119	23	7	2	1	
Чулым	VIII	145	25	6	2	1	
Енисей, в т.ч.	IX	1903	419	88	22	6	1
Ангара	IX	605	127	26	6	2	1
Подкаменная Тунгуска	VIII	235	53	12	3	1	
Нижняя Тунгуска	VIII	297	60	15	4	1	
Тасеева, в т.ч	VIII	194	40	7	2	1	
Ока	VIII	86	23	5	2	1	
Лена, в т.ч.	IX	2184	554	114	24	5	1
Витим	VIII	170	35	8	2	1	
Олекма	VIII	283	61	11	4	1	
Алдан	VIII	942	186	38	6	1	
Виллой	VIII	531	112	20	5	1	
Пяси́на	VIII	363	84	20	5	1	
Хатанга	VIII	511	107	31	3	1	
Оленек	VIII	311	54	14	2	1	
Яна	VIII	406	29	7	2	1	
Инди́гирка	VIII	687	128	31	8	1	
Колы́ма	VIII	1074	236	60	12	1	

системы IX порядка (Енисей-Ангара, Лена, Обь); 110 больших – VII порядка; 550 средних – VI; а также около 15 тысяч малых (среди них 2400 – V порядка и 12,5 тысяч – IV порядка). Полная классификация (с учетом очень малых рек) пока проведена только для юга Восточной Сибири [10].

Особенности водного режима. Реки рассматриваемой территории имеют смешанное питание, с преобладанием на юге снегодождевого, а на севере снегового питания. Подземное питание преобладает в районах, где распространены породы с

большой водопоглощающей способностью (трещиноватые и закарстованные породы). Доля подземных вод в питании рек, находящихся в условиях сплошной многолетней мерзлоты, обычно не превышает нескольких процентов.

По классификации Б.Д.Зайкова [6], все сибирские реки относятся к группе с преобладанием весеннего половодья, к трем типам – западносибирскому, восточносибирскому и алтайскому. В их питании преобладает снеговое, но они отличаются между собой по отношению максимального и среднего расхода, форме гидрографа, относительной водности и календарным срокам межени. В горных районах с высотой возрастает увлажнение территории, доля снегового (а для высоких гор – и ледникового) питания, сдвигаются сроки снеготаяния. Половодье горных рек растянуто, в его формировании значительна роль дождей, выпадающих в период таяния снега.

Водный режим крупных рек отличается от режима средних и малых рек их бассейнов. Верховья крупнейших рек Сибири находятся в горах, где водотоки имеют особый режим (алтайский по Б.Д. Зайкову), с большой ролью летнего, преимущественно дождевого стока, но он прослеживается на относительно небольшом расстоянии. Зато для Яны, Индигирки, Колымы паводочный режим характерен на всем протяжении реки.

Коэффициент естественной зарегулированности стока уменьшается при увеличении доли весеннего стока: его минимум (менее 0,25) отмечается в Центральной Якутии, на Средне-Сибирском плоскогорье, Северо-Востоке, в Забайкалье, на Ямале, в степях Западной Сибири и Тывы в диапазоне 0,25–0,50, а для остальной Западной Сибири и в горах юга Сибири колеблется от 0,50 до 0,75.

Для годового хода уровней воды рек характерно чередование подъемов и спадов в теплый период года и низкое их стояние в холодный период. В конце сентября – начале октября уровни воды на многих реках перед наступлением ледостава достигают наименьших значений за период открытого русла. Характерным для всех рек территории является резкое повы-

шение (на 1–1,5 м) уровня воды в период образования ледостава, вызванное сужением русла и уменьшением его пропускной способности. Зимой на большинстве рек происходит плавное понижение уровня, продолжающееся до конца марта – начала апреля. Зимние уровни на преобладающем числе рек обычно ниже летних и являются годовыми минимумами. Подъем уровня воды весной обычно начинается в апреле-мае, когда температура воздуха повышается до положительных значений. Весенние подъемы уровней на непромерзающих реках происходят в результате увеличения водности рек. На промерзающих реках часть весеннего стока происходит по поверхности ледяного покрова при повышенных уровнях. В теплый период года отмечаются резкие колебания уровня, обусловленные прохождением весеннего, весенне-летнего половодья и дождевых паводков. После половодья на большинстве рек равнинной части уровни воды снижаются до минимальных летних значений. Дождевые паводки обычно начинаются на спаде половодья и наблюдаются в течение всего лета. На горных реках паводки чаще всего формируются вслед за половодьями. Характерной особенностью паводков являются резкие подъемы и спады уровней во время их прохождения. Высота подъемов за летний период уменьшается с юга на север.

Годовая амплитуда колебания уровней на больших реках составляет в среднем 7–8 м, на средних реках – 3–4 м, на малых – 1–2 м. Изменения уровня воды для Оби, Енисея и Лены наибольшие для российских рек, они увеличиваются от верхнего течения к устью от 3–6 до 16 м и больше. В нижнем течении р. Лены (с. Кюсюр) уровень повышается на 28 м, а на Нижней Тунгуске у пос. Большого Порога – на 33 м.

Межгодовые колебания стока носят циклический характер. Хорошо выраженная синхронность в колебаниях годового стока наблюдается у рек, протекающих в пределах районов, характеризующихся более или менее однородными физико-географическими условиями. Чаще всего совпадают многоводные или маловодные фазы со сдвигом начала и окончания на 1–2 года.

Распределение среднего годового стока рек по территории характеризуется исключительной сложностью в связи с ее орографическими особенностями и разной увлажненностью. Среднегодовое значение модуля годового стока изменяется от 1 до 30 л/(с·км²). В равнинной части происходит уменьшение стока с северо-запада на юго-восток. Наибольшей водностью (20–30 л/(с·км²)) характеризуются реки высокогорных районов: бассейнов Катунь, Тубы, левобережные притоки Катуни и верховья правобережных притоков Белой, реки хребтов Хамар-Дабан, Байкальского и Сынныр, Станового нагорья. Наименьшей водностью (1–5 л/(с·км²)) отличаются реки в пределах центральной части Тувинской котловины, центральной части бассейна Байкала, Иркутско-Черемховской равнины, Центрально-Якутской низменности, юга Забайкалья.

Изменчивость стока большинства сибирских рек невелика, коэффициент вариации не превышает 0,25. Высока изменчивость стока рек степных и лесостепных территорий на юге Западно-Сибирской равнины и Забайкалья, где коэффициент вариации достигает до 0,5 и даже больше.

Внутригодовое распределение стока изменяется в пределах равнинной части территории в широтном направлении, в горной его части – с высотой местности. Распределение стока в течение года отличается большой неравномерностью. Около 70–95 % его объема проходит в теплую часть года. В зимние месяцы реки маловодны, иногда сток отсутствует вследствие промерзания (особенно на реках Северо-Востока).

Изменение доли половодья носит сложный характер. Она увеличивается с запада на восток в пределах Западно-Сибирской низменности, Среднесибирского плоскогорья, Алтая, уменьшается (до 40–50 %) для рек хребтов Верхоянский и Черского и ещё более резко (до 25 % и менее) – для рек Витимского плоскогорья, Станового хребта, Хамар-Дабана, Алданского нагорья. Половодье на реках обычно начинается в конце апреля – начале мая на юге, в конце мая-начале июня на севере, а заканчивается соответственно в первой половине июня и примерно в середине июля. Продолжительность его составляет

30–80 дней и зависит от размера бассейна. На небольших реках она составляет 10–20 дней для безлесных бассейнов и 30–40 дней для лесных.

Для ряда территорий, расположенных в горах Южной Сибири и на востоке Якутии, максимальные расходы дождевых паводков превышают максимумы половодья. Это обусловлено сочетанием орографических условий и климатических условий (малоснежные зимы, летний максимум осадков континентального генезиса и др.). Паводки наблюдаются на всех реках территории. Общая продолжительность паводочного периода на реках южных районов составляет в среднем три месяца, в северных районах 1–2 месяца.

Большое разнообразие значений минимального стока объясняется существенными различиями условий увлажнения отдельных частей территории, а также влиянием гидрогеологических особенностей речных водосборов. В водном режиме рек Сибири выражены два маловодных сезона: зимняя межень (всегда и повсеместно) и летне-осенняя межень (на большинстве территорий; в горах часто прерывается паводками). В период устойчивой и продолжительной зимней межени доминирует подземное питание. Для многих малых и даже некоторых средних рек в зоне многолетней мерзлоты характерно перемерзание вследствие быстрого истощения стока, промерзания толщи грунтов, образования наледей. Величины зимнего минимального суточного стока изменяются по территории от 0 до 2,5 л/(с·км²). Зимние минимумы по своей абсолютной величине значительно меньше летних. Летняя межень на севере более устойчива, на юге менее выражена, особенно в многоводные годы. Средняя продолжительность меженного периода колеблется от 70–90 дней на севере до 30–50 дней на юге. Минимальные летние суточные модули изменяются от 0,02–0,1 до 10–12 л/(с·км²).

Основной особенностью режима рек Сибири, как и всей России, связанной с климатическими изменениями, является повсеместное увеличение зимнего стока [15]. Наибольшее его увеличение (на 40–70 %) характерно для левобережья Иртыша;

в бассейне Лены, а также на реках тундры и лесотундры оно составляет 10–30 %, а в бассейне Енисея и на реках Забайкалья – 10–20 %. Летне-осенний сток увеличился на левобережье Иртыша и Тобола, в бассейне Лены (на 10–20 %), более всего – на реках северо-востока – до 30 %. В многоводные периоды тенденции неоднозначны: в бассейне верхней Оби сток уменьшается на 10–25 %, на реках Забайкалья – на 5–15 %. На притоках Тобола и Иртыша сток весеннего половодья, напротив, увеличился на 15–25 %, на притоках Лены (Олёкма, Витим, Амга) – на 10–20 %, еще более – в бассейнах рр. Оленек и Колыма.

Особенности термического и ледового режима рек. Температура воды из года в год колеблется в относительно небольших пределах. Годовой ход температуры воды в общих чертах повторяет колебания температуры воздуха. Температура воды повышается с севера на юг и юго-восток. Начиная с октября и вплоть до середины апреля температура воды близка к нулю. Однако у некоторых горных рек вода в декабре – январе имеет температуру 0,7–0,8°С. Весной в связи с потеплением отмечается постепенное повышение температуры воды. Максимумы температуры воды обычно наступают во второй половине июля, их значения колеблются от 6,0 (на северо-востоке) до 28 °С. В августе вода большинства рек начинает охлаждаться. В октябре – ноябре местами наблюдается переохлаждение воды и образование донного льда и шуги. В целом среднегодовая температура воды рек в пределах рассматриваемой территории изменяется от 2 до 6°С.

Существенное влияние на термический режим водных объектов оказывает регулирование стока. Сооружение каскада водохранилищ на Ангаре и Енисее обусловило понижение температуры в мае-сентябре: на Енисее на 8,7°С, на Ангаре – на 11,6°С. На Енисее влияние плотины Красноярской ГЭС прослеживается ниже по реке на 600–800 км. На Вилюе, наоборот, отепляющее влияние плотины прослеживается в мае на расстоянии до 900 км.

Тепловой сток рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, максимален для крупнейших рек и в среднем за год

составляет: для Енисея – $16,0 \cdot 10^{15}$ кДж, для Лены – $15,7 \cdot 10^{15}$; для Оби – $13,5 \cdot 10^{15}$; для Колымы – $4,0 \cdot 10^{15}$ кДж. Изменения климата и регулирование стока привели к трансформации теплового режима отдельных рек. В частности, для Оби, Таза, Пура, Енисея (в устье) он фактически не изменился, на Ангаре возрос, но не более чем на 5 %, а на Яне увеличился на 40 % по сравнению с периодом 1936–1950 гг. [7].

Для рек Сибири характерны значительная продолжительность существования ледяных образований, преобладание устойчивых и разнообразных форм ледовых явлений, широкое распространение внутриводного и донного льда, перемерзания рек и наледных явлений, значительная толщина льда и зашугованность русел. На реках ежегодно в октябре – ноябре (сентябре – начале октября для северных рек) образуется ледостав, которому предшествует период замерзания (возникновение и развитие заберегов, появление шуги, ледохода). Продолжительность ледостава на реках южной части территории составляет 140–190 дней (в высокогорных районах 160–170 дней). На реках северных районов длительность его достигает 210–260 дней. Средние значения толщины льда составляют 30–50 см для рек южной территории и 180–270 см для рек северной территории. Наибольшей толщины лед достигает в феврале – марте. На промерзающих до дна реках толщина льда зависит от глубины потока во время образования на нем ледяного покрова, на ряде рек – от формирующихся на них наледях.

Весной с наступлением положительных температур воздуха начинается таяние и разрушение ледяного покрова. Весенние процессы на промерзающих реках начинаются с появления неподвижной воды, а потом потока воды на поверхности льда. На больших непромерзающих реках характерен только первый процесс. Уже в марте вскрываются реки Алтая, остальные в апреле-июне; в это время наблюдаются выходы воды на поверхность льда, образование закраин, происходят подвижки льда, отмечается весенний ледоход. Продолжительность периода вскрытия рек составляет в среднем 34 дня и изменяется от 21 до 46 дней. Ледоход продолжается обычно 1–6 дней. На

горных участках он имеет прерывистый характер и может растягиваться на 15–20 дней. В период прохождения весеннего ледохода нередко образуются заторы льда. Продолжительность заторов обычно невелика и не превышает 1–2 дней, лишь в низовьях больших рек она может достигать 5–6 дней.

Изменения климата привели к смещению начала и окончания фаз ледового режима, хотя и не повсюду. Например, в верховьях Оби лед появляется на 5 дней позже, а вскрывается река на 10 дней раньше, чем это было 30–40 лет назад; Нижняя Лена начинает замерзать на 2 дня раньше, а вскрывается на 2 дня позже. На Среднем Енисее подобные изменения отсутствовали.

Особенности водного баланса. Воднобалансовые расчеты проведены на основе многолетних исследований Государственного Гидрологического института [2, 12]. Значения осадков получены планиметрированием карт изогиет, сток определялся на основе анализа длительных рядов наблюдений, а испарение рассчитывалось по разности осадков и стока. В итоге получены среднегодовые значения элементов водного баланса, его структуры, показателем которой выступает коэффициент стока, и величины водных ресурсов рек Сибири и ее частей (табл. 3). Ресурсы Сибири составляют более половины водных ресурсов России. Для Сибири характерна значительная дифференциация условий влагооборота, что приводит к существенным различиям элементов и структуры баланса. Наименьший сток характерен для бассейнов Вилюя, Иртыша и Тобола. Для бассейнов Олекмы, Витима, Колымы коэффициенты стока достигают максимума, что объясняется наличием многолетнемерзлых горных пород при достаточном увлажнении территории. Около 15 % всех возобновляемых водных ресурсов страны формируется в бассейне Енисея.

Особенности генезиса наводнений. Наводнения в Сибири наиболее часто возникают во время весенних (весенне-летних) половодий и летних дождевых паводков. Половодные наводнения вызываются снеготаянием на равнине (весеннее половодье) или таянием снега и ледников в горах (весенне-летнее

половодье). Паводочные наводнения имеют самую высокую повторяемость, высокую скорость формирования и могут охватывать отдельные небольшие бассейны, так и обширные территории.

Таблица 3 – Водный баланс и водные ресурсы регионов Сибири

Территория	Элементы водного баланса, мм / год			Коэффициент стока	Ресурсы речного стока км ³ в год/ % от России
	осадки	сток	испарение		
Сибирь	480	218	262	0,45	2350 / 55
Западная Сибирь	543	198	345	0,36	491/ 11
Восточная Сибирь	530	290	241	0,55	1272/30
Якутия	390	176	214	0,45	577/14

Селевые наводнения возникают в горах и предгорьях, в результате интенсивного ливня и (или) дружного снеготаяния там, где значительна крутизна склонов и присутствует легко смываемый рыхлый грунт. Селевые наводнения характерны для рек Южного Байкала, ряда рек Забайкалья, Алтая, Тывы.

Специфика наводнений на сибирских реках – большое число наводнений, вызванных образованием зажоров, заторов и наледей. В Сибири число заторных наводнений и ущерб, наносимый ими, очень велики, поскольку главные сибирские реки текут в субмеридиональном направлении, что способствует образованию заторов. При малых уклонах реки длина затора может достигать десятков километров. Как правило, заторы в возникают на фоне большой весенней водности при холодной весне в районе заторного участка и интенсивном снеготаянии (5–7 мм/сут) в верхней части бассейна. Наиболее тяжелые последствия возникают при образовании затора на пике весеннего половодья, когда за мощным затором следует высокая волна весеннего половодья. Вместе с тем, не исключена возможность

образования заторов льда значительной мощности в условиях затяжной весны на спаде волны половодья. Заторные наводнения в основном приурочены к речным участкам с большим перепадом отметок продольного профиля реки, к зонам выклинивания кривых подпора от водохранилищ, узлам слияния рек (например, в узле слияния Ангары и Енисея), зонам выхода рек с гор на равнину (Лена, г. Киренск) [1]. Образованию заторов способствует различие в сроках вскрытия рек, текущих в субмеридиональном направлении, пересекающих разные климатические пояса (рр. Енисей, Лена, Яна, Индигирка).

Заторные явления наибольшей повторяемости на реках южной части бассейна Енисея образуются на участках извилистого каньонообразного и почти беспойменного русла. Мощные заторы большой протяженности (20–30 км), вызывающие экстремально высокие подъемы уровней воды (8–10 м), образуются на Лене вследствие задержки вскрытия в местах повышенной толщины и прочности ледяного покрова, на участках стеснения русла островами различных размеров и формы. Формирование заторов нередко происходит под воздействием волны прорыва верхнего по течению заторного скопления. Скорость передвижения волны прорыва может достигать 15 м/с [4].

Зажорные наводнения более редки. Зажорообразование характерно для участков с быстрым течением, которые являются зонами формирования шуги на реках горного и полугорного типа. Вышедшая из берегов вода замерзает и остается в пойме на всю зиму, затрудняя весенние работы на пойме. До строительства ГЭС от наводнений, вызванных зажорами, часто страдал г. Иркутск. После строительства ГЭС опасность таких наводнений существует на границе польньи и кромки льда в нижнем бьефе; в частности, это характерно для участка Енисея между устьями рр. Ангара и Подкаменная Тунгуска. Зажорные наводнения нередко являются предпосылкой образования заторов вследствие повышенной толщины и прочности льда и повышенной зашугованности русла. Особенностью этих зимних наводнений является то, что они, как правило, охватывают одни и те же реки (участки рек), повторяются примерно в одни

и те же сроки. Низкие температуры воздуха и суровые зимние условия усугубляют последствия от таких наводнений.

Всего на реках Сибири насчитывается 507 заторных участков (на 97 из них (19 %) бывают наводнения); 44 зажорных участка (на 3 (7 %) происходили наводнения); 219 заторно-зажорных участков (наводнения известны для 50 (23 %) из них. Больше всего заторных участков в бассейнах Оби, Енисея и Лены, заторно-зажорных -- в бассейнах Оби, Лены, рек, впадающих в оз. Байкал. Зажорных участков значительно меньше и встречаются они в основном в бассейнах Оби и Ангары (рис. 1) [8].

Нередко наводнения обусловлены несколькими причинами одновременно (половодьями и заторами на равнине, таянием снегов и ливневыми осадками в горах). Чаще совмещаются половодные и заторные наводнения. Нередко заторы являются единственной причиной наводнений. Особенностью малых рек Восточной Сибири являются наводнения от наледей.

В устьях рек Сибири возможны нагонные наводнения. На Енисее нагонная волна может в меженный период доходить до г. Туруханск, а у пос. Байкалово (около 400 км от устья) высота нагонов достигает 1,5–2,4 м [13]. Нагоны редко приводят к крупным наводнениям вследствие небольшой численности населения и расположения поселков и хозяйственных объектов преимущественно на высоких берегах.

Более значимой является опасность наводнений, связанная с гидротехническим строительством. Так, в верхних бьефах Ангарского каскада в последние годы участились случаи форсировки уровня выше нормального подпорного горизонта, что, в частности, послужило причиной почти постоянного затопления низко расположенных участков байкальского побережья. С другой стороны, сброс через плотину дополнительных объемов воды, для предотвращения затопления в верхнем бьефе, приводит к затоплению и подтоплению объектов в нижнем бьефе (как это было в Иркутске в 1995 г.). В июне 2006 г. при чрезмерном сбросе на Мамаканской ГЭС были затоплены дома в п. Витим Иркутской области и в Республике Якутия.

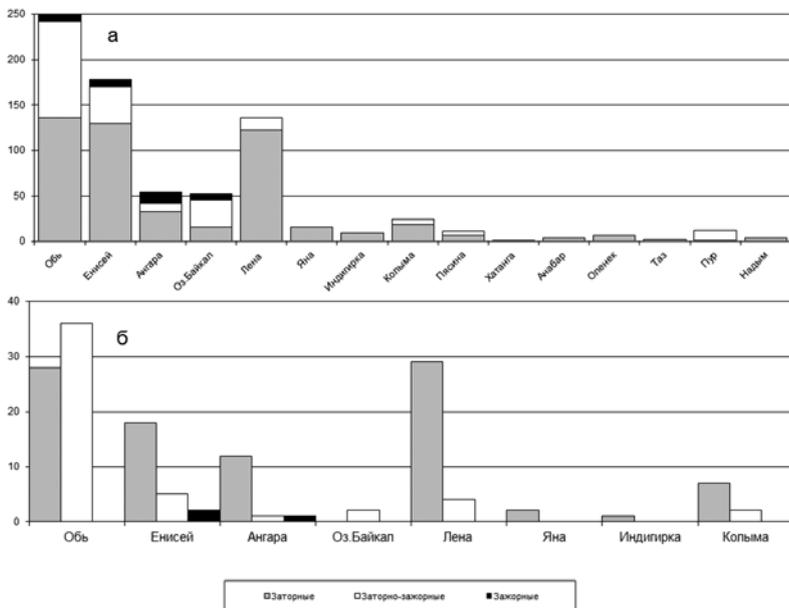


Рисунок 1 – Общее число заторных, заторно-зajorных и зajorных участков крупнейших рек Сибири (а), и участков рек с наводнениями (б)

Особую опасность могут представлять наводнения при повреждении гидроузлов и формировании в нижних бьефах волн прорыва. Затопления, вызванные разрушением плотин, ведут к тяжелым социальным, экономическим и экологическим последствиям. Такие наводнения представляют особую опасность, так как они непредсказуемы и обладают огромной разрушительной силой. Такая опасность существует и для ГЭС Ангаро-Енисейского каскада. Ее реальность доказывает обстановка в нижнем бьефе Красноярской ГЭС в 1988 г. В рассматриваемом регионе имеется несколько крупных гидроэлектростанций, которые находятся в списке потенциально опасных объектов экономики, поскольку они находятся в сейсмоопасной зоне.

Особенности антропогенного воздействия на речные системы. Среди факторов антропогенного влияния на состояние рек

важнейшим является водоотведение. В зависимости от количества и качества отводимых стоков, ассимилирующей способности водотоков и водоемов формируется уровень загрязнения водных объектов. Наиболее существенное негативное влияние на водную среду оказывают неочищенные и недостаточно очищенные сточные воды. В Сибири величина неочищенных стоков составляет около 3 км³/год, что значительно меньше по сравнению с ЕТР, что составляет в среднем 15 % общероссийского объема сточных вод. Доля загрязненных вод в общем объеме водоотведения по региону также меньше по сравнению с их долей для всей страны и составляет 28% [3].

Объем водоотведения в Сибири уменьшались, начиная с 2008 г. с интенсивностью 4–5 % в год. В 2012 г. он возрос в среднем на 3,5 % (около 270 млн м³). По отдельным субъектам Российской Федерации в пределах Сибири он был еще больше – 10–11 % (Республика Бурятия и Иркутская область). Максимальные объемы неочищенных сточных вод поступают в водные объекты в Иркутской (614 млн м³) и Кемеровской (572 млн м³) областях [3].

Анализ динамики водоотведения за 2008–2012 гг. в Сибири показывает исключительно большие нагрузки на речную систему Оби, уровень загрязненности поверхностных вод которой значительно превосходит бассейны Енисея, Лены и оз. Байкал (с р. Селенга). В абсолютных величинах река Обь (включая Иртыш) переносит наибольшее в регионе количество загрязняющих веществ. В составе сточных вод в Обь поступает почти четверть всего объема нитратов, сброшенных в Российской Федерации. Более половины нефтепродуктов, легкоокисляемых органических веществ и нитратов в общий объем стока токсичных веществ Оби вносит Иртыш. Наибольшее число случаев превышения ПДК по нефтепродуктам и фенолам отмечается в воде р. Енисей; по соединениям железа первенствуют северные реки Яна, Надым, Пур и Индигирка; по соединениям меди – рр. Пур и Анабар. Исследования устьевых частей рек Арктического бассейна свидетельствуют, что максимальная масса аммонийного азота, нефтепродуктов и орга-

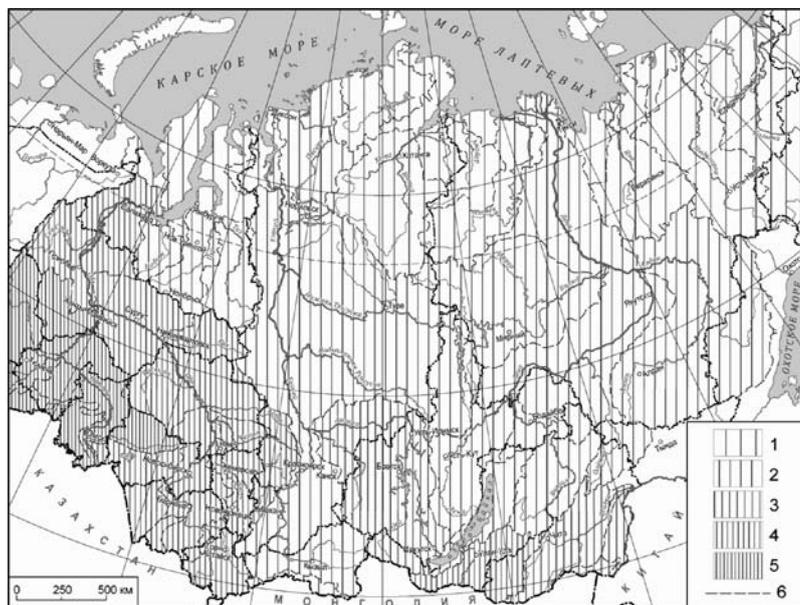
нических веществ переносится водами Енисея, Оби, Надыма, Пура и Таза [5].

Комплексная оценка, учитывающая количественные характеристики сброса недостаточно очищенных и загрязненных вод, показывает, что уровень воздействия на водные ресурсы наиболее высок в Иркутской и Кемеровской областях, также значительно загрязнение сточными водами водных объектов Красноярского края. Наиболее благополучная ситуация с водоотведением характерна для Алтая, Бурятии и ХМАО, где объемы неочищенных стоков относительно малы.

Для определения воздействия косвенных факторов на гидросферу проведены сравнительные оценки демографической, сельскохозяйственной и производственной нагрузок на речные бассейны Сибири. Демографическая нагрузка на водосборы определялась по соотношению численности населения и объема годового стока рек. Сельскохозяйственное влияние оценивалось по доле пахотных угодий (наиболее трансформированные ландшафты) в общей площади бассейна. Воздействие промышленного производства характеризовалось объемом годового валового продукта в отношении к объему годового стока.

Максимальная демографическая нагрузка на природные воды характерна для бассейна Иртыша (рис. 2). Это объясняется ограниченностью водно-ресурсного потенциала и относительно большим населением территории. Несколько меньше воздействие на поверхностные воды в бассейнах Оби и Селенги. Оно еще меньше в бассейне Ангары. На остальных территориях влияние демографического фактора незначительно.

Анализ нарушенности водосборов в результате земледелия выявил наибольшую нагрузку в южных районах бассейнов Оби и Иртыша. Особенно высока она на водосборах р. Алей и озер Кучукское и Кулунда, где сосредоточено производство зерновых культур. Бассейны рр. Ангара и Селенга характеризуются средней степенью земледельческой нагрузки. В бассейне р. Енисей сельскохозяйственное воздействие на природные воды достаточно велико в южных районах (Красноярский край и Хакасия), где развито земледелие и мелиорация.



1 – менее 1; 2 – 1–10; 3 – 11–20; 4 – 21–50; 5 – больше 50;
6 – границы бассейнов

Рисунок 2 – Демографическая нагрузка на водные ресурсы по основным водным бассейнам Сибири (тыс. чел./км³)

Уровень воздействия на гидросферу промышленного производства наиболее высок в бассейнах Оби и Иртыша. Сложившийся промышленный кластер в бассейнах Тобола и Томи дополняется нефтегазодобывающими предприятиями в бассейнах притоков среднего и нижнего течения Оби, формируя комплексный пресс на водные объекты и их водосборные площади. Значительны показатели промышленных нагрузок в бассейнах северных рек: Пур, Пясины и Анабар; водные ресурсы этих водосборов испытывают существенное негативное воздействие от деятельности предприятий горнодобывающей, нефтегазовой и металлургической отраслей. Высокая степень влияния предприятий химической, нефтехимической, металлургической отраслей характерна для Ангары. В бассейнах

Енисея, Селенги, южной части оз. Байкал, Яны и Колымы ситуация это влияние соответствует среднему уровню. Остальная территория макрорегиона испытывает относительно слабое влияние производственного фактора.

Одним из факторов формирования негативной водно-экологической обстановки в южных районах Сибири является трансграничный перенос загрязненных вод в Обь-Иртышском и Селенгинском бассейнах. Вода отдельных рек в этих бассейнах является «загрязненной» (3 и даже 4 класс) уже в пограничных створах [5].

* * *

Богатые водные ресурсы Сибири – стратегически важное экономическое и экологическое преимущество макрорегиона и всей страны. Проведенный анализ гидрологических особенностей сибирских рек позволяет выявить и решать проблемы их изучения, использования и охраны. Особенно важно сохранить надлежащее качество воды, с которым уже сегодня во многих бассейнах Сибири далеко не все благополучно, а также продолжить совершенствование региональных методов расчетов и прогнозов экстремального стока.

Литература

1. Бузин В.А. О наводнениях на реках, вызванных заторами льда // Водные ресурсы, 2000. -№ 5. – С. 524-530.
2. Водные ресурсы России и их использование. Под ред. И. А. Шикломанова. – СПб: ГГИ, 2008. – 508 с.
3. Государственный доклад «О состоянии использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2012 г.». – М.: НИИ-Природа, 2013. – 287 с.
4. Донченко Р.В. Исследования, расчеты и прогнозы зажоров и заторов // Гидрологические прогнозы и предсказания опасных гидрологических явлений / Тр. V Всесоюзного гидрологического съезда. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – Т.7. – С. 267–278.
5. Ежегодник качества поверхностных вод РФ за 2012 год. Гидрохимический институт. – <http://www.ghi.aaanet.ru>
6. Зайков Б.Д. Средний сток и его распределение в году на территории СССР // Тр. НИУ ГУМС, 1946. - Сер. 4. Вып. 24. – С. 1–147.

7. Закономерности гидрологических процессов. Под ред. Н.И. Алексеевского. -М.: ГЕОС, 2012. – 736 с.

8. Каталог заторных и загорных участков СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – Т. II. – 288 с.

9. Корытный Л. М. Классификация рек Сибири по их величине // География и природ ресурсы, 1985. – № 3. – С. 32–26.

10. Корытный Л.М. Бассейновая классификация в природопользовании. – Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2001. – 163 с.

11. Малик Л.К. Природные и антропогенные факторы повреждения гидротехнических сооружений // Известия РАН. Серия геогр., 1995. – № 1.

12. Методы изучения и расчеты водного баланса – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 397 с.

13. Нежиховский Р.А. Наводнения на реках и озерах. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 306 с.

14. Хортон Р.Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. – М.: ИЛ, 1948. – 159 с.

15. Шикломанов И. А., Георгиевский В.Ю. Современные и перспективные изменения стока рек России под влиянием климатических факторов // Водные ресурсы суши в условиях изменяющегося климата – СПб: Наука, 2007. – С. 20–32.

16. Strahler A.N. Hypsonetria (aria-altitude) analysis of erosional topography // Geol. Soc. Amer. Bull. – 1952. -- Vol. 63. – pp. 1117–1142.

Причины наводнений в бассейне Камы и мероприятия по их предотвращению (на примере г. Кунгур)

Двинских С.А., Китаев А.Б., Михайлов А.В.

Пермский государственный университет

Наиболее часто в России наводнения возникают в долинах рек Северного Кавказа, Приморского края, Сахалинской и Амурской области, Забайкалья, Среднего и Южного Урала, притоков Нижней Волги [1, 2, 6, 11–13]. Основные гидрологические риски на реках Пермского края (и в бассейне Камы) также возникают в условиях наводнений.

Наводнения в бассейне Камы. Причиной высоких половодий в бассейне Камы является весеннее снеготаяние при экстремально больших запасах снега или (и) дружном характере весны. За последние 100 лет наиболее высокие половодья формировались в 1902, 1914, 1926, 1957, 1965, 1969, 1979, 1990, 1991 гг. Они сопровождались наводнениями во всем камском бассейне, затоплением освоенной поймы, населенных пунктов и предприятий. Большой ущерб принесло наводнение 1979 г. В Пермском крае от него пострадали 11 городов и 86 небольших населенных пунктов. Вода местами поднималась на 5–11 м, было затоплено 7200 жилых домов, разрушены мосты, размыто 338 км дорог, 11 км дамб, 11 км канализационных сетей, 16 км водопровода, 11 км линий электропередач.

Причиной возникновения наводнений являются и ледовые явления. Максимальные уровни воды нередко формируются и в условиях зажоров на реках Верхней и Средней Камы. На Верхней Каме подъемы уровней достигают при этом 2,0–2,5 м, на Пильве, Кутиме, Язьве, Колве, Яйве, Велве, Обве колеблются от 0,5 до 2,0–2,5 м. Наивысшие подъемы уровня отмечены на р. Чусовой (пос. Кын, 2,8 м), р. Ирень (пос. Шубино, 2,7 м) и р. Сылтава (с. Подкаменное, 3,4 м). Затонные повышения уровней воды часто возникают в зоне выклинивания подпора Камских водохранилищ на притоках Камы.

Опасные изменения ледового режима на реках региона иногда связаны с формированием наледей. Мощный снежный покров обычно препятствует их возникновению и лишь при определенных погодных условиях в начале зимы (сильные морозы при маломощном снежном покрове) возникает перемерзание малых и средних рек, что приводит к формированию наледей. Такие условия существовали, в частности, в 1928, 1937, 1947, 1949, 1966 гг. Зимой 1966–1967 гг. перемерзали почти все малые реки бассейна р. Кама, что создало опасность для гидротехнических сооружений. Толщина наледей на отдельных участках достигала 1,5–4 м. Их наличие и развитие привело к разрушению мостов в гг. Пермь, Чусовой, Лысьва, Чернушки.

В 2006 г. половодье началось 5–11 апреля с подъема уровня воды в рр. Мулянка, Б.Таныш и Буй, на Камском и Воткинском водохранилищах – 16 апреля. Очищение ото льда произошло 9–11 мая, что близко к средним срокам. С 11 мая на Камской ГЭС производились холостые сбросы, которые с 22 мая 5000 м³/с. Максимальная величина расхода воды в нижнем бьефе Камской ГЭС (30 мая) составила 5773 м³/с. Максимальный уровень в нижнем бьефе гидроузла наблюдался 1 июня и достиг 91,57 м, что на 4,88 м ниже критической отметки. В нижнем бьефе Воткинской ГЭС максимальный расход воды наблюдался 31 мая (6907 м³/с). Максимальный приток в Камское и Воткинское водохранилище составил соответственно 9080 и 5905 м³/с. Половодье на реках края в этот период носило двух- и трехпиковый характер. Максимальные уровни воды на реках отмечались в период с 13 по 19 апреля (на юге) и с 13 по 27 мая на реках севера и левобережья Камского водохранилища. Величина максимальных уровней оказалась ниже среднегодовых значений на 0,4–1,8 м (в верховьях Вишеры – была близка к средней величине). При прохождении весеннего ледохода на семи реках Пермского края образовались ледовые заторы. На р. Вильва в целях защиты мостового перехода были проведены предупредительные подрывные работы; другие заторы разрушились естественным путем и не привели к затоплению территории.

Начало активного половодья на реках Пермского края в 2007 г. датируется 30 марта. Половодье на реках проходило несколькими волнами. Отметки уровня воды достигли максимальных значений в верхнем течении Камы, Колвы, Сылва, на малых реках юга территории 19–26 мая. В долинах рр. Яйва, Велва, Усьва и Сылве они превысили среднее значение на 50–90 см (для других рек они оказались ниже средних многолетних отметок). Уровни воды, соответствующие неблагоприятным условиям, на Вишере были превышены 24 мая, на Яйве – 20 мая, на Чусовой – 13 мая, на Сылве – 1 мая. В Воткинском водохранилище (в районе Перми) они существовали в период с 29 апреля по 29 мая, в районе г. Краснокамск – с 14 по 25 мая.

Подтопление жилых домов наблюдалось в г. Александровск, с. Усть-Качка, д. Гамы и в других населенных пунктах. В Перми был подтоплен цех ОАО «Пиломатериалы», в ряде районов краевого центра вода поднялась до уровня фундаментов домов.

Характеристика района исследований. Наиболее часто высокие весенние половодья в Камском бассейне наблюдаются в районе г. Кунгур. Он расположен в месте слияния Сылвы и трех крупных ее притоков – Ирени, Шаквы и Бабки. Происхождение этого речного узла связано с длительным развитием карста и тектоническими движениями земной коры [3].

Бассейн Сылвы находится в юго-восточной части Пермского края. Речная сеть изучаемой территории принадлежит бассейну Каспийского моря. Территорию бассейна отличает сочетание горного (Урал, Предуралье) и равнинного рельефа. В бассейне реки насчитывается свыше 300 прудов, около 400 озер с суммарной площадью зеркала до 20 км², находится 120 болот, общей площадью порядка 66 км². Климат территории имеет ряд особенностей, проявляющихся в распределении температуры воздуха, атмосферных осадков и других метеорологических элементов, обусловленном влиянием Уральских гор.

Водный режим рек рассматриваемой территории характеризуется четко выраженным весенним половодьем, летне-осенними дождевыми паводками и длительной устойчивой зимней меженью. В питании водотоков преимущественное значение имеют снеговые воды. Доля талых вод в суммарном стоке рек южных лесостепных районов достигает 85–90 %. В пределах наиболее возвышенных частей горного Урала, где наряду с твердыми осадками в питании рек велика роль дождей (до 40 %) она значительно меньше (60–65 %). В среднем примерно 25–35 % годового стока формируют подземные воды.

Перед весенним подъемом наблюдается быстрое кратковременное снижение уровня до минимальных отметок, когда русло реки в пределах города очищается ото льда. Весеннее половодье на Сылве начинается в первой декаде апреля. Пик половодья наступает во время ледохода, длящегося 1–5 суток. В это время в окрестностях Кунгура снеготаяние обычно уже завершено

(рис.1). В случае ранней весны начало половодья приходится на конец марта (1961, 1978, 1981, 1983, 1984 и 1986 гг.), а при запаздывании снеготаяния – на вторую половину апреля; Сток реки интенсивно увеличивается в первой декаде мая. Уровень воды в реке достигает максимума раньше или позже в зависимости от температуры воздуха. По данным за 1934–1997 гг. максимумы весеннего половодья наблюдались в промежутке от 3.IV (1961 г.) до 21.V (1940). Спад уровней воды происходит значительно медленнее, чем подъем. Он обычно растягивается на 1–1,5 месяца. В зависимости от времени наступления максимума стока спад уровней воды заканчивается в первой (1975, 1977) или во второй половине мая (1976, 1980, 1982 и 1983 гг.). В отдельные годы он завершался в первой половине июня (1934, 1935, 1956, 1978, 1979, 1981, 1985, 1986 гг.) и даже в июле (1984 г.). Кратковременные похолодания в период снеготаяния сопровождаются формированием сложной многомодальной формы графика $H = H(t)$. От сложности этого графика зависит максимальная годовая отметка водной поверхности. При одном



Рисунок 1 – Пик половодья на р.Сылва (г.Кунгур)

максимуме функции (1979, 1981 и 1987 гг.) подъем уровня мог превышать 7 м и более. В случае бимодальной форме графика этой функции (1959, 1968 и 1980 гг.) максимальное превышение максимальных уровней воды относительно межени составляло 4,5–5,5 м, а при формировании трех максимумов (1935, 1961 и 1984 гг.) – не более 3,5 м. Поэтому реальную угрозу возникновения катастрофических наводнений в г. Кунгур создают лишь однопиковые волны половодья с максимальными отметками уровней воды в конце апреля или в начале мая [4,5].

Выбор берегозащитных сооружений. Защитные дамбы должны быть достаточно высокими для того, чтобы не допустить перелива через гребень. В качестве укрепления применяют железобетонные, сборные и монолитные бетонные плиты, каменные наброски, гибкие тьюфячные покрытия, каменное мощение, габионы, асфальтные плиты, одерновку, посадку кустарников, лесопосадки и посев трав и др. Берегозащитные сооружения подвергаются воздействиям атмосферных осадков, текущей воды, волн и льда. Тот или иной тип укрепления выбирают в зависимости от степени воздействия на откосы этих факторов. От затопления тальми водами город защищают дамбы общей протяженностью около 28 км, высотой до 10 м, шириной по гребню до 6 м (заложение откосов изменяется от 1:0,5 до 1:1,5). Дамбы были построены в середине 1960-х годов в условиях сильно стесненной городской застройки. Защитные сооружения возводились методом «народной стройки» (за предприятиями и организациями города были закреплены участки городской территории, которые ими защищались дамбами, отличающимися по составу грунтов. В дамбы укладывались промышленные отходы, глина, обломки бетонных конструкций (рис. 2, 3). Эксплуатация дамб до середины 1990-х годов велась хаотично, работы проводились только в период весеннего половодья. Основная работа по наращиванию, уширению и укреплению защитных дамб была завершена в 1998–1999 гг. В результате появилась возможность организации свободного проезда автомобилей по гребню дамб.



Рисунок 2 – Каменная наброска. Защитная дамба на р. Ирень (в черте г. Кунгур)



Рисунок 3 – Каменная наброска. Защитная дамба на р. Ирень (ул. П. Морозова, г. Кунгур)

Ежегодно на спаде половодья происходит обрушение и оползание откосов дамб на неустойчивых участках. Причиной

может быть некачественное строительство дамб, их большая высота, и повышенная крутизна откосов. Для предотвращения этих негативных явлений дамбы г. Кунгур превратились в «полигон» для апробации различных типов их креплений. Так, впервые (для Пермского края) для укрепления откосов дамб были применены:

- габионные конструкции (рис. 4),
- геоинъекционные закрепления склонов дамб,
- биологические материалы (сетка из волокна кокоса, биоматы и др.) (рис. 5),
- устройство волногасящего парапета [9].

Габионные конструкции были спроектированы по технологии итальянской компании «Габионы Маккаферри». При закреплении оползневых склонов дамб использовался метод геоинъекций, предложенный Пермской компанией «Габионы». Для «мокрого» откоса он применен впервые. На дамбах нашего региона также успешно применяются биоматы фирмы «Габионы Маккаферри», которые в настоящее время являются одним из основных материалов для закрепления невысоких откосов насыпей, размываемых преимущественно поверхностными



Рисунок 4 – Габионное укрепление берега р. Шаква (в черте г. Кунгур)



*Рисунок 5 – Биотекстильное закрепление берега р.Сылва
(в черте г. Кунгур)*

водами. Эти биологические материалы нашли применение во многих странах мира [10].

Пример укрепления защитной дамбы показывают работы на р. Ирень (в черте г. Кунгур) в 2005 г. (табл.1). Протяженность дамбы 330 м. Она обеспечивает защиту от наводнений для 531 дома с населением 3000 человек. Предотвращенный ущерб – 332 млн руб.

В ряде случаев, особенно при новой застройке, защита освоенной территории от затопления осуществляется с помощью отсыпки грунта. Этот способ экономически оправдан лишь при небольшой высоте насыпи. Стоимость такой защиты обычно в 2–3 раза больше стоимости сооружения защитных дамб.

Руслорегулирующие работы. На практике находит применение такой способ защиты от наводнений, как очищение речных русел. На водопропускную способность Сылвы оказывает накопление на участках реки затопленной древесины, ила и песка, что уменьшает площадь поперечного сечения русла. При удалении этих отложений уровень воды в период макси-

мального стока понижается, уменьшается размыв берегов и зарастание отмелей. Вопросы проведения руслорегулирующих работ и оценка их эффективности на водотоках вблизи г. Кунгур представлены в работах А.П. Лепихина [7] и его коллег [8]. Ими убедительно доказано, что осуществление этих работ позволит снизить вероятность наводнений в этом районе.

Регулирование стока. Наиболее радикальный способ защиты от наводнений – регулирование стока водохранилища-

Таблица 1 – Техничко-экономические показатели защитной дамбы (ОАО «Пермгипроводхоз», 2004 г.)

Показатели	Ед. измерения	Количество
I. Местоположение		
Г. Кунгур, левый берег р. Ирень от ул. Павлика Морозова, д. 7 до ул. Береговая		
II. Берегоукрепительные работы		
Класс сооружения	–	II
Назначение – предотвращение размыва дамбы	–	–
Расчетный уровень (1% обеспеченности в створе №00)	М. Б. С.	120,10
Отметка верхней границы крепления	М. Б. С.	120,84
Протяженность участка крепления	М	330
Тип крепления – откосное	–	–
Материал крепления – каменная наброска, ПГС, геотекстиль	–	–
Укрепление гребня дамбы – камень фракций 70-120 мм	М ³	269
Установка контрольных марок	Шт.	5
III. Экономические показатели		
Стоимость 1-го погонного метра в ценах	Тыс.руб.	9378
Продолжительность строительства	Мес.	3
Общая стоимость строительства в ценах 2003 г. с НДС, в т.ч. СМР с НДС	Тыс.руб. Тыс.руб.	3403,83 2927,21
Стоимость 1-го погонного метра в ценах 2003 г.	Тыс.руб.	10,31

ми. Уменьшение паводковых расходов при этом достигается путем перераспределения стока во времени. Специально создаваемые для борьбы с наводнениями водохранилища создаются с помощью плотин различной высоты и протяженности. Для их устройства используются искусственные и естественные котловины. Между рекой и котловиной сооружается канал, по которому речные воды в половодье направляются в водохранилище, а в межень – в реку. Канал имеет сооружения для регулирования его пропускной способности. На реках с широкими затопляемыми долинами создаются противопаводочные водохранилища – речного или озерно-речного типа, или водохранилища на главной реке и ее притоках. При их проектировании обязательна разработка вариантов расположения горизонтов воды, режимов эксплуатации водохранилищ, оценка эффективности создания водохранилищ. Водохранилища могут стать причиной многих негативных процессов – карстовых, эрозионных, гидрохимических, гидробиологических, изменяющих естественно развивающуюся природную систему. Поэтому необходимо тщательное изучение всего комплекса вопросов их создания. Любая попытка обособленного решения проблемы обречена на неудачу, так как она может не снять, а усилить угрозу наводнений.

Выводы.

1. Причиной высоких половодий в бассейне Камы является весеннее снеготаяние при экстремально больших запасах снега или (и) дружном характере весны.

2. Угроза катастрофических наводнений в г.Кунгур возникает лишь при формировании волны половодья с одним максимумом в конце апреля или в начале мая.

3. В качестве укрепления защитных противопаводковых дамб можно использовать железобетонные, сборные и монолитные бетонные плиты, каменные наброски, гибкие туюфачные покрытия, каменное мощение, габионы, асфальтные плиты, одерновку, посадку кустарников, лесопосадки и посев трав и т.п.

4. Осуществление руслорегулирующих работ позволяет снизить вероятность наводнений за счет увеличения площади

поперечного сечения русла реки и соответствующего понижения уровня воды.

5. Наиболее радикальный способ защиты от наводнений – регулирование стока водохранилищами, расположенными в верховьях рр. Сылва и Ирень.

Литература

1. Акимов В.А., Лесных В.В., Соколов Ю.И. Риски катастрофических наводнений на территории России в начале XXI века: анализ и управление // Оценка и управление природными рисками: материалы Всероссийской конференции «Риск – 2003». – М.: Изд-во Российского университета дружбы народов, 2003. – Т.1. – С.293–298.

2. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы. – М.: Изд-во ООО «ДЭКС-ПРЕСС», 2003. – 352 с.

3. Кадебская О.И., Пятунин М.С. Применение ГИС-технологий при прогнозировании паводка в г. Кунгуре Пермской области // Оценка и управление природными рисками: материалы Всероссийской конференции «Риск – 2003». – М.: Изд-во Российского университета дружбы народов, 2003. – Т.2. – С.14–19.

4. Комлев А.М., Дробышев А.Д., Назаров Н.Н., Пермяков Ю.А., Черных Е.А. Стихийные гидрометеорологические явления в Пермской области // Вопросы физической географии и геоэкологии Урала. – Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 1996. – С.105–112.

5. Комлев А.М. Весеннее половодье в бассейне р.Сылвы и наводнения в г.Кунгуре // Эколого-водохозяйственный вестник, 2001. – Вып.5. – С.95–100.

6. Курбатова А.С., Мягков С.М., Шныпарков А.Л. Природный рис для городов России. – М.: Изд-во НИиПИ экологии города, 1997. – 240 с.

7. Лепихин А.П. К оценке эффективности применения дамб для снижения рисков затопления при прохождении экстремально высоких паводков // Водное хозяйство, 2006. – №6. – С.27–31.

8. Лепихин А.П., Перепелица Д.И., Тиунов А.А. Анализ и обоснование возможных схем защиты г. Кунгура от наводнений // Водное хозяйство России, 2006. – №2. – С.80–93.

9. Михайлов А.В., Китаев А.Б. Защитные и берегоукрепительные сооружения Пермского края. Учебное пособие. – Пермь, Пермский ун-т, 2008. – 175 с.

10. Михайлов А.В., Китаев А.Б. Защитные и берегоукрепительные сооружения Пермского края. Учебное пособие (2-е изд.). – Пермь: Изд-во «ОТ и ДО», 2009. – 142 с.

11. Нежиховский Р.А. Наводнения на реках и озерах. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 184 с.

12. Таратугин А.А. Наводнения на территории Российской Федерации. – Екатеринбург: Изд-во Аэрокосмоэкология, 2000. – 375 с.

13. Эпов А.Б. Аварии, катастрофы и стихийные бедствия в России. – М.: Финиздат, 1994. – 341 с.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ ВОДНОГО ОБЪЕКТА

Дмитриев В.В.

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия*

Целостное представление о закономерностях взаимодействия населения, хозяйства и водных объектов, их биоценозов формируется в междисциплинарной области исследований, называемой в последние годы геоэкологией. В литературе примерно такой же предмет исследований характерен для гидробиологии, водной экологии, гидроэкологии. Биологические аспекты существования «населения» водных экосистем традиционно изучает гидробиология. Мониторинговые наблюдения за компонентами экосистемы позволяют получить информацию о массах или концентрациях компонентов в определенные моменты времени. Эти показатели отражают результат жизнедеятельности экосистемы и лишь частично характеризуют протекающие в ней процессы, поскольку изменение биомасс и концентраций является видимым проявлением сложных процессов обмена веществом и энергией между компонентами системы. В связи с этим, *водная экология* (термин чаще

упоминается биологами) выделилась из гидробиологии, стала самостоятельным разделом общей экологии в результате развития гидробиологии, современных математических методов, информатики, обработки данных на ПК и т.д., а также формального упрощения и моделирования водных экосистем. Ей чаще всего отводится изучение отношений в системе «водный объект – организмы гидробионты». *Гидроэкология* (термин чаще упоминается географами и гидрометеорологами) разрабатывает методологию, изучает возможность и практические пути минимизации негативного влияния гидрологического режима и состояния водных объектов на общество, а также на безопасность жизнедеятельности населения, социальных и производственных объектов в зонах существующей или потенциальной угрозы затопления, подтопления территорий, разрушения сооружений, ухудшения качества воды. Ей же отводится исследование экологической безопасности водных бассейнов и минимизация в них экологических рисков. Современная реальность свидетельствует о широком толковании предмета исследований перечисленных научных направлений. В нашем понимании водноэкологическое и гидроэкологическое направления должны оставаться экологическими по существу и в определённом смысле являются синонимами. Речь может идти лишь о присутствии в них биоцентристской, экоцентристской, геоцентристской или антропоцентристской позиций на изучение водных объектов, или всех одновременно [2–5, 12, 14].

Нами под экологической оценкой понимается параметрическое определение состояний природной среды, обеспечивающих существование сообществ живых организмов, характерных для этих состояний в условиях естественного или антропогенного режимов их развития. Такая оценка сводится к оценке химического, биологического состава и физических свойств природного объекта, обуславливающих устойчивое функционирование в нем конкретных сообществ живых организмов, сохранение определенного типа экологической сукцессии, или к оценке его пригодности для различных видов использования человеком (совмещение био- и антропоцен-

тризма). При этом исследуются как свойства абиотической среды, так и параметры структуры и функционирования экосистем природного объекта в естественных и измененных условиях с целью их рационального использования, оптимальной эксплуатации для удовлетворения потребностей людей и жизни организмов [2–8, 14].

Близкий по смыслу термин – оценка экологического состояния водоема, под которым нами понималась параметрическая оценка его биологического, химического состава и физических свойств, а также факторов на них влияющих, обуславливающих пригодность водоема для жизни организмов-гидробионтов (биоцентризм) или его использование человеком (обществом) для различных целей (антропоцентризм) [8, 12].

Исследования состояния малых озер карельского Приладожья традиционно выполняются нами с конца 1980-х годов ежегодно в рамках производственных практик студентов геоэкологов, гидрологов и научных исследований по грантам [6]. Для анализа состояния систем используются кроме аддитивных характеристик и неаддитивные, среди которых в последнее время чаще других упоминаются интегративность или целостность. В англоязычной литературе это синонимы и в сочетании с прилагательными «биологическая» или «экологическая» образуют «biological integrity» или «ecological integrity», а в русском языке часто переводятся как «биологическая целостность» или «экологическая целостность». Иногда так же называются группы характеристик, отражающих интегративные свойства сложных систем, то есть свойства, присущие системам в целом, а не каким-либо их компонентам («важным», «значимым», «ключевым», «слабым», «аддитивным» и др.) [9].

В современных зарубежных исследованиях ключевыми понятиями являются биологическая оценка (Biological Assessment) и биологическая целостность (Biological Integrity). Биологическая оценка определяется как «состояние природного объекта, на основе биологических исследований и других прямых измерений для оценки состояния обитателей биоты» [13]. В биологических оценках состояние биоты определяют для различных

уровней: структура, таксономический состав, состояние особей и биологические процессы, то есть используется т.н. интегрированный подход (иногда непрофессионально переводят как «интегральный», но этот подход не имеет ничего общего с интегральной оценкой, обсуждаемой в данной публикации). Биологическую целостность (Biological Integrity) западные исследователи обычно определяют, как «способность поддерживать сбалансированное, целостное и адаптивное состояние сообщества организмов, имеющих видовую структуру, разнообразие и функциональную организацию, сравнимую с естественными внутри определенного региона» [13]. В США используется термин «ecological integrity». Как основное понятие он фигурирует в американском экологическом законодательстве («Закон о Чистой воде») и используется Агентством по охране окружающей среды Environmental Protection Agency (EPA).

Биологическая целостность на западе часто рассматривается как способ определения здоровья экосистемы, а «здоровые экосистемы», начиная с трудов Haskell et al. (1991); Meyer (1997); Chessman (2002) [цит. по 13] в основном связывают с ее устойчивостью, и если устойчивость нарушена, то такая экосистема теряет свой исходный (здоровый) статус. Согласно Европейской Рамочной Водной Директивы (Water Framework Directive, WFD), интегральный подход (правильнее перевести интегрированный подход), развивающийся в Европе, основан на следующих принципах: 1 – совместное рассмотрение всех типов геосистем с учетом их взаимодействия; 2 – экосистемный подход к объектам, учитывающий как абиотическую, так и биотическую компоненты; 3 – учет и оценка взаимодействия всех типов природопользования, включая саму экосистему. В задачи этих исследований входит также выделение так называемых «экорегiónов» Европы [13].

Нами показано, что устойчивость является лишь одним из параметров оценки экологического благополучия и что устойчивая экосистема может являться сильно антропогенно-трансформированной системой. В этом случае она не может быть признана благополучной (здоровой) [9–11, 14].

Разработка различных методик оценки устойчивости базируется в основном на индикаторном подходе и индексах состояния, устойчивости, а также моделях-классификациях, подавляющее большинство которых построено на балльном или балльно-индексном подходе [14]. Ценность этих исследований в том, что в них выделяются основные параметры оценки устойчивости, предлагаются оценочные шкалы и обозначается весомость отдельных критериев оценивания. Слабо развита индексология устойчивости. В [10–11] определено, что балльно-индексные системы оценки, с одной стороны, содержат, как правило, хорошую базу оценочных (нумерических, квалиметрических) шкал, которые целесообразно использовать при многокритериальном и интегральном оценивании. С другой стороны, в балльно-индексных подходах эти шкалы, составляющие фундамент «экологической квалиметрии», не используются в явном виде. В них натуральным значениям характеристик ставится в соответствие определенное количество индексов, разрядов и баллов, учитываемых на следующих этапах оценочных построений. При этом иногда случается, что одна и та же шкала у разных авторов характеризуется разнонаправленностью связи i -го параметра с оцениваемым свойством: у одного автора это положительная связь, а у другого, – отрицательная (нелинейность связи не обсуждается). В оценочных исследованиях устойчивости это происходит из-за того, что один автор оценивает адаптационную устойчивость, а другой – регенерационную. Бывает и так, что в одной модели-классификации встречаются первый и второй тип устойчивости одновременно, но автор умышленно допускает или не поясняет причину и необходимость такого сочетания подходов [14].

Материалы и методы. Нормальная (понимаемая как «хорошая») экосистема – это экосистема с оптимальной и разнообразной продукцией (удовлетворяющей экономические и эстетические потребности человека), существующая неограниченно долго в изменяющейся среде [1]. Признаками благополучной водной экосистемы предлагается считать: 1 – оптимальную продукцию ресурсного звена; 2 – оптимальную

биомассу ресурсного звена; 3 – максимальное видовое разнообразие биоты; 4 – высокое качество воды; 5 – высокую устойчивость к изменению параметров естественного и антропогенного режимов; 6 – низкую скорость загрязнения, закисления, эвтрофирования; 7 – высокую скорость самоочищения; 8 – способность сохранять вышеназванные признаки реально неограниченное время [8, 18]. В зарубежной литературе идея оценки экологического благополучия дискутируется под углом зрения «здоровья экосистемы» [15].

Основу, разработанной модели-классификации ЭБ составляют признаки «хорошей» (для человека и организмов-гидробионтов) водной экосистемы и их изменение по пяти классам благополучия. При создании модели нами использовано совмещение антропоцентрического и биоцентрического подходов, в формировании представлений об ЭБ используются аксиология и аксиометрия. Признаки экологически благополучной водной экосистемы, учитываемые в модели: 1 – оптимальная первичная продукция, создаваемая олиготрофными экосистемами; 2 – высокое качество воды; 3 – максимальное видовое разнообразие биоты (по зообентосу); 4 – высокая устойчивость к изменению параметров естественного и антропогенного режимов; 5 – низкая скорость закисления; 6 – высокая скорость самоочищения. Интегральная оценка экологического благополучия (ЭБ) выполняется на основе метода сводных показателей (МСП).

На первом этапе этой оценки отбирается обоснованная система критериев, с использованием которых возможно диагностирование ЭБ. Эти критерии разбиваются на группы, характеризующие указанные выше признаки. Нужно стремиться к тому, чтобы каждый из параметров был необходим, а все параметры (индикаторы) вместе были достаточны для описания качества (состояния) рассматриваемого свойства геосистемы. При этом могут существовать характеристики, увеличение значений которых приводит к ухудшению качества или близки к оптимальному состоянию (*первый мин*), а также характеристики, увеличение значений которых приводит к его улучше-

нию (*второй тип*). Кроме того, возможно существование характеристик, критические значения которых разбивают шкалу изменений характеристики на два интервала с противоположными свойствами влияния переменной на результат оценивания. Одновременно с введением признаков (критериев) оценивания вводятся классы благополучия.

На втором этапе с помощью несложных преобразований устраняется размерность исходных характеристик так, чтобы наилучшим условиям по каждому критерию соответствовало значение равное 0, а наихудшим, равное 1 (или наоборот). Такое преобразование, следуя [17], выполним следующим образом. Для критериев первого типа введем правило перевода в виде:

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 0, & x_i \leq \min_i, \\ \left(\frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i}\right)^\lambda, & (\min_i < x_i \leq \max_i), \\ 1, & x_i > \max_i \end{cases} \quad (1)$$

В (1) принято, что q_i – преобразованное значение из табл. 2; x_i – текущее значение из табл. 2; \min_i – минимальное (фоновое, допустимое, безопасное, предельно-допустимое и т. п.) значение критерия; \max_i – максимальное значение критерия (лучше ориентироваться на региональные, но не абсолютные максимумы критериев). Исследователь должен дополнительно выбрать показатель степени λ , определяющий характер и степень выпуклости нормирующей функции $q_i(x_i)$: при $\lambda > 1$ соответствующая нормирующая функция выпукла вниз, а при $\lambda < 1$ – вверх.

Для критериев второго типа введем правило перевода в виде:

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i \leq \min_i, \\ \left(\frac{\max_i - x_i}{\max_i - \min_i}\right)^\lambda, & (\min_i < x_i \leq \max_i), \\ 0, & x_i > \max_i. \end{cases} \quad (2)$$

Особенно просто построение нормирующих функций, получается при подстановке в формулы (1) и (2) значения параметра $\lambda=1$. Далее мы будем использовать такие простейшие нормирующие функции, учитывая, что выбор линейной нор-

мировки всегда может быть оправдан на первом этапе исследования. Диапазон изменения q_i всегда находится в пределах от 0 до 1. Таким образом, исходные критерии в различных шкалах измерения (абсолютные и средние величины в конкретных единицах измерения, относительные или балльные оценки и т.п.) приводятся к безразмерным шкалам, после чего над их значениями можно производить математические действия с целью получения интегрального показателя ЭБ.

Зададим минимальные и максимальные значения критериев. Для этого, как правило, используются минимальное (\min_i) и максимальное (\max_i) значения из каждой шкалы исходных характеристик. Можно рекомендовать также использовать для этого региональные минимумы и максимумы характеристик.

На третьем этапе выбирается вид интегрального показателя $Q(q, w)$, который строится таким образом, что зависит не только от показателей q_i , но и от их значимости, определяемой весовыми коэффициентами w_i , сумма которых должна равняться 1,0 ($0 \leq w_i \leq 1$). В качестве выражения для интегрального показателя, следуя [17], зададим линейную свертку показателей вида:

$$Q_i = \sum_{i=1}^n q_i w_i, \quad (3)$$

где $i = 1, \dots, n$, n – число критериев оценивания.

На четвертом этапе вводятся оценки весовых коэффициентов w_i . Как правило, уже само составление программы оценочных исследований является первичным «взвешиванием» параметров, компонентов и их свойств. Однако такое взвешивание оказывается недостаточным, так как влияние отобранных главных факторов также неравнозначно, что вызывает необходимость придавать при оценке различным критериям разные приоритеты, веса или коэффициенты значимости. Нередко при этом вес вводится без какого-либо четкого обоснования. В самом простом случае, при равенстве весов исходных параметров, вес определяется простой формулой $w_i = 1/n$.

На пятом этапе для левой и правой границ каждого класса исходной классификации рассчитывается значение Q_i . В ре-

результате выполнения пятого этапа получаем шкалу интегрального показателя по классам состояния при условии равновесного (неравновесного) учета всех параметров оценивания.

На шестом этапе по собранным данным определяется значение интегрального показателя качества жизни в определенный момент времени. Как правило, оценить состояние системы однозначно при покомпонентной оценке не представляется возможным, так как по одному критерию система относится к одному классу состояния, по другому – к другому. Встречаются еще более сложные ситуации, когда разброс значений отдельных критериев укладывается в несколько классов состояния. Это может быть связано как с несовершенством методической базы, так и с недостаточным опытом исполнителя, осуществляющего сбор фондовых, каталожных материалов и статистических данных.

По правилам построения исходной классификации рассчитываются значения интегрального показателя Q_i и, таким образом, по совокупности критериев оценивания система (или ее качество) относится к определенному классу (либо к пограничному состоянию между классами).

Можно таким же образом рассчитать значение интегрального показателя по другим натурным данным или другим моделям-классификациям, учитывающим несколько уровней свертки показателей. В более сложных примерах, учитывающих неполную, неточную и нечисловую информацию, вводятся многоуровневые свертки информации о состоянии природных систем, а весовые коэффициенты задаются на основе моделей информационного дефицита [17]. Сравнение состояния геосистем на интегральной основе дает возможность количественно оценивать пространственно-временные особенности их динамики, степень их трансформации, тенденции их изменения, степень допустимого воздействия на них.

Результаты и обсуждение. Цель исследования – на основе аксиологического подхода и метода сводных показателей (МСП) выполнить интегральную оценку экологического благополучия водоема для летнего периода функционирования

водной экосистемы. Перечень критериев и рекомендации по формированию оценочных шкал и показателям весомости критериев для первого уровня свертки приведены в табл.1.

В табл. 2 и 3 дана характеристика модели-классификации для расчета ИПТ и ИПК. В числителе даны левая и правая границы оценочных шкал, в знаменателе – нормированные значения показателей в соответствии с нормирующими функциями (1) и (2). В табл. 4 сведены все оценочные шкалы первого уровня свертки показателей для оценки ЭБ и шкала ИПЭБ (второй уровень свертки). При построении ИПЭБ на втором уровне

Таблица 1 – Параметры модели и рекомендации по формированию оценочных шкал для интегральной оценки ЭБ

1. Трофический статус водной экосистемы (интегральный показатель трофности)	Оценивался по величине интегрального показателя трофности (ИПТ) для 5 классов трофности (О – олиготрофия; М–мезотрофия; Э – эвтрофия; П–политрофия; Г– гиперэвтрофия) по 4 критериям: 1 – валовая первичная продукция фитопланктона, мг С/л сут; 2 – прозрачность воды, м; 3– отношение прозрачности к глубине [12, 14]; 4 – рН воды в летнее время [12, 14]. При задании весов (приоритетов) при построении ИПТ учитывалось, что: $w_1 > w_2 > w_3 = w_4$. Для расчетов использовались $w_1 = 0,49$; $w_2 = 0,29$; $w_3 = w_4 = 0,11$.
2. Качество воды (интегральный показатель качества)	Оценивалось по величине интегрального показателя качества воды (ИПКВ) для 5 классов качества по 6 критериям: 1 – прозрачность воды (шкала взята из модели-классификации оценки трофности); 2 – удельная электропроводность воды (мк См/см) [16]; 3 – азот NH_4 (мгN/л); 4 – кислород в % насыщения; 5 – гидробиологический индекс ВМWP; 6 – фосфор PO_4 (мгP/л) [12]. При задании весов (приоритетов) при построении ИПКВ учитывалось, что: $w_2 = w_3 = w_4 = w_5 > w_1 = w_6$. Для расчетов использовались равенства $w_1 = w_6 = 0,112$; $w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = 0,194$.

3. Максимум видо-вого разнообразия по индексу Шеннона (H)	Оценивался по авторской шкале по верхнему пределу изменчивости индекса. В процессе построения шкалы было принято, что максимум индекса Шеннона (H) наблюдается в олиготрофных условиях и равен 5,0. По мере увеличения трофности и снижения качества воды значения H равномерно уменьшаются до 0. Принималось, что I – наиболее высокому классу ЭБ, соответствует значение индекса H в пределах 5–4; II классу – 4–3; III классу – 3–2; IV классу – 2–1; V классу – 1–0.
4. Устойчивость (баллы устойчивости по балльной шкале) к изменению естественного и антропогенного режимов	Оценивалась по балльной шкале, которая нормированием переводилась в интегральный показатель устойчивости ИПУ [12, 14]. ИПУ рассчитывался для двух сценариев У1 и У2, в которых оценивалась устойчивость к изменению параметров естественного режима и антропогенному эвтрофированию (У1) или к изменению параметров естественного режима и изменению качества воды (У2). В случае У2 оценивалось только качество воды верхней толщи озера. По классам задавались следующие интервалы баллов устойчивости из балльно-индексной шкалы: 5–11 баллов (макс.уст.) – I класс; 13–16 баллов – II класс; 18–23 баллов – III класс; 25–28 баллов – IV класс; 30–37 баллов – V класс (мин.уст.) [12, 14, 16].
5. Степень закисления воды	Оценивалась по оценочной шкале рН. Принималось, что I-му классу ЭБ соответствует значение рН в пределах 8,5–6,5; II классу – 6,5–6,0; III классу – 6,0–5,5; IV классу – 5,5–5,0; V классу – 5,0–4,5.
6. Скорость самоочищения по времени осветления воды зоопланктоном	Оценивалась по времени осветления воды зоопланктоном (Т) в сутках по авторской шкале. Принималось, что I-му классу ЭБ соответствует значение Т в пределах от 1 до 2 сут, II классу – 2–5 сут.; III классу – 5–10 сут.; IV классу – 10–25 сут.; V классу – 25–50 сут. Методика расчета Т приведена в [12].
Интегральный показатель экологического благополучия (ИПЭБ)	ИПЭБ представляет собой сумму нормированных значений параметров 1–6, взятых со своим весом. ИПЭБ оценивался на втором уровне свертки показателей в предположении о равновесности шести исходных критериев первого уровня.

Таблица 2 – Модель-классификация интегральной оценки трофности водной экосистемы

Критерии	Олиготрофия (макс. ЭБ)	Мезотрофия	Эвтрофия	Политрофия	Гиперэвтрофия (мин. ЭБ)
1. Валовая первичная продукция, мгС/л сут	0,005 – 0,05 0,000–0,0056	0,05 – 0,50 0,0056–0,062	0,50 – 4,00 0,062–0,500	4,00 – 6,00 0,500–0,750	6,00 – 8,00 0,750–1,000
2. Прозрачность воды по белому диску, м	6,00 – 4,75 0,000–0,212	4,75 – 2,50 0,212–0,593	2,50 – 2,00 0,593–0,678	2,00 – 1,00 0,678–0,847	1,00 – 0,10 0,847–1,000
3. Отношение прозрачности к глубине	2,00 – 1,00 0,000–0,503	1,00 – 0,50 0,503–0,754	0,50 – 0,25 0,754–0,879	0,25 – 0,10 0,879–0,955	0,10 – 0,01 0,955–1,000
4. рН воды в летнее время	6,90 – 7,20 0,000–0,143	7,20 – 8,00 0,143–0,524	8,00 – 8,50 0,524–0,762	8,50 – 8,75 0,762–0,881	8,75 – 9,0 0,881–1,000
ИПТ	0 – 0,135	0,135–0,343	0,343–0,622	0,622–0,815	0,815–1,000

Таблица 3 – Модель-классификация для интегральной оценки качества воды

Класс качества	I (макс. ЭБ)	II	III	IV	V (мин. ЭБ)
1. Прозрачность воды, м	3,50–3,00	3,00–0,50	0,50–0,30	0,30–0,10	0,10–0,05
2. Удельная электропроводность, мкСм/см	0–0,145	0,145–0,870	0,870–0,928	0,928–0,986	0,986–1
3. Азот NH ₄ , мгN/л	100–400	400–700	700–1100	1100–1300	1300–1600
4. O ₂ , %	0–0,05 0–0,017	0,200–0,400 0,05–0,20 0,017–0,067	0,400–0,670 0,20–0,40 0,067–0,133	0,670–0,800 0,40–1,00 0,133–0,333	0,800–1,000 1,00–3,00 0,333–1,000
5. BМWP	100–95 200–150	95–80 0,071–0,286	80–70 0,286–0,429	70–60 0,429–0,571	60–30 0,571–1,000
6. Фосфор PO ₄ , мгP/л	0–0,250	0,250–0,500	0,500–0,750	0,750–0,875	0,875–1,000
ИПКВ	0–0,005 0–0,008	0,005–0,03 0,008–0,050	0,03–0,10 0,050–0,167	0,10–0,30 0,167–0,500	0,30–0,60 0,500–1,000
	0–0,122	0,122–0,346	0,346–0,507	0,507–0,667	0,667–1,000

свертки показателей использована гипотеза о равновесности всех шести оценочных критериев первого уровня.

В табл. 5 размещены исходные данные (средние значения или пределы изменения) для расчета ИПЭБ для оз. Суури в 2010–2013 гг [6, 13]. В расчетах использованы данные наблюдений, собранные в период летних (июль) полевых практик студентов на озере в указанные годы. В табл. 6 и 7 приведены результаты расчетов интегральных показателей первого и второго уровней свертки соответственно с учетом равновесности показателей второго уровня. В скобках указан класс и близость к границам между классами для показателей первого уровня и для ИПЭБ (второй уровень). При оценке устойчивости рассмотрен сценарий VI.

Как показали исследования, учет неравновесности весовых коэффициентов на втором уровне свертки не изменил оценочных результатов (табл. 7). Лишь в 2013 г. озеро по величине интегрального показателя перешло в III-й класс (ближе к левой границе).

Заключение. Обобщены существующие подходы к оценке экологического благополучия водных объектов. На основе аксиологического подхода сформулировано представление об экологическом благополучии водоема. Разработаны признаки экологически благополучной водной экосистемы, для которой сформулированы модели-классификации экологического благополучия (ЭБ). В перечень признаков включены: 1 – оптимальная первичная продукция, создаваемая в олиготрофных экосистемах; 2 – высокое качество воды; 3 – максимальное видовое разнообразие биоты; 4 – высокая устойчивость к изменению параметров естественного и антропогенного режимов; 5 – низкая скорость закисления; 6 – высокая скорость самоочищения. Использовано совмещение антропоцентрического и биоцентрического подходов при разработке классификаций и оценочных шкал ЭБ. В соответствии с определением ЭБ предложены репрезентативные критерии оценивания: трофический статус водоема (по содержанию валовой первичной продукции, прозрачности воды по белому диску, отношению

Таблица 4 – Оценочная классификация интегрального показателя ЭБ

Признак	Степень экологического благополучия, классы экологического благополучия				
	высокое I	выше среднего II	среднее III	ниже среднего IV	низкое V
1. Трофический статус водной экосистемы (интегральный показатель трофности ИСТ)	0–0,135	0,135–0,343	0,343–0,622	0,622–0,815	0,815–1
2. Качество воды (интегральный показатель качества ИПК)	0–0,122	0,122–0,346	0,346–0,507	0,507–0,667	0,667–1
3. Максимум видового разнообразия по индексу Шеннона (H)	0–0,200	0,200–0,400	0,400–0,600	0,600–0,800	0,800–1
4. Устойчивость (баллы устойчивости по индексо-балльной шкале) к изменению естественного и антропогенного режимов	0–0,188	0,25–0,344	0,406–0,563	0,625–0,719	0,781–1
5. Степень закисления воды по pH	0–0,500	0,500–0,625	0,625–0,750	0,750–0,875	0,875–1
6. Скорость самоочищения по времени осветления воды зоопланктоном	0–0,020	0,020–0,082	0,082–0,184	0,184–0,490	0,490–1
Интегральный показатель экологического благополучия (ИПЭБ)	0–0,194	0,205–0,357	0,367–0,538	0,548–0,728	0,738–1

Таблица 5 – Исходные данные для оценки экологического благополучия оз. Суури по материалам натуральных наблюдений 2010–2013 гг.

Признак	Годы			
	2010	2011	2012	2013
1. Валовая первичная продукция в подповерхностном слое воды, мг С/л сут	0,0125	0,111	0,28	0,15
2. Средняя прозрачность воды по белому диску, м	1,4	2,01	1,65	1,80
3. Отношение прозрачности к глубине при средней глубине 2,2 м (использовалось среднее значение)	0,64	0,91	0,48	0,82
4. рН воды в летнее время на поверхности (использовалось среднее значение)	6,4–6,9	6,71–7,06	6,45–6,79	7,00–7,40
5. Удельная электропроводность, мкСм/см на поверхности (использовалось среднее значение)	70–76	79,4–87,9	60–66	55–58
6. Средняя концентрация азота NH ₄ , мгN/л на поверхности, среднее	0,143	0,697	0,798	0,219
7. Процентное насыщение воды кислородом на поверхности (использовалось среднее значение), %	104–112	117–151	91-105	93-101
8. Индекс BMWP по зообентосу (использовалось среднее значение)	44–88	51–60	16–41	45
9. Фосфор PO ₄ , мгP/л на поверхности, среднее	0,013	0,003	0,004	0,01
10. Индекс Шеннона (по правой границе предела изменчивости)	3,40–3,68	1,71–2,89	1,77–2,38	1,86
11. Устойчивость в баллах по У1	23	23	26	25
12. Устойчивость в баллах по У2 для поверхн.	26	26	30	30
13. Время осветления воды зоопланктоном, сут	14	4,4	7,1	1,78

Таблица 6 – Оценка экологического благополучия оз. Суури по материалам натуральных наблюдений 2010-2013 гг (первый уровень свертки показателей)

Признак	Годы			
	2010	2011	2012	2013
1. ИПТ	0,301 (Мезотрофия, П)	0,264 (Мезотрофия, С)	0,315 (Мезотрофия, П)	0,296 (Мезотрофия, П)
2. ИПКВ	0,21 (II класс, С)	0,30 (II класс, П)	0,284 (II класс, П)	0,23 (II класс, С)
3. Индекс Шеннона для зообентоса	0,292 (II класс, П)	0,54 (III класс, П)	0,584 (III класс, П)	0,63 (IV класс, Л)
4. Устойчивость в баллах по У1	0,563 (III-IV класс, граница)	0,563 (III-IV класс, граница)	0,66 (IV класс, С)	0,625 (III-IV класс, граница)
5. рН воды	0,463 (I класс, П)	0,404 (I класс, П)	0,47 (I класс, П)	0,325 (I класс, С)
6. Время осветления воды зоопланктоном	0,265 (IV класс, С)	0,069 (II класс, П)	0,124 (III класс, П)	0,016 (I класс, П)

Примечание. Символ справа от номера или название класса означает:

С – ближе к середине класса, Л – ближе к левой границе класса;

П – ближе к правой границе класса.

Таблица 7 – Оценка экологического благополучия оз. Суури по материалам натуральных наблюдений 2010–2013 гг. (второй уровень свертки показателей)

Показатели / год	2010	2011	2012	2013
Интегральный показатель экологического благополучия (ИПЭБ)	0,349 (II класс, П)	0,357 (II класс, П)	0,406 (II класс, С)	0,354 (II класс, П)

прозрачности к глубине и по рН воды в летнее время); качество воды (прозрачность воды, удельная электропроводность, азот NH₄, O₂, ВМWP, фосфор); степень закисления водоема по рН;

видовое разнообразие (по индексу Шеннона); скорость самоочищения водоема (по времени осветления воды зоопланктоном); устойчивость водоема к загрязнению и эвтрофированию (по индексу – балльной шкале).

В основу количественного интегрального оценивания экологического благополучия на основе метода сводных показателей (МСП) положена модель-классификация экологического благополучия для 2 уровней свертки показателей. На 1-м уровне реализовано построение ИПТ, ИПК, ИПУ при неравновесном значении исходных параметров. Выполнены три варианта расчета ИПЭБ. Варианты различаются учетом в модели параметров устойчивости. В первом случае (ЭБ–VI) рассматривается устойчивость к изменению параметров естественного режима и антропогенному эвтрофированию. Во втором варианте (ЭБ–У2п) рассматривается устойчивость к изменению параметров естественного режима и к изменению качества воды на поверхности водоема. В третьем варианте (ЭБ–У2д) рассматривается устойчивость к изменению параметров естественного режима и к изменению качества воды для придонного слоя. Все варианты ориентированы на пять классов оценки устойчивости. На 2-м уровне свертки рассчитывались ИПЭБ при равенстве приоритетов (весовых коэффициентов) и их неравенстве.

Проведена апробация разработанных моделей для оценки экологического благополучия района исследования (оз. Суури). Были реализованы три варианта построения интегрального показателя. По результатам расчетов интегрального показателя экологического благополучия по варианту модели ЭБ–У1 (устойчивость к изменению естественного режима и антропогенному эвтрофированию) значения ИПЭБ практически во все годы попадают в правую границу II-го класса ЭБ водоема (ЭБ «выше среднего»). По варианту модели ЭБ–У2п (устойчивость к изменению естественного режима и к изменению качества воды для поверхности) в 2010 и 2011 гг. значения интегрального показателя ЭБ попадают в правую границу II класса ЭБ (ЭБ «выше среднего»). А в 2012 и 2013 гг. значения интегрального показателя попадают в левую границу III

класса. По последнему варианту модели ЭБ–У2д (устойчивость к изменению естественного режима и к изменению качества воды для придонного слоя воды) значения интегрального показателя ЭБ в период с 2010 по 2013 гг. попадают в правую границу II класса ЭБ (ЭБ «выше среднего»). Только значение ИПЭБ за 2012 г. находится на границе изменения характеристик, соответствующих III классу ЭБ.

Исследования выполнялись при частичной поддержке грантами РФФИ 13-05-10046-к, 13-05-00648-а, 14-05-00787-а.

Список литературы

1. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем. – Екатеринбург: 1994. – 280 с.

2. Гальцова В.В., Дмитриев В.В. Практикум по водной экологии и мониторингу состояния водных экосистем (учебное пособие). – СПб: Наука, 2007. – 267 с.

3. Дмитриев В.В. Интегральные оценки состояния сложных систем в природе и обществе // Биосфера, 2010. – Т.2. – №3. – С.507–520.

4. Дмитриев В.В. Методологические аспекты параметрической оценки состояния природных и антропогенно-трансформированных систем / География и современность. Вып. 10. Сборник статей под ред. В. В. Дмитриева, Д. В. Севастьянова, К. В. Чистякова. – СПб: Изд. СПбГУ, 2005. – С. 21–46.

5. Дмитриев В.В. Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы // Общество. Среда. Развитие, 2009. – №4 (12). – С.146–165.

6. Дмитриев В.В. Современное экологическое состояние водных объектов карельского Приладожья и его сравнение с ретроспективными данными // Ученые записки РГГМУ, 2014. – №33. – С.102–118.

7. Дмитриев В.В. Экологическое нормирование состояния и антропогенных воздействий на природные экосистемы // Вестник СПбГУ, сер.7, 1994. Вып.2 (№14). – С.60–70.

8. Дмитриев В.В. Эколого-географическая оценка состояния внутренних водоемов // Автореф. диссерт. д.г.н. СПб, 2000. – 38 с.

9. Дмитриев В.В., Дмитриев Н.В., Воскресенская В.А., Фролова А.Д., Кожеко Ю.Р. Развитие методологии интегральной оценки экологической целостности геосистем // International Journal of Applied and fundamental research, 2014. – №8. – С. 78–85.

10. Дмитриев В.В., Огурцов А.Н. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. II. Методы интегральной оценки устойчивости наземных и водных геосистем // Вестник СПбГУ, сер.7 (геология, география), 2013. Вып.3. – С.88–103.

11. Дмитриев В.В., Огурцов А.Н. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. I. Интегральная оценка устойчивости наземных и водных геосистем // Вестник СПбГУ, серия 7, 2012. Вып. 3. – С.65–78.

12. Дмитриев В.В., Панов В.Е., Пряхина Г.В. Методические указания по учебно-производственной практике «Экологическое состояние водных объектов». Учебно-метод. пособие. – СПб.: ВВМ, 2010. – 116 с.

13. Дмитриев В.В., Панов В.Е., Пуленко Н.А., Шарафутдинова Г.Ф., Бурцев С.Н., Боброва О.Н., Буршева О.А., Евдокимов А.А., Зезюльчик Т.С., Кашина В.В. Экологическое состояние водных объектов карельского приладожья по результатам экспедиционных исследований 2011 г. и его сравнение с ретроспективными данными // Современные проблемы географии и геоэкологии. Материалы международной научной конференции, посвященной 90-летию почетного профессора СПбГУ, доктора географических наук, профессора А.Г.Исаченко. Под общей ред. Алиева Т.А., Белозерского Г.Н., Дмитриева В.В., Мовчана В.Н., Чистобаева А.И. – СПб.: СПбГУ, 2012. – С.220–233.

14. Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. Учебное пособие. – СПб.: Наука, 2004. – 294 с.

15. Семенченко В.П., Разлуцкий В.И. Экологическое качество поверхностных вод. – Минск:Беларуская наука, 2010. – 329 с.

16. Снакин В.В., Мельченко В.Е., Буковский Р.О. и др. Оценка состояния и устойчивости экосистем. – М.: 1992. – 127 с.

17. Хованов Н.В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците DJVU. – СПб.: СПбГУ, 1996. – 195 с.

18. Alexeeva O.N., Guzheva I.N., Dmitriev V.V. The development of approach to the water reservoir ecological prosperity assessment / 3-rd Symposium «Quality and Management of Water Resources» Saint Petersburg, Russia, June 16-18, 2005. Book of proceedings. Scientific Editors V.V. Dmitriev, V.I. Sergeev Saint Petersburg. – СПб.:Наука, 2005. – pp. 9–17.

**ДИНАМИКА ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ В ЗАПАДНОЙ
СИБИРИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА**

Земцов В.А., Паромов В.В., Копысов С.Г.

Томский государственный университет, Томск, Россия

К гидрологическим опасностям, или опасным гидрологическим событиям, можно отнести такие гидрологические явления и процессы, которые влекут за собой социальный, экономический и (или) экологический ущерб [1], а именно: наводнения, засухи с дефицитом водных ресурсов, опасные эрозионные и русловые процессы, ухудшение качества вод и др. Опасности при этом могут подвергаться природная среда, хозяйственные объекты, населенные пункты и само население. Идентификация опасностей и определение объектов, которым они угрожают, являются необходимыми атрибутами оценки и управления рисками, в том числе гидрологическими. Пример оценки риска показан в [3].

Отметим, что опасные гидрологические явления и процессы можно подразделить на ряд категорий в зависимости от того, в какой степени их проявление зависит от фоновых географических условий. Крайние случаи будут, во-первых, представлять опасности, наиболее тесным образом связанные с местоположением объекта, на который они распространяются (сюда относятся, прежде всего, природные опасности), и, во-вторых, опасности, характеристики которых практически не связаны с окружающими природными условиями (здесь важное место принадлежит опасностям природно-техногенного и

техногенного характера). В первом случае важна зональность природных условий, например, засухи и связанный с ними дефицит водных ресурсов характерны для зон недостаточного увлажнения, для которых дальнейшее уменьшение осадков и рост температуры воздуха крайне неблагоприятны. Во втором случае (когда риски можно назвать азональными) характерно загрязнение рек из точечных источников, особенно при залповых аварийных сбросах.

Для Западной Сибири не характерны крупные природные катастрофы, но опасные события меньшего масштаба вполне вероятны. Вероятность ряда из них может возрастать по мере изменения климата и усиления антропогенного давления. Природа Западной Сибири весьма уязвима к антропогенным воздействиям, последствия которых на фоне происходящих изменений климата могут выступать как элемент положительной обратной связи в механизмах, определяющих изменения не только регионального, но и глобального масштаба (например, деградация многолетней мерзлоты, динамика болот [12]).

Цель исследования заключается в идентификации гидрологических опасностей и обнаружении уже наблюдаемых и возможных в будущем тенденций их усиления в связи с изменениями климата и антропогенными воздействиями на обширной и отличающейся значительным природным разнообразием территории Западной Сибири.

Исследуемый физико-географический регион простирается от южной границы России до Северного ледовитого океана и от Уральских гор на западе до р. Енисей на востоке и имеет площадь 3 млн км² с населением около 15 млн человек. В него входит Западно-Сибирская равнина, западная часть Алтае-Саянской горной области и восточные склоны Уральских гор. Почти вся территория принадлежит бассейну р. Обь, длина которой достигает 3650 км. Около 0,5 млн км² площади в бассейне Оби занимают районы замкнутого стока, откуда вода не поступает в океан. Природные условия отличаются большим разнообразием. Здесь представлены равнинные и горные территории, степень обеспеченности которых теплом и влагой

закономерно меняется с юга на север и по высоте местности, определяя ярко выраженную широтную географическую зональность на равнине и высотную поясность в горах. На равнине с юга на север сменяются степные, лесостепные, лесные, лесотундровые и тундровые ландшафты. Соответствующие этим зонам высотные пояса имеются и в горах.

Континентальный и резко континентальный климат отличается хорошо выраженной сезонностью, определяющей сезонность гидрологического режима территории. На равнинных реках выделяются: 1) весеннее (или весенне-летнее) половодье, 2) летне-осенняя межень, прерываемая в увлажненных районах дождевыми паводками, и 3) очень низкая зимняя межень, когда реки полностью переходят на питание подземными водами. Половодье на реках Горного Алтая проходит в весенне-летний период и формируется за счет таяния снега и ледников. Сток малых рек во многих районах может прекращаться зимой и летом в результате их перемерзания и (или) пересыхания. Реки имеют широкие поймы, частично или целиком затапливаемые во время половодья. Поймы Оби, Иртыша и других крупных рек достигают в ширину десятков километров. Затапливаемая в многоводные годы пойма северной реки Таз занимает, по оценкам [15], до 13,5% от общей площади бассейна 140 000 км².

На приустьевых участках равнинных рек-притоков в половодье практически ежегодно возникают подпорные явления, которые при низких уклонах распространяются вверх по течению на десятки и даже сотни километров, существенно ухудшая условия дренирования водосборных бассейнов и повышая уровни грунтовых вод, что, в свою очередь, способствует прогрессирующему заболачиванию территории [6]. Повышенные уровни воды наблюдаются в тайге почти весь весенне-летний период (3–4 месяца). Лишь после прохождения высоких вод в основных водоприемниках – Оби и Иртыше, начинается обсыхание приречных территорий. Ледовый покров устанавливается на реках зимой на 5–7 месяцев. Вскрытие льда на крупных реках, текущих с юга на север, происходит с образованием большого количества ледовых заторов, вызывающих выше по

течению от этих плотин в русле реки подъем уровней воды и локальные наводнения с частичным или полным затоплением населенных пунктов.

На всей исследуемой территории распространено огромное количество озер различного происхождения и размеров. Половина площади Западно-Сибирской равнины занята болотами разных типов, наибольшее развитие получившими в лесной (лесоболотной) зоне. На севере равнины и в горах распространена многолетняя мерзлота. К северу от Полярного круга мерзлота сплошная, она отсутствует только под руслами крупных рек, южнее мерзлота прерывистая, ее нет под речными руслами и котловинами озер, а еще дальше к югу – спорадическая, обнаруживаемая в основном в болотных торфяниках. На состояние многолетнемерзлых пород определяющее влияние оказывает климат: при его потеплении происходит увеличение глубины сезонного оттаивания грунта, повышение температуры мерзлой толщи и деградация мерзлоты.

Изменения климата. Изменчивость гидрологических процессов зависит, прежде всего, от климатических воздействий. Современные изменения глобального и регионального климата, их гидрологические последствия на территории России и, в частности, Западной Сибири хорошо изучены [5, 7, 8, 11, 13, 14]. Однако гидрологические последствия изменений климата не всегда очевидны. Это обуславливает высокую степень неопределенности в инженерно-гидрологических расчетах для целей строительного проектирования (например, имеющих редкую повторяемость максимальных расходов и уровней воды в реках во время половодий, паводков и меженных минимумов), а также при прогнозировании опасных гидрологических явлений и процессов с разной степенью заблаговременности.

Современные изменения климата в регионе проявляются в повышении приземной температуры воздуха, изменении осадков и увеличении частоты аномальных (часто экстремальных) гидрометеорологических событий. Они нередко носят долговременный характер (до нескольких недель) в связи с образованием устойчивых синоптических структур, блокиру-

ющих западный перенос воздушных масс. В результате экстремальный сток воды формируется практически синхронно в пределах весьма обширных территорий. Примером может быть длительное маловодье 2012 г. в Западной Сибири, когда после сухой осени, аномально малоснежной зимы и засушливого лета с осадками меньше 60 % нормы [4] сток воды р. Томь после экстремально низкого половодья достиг в августе исторического минимума. Максимальный расход половодья Томи у Томска в 2012 г., равный 2750 м³/с (менее 1/3 нормы), по оценкам, исходящим из спорного предположения об однородности ряда во времени, имеет повторяемость не более одного раза за 1000 лет. Уровни воды весной и летом тоже были очень низкими. Пострадали гидроэнергетика, в связи с проблемой наполнения Новосибирского водохранилища на Оби, и судоходство на рр. Обь, Томь и их притоках (рис. 1). Сходная ситуация наблюдается в 2014 г. в Европейской части страны в бассейне Волги.

Анализ многолетних наблюдений за приземной температурой воздуха и атмосферными осадками на 12 метеостанциях (из архива ВНИИГМИ-МЦД [2]), относительно равномерно расположенных по территории Западно-Сибирской равнины, позволяет выполнить оценку произошедших в последние десятилетия изменений приземной температуры воздуха и осадков за климатические сезоны по состоянию изученности процесса на 2013 г. Для анализа изменений температуры воздуха за холодный (XI–III месяцы), теплый (VI–VIII) и переходные (IV–V и IX–X) сезоны использованы данные за 1940–2013 гг. Ряды средних за сезон приземных температур воздуха преобразовывались в значения отклонений от среднего за период 1940–1985 гг. Этот период принят за базовый, для которого отсутствовали существенные климатические изменения. Выбор 1985 г. в качестве граничного объясняется тем, что, по данным [9], 10 самых теплых лет с 1860 г. приходится на период с середины 1980-х годов, а семь из них – на 1990-е годы.

Очевидно, что в Западной Сибири в 1986–2013 гг. наблюдается повсеместное увеличение среднегодовых температур воздуха. Температура короткого весеннего и продолжительного

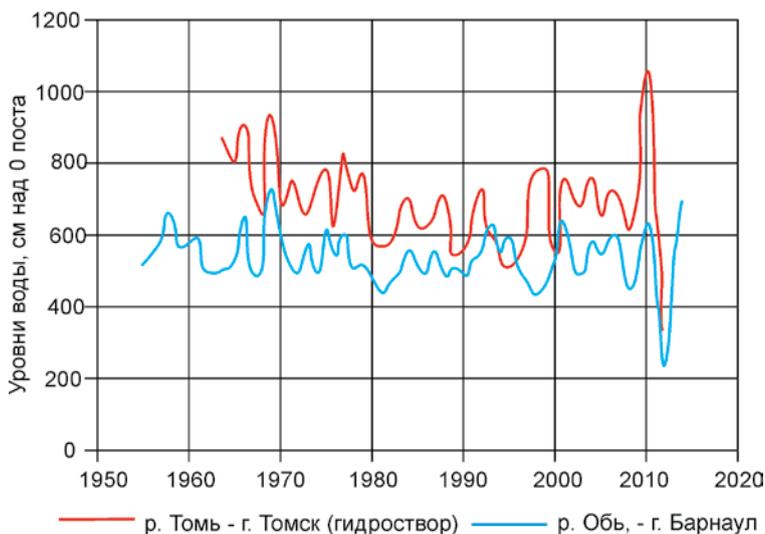


Рисунок 1 – Максимальные уровни воды в период половодья

холодного периода года в основном повышается только южнее 60° с.ш. Температура теплого периода повышается практически повсеместно, а температура осени, наоборот, практически не изменилась (исключение – зоны контакта южной тайги и лесостепи).

Результаты регрессионного анализа доказывают тесную зависимость интенсивности роста температур как отдельных сезонов года, так и среднегодовых температур, от географической широты и долготы. Это подтверждает важнейшую роль природной зональности на исследуемой территории. В целом, можно говорить об общей тенденции к росту интенсивности потепления на территории Западной Сибири с северо-запада на юго-восток. Это верно для среднегодовых температур воздуха, а также температур зимнего и весеннего сезонов. Для летних температур характерна четкая широтная зависимость, связанная с увеличением интенсивность их повышения с юга на север. Для осени тесная зависимость интенсивности потепления от географических координат не обнаружена. Базовый

фактор их изменения – географическая долгота, поэтому проявляется не широтная, а меридиональная зависимость характеристики: по направлению с запада на восток интенсивность роста осенних температур уменьшается.

Направленность изменения сумм годовых и сезонных осадков (базовый период 1966–1985 гг.) не так однозначна, как для приземной температуры воздуха. Тем не менее, закономерности, характерные для Западно-Сибирской равнины, существуют, если в расчет не принимать во внимание данные наблюдений осадков по м/с пос. Тазовский (характерно аномальное увеличение осадков практически для всех периодов года). Анализ результатов анализа показал, что знак и величина тенденции в рядах атмосферных осадков также подчиняется широтной зональности, которая в отдельные сезоны года несколько искажается под влиянием гор Урала и Алтае-Саянской горной области.

Для изменения годовых и весенних (IV–V) осадков явные территориальные закономерности изменения отсутствуют. На метеостанциях наблюдаются разнонаправленные тенденции разной интенсивности. В целом, можно говорить о том, что по состоянию на 2013 г. на исследуемой территории осадки данных периодов стационарны, т.е. примерно равны климатической норме.

Отмечается повсеместное увеличение твердых осадков холодного периода (XI–III) в пределах рассматриваемой территории. Южнее 60° с. ш. наблюдается их более заметное увеличение – в среднем на 15 %, тогда как севернее, оно менее существенное – на 6 % от климатической нормы. Осадки летнего сезона (VI–VIII) в целом стабильны. Выделяется лишь область статистически значимого их снижения на Обь-Иртышском междуречье в центре Западно-Сибирской равнины (м/с Ханты-Мансийск, Александровское, Тобольск, Тара, Барабинск), которое в среднем составляет 12 %. Осадки двух осенних месяцев (IX–X) незначительно увеличиваются в таежной зоне (на 7 % от климатической нормы), а севернее 60° с. ш. испытывают слабую тенденцию к снижению (в среднем на 6 %).

Антропогенные факторы. Гидрологические опасности, в дополнение к обычным природным факторам, вызываются антропогенными нагрузками. Основная часть населения региона сосредоточена в южных районах, в частности, в крупных городах и промышленных центрах, расположенных на берегах рек: Барнаул, Новосибирск, Нижневартовск, Сургут (р. Обь), Омск (р. Иртыш), Новокузнецк, Кемерово, Томск (р. Томь). Фоновые (или площадные) антропогенные воздействия существенно влияют на состояние гидрографической сети и на качество поверхностных вод [16]. На Урале и в Кузбассе развита горнодобывающая и обрабатывающая промышленность. В частности, в Кузбассе (верхняя и средняя часть бассейна Томи, один из крупнейших эксплуатируемых каменноугольных бассейнов мира) в шахтах и глубоких поверхностных разрезах добывается до 60 % общей добычи угля в России. Здесь же на рудниках происходит добыча железной руды. В результате изменения режима грунтовых вод, инженерного преобразования рельефа местности за последние десятилетия практически исчезли сотни малых рек. В Новосибирской, Омской областях и Алтайском крае на равнинах развито земледелие, в том числе орошаемое. Нефтегазодобыча и лесная промышленность преобладает в центральных и северных районах Западной Сибири. Здесь добывается 70 % нефти и 90 % годового объема добычи газа России. Все это определяет высокий уровень антропогенных воздействий на гидрологическое состояние и режим рек и озер региона. В горах Алтая они связаны с развитием скотоводства и туризма.

Для Западной Сибири характерны следующие виды антропогенных воздействий: 1) выбросы в атмосферу; 2) землепользование; 3) горнодобывающие работы (шахты, разрезы, карьеры для добычи полезных ископаемых), приводящие к исчезновению поверхностных водных объектов; 4) уничтожение растительности, распашка земель и другие воздействия, способствующие интенсификации склоновой эрозии, и, следовательно, заилению русел малых рек, их обмелению и в некоторых случаях – исчезновению; 5) избыточное водопотребление

(в засушливых и урбанизированных районах); 6) регулирование стока рек; 7) регулирование речных русел, гидротехническое строительство, вызывающие или интенсифицирующие деформации речных русел и разрушение берегов водохранилищ; 8) стеснение русла и отчленение поймы дамбами, строительство на пойме с повышением ее шероховатости, что изменяет гидравлические особенности движения воды и опасность затоплений; 9) прорывы плотин, перелив воды через паводкозащитные дамбы или разрушение последних, что вызывает локальные наводнения; 10) создание искусственных или изменение существующих водоразделов (профилированные дороги на равнинных территориях (например, на юге Омской области), изменение естественных путей стока воды вдоль дорог и других трасс коммуникаций, что способствует подтоплению земель; 11) загрязнение воды из точечных и рассредоточенных источников.

Гидрологические опасности и тенденции их временной динамики. В табл. 1 показаны наиболее вероятные гидрологические последствия изменения климата в Западной Сибири. Некоторые изменения гидрологического режима представляются вполне благоприятными с экономической точки зрения, например, выравнивание распределения стока воды в реках по сезонам и месяцам в лесной зоне, сходное в общих чертах с регулированием стока водохранилищами (снижение опасности наводнений весной и маловодий зимой и летом), или сокращение продолжительности ледовых явлений.

С другой стороны, в контексте меняющегося климата и растущей антропогенной нагрузки наибольшую угрозу с учетом тенденций их нарастания представляют следующие виды опасностей.

1. Наводнения, вызываемые а) снеготаянием и дождями на водосборной площади весной и в начале лета; б) локальными причинами (ледовыми заторами, зажорами, наледями, прорывом естественных и искусственных плотин, переливом воды через паводкозащитные дамбы или разрушением последних); в) повышением уровня моря и нагонами, другими видами подпорных явлений;

Таблица 1 – Изменения климата, географических условий и их гидрологические последствия в Западной Сибири [17, с изменениями] (опасные тенденции выделены жирным шрифтом)

Изменения климата и физико-географических условий	Гидрологические последствия
1. Повышение приземной температуры воздуха, особенно существенное в северных широтах и в горах	<ul style="list-style-type: none"> - интенсификация гидрологического цикла и увеличение общего речного стока при увеличении осадков в увлажненных районах; - сокращение продолжительности периода ледостава за счет более позднего замерзания и более раннего вскрытия рек и озер; - уменьшение толщины ледового покрова; - усиление повторяемости заторов при вскрытии рек; - деградация ледников в горах
2. Потепление зимних месяцев	<ul style="list-style-type: none"> - повышение уровней грунтовых вод; - увеличение зимнего меженного стока; - некоторое выравнивание стока рек по сезонам
3. Повышение температуры воздуха и уменьшение количества осадков летом	<ul style="list-style-type: none"> - снижение стока рек в летнюю межень вплоть до их пересыхания на юге равнины; - обострение дефицита воды в южных сельскохозяйственных районах степной и лесостепной зон
4. Увеличение (или уменьшение) атмосферных осадков	<ul style="list-style-type: none"> - увеличение (или уменьшение) речного стока
5. Возрастание величины и повторяемости ливневых осадков	<ul style="list-style-type: none"> - увеличение опасности паводков за счет дождей, выпадающих в период половодья, или летних ливней; - рост опасности селей в горах
6. Повышение уровня моря	<ul style="list-style-type: none"> - интенсификация подпорных явлений и затопления местности в устьях рек; - затруднение дренирования (сброса воды) с водосборной площади, повышение уровня грунтовых вод и переувлажнение грунтов, заболачивание территории; - абразия морских берегов

Изменения климата и физико-географических условий	Гидрологические последствия
7. Таяние многолетней мерзлоты, интенсификация термокарстовых процессов	- переобводнение почв; - интенсификация склоновых процессов; - интенсификация эрозии и русловых процессов на реках - рост размеров, количества и миграция озер тундры - возможность миграции и прорыва горных озер

2. Дефицит чистой воды, особенно в засушливых зонах и урбанизированных районах;

3. Динамические явления на поверхности суши: а) опасные русловые процессы (размыв дна и отложение наносов, размыв берегов рек и водохранилищ), включая последствия искусственных воздействий на речные русла и строительства гидротехнических сооружений; б) нарушение устойчивости поверхности водосборов/склонов, ее переобводнение в связи с фазовыми превращениями воды и ее движением (термокарст, миграция озер, сели и др.);

4. Загрязнение воды из точечных и рассредоточенных источников.

По характеру гидрологических опасностей в пределах региона отчетливо выделяются три характерные области: 1) юг равнины (южнее северной границы лесостепи), 2) север равнины, где можно отдельно отметить область распространения многолетней мерзлоты с интенсифицирующимися термокарстовыми процессами, 3) горы и предгорья.

Наиболее интенсивные и часто опасные процессы характерны для гор и предгорных районов. К ним относятся в основном разрушительные наводнения и сели. Примерами такого развития событий являются вызванные обильными летними осадками после длительного жаркого и засушливого периода селевые паводки 2012 г. в горах Алтая. Негативные последствия связаны и с деградацией горных ледников [13]. В предгорных райо-

нах на юго-востоке Западной Сибири наиболее примечательны паводки в апреле 2004 г. в верховьях р. Томь и длительные наводнения на рр. Бия, Катунь и на Оби (у Барнаула) в начале лета 2014 г., когда в реки в период половодья интенсивно поступали дождевые осадки. Частота заторов и вызванных ими наводнений существенно возросла в 2005–2010 гг. на верхних горных участках рек Сибири в связи с более ранним началом половодья в верховьях рек и с увеличением разницы в интенсивности и сроках повышения весенней температуры в южных и северных частях бассейнов [10]. Примером служит заторный максимум уровня воды в р. Томь у Томска в апреле 2010 г., самый высокий за весь период наблюдений с 1964 г. (рис. 1). Можно полагать, что по весьма опасному сценарию развиваются гидрометеорологические процессы в области распространения многолетней мерзлоты, которые охватывают огромные территории и приводят к последствиям глобального масштаба.

Заключение

Гидрологические последствия изменений климата в Западной Сибири отличаются высокой степенью пространственно-временной неоднородности и весьма разнообразны. Как вероятность, так и масштаб негативных последствий от определенных гидрологических явлений и процессов возрастает по мере нарастания климатических изменений и усиления антропогенных воздействий. Имеется ряд опасных гидрологических явлений и процессов, степень риска которых, вероятно, будет возрастать и в дальнейшем. Причины такой динамики гидрологических опасностей, характерные места их проявления требуют углубленного исследования для разработки практических мер совершенствования системы их мониторинга и прогнозирования, а также предотвращения негативных последствий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-05-00700), РФФИ-РГО (№ 13-05-41116-РГО-а) и гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. по договору с Министерством образования и науки Российской Федерации № 14В25.31.0001 от 24 июня 2013 г. (BIO-GEO-CLIM).

Литература

1. Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Христофоров А.В. Мониторинг гидрологических процессов и повышение безопасности водопользования. – М.: Географический факультет МГУ, 2011. – 408 с.
2. ВНИГМИ-МЦД. Специализированные массивы для климатических исследований. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimatеR>. Дата обращения 30.06.2014.
3. Голубева А.Б., Земцов В.А. Оценка опасности и рисков наводнений в г. Барнауле (пос. Затон) // Вестник Томского государственного университета, 2013. – № 373. – С. 183–188.
4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2012 год. – М.: Росгидромет, 2013. – 86 с.
5. Колмакова М.В., Захарова Е.А., Кураев А.В., Земцов В.А., Кирпотин С.Н. Временная изменчивость климата и обводненности территории Западной Сибири по данным метеорологических станций, модельного реанализа и спутниковой альтиметрии // Вестник Томского государственного университета, 2012. – № 364. – С. 173–180.
6. Малик Л.К. Гидрологические проблемы преобразования природы Западной Сибири. – М.: Наука, 1978. – 180 с.
7. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Изменения климата. – М.: Росгидромет, 2008. – Т. 1. – 228 с.
8. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Последствия изменений климата. – М.: Росгидромет, 2008. – Т. 2. – 288 с.
9. Переведенцев Ю.П., Верещагин М.А., Шанталинский К.М., Наумов Э.П., Тудрий В.Д. Современные глобальные и региональные изменения окружающей среды и климата. – Казань: «УНИ-ПРЕСС», 1999. – 96 с.
10. Семенов В.А. Климатообусловленные изменения повторяемости и взаимосвязь опасных гидрометеорологических явлений на Азиатской территории России // Климатология и гляциология Сибири: материалы Международной научно-практической конференции (г. Томск, 16–20 октября 2012 г.). – Томск, 2012. С. 274–276.
11. Groisman P.Ya., Blyakharchuk T.A., Chernokulsky A.V., Arzhanov M.M., Marchesini L.B., Bogdanova E.G., Borzenkova I.I.,

Bulygina O.N., Karpenko A.A., Karpenko L.V., Knight R.W., Khon V.Ch, Korovin G.N., Meshcherskaya A.V., Mokhov I.I., Parfenova E.I., Razuvaev V.N., Speranskaya N.A., Tchebakova N.M. and Vygodskaya N.N. Climate Changes in Siberia. In: P.Ya. Groisman, G.Gutman (Eds) Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences. – Dordrecht: Springer, 2013. – 57–109.

12. Kirpotin S., Berezin A., Bazanov V., Polishchuk Yu., Vorobiov S., Mironycheva-Tokoreva N., Kosykh N., Volkova I., Dupre B., Pokrovsky O., Kouraev A., Zakharova E., Shirokova L., Mognard N., Biancamaria S., Viers J., Kolmakova M. Western Siberia wetlands as indicator and regulator of climate change on the global scale // International Journal of Environmental Studies, 2009. – Vol. 66. – pp. 409–421.

13. Narozhniy Yu., Zemtsov V. Current State of the Altai Glaciers (Russia) and Trends Over the Period of Instrumental Observations 1952–2008 // AMBIO, 2011. – Vol. 40. – Issue 6. – pp. 575–588.

14. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.P., Polishchuk Yu.M., Savichev O.G., Smith L.C. and Chernokulsky A.V. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections, In: P.Ya. Groisman, G.Gutman (Eds) Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences. – Dordrecht: Springer, 2013. – pp. 111–154.

15. Zakharova E.A., Kouraev A.V., Remy F., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. Seasonal variability of the Western Siberia wetlands from satellite radar altimetry // Journal of Hydrology, 2014. – V. 512. – pp. 366–378.

16. Zemtsov V. Ecoregions and the problem of surface water quality objectives indication in the Ob river basin (Siberia, Russia). Proc. of the Int. conf. Hydrology: Science & Practice for the 21st Century, London, V. II. – pp. 226–231.

17. Zemtsov V.A., Paromov V.V., Kopysov S.G., Kouraev A.V., Negrul S.V. Hydrological risks in Western Siberia under the changing climate and anthropogenic influences conditions // International Journal of Environmental Studies. 2014. <http://dx.doi.org/10.1080/00207233.2014.942530> (in print).

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РИСКА И ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ НА ОСНОВЕ ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ

Гельфан А.Н., Мотовилов Ю.Г.

*Институт водных проблем РАН, Москва
hydrowpi@aqua.laser.ru*

Введение

Глобальный экономический ущерб, наносимый наводнениями, вырос за последние десятилетия более чем втрое: с 7 млрд долларов США в год в 1980-е годы до 24 млрд. долларов в год в 2001–2011 годы [14]. Этот рост обусловлен, в первую очередь, социально-экономическими факторами: заселением территорий, подверженных наводнениям, их более интенсивным промышленным и сельскохозяйственным использованием, увеличением расходов на восстановительные работы в районах бедствий, росте страховых выплат, инфляцией и т. п. Однако в последнее время все более значимое влияние на рост ущерба оказывает увеличение частоты экстраординарных, катастрофических наводнений, которых в последнее десятилетие произошло вдвое больше, чем в 1980-е годы [21]. Рост повторяемости катастрофических наводнений связывают обычно с двумя факторами: изменением климата, сопровождающимся ростом числа экстремально влажных и сухих сезонов года [12, 14], а также увеличением антропогенной нагрузки на речные водосборы и реки [9, 15]. Наблюдаемый рост повторяемости катастрофических наводнений дает основания утверждать, что перспективы построения научно обоснованных технологий управления риском наводнений в зависимости от реализации тех или иных возможных сценариев изменений климата и хозяйственной деятельности становятся важными факторами национальной безопасности [3].

Возможности повышения эффективности управления риском наводнений (осуществления мер, позволяющих минимизировать наносимый наводнениями социально-экономи-

ческий и экологический ущерб), связаны, в значительной степени, с развитием комплекса *неструктурных* мероприятий [18]. Неструктурные мероприятия направлены на разработку эффективных методов оценки опасности, риска и возможных размеров будущих наводнений с учетом природных и антропогенных изменений, на повышение заблаговременности и точности прогнозов формирования и развития наводнений в реальном времени. Результаты реализации неструктурных мероприятий создают информационную основу для поддержки решений о выборе, повышении надежности и снижении стоимости комплекса *структурных* мероприятий (строительства водохранилищ, защитных дамб, изменения морфометрии русел и т.п.), которые направлены на обеспечение необходимого уровня безопасности населения, социальных и производственных объектов [20].

Несмотря на то, что оценка риска наводнений и их заблаговременное прогнозирование – разные по постановке и исходной гидрометеорологической информации задачи, их решение может основываться на общей методологической базе – физико-математических моделях формирования стока на речных водосборах и движения воды в речных системах [4]. Физико-математические модели описывают пространственно-временные процессы формирования стока на основании достаточно полных физических представлений с использованием общих законов и зависимостей гидрофизики и гидродинамики. Значения большинства параметров физико-математических моделей могут быть либо заданы из физических соображений, либо найдены с помощью эмпирически установленных соотношений по измеряемым свойствам рельефа, почв, растительности в речном бассейне, что создает принципиальную возможность применения таких моделей в ненаблюдавшихся условиях изменений климата и характеристик водосбора. Кроме того, внедрение в гидрологические расчеты и прогнозы развитых физико-математических моделей формирования стока значительно расширяет возможности использования современной экспериментальной информации, полученной на основе постоянно

модернизируемых измерительных технологий (в т.ч. дистанционных).

За последние десятилетия модели формирования стока различной детальности и структуры в сочетании с базами данных об окружающей среде и геоинформационными системами их обработки стали в экономически развитых странах основным инструментом гидрологических расчетов и прогнозов, связанных с защитой от наводнений, водохозяйственным проектированием, гидротехническим строительством, природоохранными задачами (обзор существующих моделей представлен в монографии [1]). На базе современных технологий моделирования и мониторинга в этих странах в течение последних 10–15 лет осуществлена модернизация систем оценки риска и предупреждения наводнений. В 2007 году после катастрофических наводнений начала 2000-х годов, в странах Европейского союза начата реализация программы управления рисками наводнений, в основу которой положены современные модели и технологии оценки опасности и риска наводнений, их прогнозирования, построения карт потенциально затопляемых зон и карт риска в масштабах порядка 1:5000–1:25000 для паводкоопасных участков всех без исключения речных бассейнов, расположенных в этих странах [11, 19]. Аналогичная программа, устанавливающая стандарты построения карт риска наводнений в США с использованием современных технологий гидродинамического моделирования движения воды в руслах рек, осуществляется Национальной службой погоды [7, 22]. При этом модели и технологии, используемые для оценки опасности и картирования риска наводнений на речных водосборах США, непрерывно совершенствуются [17].

В отечественной инженерной практике для оценки риска катастрофических наводнений используются методы, которые разработанные в 40–50-х годах прошлого века. Эти методы основаны на построении статистических распределений максимальных расходов воды по имеющимся рядам наблюдений за стоком и экстраполяции этих распределений в область малых вероятностей. Использование таких методов означает исполь-

зование гипотезы стационарности рядов наблюдения за стоком. Однако эта гипотеза во многих случаях не выполняется, т. к. физические механизмы формирования катастрофических наводнений существенно отличаются от механизмов формирования обычных наводнений, и условия формирования стока могут значительно меняться вследствие изменений климата и антропогенной деятельности на водосборе. Даже когда условия на водосборе мало меняются, экстраполяция статистических распределений максимальных расходов дает удовлетворительные результаты лишь для периодов повторяемости, не намного реже повторяемости наибольшего расхода за период наблюдений. Возрастание требований к точности оценки возможного экономического и экологического ущерба от наводнений делает также недостаточным предвычисление лишь максимального расхода или уровня воды. Необходим расчет возможного гидрографа стока с помощью современных моделей, что позволяет оценить возможный риск с учетом продолжительности стояния высоких уровней и динамики затопления населенных пунктов и объектов экономики, определить экологический ущерб от наводнения.

Гидрологические прогнозы – другая область неструктурных методов защиты от наводнений, которая активно модернизируется в последние годы в экономически развитых странах путем внедрения современных технологий моделирования и информационного обеспечения. Одним из важных следствий происходящей модернизации стал переход на технологии ансамблевого гидрологического прогнозирования; детерминистические (однозначные) прогнозы заменяются при этом прогнозами возможных ансамблей прогнозируемой величины или соответствующих им вероятностных распределений [10]. Детерминистический гидрологический прогноз не предоставляет пользователям информацию о вероятности его ошибок, в то время как при выборе оптимальных решений при управлении риском наводнений эта информация и оценка ее надежности могут иметь большое значение для повышения экономической эффективности принятия решений [8]. Методы ансамблевого

прогнозирования оказались эффективными для долгосрочных (заблаговременностью от нескольких недель до нескольких месяцев) прогнозов речного стока. С начала 2000-х годов методика ансамблевых долгосрочных гидрологических прогнозов, в том числе с привлечением сезонных прогнозов погоды, стала применяться в нескольких прогностических центрах Национальной службы погоды США. В России сезонные прогнозы весенне-летнего половодья выпускаются сейчас в России с помощью оперативных методик, разработанных, несколько десятилетий назад, на основе детерминистических связей объема стока с измеренными запасами воды в снеге, индексом предшествующего увлажнения и глубиной промерзания почвы. В период их создания эти методики вполне соответствовали существовавшему тогда уровню гидрологической науки и были достаточно обеспечены необходимой оперативной информацией для их использования. Однако сейчас, заблаговременность и детализация долгосрочных прогнозов не в полной мере соответствует современным возможностям гидрологической науки.

Таким образом, в использовании современных научно-технологических достижений для решения указанных выше задач управления риском наводнений в России наметилось отставание от экономически развитых стран. В то же время модели и технологии, используемые за рубежом для оценки риска и прогнозирования наводнений, могут находить лишь ограниченное применение из-за климатических особенностей нашей страны, а также специфики отечественной сети гидрометеорологических наблюдений. Необходима разработка методов оценки рисков и масштабов возможных паводков, а также их прогнозирования, на основе моделей формирования стока, которые бы в полной мере учитывали климатические условия формирования речного стока на паводкоопасных водосборах России и были адаптированы к стандартным данным наблюдений на сети Росгидромета.

Одним из перспективных и интенсивно развивающихся направлений в области применения физико-математических

моделей для расчетов и прогнозов максимального стока является разработка на их основе динамико-стохастических моделей формирования речного стока [2]. В структуре таких моделей объединены два компонента: физико-математическая (детерминистическая) модель, описывающая гидрологические процессы в речном бассейне, и стохастическая модель временных рядов метеорологических величин, задаваемых на входе детерминистической модели. Такое объединение расширяет круг гидрологических задач, решаемых с помощью моделей речного стока, открывая возможности предвычисления его характеристик для огромного разнообразия метеорологических условий и получения на этой основе оценок риска возникновения катастрофических наводнений, превышающих наблюдавшиеся за период инструментальных измерений, а также ансамблевых прогнозов возможных сценариев развития наводнений в реальном времени.

Указанные возможности рассмотрены в статье на примере динамико-стохастической модели формирования речного стока, разработанной в Институте водных проблем РАН и примененной для оценки опасности формирования и долгосрочного ансамблевого прогноза весеннего половодья в бассейне Чебоксарского водохранилища.

Чебоксарское водохранилище – одно из водохранилищ Волго-Камского каскада – заполнено в 1980–1982 г. Общая площадь бассейна составляет 604000 км², частная площадь водосбора бокового притока в водохранилище между створами Горьковской и Чебоксарской ГЭС – 373800 км².

Структура динамико-стохастической модели и результаты ее проверки по данным о притоке воды в Чебоксарское водохранилище

Ниже описаны два основных компонента динамико-стохастической модели: физико-математическая модель формирования стока в бассейне Чебоксарского водохранилища и стохастическая модель гидрометеорологических воздействий на водосбор этого бассейна, и показаны результаты проверки каждого из указанных компонентов модели по данным наблюдений в исследуемом бассейне.

Модель формирования стока в бассейне Чебоксарского водохранилища

В основе структуры разработанной динамико-стохастической модели лежит физико-математическая модель формирования стока в речных бассейнах с распределенными параметрами ЕСОМАГ (ECOLOGICAL Model for Applied Geophysics), созданная Ю.Г. Мотовиловым [16] на базе достижений школы физико-математического моделирования гидрологических процессов Института водных проблем РАН [4]. Модель описывает процессы формирования и таяния снежного покрова, гидротермические процессы в почве при ее промерзании и оттаивании, инфильтрации воды в мерзлую и незамерзшую почву, испарения и эвапотранспирации, стекания воды по поверхности водосбора, подповерхностного и грунтового стока, движения воды в речной системе. Основные уравнения модели ЕСОМАГ, описывающие процессы гидрологического цикла обыкновенными дифференциальными уравнениями, получены путем интегрирования по пространству соответствующих уравнений в частных производных детальных физико-математических моделей.

Пространственная структура модели ЕСОМАГ базируется на принципах ландшафтных единиц. Их структура позволяет отразить пространственные неоднородности рельефа, почв, землепользования, строения гидрографической сети, а также учесть пространственные особенности полей гидрометеорологических воздействий на водосбор. При модельной схематизации речного бассейна его поверхность разделяется нерегулярной сеткой на отдельные ландшафтные элементы с учетом особенностей рельефа, структуры речной сети, местоположения типов почв, растительности, землепользования и т. д. С 2002 года комплекс ЕСОМАГ задействован Федеральным агентством водных ресурсов для моделирования, сценарных расчетов и прогнозирования гидрологических характеристик в бассейне Волги для задач расчетов боковой приточности к водохранилищам Волжско-Камского каскада [13].

Модельная схематизация водосборной площади и речной сети в бассейне Чебоксарского водохранилища выполнена с помощью специализированного геоинформационного комплекса Ecomag extension на основе электронных тематических карт и цифровой модели рельефа с разрешением 1 км. Производилась растеризация этих данных по квадратной сетке с разрешением 2 км×2 км и каждой ячейке сетки присваивались соответствующие значения ее высоты (по рельефу), номера типов почв и ландшафтов. После этого с помощью Ecomag extension строилась модельная древообразная структура речной сети, выделялись линии водоразделов – границы частных водосборов притоков. Информация о характеристиках склоновых элементов и структуре речной сети (рисунок 1) передавалась в ИМК «ЕСОМАГ», где из соответствующих баз данных каждому элементу назначались соответствующие параметры модели.

Модель была калибрована и проверена по данным о боковом притоке воды к Чебоксарскому водохранилищу за период с начала его функционирования в 1982 году по 2010 год. В качестве входов в модель использовались ряды фактических среднесуточных значений температуры и влажности воздуха, суточных сумм осадков за этот период, измеренных на 15 метеорологических станциях в пределах рассматриваемого бассейна. Калибровка модели производилась по данным о расходах воды с 1982 по 1999 годы; проверка модели на независимых данных производилась для периода 2000–2010 годы. Рассчитанные ежедневные расходы воды за весь период сравниваются с соответствующими фактическими величинами на рисунке 2.

В целом, модель позволила с удовлетворительной точностью рассчитать ежедневные расходы воды в реках бассейна по метеорологическим данным наблюдений: среднеквадратическая погрешность расчетов составила порядка 800 м³/с при стандартном отклонении фактических величин около 2100 м³/с.

Стохастическая модель гидрометеорологических воздействий на водосбор («генератор погоды»)

«Генератор погоды» – принятый в климатологии термин для обозначения комплекса стохастических моделей, позво-

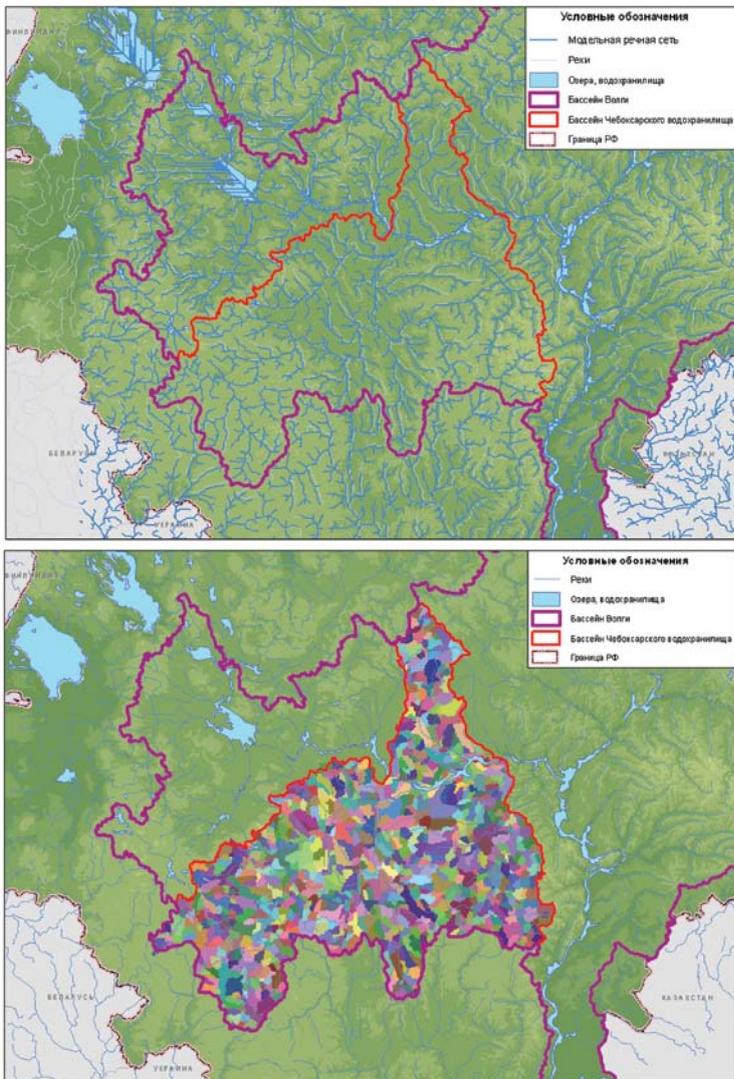


Рисунок 1 – Модельная схематизация речной сети (сверху) и схематизация водосборной площади в бассейне Чебоксарского водохранилища (разными цветами показаны расчетные ячейки)

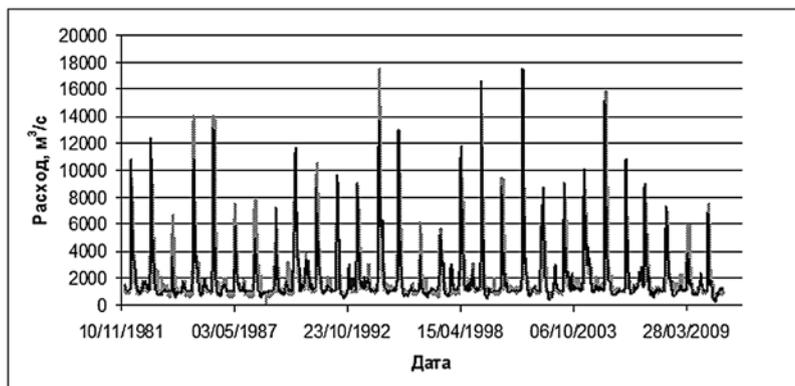


Рисунок 2 – Рассчитанные (черная линия) и фактические (серая линия) расходы бокового притока воды к Чебоксарскому водохранилищу

ляющих получать методом Монте-Карло многолетние искусственные ряды метеорологических переменных суточного разрешения, статистические свойства которых и во времени, и по пространству близки к свойствам наблюдаемых метеорологических рядов.

Генератор погоды, разработанный нами в Институте водных проблем РАН, основан на методе пространственно-временных фрагментов, являющимся модификацией метода фрагментов Г. Г. Сванидзе [6]. Генератор имеет 7 климатических параметров – значительно меньше, чем другие известные модели такого типа (их обзор содержится в монографии [2]), и позволяет с хорошей точностью воспроизвести вероятностную структуру полей метеорологических величин разного временного осреднения.

Параметры генератора погоды для бассейна Чебоксарского водохранилища были оценены методом моментов по данным наблюдений за осадками, температурой и влажностью воздуха за 58 лет (1953–2010) на 15 метеорологических станциях, расположенных в границах водосбора или в непосредственной близости от него. На рисунке 3 в качестве примера показаны

результаты воспроизведения с помощью разработанного генератора погоды статистических характеристик перечисленных метеорологических величин – их средних значений, вариаций и пространственной корреляции – в сравнении с фактическими величинами для каждой из 15 станций. Расчеты показали, что разработанный генератор погоды с хорошей точностью воспроизводит статистические характеристики среднегодовых значений метеовеличин (как показано на рисунке 3), а также среднемесячных и среднесуточных значений.

Оценка вероятности формирования экстремально высоких весенних половодий в бассейне Чебоксарского водохранилища

Алгоритм оценки вероятности формирования экстремально высоких весенних половодий в бассейне Чебоксарского водохранилища заключался в следующем. С помощью генератора погоды были смоделированы искусственные последовательности среднесуточных метеорологических входов в модель ЕСОМАГ длиной 500 лет. Затем по модели рассчитан 500-летний ряд ежедневных расходов воды, по которому получены 500 значений максимальных в году расходов воды, и построена кривая вероятности их превышения. На рисунке 4 эта кривая сравнивается с обеспеченностями фактических величин максимальных расходов, определенными по имеющимся рядам измерений притока воды к водохранилищу, начиная с 1982 года. Здесь же приведена кривая трехпараметрического распределения Крицкого-Менкеля, подобранная по фактическим данным. В таблице 1 сравниваются статистические характеристики максимальных расходов талого стока, полученные по фактическим и рассчитанным рядам. Как видно из рисунка 1 и таблицы 1 разработанные динамико-стохастические модели позволили с удовлетворительной точностью воспроизвести статистические характеристики максимальных расходов воды в области имеющихся наблюдений. Максимальные расходы малой вероятности превышения, рассчитанные с помощью модели, оказались выше, чем полученные путем экстраполя-

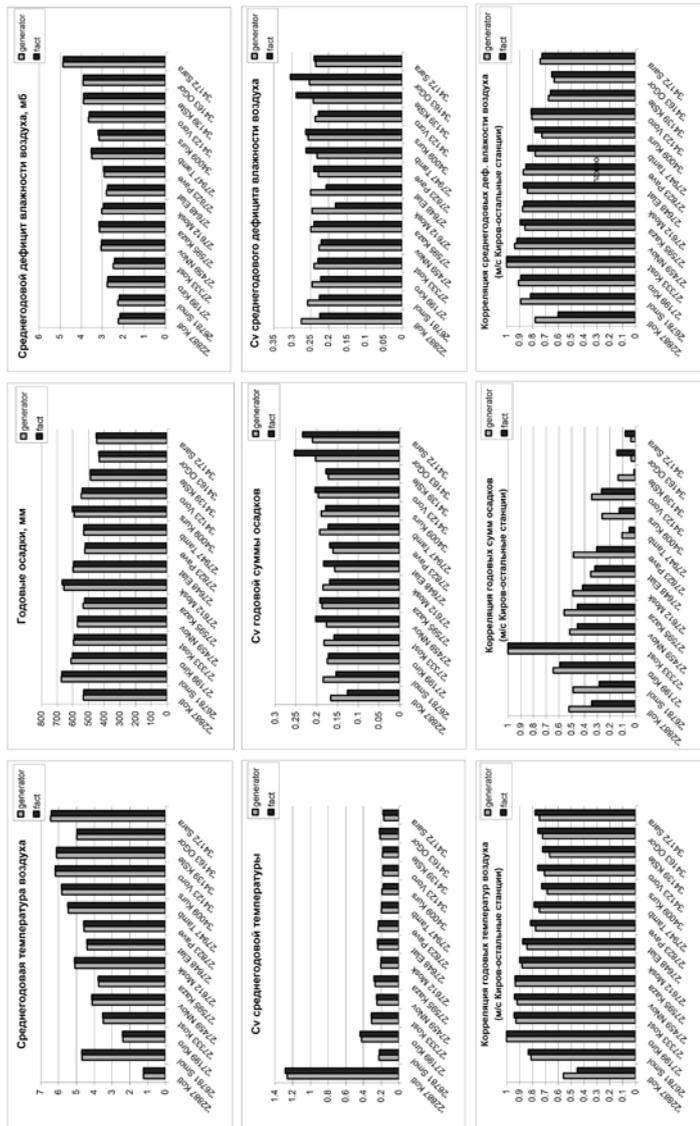
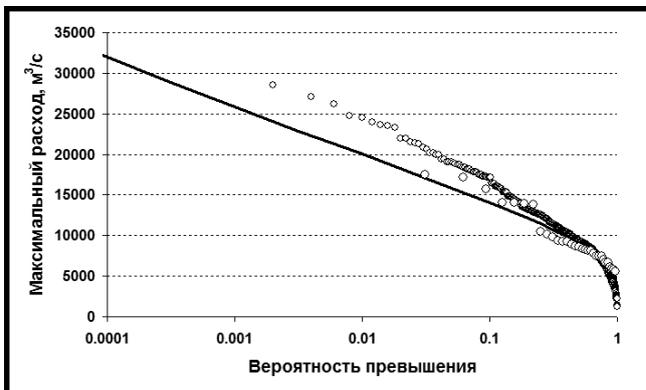


Рисунок 3 – Фактические и смоделированные статистические характеристики среднегодовых значений метеорологических величин



большие точки – наблюдаемые расходы воды; маленькие точки – расходы, рассчитанные с помощью динамико-стохастической модели; кривая – кривая трехпараметрического распределения Крицкого-Менкеля, подобранная по наблюдаемым расходам

Рисунок 4 – Вероятности превышения максимальных расходов весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище

ции кривой Крицкого-Менкеля. Так, смоделированный максимальный расход весеннего притока воды в водохранилище 1%-й обеспеченности получился равным порядка 25000 м³/с, а снятый с кривой – 20000 м³/с. Примерно такая же разница между расходами 0.5%-й обеспеченности. Есть основания полагать, что оценки максимальных расходов повторяемостью 1 раз в 100 лет и реже, рассчитанные с помощью динамико-стохастической модели, надежнее оценок, полученных путем экстраполяции кривой распределения Крицкого-Менкеля, подобранной по данным за короткий период наблюдений (31 год).

Иными словами, опасность формирования экстремально высокого половодья и притока воды в Чебоксарское водохранилище выше, чем это следует из статистической обработки данных наблюдений. Например, наибольший расход за 31-летний период наблюдений (17500 м³/с) имеет повторяемость порядка 1 раза в 11 лет, а не в 30 лет.

Таблица 1 – Статистические характеристики максимального весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище, определенные по ряду наблюдений и рассчитанные с помощью динамико-стохастической модели

Продолжительность ряда максимальных расходов, годы	Среднее, м ³ /с	Ср.кв. отклонение, м ³ /с	Коэфф. вариации	Расчетная повторяемость, годы		
				25000 м ³ /с	20000 м ³ /с	15000 м ³ /с
Фактические данные						
31	9599	3378	0.35	830	100	16
Расчет по модели						
500	10105	3653	0.36	125	27	7

Ансамблевый долгосрочный прогноз весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище

Алгоритм ансамблевого прогноза притока воды к водохранилищу с использованием динамико-стохастической модели формирования стока основан на методике, разработанной в работе [4], и заключается в следующем:

1. По данным метеорологических наблюдений за период с 1 июня предыдущего года по 28 (29 февраля) текущего года моделируются условия на водосборе (запасы воды в снежном покрове, глубина промерзания и влажность почвы, начальный запас воды в русловой сети и др.) на 1 марта – дату выпуска прогноза.

2. С помощью генератора погоды, строится ансамбль из 500 искусственных сценариев погоды в рассматриваемом бассейне. Каждый сценарий представляет собой совокупность временных рядов суточных сумм осадков, среднесуточных значений температуры и влажности воздуха за период с 1 марта по 31 мая, распределенных по площади водосбора.

3. По смоделированным начальным условиям на 1 марта и сценариям метеорологических условий за период заблаговременности прогноза, задаваемым на входе модели, рассчитыва-

ется ансамбль из прогнозируемых гидрографов весеннего притока воды в водохранилище для половодий 1982–2010 годов.

4. По полученным выборкам значений объема и максимального расхода весеннего стока, определенных по ансамблю гидрографов, оцениваются средние значения и стандартные отклонения спрогнозированных характеристик стока и строятся их эмпирические функции распределения для каждого года из проверочного ряда (1982–2010 гг.).

В таблице 2 показаны осредненные по ансамблю из 500 значений величины объема и максимального расхода весеннего притока воды к водохранилищу для каждого года. Отношение среднеквадратических погрешностей прогноза среднего объема и максимального расхода к среднеквадратическим отклонениям соответствующих фактических величин получились равными 0.63 и 0.80.

В качестве иллюстрации представления результатов ансамблевых прогнозов на рисунке 5 приведены функции распределений прогнозируемых характеристик стока y_{np} (объема и максимального расхода), определяемых по полученным ансамблям проверочных прогнозов, и функций распределения наблюдаемых величин $y_{факт}$. Примеры приведены для половодий 1986 года (высокое половодье), 2009 года (низкое половодье) и 2004 года (среднее половодье).

Ординаты интегрального распределения величины y_{np} для j -го половодья из проверочного ряда рассчитываются как

$$F_m(j) = \sum_{i=1}^m f_i(j),$$

$m=1, \dots, M; j=1, \dots, N$ (M – число интервалов вероятностей, на которое разбивается распределение; N – число проверочных прогнозов; f_i – вероятность попадания прогнозируемой величины в заданный интервал), а ординаты распределения величины $y_{факт}$ для того же половодья, как

$$O_m = \sum_{i=1}^m o_i,$$

Таблица 2 – Фактические объемы и максимальные расходы бокового притока воды к Чебоксарскому водохранилищу и их средние значения, определенные по ансамблю спрогнозированных гидрографов стока

Год	Объем притока воды к водохранилищу за III–V, км ³				Макс. расход притока воды к водохранилищу за III–V, м ³ /с			
	Факт.	Средний прогноз	Абс. ошибка	Отн. ошибка	Факт.	Средний прогноз	Абс. ошибка	Отн. ошибка
1982	33.16	34.87	1.72	0.05	9350	11450	2100	0.22
1983	34.97	37.18	2.20	0.06	10100	11850	1750	0.17
1984	20.36	19.48	-0.89	-0.04	6700	5281	-1419	-0.21
1985	41.51	40.14	-1.37	-0.03	13900	13761	-139	-0.01
1986	44.19	43.73	-0.46	-0.01	14000	14460	460	0.03
1987	25.59	28.02	2.42	0.09	7500	8359	859	0.11
1988	29.17	26.02	-3.15	-0.11	7810	7939	129	0.02
1989	26.39	26.94	0.55	0.02	6700	8463	1763	0.26
1990	36.37	42.51	6.14	0.17	8140	13457	5317	0.65
1991	36.59	36.61	0.03	0.00	10500	11106	606	0.06
1992	32.75	32.82	0.07	0.00	8260	10868	2608	0.32
1993	29.99	35.40	5.41	0.18	8870	11080	2210	0.25
1994	49.52	38.79	-10.73	-0.22	17500	12750	-4750	-0.27
1995	37.78	38.12	0.35	0.01	9780	12876	3096	0.32
1996	19.29	26.30	7.02	0.36	6140	7815	1675	0.27
1997	20.66	22.34	1.68	0.08	5570	6371	801	0.14
1998	34.02	34.92	0.89	0.03	9290	10445	1155	0.12
1999	44.86	49.35	4.49	0.10	14100	17540	3440	0.24
2000	29.84	26.30	-3.54	-0.12	9290	7652	-1638	-0.18
2001	44.96	36.57	-8.39	-0.19	17200	12615	-4585	-0.27
2002	29.68	39.28	9.60	0.32	5850	13239	7389	1.26
2003	31.98	29.24	-2.74	-0.09	8310	8462	152	0.02
2004	35.61	33.45	-2.16	-0.06	8540	10581	2041	0.24
2005	47.77	34.48	-13.29	-0.28	15750	11413	-4337	-0.28
2006	30.07	22.95	-7.12	-0.24	8680	6731	-1949	-0.22
2007	28.06	35.22	7.16	0.26	7490	10169	2679	0.36
2008	30.19	28.01	-2.18	-0.07	6990	8090	1100	0.16
2009	22.94	21.83	-1.12	-0.05	5890	6207	317	0.05
2010	25.92	30.81	4.89	0.19	7420	9551	2131	0.29
Сред.	32.90	32.82	-0.09	0.01	9504	10364	861	0.14

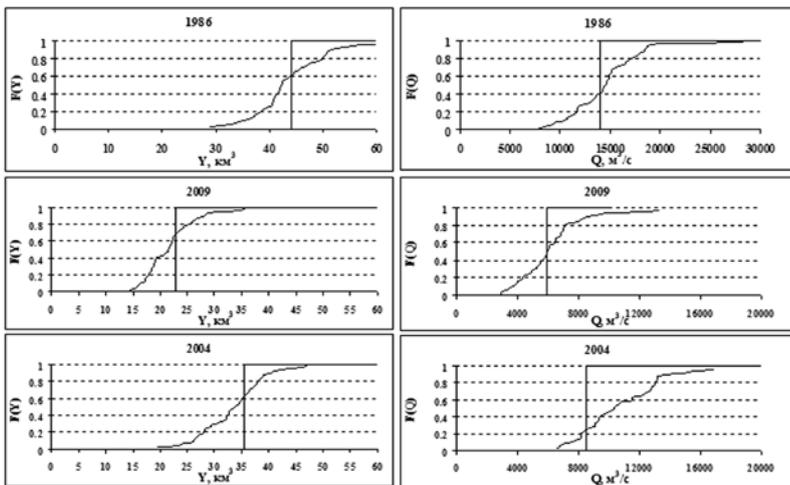


Рисунок 5 – Функции распределения вероятности долгосрочных прогнозов (тонкие линии) объема (слева) и максимального расхода (справа) притока воды к Чебоксарскому водохранилищу в сравнении с функциями распределения фактических характеристик стока (жирные линии) для высокого (1986 г.), низкого (2009 г.) и среднего (2004 г.) половодий

где $o_i = 1$ в интервале, куда попала наблюдаемая величина; в остальных интервалах $o_i = 0$.

По приведенным иллюстрациям можно сделать выводы о, например, доверительном интервале прогнозируемых значений характеристик стока. Так, согласно проверочному долгосрочному вероятностному прогнозу высокого половодья 1986 года его объем с вероятностью 95 % находится в диапазоне от 32 до 58 km^3 (фактический объем в 1986 году был 44 km^3). Для низкого половодья 2009 года 95%-й доверительный интервал прогноза составил 15–31 km^3 (фактический объем в 2009 году – 23 km^3). Для среднего половодья 2004 года 95%-й доверительный интервал прогноза составил 23–44 km^3 (фактический объем в 2009 году – 36 km^3). О хорошей точности прогноза объема стока для этих лет свидетельствует также то, что средний объем стока для этих лет получился близким к фактическому, что также видно из сравнения кривых распределения.

Аналогичный анализ для долгосрочного вероятностного прогноза максимальных расходов дает для этих лет менее точные результаты. 95%-е доверительные интервалы прогнозов равны: в 1986 году от 9100 до 22400 м³/с (фактический максимальный расход в 1986 году – 14000 м³/с), в 2009 году от 3900 до 9700 м³/с (фактический максимальный расход в 1986 году – 5890 м³/с), в 2004 году от 7800 до 14400 м³/с (фактический максимальный расход в 1986 году – 8540 м³/с).

Заключение

В статье показаны возможности применения методов динамико-стохастического моделирования для модернизации существующих подходов к оценке вероятности формирования и долгосрочного прогноза весеннего половодья. На основе физико-математической модели формирования речного стока ЕСОМАГ с распределенными параметрами и стохастического генератора погоды, учитывающего пространственную структуру метеорологических полей, разработана динамико-стохастическая модель притока воды к Чебоксарскому водохранилищу в период весеннего снеготаяния. С помощью модели оценены вероятности превышения расчетных максимальных расходов, и предложена методика долгосрочного (заблаговременностью 3 месяца) ансамблевого прогноза весеннего притока воды в водохранилище, проверенная по данным о фактическом притоке за период 1982–2010 годы.

Список литературы

1. Алексеевский Н.И. Закономерности гидрологических процессов. М.:ГЕОС, 2012. 736 с.
2. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 294 с.
3. Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н., Мотовилов Ю.Г., Калугин А.С. Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне реки Амур: условия формирования, оценка повторяемости, результаты моделирования // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. №2. С. 111–122.
4. Кучмент Л.С. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). М.:РАСХН, 2008. 394 с.

5. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Исследование эффективности ансамблевых долгосрочных прогнозов весеннего половодья, основанных на физико-математических моделях формирования речного стока // Метеорология и гидрология. 2009. № 2. С. 54–67.

6. Сванидзе Г.Г. Математическое моделирование гидрологических рядов. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 311 с.

7. Bates P. D. Integrating remote sensing data with flood inundation models: how far have we got? // Hydrological Processes. 2012. V. 26. №16. P. 2515–2521.

8. Boucher M.-A., Anctil F., Perreault L., and Tremblay D. A comparison between ensemble and deterministic hydrological forecasts in an operational context // Adv. Geosci. 2011. V. 29. P. 85–94. doi:10.5194/adgeo-29-85-2011

9. Bradshaw C.J.A., et al. Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world // Global Change Biology. 2007. V. 13. P. 1–17.

10. Cloke H.L., Pappenberger F. Ensemble flood forecasting: a review // Journal of Hydrology. 2009. V. 375. № 3–4. P. 613–626. doi:10.1016/j.jhydrol

11. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks.

12. Field C.B., et al. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press, 2012. P. 3–21.

13. Gelfan A.N., Motovilov Yu.G. Long-term hydrological forecasting in cold regions: retrospect, current status and prospect. Geographia Compass, 2009, 3(5), 1841-1864.10.1111/j.1749-8198.2009.00256.

14. Kundzewicz Z.W., et al. Flood risk and climate change: global and regional perspectives // Hydrological Sciences Journal, 2013. V. 59. № 1. P. 1–28. doi: 10.1080/02626667.2013.857411

15. Kundzewicz Z.W., et al. Changes in flood risk in Europe. Wallingford: IAHS Press, 2012.

16. Motovilov Yu. G., Gottschalk L, Engeland K., Belokurov A. ECOMAG: Regional model of hydrological cycle. Application to

the NOPEX region. Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series No: 105 ISBN 82-91885-04-4 May, 1999. 88 p.

17. NOAA Partnered Guidelines for the Development of AHPS Flood Inundation Mapping, 2011. http://water.weather.gov/ahps/NOAA_AHPS_Guidelines_Final_2011_v3.pdf

18. Pender G., Faulkner H. Flood Risk Science and Management. Wiley-Blackwell, 2010. 544 p.

19. Review of Flood Hazard Mapping. Flood-site Project Report № T03-07-01. 2008. 54 p.

20. Simonovic S.P. Managing flood risk, reliability and vulnerability // Journal Flood Risk Management. 2009. V. 2. P. 230–231. doi:10.1111/j.1753-318X.2009.01040.

21. United Nations International Strategy for Disaster Reduction. Revealing risk, redefining development. Geneva: UNISDR, 2011. 178 p.

22. Watershed Concepts, Methods and Standards for National Weather Service Flood Severity Inundation Maps, contract report submitted to NOAA National Ocean Service. Charleston, SC, 2006.

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОД В БАССЕЙНЕ РЕКИ СЕЛЕНГА

Е.Ж. Гармаев, Т.А. Борисова, Б.З. Цыдытов, А.А. Аюржанаев

*Байкальский институт природопользования СО РАН
г. Улан-Удэ, Россия (E-mail: Garend1@yandex.ru; tabor@binm.
bscnet.ru; bz61@mail.ru; aaa@binm.bscnet.ru)*

Негативное воздействие вод обусловлено наводнениями (летние паводки, заторы), а также в результате схода селей, формирования наледей. Наводнения являются одним из наиболее распространенных опасных видов стихийного бедствия, представляющими угрозу жизнедеятельности и несущими колоссальный экономический ущерб. Последние чрезвычайные ситуации в России свидетельствуют о недостаточной гидрологической изученности ряда потенциально опасных рек, а также неготовности и неспособности в полной мере соответствующих структур к предупреждению и прогнозированию развития

катастрофических ситуаций, защите населения от негативного воздействия вод.

Для решения данной проблемы представляется необходимым детальное обследование речных бассейнов с выявлением закономерностей развития наводнений, зон затоплений, возможных ущербов, технического состояния существующих защитных сооружений и обоснования строительства новых. При этом современные технологические решения, а именно информатизация полученной информации с возможностью моделирования процесса в развитии явится объективной информационной базой для управления и принятия оперативных грамотных решений по своевременному предупреждению, снижению социальных и экономических потерь и перспективному развитию территории.

Селенга относится к рекам с высокой вероятностью катастрофических паводков. За последние 100 лет здесь прослеживается целая серия крупных наводнений, повторяемость которых в среднем составляет 12–14 %. По официальной статистике наносимые размеры ущербов для Бурятии достигали: в 1971 г. – 1,4 млрд руб., 1973 г. – 0,7 млрд руб., 1993 – 40 млрд руб. (цены периода прохождения наводнений). Данные цифры отражают лишь прямые потери для экономики республики без учета значительных экологических ущербов в результате загрязнения воды от затоплений и подмыва мест свалок, бытовых отходов, кладбищ, скотомогильников и др. Следует обратить особое внимание, что р. Селенга, несущая свои воды в Байкал, в период наводнений подвергает высокому экологическому риску чистоту и безопасность озера.

В связи с вышеизложенным в рамках Федеральной целевой программы был поддержан и выполнен Государственный контракт № И-12-71 на тему «Исследование, прогноз пространственного распределения характеристик водного стока бассейна трансграничных рек Селенга и Чикой и разработка рекомендаций по предотвращению вредного воздействия вод». Целью является: на основе исследований водного режима и русловых процессов трансграничных рек Селенга, Чикой, вы-

явления участков негативного воздействия вод и степени его опасности в конкретных населённых пунктах, разработать обоснованные рекомендации и мероприятия по предотвращению негативного воздействия вод и противопаводковой защите данных населённых пунктов Республики Бурятия.

На начальном этапе в динамике за период 1936–2011 гг. произведен сбор гидрографических параметров, данных уровня режима, максимальных расходов и др., создана единая база данных разносторонней гидрологической информации, включая монгольскую часть. Систематизация всего объема полученной информации позволила в пространственно-временном диапазоне рассмотреть формирование паводковых и заторных наводнений, развития русловых процессов, определить населенные пункты, расположенные в потенциально-опасных зонах. В результате детализированного рекогносцировочного обследования 77 поселений выявлено, что на р. Чикой 12 – периодически подвергаются затоплениям, из них 3 размещены в максимально опасных зонах и на р. Селенга соответственно – 54 и более 19. Инвентаризация 22 существующих гидротехнических сооружений показала, что большинство из них находится в не удовлетворительном состоянии и требуют срочного ремонта или реконструкции. Отметим, что г. Улан-Удэ, а именно его левобережная часть полностью подвергается затоплению и дамбами не защищена. Результаты обследования населенных пунктов и современного состояния гидротехнических сооружений отражены в актах.

Главным результатом работы являлось моделирование зон затопления в пределах населенных пунктов при уровнях наводнений заданной обеспеченности. Оно производилось с использованием программных комплексов HEC-RAS, HEC-GeoRAS и ArcGIS. Исходными данными для построения рельефа послужили результаты гидроморфологических изысканий участков с разбивкой и нивелировкой морфостворов по руслу и пойме. В качестве гидрологической информации использованы расчетные уровни воды в створах населенных пунктов, полученные с помощью кривых обеспеченностей

уровней и расходов воды в гидрометрических постах на рассматриваемых водотоках с использованием графиков $Q = f(H)$. Для населенных пунктов, рассматриваемых в данном проекте и не располагающими гидрометрическими постами, применен метод интерполяции с учетом продольного профиля и падения реки на основе крупномасштабных карт. Этапы моделирования включали задание граничных условий модели – расчетные расходы воды, коэффициенты шероховатости Маннинга для русла и пойменной части в зависимости от типа подстилающей поверхности и решение в HEC-RAS упрощенного одномерного уравнения мелкой воды (уравнение Сен-Венана) с использованием неявной конечно-разностной схемы. Результатом расчетов является уровень водной поверхности в расчетных створах при наводнении. Полученные данные, экспортируются в среду ArcGIS, где происходит автоматическое вычерчивание зон затопления по цифровой модели рельефа.

В итоге получены зоны затопления – при уровнях вод летних паводков 1 %, 5 % обеспеченности, а также максимального уровня при заторных явлениях.

Картографическое отображение зон затопления позволило оценить масштабы негативного воздействия вод в пределах населенных пунктов, определить параметры и перечень объектов и рассчитать вероятностный ущерб.

Анализ негативного воздействия вод показал, что основные проблемы связаны с затоплением жилых и хозяйственных объектов, дорог, коммуникаций, сельскохозяйственных угодий. Так, при паводковых наводнениях 1 % обеспеченности площадь возможного затопления селитебных территорий составляет 4878,54 га и при максимальных заторных – 233,24 га. Процессы берегообрушения наиболее интенсивно развиваются в пределах 24 населенных пунктов, в течение 25 лет может быть потеряно 142,3 га земель поселений. В опасных зонах проживает более 39000 человек, что составляет 4,9 % населения всего бассейна.

Расчеты ущерба, стоимости рекомендованных защитных сооружений и мероприятий, их эффективности выполнены по методике оценки вероятностного ущерба от вредного воздей-

ствия вод и оценки эффективности осуществления превентивных водохозяйственных мероприятий, ВИЭМС, 2006.

Расчеты показали, что суммарный социально-экономический ущерб от паводков 1% обеспеченности на реках Селенга и Чикой составляет: 35552,364 млн руб., в том числе для территорий и объектов – 18464,087 млн руб. и населения – 1851,552 млн руб. Отметим, что только для Муниципального образования города Улан-Удэ он может достигать 27323,610 млн руб. Кроме города в опасных зонах размещены следующие крупные промышленные поселения и административные центры: Наушки (329,46 млн руб.), Кабанск (1342,61 млн руб.), Ильинка (944,56 млн руб.), Сотниково (435,824 млн руб.), Нижний Саянтуй (415,509 млн руб.), Поселье (1408,27 млн руб.) и др. Ущерб от заторных наводнений составляют 1019,181 млн руб. и вследствие размыва и обрушения береговой линии на 25 лет – 147577,392 тыс. руб.

В процессе комплексного рассмотрения типа поселения его социально-экономического развития, суммарных наносимых ущербов, уровня ЧС, существующего состояния гидротехнических сооружений обоснованы и предложены рекомендации проведения определенных мероприятий по инженерной защите от негативного влияния вод для 54 населенных пунктов. Для этого требуется строительство и реконструкция дамб протяженностью 172,104 км, строительство и капитальный ремонт берегоукрепления соответственно – 33,971 км и дноуглубление – 11,614 км общей стоимостью проектируемых работ 5804247,36 тыс. руб. Однако расчеты экономической эффективности показали, что целесообразность проведения мероприятий экономически выгодна не для всех поселений.

Таким образом, на основании проведенных исследований и результатов расчетов экономической эффективности, анализа Федеральной и Республиканской целевых программ, в отдельных случаях с учетом реально существующей ситуации разработана Программа реализации предлагаемых нами мероприятий. В целом всего для 26 территориальных участков поселений требуется инженерная защита от затопления с учетом

объединения отдельных прилегающих 3-х поселений к г. Улан-Удэ и 9 сел Кабанского района. В 4-х населенных пунктах, в пределах которых берег подвержен интенсивному размыву и обрушению, выполнение защитных мероприятий экономически целесообразно, однако в 5 – является необходимым.

Итак, первоочередное проведение мероприятий предложено для 13 населенных пунктов, во вторую очередь – 7 и в третью – 11. При общих затратах 5578904,843 тыс. руб. предполагается, что будет предотвращен вероятностный ущерб в размере 36121,136 млн руб., в том числе от затопления и заторов – 36036,331 млн руб. и берегообрушения – 84804,53 тыс. руб. Защита населения – для 38169 человек.

В заключение необходимо отметить, что в рамках данной работы по ФЦП детально рассмотрены только 2 основные реки бассейна Чикой и непосредственно сама Селенга. Безусловно, не полное включение других важных притоков Уда, Джиды, Хилюк не могут дать полной обобщающей картины по всему бассейну. Сложностью исследования являлось рассмотрение формирования паводков в бассейне, поскольку не включенные притоки дают большой привнос воды и значительно влияют на прохождение наводнений на Селенге. Хотелось бы надеяться, что продолжением данного исследования по апробированной методике станет весь бассейн р. Селенга, включая его монгольскую часть.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОЗЕР ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ

Ефимов В.А.

*МГУ имени М.В.Ломоносова, кафедра гидрологии суши, 3 курс,
Roxifixat@yandex.ru*

Гидролого-гидрохимические исследования озёр проводились в рамках комплексной экспедиции НСО кафедры гидрологии суши, проходившей на Беломорской биологической станции МГУ им. Н. А. Перцова с 26 января по 6 февраля 2014 г. В окрестностях станции расположены как пресноводные озе-

ра, так и несколько водоёмов, отделившихся от Белого моря в результате постоянного поднятия его западного побережья. Озера характеризуют все стадии отделения от моря, что, в условиях схожести их размеров и морфометрических характеристик, позволяет выявить особенности их гидрологической эволюции.

По результатам гидрохимических исследований были выделены 3 группы озёр. Первая группа – пресноводные водоёмы, давно утратившие связь с морем и имеющие смешанное питание атмосферными, поверхностными и грунтовыми водами. Для озёр данной группы характерна минерализация воды менее 100 мг/л, слабокислая или нейтральная реакция среды, высокая цветность и значительное содержание биогенных элементов. Озера, отнесенные ко второй группе, характеризуются частым поступлением морских вод, вследствие чего вся их водная толща имеет солёность 26–27 ‰, которая увеличивается с глубиной. Химический состав воды озёр аналогичен составу беломорских вод. Третья группа – меромиктические озера, ярким примером которых могут служить озера Трёхцветное и Н. Ершовское. Оз. Трёхцветное имеет «трёхслойную» структуру. В нем выделяются слои с различной минерализацией – от 1,5 г/л на поверхности до 20 г/л на дне с градиентом в хемоклине более 10 г/л на 1 м. Сероводородный слой повышенной солености, образовавшийся в результате интрузии морской воды, характеризуется высокими концентрациями минерального фосфора (до 2,5 мг/л), составляющего 100 % его валового содержания. В хемоклине обнаружено развитие эвгленовых водорослей, обусловившее увеличение рН на фоне монотонного уменьшения этого показателя от поверхности ко дну. Общей чертой всех исследованных озёр в зимний период является низкое содержание в воде растворённого кислорода и его полное отсутствие в гипolimнионе.

На примере меромиктических озёр западного побережья Кандалакшского залива можно наглядно изучать процессы трансформации вещества и энергии, происходящие в результате отделения морских акваторий. Изучение этих озёр позволит

спрогнозировать развитие подобных процессов в водоёмах, искусственно отделяемых от моря.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ГИПЕРПРИЛИВНОГО УСТЬЯ РЕКИ ПЕНЖИНА

***Горин С.Л.¹, Коваль М.В.², Сазонов А.А.³ (студент 4 курса),
Терский П.Н.³***

1 ФГУП «ВНИРО», в.н.с., gorinser@mail.ru

2 ФГУП «КамчатНИРО», зав. отд.

3 МГУ имени М.В.Ломоносова, кафедра гидрологии суши

В августе 2014 г. состоялся первый этап исследований гидрологического режима устьевой области реки Пенжина, проводимых при поддержке гранта РФФИ № 14-05-00510. В экспедиции участвовали специалисты из ВНИРО, КамчатНИРО и МГУ имени М. В. Ломоносова. В ближайшее время (летом 2015 г. и зимой 2016 г.) планируется проведение еще двух этапов исследований.

Устьевая область реки Пенжина занимает особое место среди устьев рек России, поскольку она находится под влиянием рекордных для нашей страны приливов, величина которых, по некоторым оценкам, может достигать 13 м и более. Поэтому сведения о гидрологическом режиме этого объекта представляют большой интерес для тех разделов науки, исследования которых связаны с зоной взаимодействия речных и морских вод.

Полевые исследования в устье реки Пенжина в августе 2014 г. проводились с использованием различных комбинаций традиционных методов: гидрологических съемок, суточных станций, постановок приборов на автономную работу (в буйковых, донных и береговых вариантах) и др. В результате было установлено следующее. Величина приливов в вершине Пенжинской губы изменялась от 5 м в квадратуры до 8–10 м в сизигии. Расходы воды в реке Пенжина колебались между 700 и 800 м³/с (для сравнения: средняя многолетняя норма речного

стока в августе составляет $888 \text{ м}^3/\text{с}$, а в целом за год — $682 \text{ м}^3/\text{с}$). По особенностям гидрологических процессов в устьевой области реки Пенжина выделялось три района. Первый из них находился в нижней части речного русла. В его пределах влияние морских приливов ощущалось в соответствующих колебаниях уровня (до 50 км от устьевого створа), а также в периодическом появлении обратных течений (до 20–30 км от УС) и проникновении осолоненных вод из верхней части Пенжинской губы (до 5–10 км от УС). Относительно небольшая протяженность этих гидрологических зон, скорее всего, объясняется достаточно большим уклоном речного русла и наличием в нем нескольких значительных перекаатов. Второй гидрологический район устьевой области охватывал северо-восточную часть Пенжинской губы (от устьевого створа реки до о. Аппапель, рис. 1). Для этого района были характерны те же величины приливных колебаний уровня, что и в более открытой части губы. Соленость воды в нем периодически изменялась от 0 до 6–9‰ около устья реки и от 0–4 до 11–16‰ около о. Аппапель. Следует отметить, что, благодаря постоянным ветрам, водная толща в этом районе была хорошо перемешана. Направление течений в северо-восточной части губы изменялось в полном соответствии со сменой фаз приливов. При этом максимальные скорости прямых и обратных течений превышали 1 м/с. Третий гидрологический район устьевой области охватывал северную



- 1 — с. Манилы (12 км от устьевого створа реки Пенжина); 2 — с. Каменское (66 км от устьевого створа реки Пенжина); 3 — с. Парень;
 4 — о. Аппапель (23 км от устьевого створа реки Пенжина);
 5 — м. Этаучью; 6 — м. Валижген; 7 — м. Обрывистый

Рисунок 1 — Устьевая область реки Пенжина

часть Пенжинской губы, расположенную мористее о. Аппапель (рис. 1). В отличие от относительно закрытой северо-восточной части губы, в обсуждаемом районе была обнаружена значительная пространственная неоднородность в распределении водных масс. По-видимому, это явление было связано со следующим. В прилив морская вода начинала проникать в этот район вдоль восточного берега губы. Спустя некоторое время она затекала в северо-восточную часть губы южнее о. Аппапель (рис. 1). Благодаря этому, опресненная вода, накопившаяся в губе во время отлива, сначала отжималась к ее западному берегу, а затем вытеснялась к северу от линии м. Этаучью – о. Аппапель. К моменту наступления полной воды соленость воды между створами м. Обрывистый – м. Валигжен на юге и м. Этаучью – о. Аппапель на севере плавно изменялась от 25 до 10–14‰. Севернее створа м. Этаучью – о. Аппапель соленость воды в полные воды составляла 10–14‰. В малые воды она снижалась до 4–10‰. К сожалению, осталась неизвестной дальность смещения изогалины 25‰ на юг в этот период. Это связано с тем, что в августе 2014 г. все работы южнее створа м. Этаучью – о. Аппапель проводились только в моменты времени, близкие к полным водам.

РАСЧЕТ ПРИТОКА ВОДЫ В ЧЕБОКСАРСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ С НЕЗАРЕГУЛИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Сучилина З.А.

*МГУ имени М.В.Ломоносова, кафедра гидрологии суши, 4 курс,
tezozoa1@mail.ru*

В настоящее время существует множество проблем, связанных с поднятием уровня Чебоксарского водохранилища до проектной отметки 68 м. При этом важной задачей является оценка динамики существующего бокового притока и его будущих изменений. Боковой незарегулированный приток к водохранилищу формируется в основном стоком рек Оки, Суры

и Ветлуги. Питание этих рек преимущественно снеговое и составляет от 55% до 65% годового стока. В последние десятилетия, вследствие заметных изменений климата, существующие методики долгосрочных прогнозов весеннего стока воды в водохранилище стали малоэффективными, и возникла проблема разработки методики прогноза, которая учитывает современные природные изменения.

В работе предпринята попытка оценить возможности прогнозирования притока воды на основе математической модели формирования стока на водосборе ECOMAG (ECOLOGical Model for Applied Geophysics). В качестве входных данных использовались ряды фактических метеорологических наблюдений для расчета гидрографов. Возможности использования модели ECOMAG для прогноза стока ограничены небольшой заблаговременностью прогноза метеорологических характеристик (3–5 суток). Поэтому для формирования базы метеоданных привлекались данные, полученные по двум метеорологическим моделям. Модель MPI-ESM-LR разработана в Германии, в институте метеорологии имени Макса Планка. Модель земной климатической системы ИВМ РАН (INMCM4-Institute of Numerical Mathematics Climate Model, version 4) разработана в России в Институте вычислительной математики РАН.

В результате сравнения величин бокового притока воды, полученных с использованием фактических наблюдений, и смоделированных по климатическим моделям значений метеорологических характеристик установлено:

- расчет суточных значений притока воды к водохранилищу с использованием результатов моделирования по климатическим моделям приводит к значительным расхождениям смоделированного и фактического гидрографов;

- приемлемое для практического использования соответствие результатов достигается только при значительном осреднении характеристик стока – от месяца и больше;

- для целей прогнозирования стока с небольших территорий более целесообразно использовать региональные модели климата.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЗИМНЕГО СТОКА РЕК ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Телегина Е.А.

Московский Государственный Университет им.

М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия

teleginakaterina@gmail.com

Основной особенностью современных изменений водного режима рек ЕТР является существенное увеличение зимнего меженного стока. В работе рассмотрены особенности пространственно-временной изменчивости зимнего меженного стока и его основных характеристик на фоне климатических вариаций, происходящих в последние десятилетия. Исследуемая территория включает в себя основные бассейны рек Европейской части России (ЕЧР), для которых приведены масштабы изменений характеристик стока зимней межени за период с 1975–2010 гг. по сравнению с 1945–1975 гг. В качестве исследуемых характеристик были выбраны средние, минимальные и максимальные за зимнюю межень расходы воды, глубина зимней межени, интенсивность и продолжительность истощения зимнего стока, коэффициенты линейных трендов рядов рассматриваемых величин, доля зимнего стока по отношению к величине стока, осредненного за гидрологический год, и к стоку, осредненному за летне-осенний период, дата минимального расхода за зимний период, продолжительность зимней межени и другие характеристики. Расчеты показали, что более чем на 95% гидрологических постов наблюдается существенное повышение величины зимнего стока. Для 82% постов рек бассейна Волги и Дона и для 43% постов рек севера ЕТР этот тренд к повышению оказался значимым.

В работе проведен анализ метеорологических характеристик, которые в условиях наблюдаемой изменчивости климата могли повлиять на изменение величины зимнего стока. Последняя, в свою очередь, отражает изменения современных естественных ресурсов подземных вод. К характерным про-

явлениям изменения климата в последние десятилетия можно отнести существенное повышение приземной температуры воздуха в холодный период и некоторое увеличение количества осадков, что привело к увеличению числа оттепелей (особенно в бассейнах рек, расположенных на юге ЕТР), сокращению суммарной глубины промерзания почвогрунтов, увеличению межледниковых зимних расходов речных вод, росту уровня грунтовых вод и к уменьшению объемов и максимальных расходов весеннего половодья в связи с быстрым оттаиванием почвы во время снеготаяния.

МАКСИМАЛЬНЫЙ СТОК РЕК КАМЧАТКИ (НА ПРИМЕРЕ Р. АВАЧА) И ФАКТОРЫ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ

Жбаков К. К.

*МГУ имени М.В. Ломоносова, кафедра гидрологии суши,
KKZ94@mail.ru*

Авача – одна из крупнейших рек полуострова Камчатка, протекающая в его юго-восточной части. В бассейне реки сосредоточено около 80 % населения Камчатского края. Населенные пункты, расположенные в непосредственной близости от реки, находятся в зоне риска затоплений при резких подъемах уровня воды в паводки и половодья.

Наводнения и опасные русловые деформации в густо заселенных и освоенных хозяйственной деятельностью средней и нижней частях бассейна обычно связаны с максимальным стоком р. Авачи. Его изучение необходимо для прогнозирования и предотвращения последствий опасных гидрологических явлений.

Актуальность исследования заключается в слабой гидрологической изученности района в условиях значительного разнообразия природных условий.

В процессе работы были собраны новейшие данные из различных источников о максимальных и средних расходах, уров-

нях воды р. Авачи и ее притоков за период с начала наблюдений на гидрологических постах до 2012 г.

В работе проанализирована пространственно-временная изменчивость климатических и гидрологических характеристик бассейна р. Авачи, а также проведен анализ связей между ландшафтными компонентами бассейна и максимальным стоком с помощью количественного ГИС-анализа, описан подход к ландшафтно-гидрологическому районированию бассейна.

Было выявлено, что максимальные расходы зависят от площадей бассейнов в меньшей степени, чем от остальных физико-географических факторов. Получены достаточно тесные связи стока с высотами, уклонами и ландшафтами отдельно для восточной и западной частей бассейна.

РАСЧЛЕНЕНИЕ ГИДРОГРАФА СТОКА ЛЕДНИКОВОЙ РЕКИ С ПОМОЩЬЮ ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Лошакова Н.А.

*МГУ имени М.В.Ломоносова, кафедра гидрологии суши, 4 курс,
nadya.loshakova@mail.ru*

Для высокогорных рек с большой долей оледенения бассейна характерна сложная структура питания, определяющая водный и гидрохимический режим стока. В структуре питания обычно выделяют не менее 5-6 компонент: таяние льда и фирна с различных частей ледника; таяние сезонного снега, как с ледниковой, так и с неледниковой части бассейна; летние дождевые осадки; подземные воды. Оценка роли и режима каждого из источников питания необходима для понимания механизмов формирования стока в высокогорных речных бассейнах.

Исследование методов и подходов к расчленению гидрографа ледниковой реки проводилось на примере бассейна р. Джанкуат, расположенного в приводораздельной части северного склона Главного Кавказского хребта в бассейне р. Баксан и выбранного в качестве репрезентативного ледника для Северного

Кавказа в ходе Международного гидрологического десятилетия. В работе использовались данные гидрологических, метеорологических и гляциологических полевых наблюдений в бассейне за 2007–2010 и 2013 гг.

В рамках данной работы было проведено исследование существующих методов расчленения гидрографа горных рек, в том числе с использованием изотопных и гидрохимических маркеров. На основе обработки данных полевых наблюдений за метеорологическими элементами и компонентами водного баланса горно-ледникового бассейна р. Джанкуат, сбора и обработки данных дистанционного зондирования исследуемой территории, были созданы соответствующие базы данных и ГИС-проекты.

Для моделирования режима таяния в различных зонах бассейна р. Джанкуат была использована физико-математическая модель таяния снега и льда в гляциально-нивальном зоне [1]. Сопоставление результатов моделирования с данными натурных наблюдений за стоком р. Джанкуат позволило оценить вклад различных компонент питания р. Джанкуат в «быструю» и «базисную» составляющие его стока [2].

Анализ содержания стабильных изотопов и солевого состава в отобранных пробах воды, снега и льда позволил сделать предварительные выводы о возможной применимости изотопных и гидрохимических методов расчленения гидрографа ледниковой реки на примере ручья Джанкуат.

Литература

1. Голубев Г.Н. Гидрология ледников. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 248 с.

2. Рец Е.П., Фролова Н.Л., Поповнин В.В. Моделирование таяния поверхности горного ледника // Лёд и Снег. 2011. № 4. С. 24–31.

**СРАВНЕНИЕ ЗАПАСОВ ВОДЫ В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ ПО ДАННЫМ
СНЕГОМЕРНЫХ СЪЁМОК И СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ
ПОЛЯ ГРАВИТАЦИИ ЗЕМЛИ (GRACE)**

Григорьев В.Ю.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, кафедра гидрологии суши, аспирант,
vadim308g@mail.ru*

Изучение снежного покрова, помимо чисто географического, имеет множество практических аспектов. Основным методом определения характеристик снежного покрова являются снегомерные съёмки. В связи с высокой трудоемкостью и недостаточным пространственным охватом этого метода, для России актуальны дистанционные методы, такие как гамма-съёмка, георадарное профилирование и спутниковая СВЧ-индикация. Общей проблемой для указанных дистанционных методов, является зависимость измерений от целого ряда факторов, включающих тип растительности, структуру снежного покрова, влажность почвы и т. д. Для оценки величины влагозапаса в снежном покрове можно воспользоваться оценкой его влияния на гравитационное поле Земли. Данные спутниковой системы измерения поля гравитации Земли (GRACE) [1] позволяют определить его изменение с точностью до нескольких миллиметров водного эквивалента, причём обусловленное именно изменением количества влаги на суше. В связи с небольшой величиной испарения в зимнее время года, изменение запасов воды в бассейне можно свести к $\Delta TWS + \Delta R = \Delta SN$, где ΔTWS – изменение величины влагозапаса в бассейне за некоторый период, ΔSN – изменение за рассматриваемый период содержания воды в снежном покрове, ΔR – сток с водосбора.

Материалами для данного исследования послужил архив сайта meteo.ru по снегомерным съёмкам за 2002–2011 гг. на ЕТР, величины влагозапаса по GRACE различных центров обработки данных и среднемесячные величины стока на некоторых реках ЕТР. За ноябрь–апрель (иногда май) 2002–2011 гг. данные по величинам влагозапаса были проинтерполированы

с учетом местоположения снегомерных съёмок. Полученный коэффициент корреляции r в среднем для всех 229 снегомерных пунктов составил 0,5, изменяясь в значительных пределах, без выраженной привязки к той или иной географической зоне. По мере роста площади водосбора характерно увеличение коэффициента корреляции.

Литература

1. Булычёв А.А., Джамалов Р.Г., Сидоров Р.В. Применение данных спутниковой системы измерения поля гравитации Земли (GRACE) для изучения и оценки гидролого-гидрогеологических характеристик крупных речных бассейнов // Водные ресурсы. 2012. № 5. С. 476–484.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В УЗЛЕ СЛИЯНИЯ РЕК СУХОНЫ И ЮГА

Фингерт Е.А.

*МГУ имени М.В. Ломоносова, кафедра гидрологии суши,
аспирантка 1 г.о., fingerte@gmail.com*

Одним из наиболее подверженных затоплению городов России можно признать Великий Устюг, расположенный в узле слияния рек Сухоны и Юга. С 1517 года в Великоустюгской летописи появлялись упоминания о наводнениях: «В Устюге льдом город стерло, берег срыло, дворов множество снесло и людей многих утопило» [1].

Подводный рельеф играет важную роль в формировании высоких уровней воды. Современные деформации русла у Великого Устюга во многом обусловлены тем, что русло здесь подстилается моренными отложениями. Их наличие на дне ограничивает возможности углубления русла и способствует усилению размыва берегов, которое еще более усиливается ледовыми явлениями [2].

Двумерное гидродинамическое моделирование с деформируемым дном позволило выявить самые ярко выраженные об-

ласти и направленность деформаций. Особенностью стратегии моделирования является использование плоского дна по всей области моделирования в начале расчетов и запуске руслоформирующего расхода.

Смоделированный рельеф похож на рельеф, полученный в результате промерных работ, в следующих случаях: на стрелке у правого берега р. Сухоны образуется побочень, у левого – идет эрозия; ниже узла слияния область эрозии смещается к правому берегу; левый рукав о. Мал Коневец блокируется наносами; размывается оголовок о. Мал Коневец, и в правом рукаве образуется отмель.

Некоторые русловые формы адекватно воспроизвести не получилось. Например, вместо выраженного осередка в устье Юга сформировалась обширная отмель. Это может быть связано с не учетом подпорных явлений.

Опасные гидрологические явления, наблюдаемые в узле слияния рек Сухоны и Юга, можно научиться предсказывать, имитируя различные сочетания расходов сливающихся рек, и предотвращать затопление города с помощью дамб, учитывая локализацию и направление русловых деформаций.

Литература

1. Ильина Л.Л., Грахов А.К. Реки Севера. Л., Гидрометеиздат, 1987.
2. Чалов Р.С. и др. Русловые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины. Москва: ООО Журнал «РТ», 2012. 492 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И ИЗМЕНЕНИЯ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРАСНОВИДОВСКОГО ПЛЁСА МОЖАЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Морозова Е.А.

*МГУ им. М.В.Ломоносова, кафедра гидрологии суши, 3 курс,
nam49@mail.ru*

Переработка берегов, накопление и перераспределение донных отложений приводит к заилению, а, следовательно, умень-

шению объема водохранилищ, поэтому необходимо исследовать динамику этого процесса. На основе морфометрических характеристик, определенных с помощью разновременных планов плеса (1953 и 2013 гг.), были построены батиграфические кривые, с помощью которых вычислено, что объем Красновидовского плеса сократился на 1,19 млн м³. Среднегодовая скорость заиления за 60 лет составила 1,2 см/год, а средняя мощность отложений – 72 см.

Подробные исследования донных отложений, выполненные совместно с сотрудниками ИВП РАН, позволили получить дополнительные характеристики грунтов и данные о происходящих в них процессах. Для анализа были выбраны характерные точки, расположенные в русловой ложбине, на пойме, а так же на склоне надпойменной террасы, поскольку факторы, обуславливающие процесс илонакопления, состав грунтов и условия жизнедеятельности бентосных организмов различаются на разных морфометрических участках ложа водохранилища долинного типа, к которым и относится Можайское водохранилище. Русловую ложбину заполняют, главным образом, однородные мягкие илы оливкового (ниже черного) цвета с ходами бентосных организмов. Илы глубокой поймы светлее и плотнее, чем в русловой ложбине, а склоны надпойменной террасы покрыты песчанистыми и плотными донными отложениями рыже-коричневого цвета.

Для каждой станции в придонных слоях воды были определены температура, содержание в воде растворенного кислорода и мутность, а также свойства верхнего слоя донных отложений (гигроскопическая влажность и содержание органического вещества).

С использованием кривой объемов рассчитана площадь дна Красновидовского плеса, которую занимает каждый из типов донных отложений. Илы русловой ложбины занимают около 0,1 км² (6%), илы глубокой поймы – 0,7 км² (43%). Илы, расположенные на склоне надпойменной террасы, занимают площадь 0,8 км² (или 51%). Объем донных отложений составляет 83 тыс. м³. Была рассчитана средняя мощность отложений, ко-

торая составила 50 см. Этот результат сопоставим с полученным по данным сравнения карт (72 см), что подтверждает достоверность обеих методик.

ГИДРОЛОГО-МОРФОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ НА МАЛЫХ И СРЕДНИХ РЕКАХ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Камышев А.А.

*МГУ имени М.В. Ломоносова, кафедра гидрологии суши, 3 курс,
arsenii.kamyshv@yandex.ru*

Горизонтальные русловые деформации на территории Московской области, несмотря на значительную антропогенную освоенность данного региона, изучены слабо. В связи с этим в начале 2000-х годов научно-исследовательской лабораторией эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева была создана сеть стационаров, целью которой был мониторинг состояния и интенсивности размыва берегов на малых и средних реках региона (руководитель к.г.н. А.С. Завадский). За десять лет работы сети стационаров был собран большой объем материала.

Анализ полученных данных позволил выявить некоторые закономерности размыва берегов и установить его связь с природными факторами:

1. Максимальные скорости размывов берегов наблюдаются на реках севера области. Это обусловлено преимущественным распространением в этой части области свободномандрирующих русел. Минимальные скорости размыва берегов характерны для рек центральной части региона. Это вызвано широким распространением на них адаптированных русел. На юге области, несмотря на преобладание адаптированных русел, скорости размыва более значительные, хотя и ниже, чем на севере области.

2. Связь между характерными расходами воды (средний многолетний расход, средний максимальный расход, расход 30-дневной обеспеченности, средний расход самого многово-

дного месяца) и скоростью размыва берегов не прослеживается.

3. Скорость горизонтальных русловых деформаций является функцией от порядка реки и формы русла, которая определяет структуру речного потока, т. е. $C_p = f(N, X)$, где C_p – скорость размыва берегов, N – порядок реки, X – форма русла.

4. Максимальные скорости размыва приурочены к водоворотным областям, возникающим в привершинных участках излучин; значительные скорости размыва берегов характерны также для вершин излучин гипертрофированной формы (пальцеобразные, заваленные). Низкие скорости размыва наблюдаются в вершинах и крыльях пологих излучин. Минимальные скорости размыва отмечены для прямолинейных участков русла, в частности – на прямолинейных участках между смежными излучинами.

ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ПАВОДКОВ НА РЕКАХ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА (В ПРЕДЕЛАХ РОССИИ)

Белякова П. А.

МГУ, Гидрометцентр России, pobel@mail.ru

Черноморское побережье Кавказа (ЧПК) – один из самых паводкоопасных районов России. При компактных размерах водосборов и малой протяженности рек наибольшую опасность представляют быстроразвивающиеся паводки [1].

Прогноз паводков опирается на метеорологический прогноз и модель формирования стока. Из-за низкой временной дискретности исходных гидрологических данных расчетный шаг модели составляет одни сутки. Пространственная изменчивость полей осадков довольно слабо освещается данными наблюдений ввиду неравномерного расположения метеостанций относительно высотных зон. Редкие (1 раз в месяц) снегомерные съемки также определяют недостаточность данных для проверки описания процессов снегонакопления и снеготая-

нения в различных высотных зонах и насыщения концептуальных моделей формирования стока [2]. В настоящее время для ежедневного автоматизированного прогноза среднесуточных и максимальных расходов воды в 8 створах на 6 реках (Вулан, Туапсе, Куапсе, Западный Дагомыс, Сочи и Мзымта) ЧПК применяются физико-статистические методы прогноза, основанные на упрощенных формах уравнения водного баланса и имеющие достаточную точность (критерий качества S/σ 0,5–0,6).

Успешность прогноза опасных паводков определяется во многом надежностью метеопрогноза (в первую очередь интенсивных осадков). Современные отечественные и зарубежные гидродинамические модели достаточно точно прогнозируют факт выпадения сильных осадков, но не их количество и место выпадения. При выпуске гидрологического прогноза используются выходные данные 4 метеомоделей (COSMO-Ru7, NCEP, UKMO и РЕГИОН), множественный коэффициент корреляции с фактическими осадками 0,7–0,8.

В настоящее время введена в эксплуатацию плотная сеть автоматических уровнемеров, в районе проведения Сочинских Олимпийских игр учащена метеорологическая сеть. При накоплении массива измерений и с внедрением новых технологий передачи данных в Гидрометцентр России появятся возможности использования более развитых моделей формирования стока для более точного и надежного прогноза.

Краткосрочные (автоматизированные) прогнозы сильных дождей и опасных паводков необходимо уточнять сверхкраткосрочными прогнозами на основе спутниковой и радиолокационной информации [3], а также используя опыт синоптика и гидролога, накопленный при прогнозировании в определенной местности.

Список литературы

1. Волосухин В.А., Ткаченко Ю.Ю. Прогнозирование параметров паводков на реках Краснодарского края // Гидротехника. – 2013. – № 4. – С. 16–20.
2. Мухин В.М., Полунин А.Я. Методические указания к разработке метода краткосрочного прогноза расходов воды горных рек

на основе математической модели формирования стока. – М: Гидрометеиздат, 1982. – 149 с.

3. Никифорова А.Е., Песков Б.Е. Прогноз летних дождей с использованием результатов постпроцессинга прогнозов осадков COSMO-Ru7 // Труды Гидрометцентра России. – 2014. – Вып. 351. – С. 5–22.

ОСОБЕННОСТИ НАВОДНЕНИЙ В ПЕРИОД ПОВОДОДЬЯ НА РЕКАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЕТР

Фатхи М.О.

*МГУ имени М. В. Ломоносова, кафедра гидрологии суши, 5 курс
o.miel@mail.ru*

Ежегодно наводнения на реках наносят значительный урон хозяйству, а нередко, создают угрозу здоровью и жизни людей. На устранение последствий прохождения волны половодья государство тратит большие средства, и именно поэтому работы, связанные с прогнозированием, наблюдением и отслеживанием изменений прохождения половодья на реках актуальны, а их востребованность растет по мере развития хозяйственной деятельности в окрестностях рек.

В рамках данной работы был проведен анализ формирования весеннего половодья и наводнений в бассейнах рек Урал, Дон и Волга в условиях современного изменения климата. Были проанализированы ежегодные данные о максимальных уровнях и расходах воды, датах прохождения максимальных расходов, начале и окончании половодья, высоте, продолжительности и повторяемости затопления поймы по 150 гидрологическим постам за период с 1940 по 2010 г. По полученным данным с помощью программ ArcGIS и Microsoft EXCEL построена серия карт и графиков, по которым можно выявить определенные пространственные и временные закономерности распределения вышеупомянутых характеристик.

Наиболее затяжные затопления поймы наблюдаются в средних и нижних частях бассейнов, в то время как в верховьях крупных рек их продолжительность невелика. Определены зоны, подверженные наибольшему риску наводнений – центральные части бассейнов Волги, Дона и Урала, а также территория Нижнего Дона. Верховья бассейнов в целом подвержены затоплению в меньшей степени.

Другим этапом данной работы было определение индекса природной опасности наводнений методом PATTERN (Planning Assistance Through Technical Relevance Number). Этот индекс рассчитывается на основе данных о повторяемости, продолжительности и глубине затопления поймы. Каждый частный показатель рассчитывался в долях от наибольшей по региону соответствующей величины. Анализ опасности наводнений по этому методу показал, что центральная часть бассейна Волги находится в зоне наибольшего риска, остальные территории расположены в менее опасных зонах.

КОЛЕБАНИЯ МУТНОСТИ ВОДЫ И ДИАМЕТРА ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ Р.ТАРФАЛАЙОК (СЕВЕРНАЯ ШВЕЦИЯ) ЛЕТОМ 2014 Г.

Василенко А.Н.

*МГУ имени М.В.Ломоносова, кафедра гидрологии суши, 3 курс,
saiiia24@mail.ru*

Учебная практика по горной гидрологии студентов 2 курса проходила в июле 2014 г. на базе Стокгольмского университета «Тарфала» в бассейне реки Тарфалайок в массиве Кебнекайсе, Швеция. В ходе практики были проведены исследования суточных колебаний мутности воды в створе ниже впадения ручьев, стекающих с ледников Сторгласьярен и Исфальсгльсъярен. Для измерения мутности воды в непрерывном режиме с дискретностью в 5 минут использовался логгер LISST-25X (Suspended Sediment Sensor) производства американской фирмы Sequoia Scientific. Принцип работы данного прибора осно-

ван на преломлении волны света на частицах, транспортируемых потоком. Диаметр линзы равен 2,5 см, используется свет красной области с длиной волны 670 нм.

С помощью данных самописцев мутности на горных реках можно изучать процессы размыва отдельных участков ложа ледника и приледниковой зоны, исследовать изменения транспортировки материала различной крупности в зависимости от синоптических и гидрологических условий. Анализ данных, полученных с помощью логгера, позволил сопоставить величину мутности воды со средним значением диаметра частиц, а также получить связи мутности реки с уровнями воды в ней.

Мутность воды р. Тарфалайок в течение дня колеблется в пределах 500–700 мг/л. Максимумы мутности наблюдаются в дневные часы, в периоды максимального поступления солнечной радиации и максимальной абляции ледника, минимум же отмечается ночью, когда абляция ледника отсутствует.

Крупность частиц изменяется в диапазоне 5–20 мкр, средний диаметр составляет 10–15 мкр. Крупность частиц находится в обратной зависимости от мутности воды, то есть, чем выше мутность, тем меньше размер взвешенных наносов.

Изучение графиков связи мутности и уровня воды позволили выявить особенности изменения мутности воды в зависимости от уровня воды, связанные с замещением поступления ледниковых отложений русловыми.

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ПАВОДКИ В ГОРНЫХ И ПРЕДГОРНЫХ РАЙОНАХ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ И РЕСПУБЛИКИ АДЫГЕЯ

Пожидаева Д.С.

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
pozhideeva.d@mail.ru*

Катастрофические паводки на северо-западе Кавказа происходят почти ежегодно и наносят ущерб различной степени как районам бассейна реки Кубань, так и районам Черномор-

ского побережья Кавказа. На исследуемой территории крайне разнородные природные условия, поэтому выявление общих закономерностей формирования и возникновения наводнений является непростой задачей.

На формирование катастрофических паводков на реках исследуемой территории влияет множество факторов, однако, основное влияние оказывает климат территории. Что касается генезиса наводнений, здесь наиболее распространены стоковые наводнения, сопровождающие аномально высокие половодья и паводки, сбросы воды из водохранилищ, прорывы прудов и завальных озер. Также распространены наводнения локально-ливневого генезиса.

Для косвенной оценки генезиса паводков была исследована повторяемость прохождения паводков в различные месяцы года. Условно всю территорию можно разделить на четыре области – две относятся к бассейну Кубани и две к Черноморскому побережью Кавказа. Черноморские реки отличаются более выровненным распределением стока с повышенными расходами воды в зимний период. Кроме зимнего максимума паводков отчетливо выделяется летний (в северных бассейнах – в июле и в южных – в июне–августе).

Помимо пространственных различий, характеристики уровня режима подчиняются многолетней изменчивости. На большинстве рек исследуемой территории наблюдается синхронное монотонное понижение среднего значения максимальных и минимальных уровней воды.

Наиболее опасными (по величине и повторяемости превышений отметок опасных и неблагоприятных явлений) районами являются бассейны левобережных притоков р. Кубани. Здесь амплитуда колебаний уровня воды достигает 3–10 м, и наводнения зачастую имеют катастрофический характер.

Итак, в работе были обобщены сведения о катастрофических паводках в данном районе, проведено комплексное изучение изменчивости характеристик наводнений на исследуемой территории и оценен риск затоплений ряда населенных пунктов в горных и предгорных районах Кавказа.

**Поля естественных ортогональных составляющих
как метод установления действующих факторов
формирования весеннего стока в бассейне Дона**

Ефремова Н.А.

*Московский государственный университет им.
М.В.Ломоносова, hydro-natalie@mail.ru*

При наличии длинных метеорологических рядов становится возможным применить естественные ортогональные составляющие (ЕОС) полей гидрометеорологических элементов в целях создания методик долгосрочных прогнозов [1]. Составление любого прогноза требует строгого выбора предикторов. Векторы ЕОС позволяют четко оценить наиболее весомые для предиктанта предикторы или их слагающие компоненты.

Метод ЕОС применен для изучения факторов формирования квартального стока (март–май) в бассейне Дона, для которого изучены первые три пространственных и три временных вектора. Каждый подобный вектор характеризуется собственным числом ковариационной матрицы – степенью вклада в формирование общей картины распределения исследуемой характеристики в долях от единицы [1]. Практически для всех анализируемых полей гидрометеорологических характеристик с увеличением порядкового числа его значение уменьшается по логарифмическому закону.

Первый пространственный вектор слоя весеннего стока (поле ЕОС-1) имеет отрицательный знак и характеризуется невысокой изменчивостью. Общее направление изолиний – субмеридиональное. На севере они образуют ложбину, огибая Окско-Донскую равнину, где отмечаются минимумы функции $-0,23...-0,25$. По результатам сравнительного анализа можно предположить, что поле ЕОС-1 характеризует пространственную изменчивость поступления талой воды и зависит от максимальных запасов воды в снеге до начала половодья: оба поля имеют общую тенденцию изменения с юга на север. В разложении поля стока ЕОС-2 присутствует смена знака коэффи-

циентов. Общий градиент поля направлен с запада на восток. Наиболее близкое распределение имеет сток воды за ноябрь предшествующего года и суммы осадков за холодный период – факторы, в значительной мере, определяющие потери весеннего стока на инфильтрацию и поверхностное задержание. ЕОС-3 имеет высокую пространственную изменчивость, которая указывает на сочетание в данном векторе элементов приходной и расходной частей баланса и значительного антропогенного влияния.

Список литературы

1. Мещерская А. В., Руховец Л. В., Юдин М. И. Естественные составляющие метеорологических полей. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 198 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЕЙ ВОДЫ В ОЗЕРАХ ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ БЕЛОГО МОРЯ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Василенко А.Н.

*МГУ имени М.В. Ломоносова, кафедра гидрологии суши, 3 курс,
saiiia24@mail.ru*

Активное поднятие территории беломорского побережья приводит к отчленению морских заливов и переходу их в разряд меромиктических озер. В данных озерах на ранних стадиях отчленения наблюдается связь с морем в период приливов и нагонов. На сегодняшний день остается нерешенным вопрос о наличии этой связи в зимний период. Изучение колебаний уровня воды подо льдом проводилось с помощью самописцев уровня и температуры воды – логгеров на озерах в районе Беломорской Биологической станции МГУ 26.01.14–6.02.14 в рамках научно-студенческой экспедиции кафедры гидрологии суши. Результаты исследования необходимы для оценки возможности поступления морских вод в озера в зимний период, а при существовании такой связи, для определения ее величины и степени воздействия морских вод на озеро. Для достижения

этой цели логгеры устанавливались в непосредственной близости от перемычек, отделяющих озера от моря. В ходе экспедиции было установлено 4 логгера: два на озере Кисло-Сладком, два – на озере у Зеленого мыса. Именно для этих озер характерна периодическая связь с морем во время сизигийных приливов и больших нагонов, по крайней мере, в теплый период года.

В восточной зоне озера Кисло-Сладкого, непосредственно за перемычкой наблюдаются приливы амплитудой не более 4,5 см с характерным отставанием пиков уровней полной и малой воды в периоды прилива или отлива на море от колебаний в озере. Отставание максимальных уровней полной воды составляет 7–10 часов. Отставание минимальных уровней составляет около 9 часов. На озере у Зеленого мыса на некотором расстоянии от перемычки в 0,5 м от нижней кромки льда наблюдаются приливы амплитудой 5 см, с характерным отставанием пиков уровня полной воды на море от колебаний в озере. Отставание максимальных уровней составляет 6 часов. Отставание минимальных уровней составляет 9 часов 40 минут.

Причиной запаздывания времени наступления уровней полных и малых вод в обоих озерах, является трансформация приливной волны в губе Ругозерской, покрытой льдом, и перемерзшая перемычка на каменном пороге при входе в озеро со стороны губы Кислой.