



Институт водных проблем
Российской академии наук

Кафедра гидрологии суши
МГУ им. М.В. Ломоносова



Сборник трудов
Первой открытой конференции
Научно-образовательного центра
**Ресурсы и качество вод суши:
оценка, прогноз и управление**



8 - 9 декабря 2011 года
Москва, Россия



Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences
Department of Hydrology, Moscow State University



**Институт водных проблем
Российской Академии наук**



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

Research and Education Center
First open conference
Proceedings

Water resources and water quality: assessment, forecasting and management

December 8 – 9, 2011
Moscow, Russian Federation

Сборник трудов
Первой открытой конференции
Научно-образовательного центра

Ресурсы и качество вод суши: оценка, прогноз и управление

8 – 9 декабря 2011 г.
Москва, Россия

Ответственный редактор – д.ф.-м.н. А.Н. Гельфан

Материалы подготовлены
М. Александрович, В. Морейдо, Е. Рец

Sponsored by Russian Academy of Sciences
Moscow 2011

При финансовой поддержке Российской Академии наук
Москва 2011

Ресурсы и качество вод суши: оценка, прогноз и управление. Сборник трудов Первой открытой конференции Научно-образовательного центра. 8 – 9 декабря 2011 г. / М.: ИВП РАН, Кафедра гидрологии МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011, 218 с.

В сборник включены материалы первой открытой конференции Научно-образовательного центра «Ресурсы и качество воды суши: оценка прогноз и управление», объединяющего специалистов Института водных проблем РАН и кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

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

© 2011 ИВП РАН

© 2011 Кафедра гидрологии суши ГФ МГУ

Изображение, использованное для оформления обложки, было взято в сети Интернет и принадлежит его законному правообладателю.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ	6
ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО	7
ФАКТОРЫ И ОСОБЕННОСТИ ЗАТОПЛЕНИЯ РЕЧНЫХ ПОЙМ В БАССЕЙНЕ ВОЛГИ. Алексеевский Н.И., Нестеренко Д.П.	9
КОМПЛЕКСНАЯ МНОГОФАКТОРНАЯ ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ НАВОДНЕНИЙ В РОССИИ. Гладкевич Г.И., Терский П.Н., Фролова Н.Л.	21
О ВНУТРИСУТОЧНОМ ХОДЕ ВАЛОВОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ФИТОПЛАНКТОНА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ МОЖАЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА. Гречушников М.Г., Андреева И.Ю., Кременецкая Е.Р.	37
МЕТОД ОЦЕНКИ И СЦЕНАРНЫХ ВАРИАНТОВ ПРОГНОЗА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА ДЛЯ ПАН-АРКТИЧЕСКИХ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Ковалев Е.Э.	53
БИОТРАНСФОРМАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДНОЙ СРЕДЫ. Долгоносов Б. М., Губернаторова Т. Н.	67
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ. Даценко Ю.С., Пуклаков В.В., Ершова М.Г., Эдельштейн К.К.	84
СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА РЕК БАССЕЙНА ДОНА. Киреева М.Б., Фролова Н.Л.	100

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕНОСА ВЛАГИ И МЕДИ ДЛЯ
ПОЧВ ВОДОСБОРА ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА.
Кочарян А.Г., Суворов П.Б., Гусев Е.М. 116

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОГЕННОГО УМЕНЬШЕНИЯ СТОКА
НА УСЛОВИЯ ЗАТОПЛЕНИЯ ПОЙМЫ НА РОССИЙСКО-
КИТАЙСКОМ УЧАСТКЕ ДОЛИНЫ Р. АРГУНЬ. Кривушин М.В. 127

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ
ВОДНОСТИ РЕК ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ.
Макарова О.А., Сотникова Л.Ф. 143

СОВРЕМЕННЫЕ И ОЖИДАЕМЫЕ ГИДРОЛОГО-
МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДЕЛЬТАХ ОСНОВНЫХ РЕК
РОССИИ. Михайлов В.Н., Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В.,
Михайлова М.В., Исупова М.В. 151

РАЗРАБОТКА СТОХАСТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ПОГОДЫ
ДЛЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ. Морейдо В.М. ... 167

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ПРОГНОЗ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА РЕК
ТЕРСКОГО БАССЕЙНА. Рец Е.П. 186

СОВРЕМЕННЫЕ ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ЕВРОПЕЙСКОЙ
ТЕРРИТОРИИ РОССИИ: ФОРМИРОВАНИЕ,
ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТЬ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ. Фролова Н.Л.,
Джамалов Р.Г., Игонина М.И. 201

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель:

В.И. Данилов-Данильян

Руководитель Научно-образовательного центра «Ресурсы вод
суши: оценка, прогноз и управление», директор ИВП РАН,
член-корреспондент РАН

Члены оргкомитета:

Н.И. Алексеевский

Заместитель руководителя НОЦ, заведующий кафедрой
гидрологии суши МГУ доктор географических наук

А.Н. Гельфан

Заместитель руководителя НОЦ, заместитель директора ИВП
РАН, доктор физико-математических наук

Ответственные секретари:

М.В. Александрович

Младший научный сотрудник ИВП РАН

В.М. Морейдо

Младший научный сотрудник ИВП РАН

Е.П. Рец

Аспирант кафедры гидрологии

ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО

Водные ресурсы играют чрезвычайно важную роль в решении проблем жизнеобеспечения населения и экономического развития страны. Вместе с тем, использование водных ресурсов России в последние десятилетия, даже несмотря на спад производства, привело в некоторых регионах к количественному истощению природных вод и к резкому ухудшению их качества. Помимо уже наблюдаемых социально-экономических последствий, продолжающийся рост водопотребления и снижение качества вод могут вывести природные системы за рамки экологической устойчивости, создавая долговременные угрозы безопасности будущих поколений. Нарушение экологической устойчивости становится еще реальнее на фоне происходящих изменений климата и усиливающейся антропогенной нагрузки на природные системы.

В связи с этим все большую актуальность приобретают задачи интеграции исследований, проводимых ведущими специалистами академической и вузовской науки в области гидрологии суши, исследования водных ресурсов и охраны вод, создания современной системы подготовки ученых и инженеров в этой области, закрепления талантливой молодежи в науке и образовании. Эти задачи являются основой деятельности Научно-образовательного центра «Ресурсы и качество вод суши: оценка, прогноз и управление», созданного в 2009 году и объединяющего ведущих специалистов, молодых исследователей Института водных проблем РАН и кафедры Гидрологии суши Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

В настоящем сборнике обобщены некоторые результаты исследований, полученные коллективом Центра при выполнении

проекта «Исследования пространственно-временных закономерностей формирования водных ресурсов и качества вод с учетом изменений климата и антропогенной нагрузки на водные объекты и их водосборы» по заказу Министерства образования и науки РФ. При формировании сборника отбирались, в первую очередь, работы, в выполнение которых значительный вклад внесен молодыми исследователями ИВП РАН и МГУ.

Конференция проведена при финансовой поддержке Российской академии наук.

Оргкомитет конференции

ФАКТОРЫ И ОСОБЕННОСТИ ЗАТОПЛЕНИЯ РЕЧНЫХ ПОЙМ В БАССЕЙНЕ ВОЛГИ

Алексеевский Н.И., Нестеренко Д.П.

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
географический факультет, Москва, Россия

E-mail: n_alex50@mail.ru

Речная пойма – пониженная часть долины реки, подверженная ежегодному или периодическому затоплению в половодье и высокие паводки. На характер затопления влияет ряд факторов: строение речной долины, тип русла реки, водный режим реки, а также её размер. Для врезанных рек высота, ширина поймы B_n и её площадь F_n малы, в общем случае они стремятся к 0. Поймы зачастую фрагментарны. Для широкопойменных рек, наоборот, эти характеристики достигают максимальных значений. Для адаптированных русел рек они принимают некоторые промежуточные значения [Чалов и др., 1998; Чернов, 1983].

Важной характеристикой гидрологического режима пойм является продолжительность их затопления. Она зависит от высотных отметок поймы H_n , а также от типа водного режима рек. Низкая пойма затопляется каждый год и на продолжительное время. Средняя пойма характеризуется менее продолжительным ежегодным или более редким (один раз в несколько лет) затоплением. Высокая пойма затопляется редко (несколько раз за 100 лет) и на короткий срок. Чем больше высота поймы, тем меньше вероятность её затопления и меньше ее поемность.

В зависимости от микрорельефа поверхности поймы находится объем воды, который может задерживаться в ее пределах

при затоплении. Этот объем изменяется в зависимости от генетического типа пойм. Он достигает максимума для двухсторонних сегментно-гравистых пойм, формирующихся в условиях свободного развития русловых процессов, и практически отсутствует в долинах врезанных рек.

На конкретном участке речной долины затоплению пойм соответствует уровень воды H_m , при котором начинается ее заливание водами H_p . При $H_{mn} \leq H < H_p$ водный поток находится в пределах меженного русла и не создает угроз для населения, социальных и производственных объектов, находящихся на пойме. Разность $H_m - H_{mn} = \Delta H$ характеризует естественный диапазон изменения уровней воды на участке реки. Он зависит от размера реки (ее порядка $N_{ш}$) [Нестеренко, Косицкий, 2010], площади водосбора F . В бассейне р. Ока, например, при $F < 15000 \text{ км}^2$, разность (см) $\Delta H = 0,04F + 160$ [Самохин, 2006].

Величина ΔH зависит от условий формирования русла (свободные, ограниченные) и их типа (широкопойменные, адаптированные и врезанные). В бассейне Волги преобладают (80%) широкопойменные реки [Русловой режим., 1994], для которых характерно периодическое или ежегодное затопление двухсторонней поймы. Реки с адаптированным руслом отличаются наличием односторонней поймы. В бассейне Волги участки адаптированного русла занимают около 5% протяженности речной сети. Примерно на 15% длины русловой сети в бассейне Волги распространено врезанное русло, для которого характерно отсутствие поймы или наличие ее небольших фрагментов. Для врезанных русел опасность затопления местности отсутствует, поскольку склоны таких рек круты, а берега высоки по сравнению с сезонными максимумами уровней воды стокового генезиса. При площади водосбора $F = \text{const}$

и в зонах формирования широкопойменных и адаптированных русел рек величина ΔH примерно одинакова.

В бассейне Волги тип водного режима не оказывает заметного влияния на пространственное изменение величины ΔH , поскольку подавляющее большинство рек этого бассейна отличается подобием внутригодового распределения стока (восточно-европейский тип). Исключение составляют малые и средние реки на юге и крайнем юго-востоке территории, где водный режим рек имеет черты казахстанского типа. В большей степени внутригодовое распределение стока определяет повторяемость и продолжительность расходов, уровней воды, при которых происходит затопление разных ступеней (низкая, средняя, высокая) пойменной поверхности. В соответствии с данными [Морфология и динамика..., 1999] продолжительность затопления речных пойм в волжском бассейне не превышает 50 дней (рис.1).

Для большей части этого бассейна характерно затопление речных пойм на непродолжительное время (в среднем оно продолжается менее 10 дней). В Калужской, Кировской, Московской, Рязанской и Тверской областях, Пермском крае, Республике Башкортостан, Татарстан, Удмуртия и Чувашия оно более длительное (10–30 дней). Лишь иногда поймы некоторых рек (Ветлуга, Молога) покрыты водой на период более 30 дней. Поймы некоторых малых рек в Волгоградской и Самарской области очень редко затопляются в период половодья и паводков или вообще не подвержены затоплению в современных гидроклиматических условиях. На горных и полугорных реках западного склона Урала поймы отсутствуют или фрагментарны, что исключает их затопление.

Повторяемость затопления пойм волжского бассейна можно оценить лишь для участков расположения пунктов гидрологического мониторинга. Для них можно определить повторяемость ежегодных и средних за многолетний период суточных расходов воды, соответствующих выходу воды на поверхность поймы. Средняя (за многолетний период) повторяемость этого процесса соответствует верхнему интервалу эпюры руслоформирующих расходов Q_{bff} [Власов, Чалов, 1991] и в многолетнем отношении наиболее объективно определяет режим затопления речных пойм. Величина Q_{bff} связана с размером реки (ее порядком $N_{ш}$) степенным уравнением (рис.2):

$$Q_{bff} = 1,76 N_{ш}^{0,72}.$$

Обеспеченность расхода воды Q_{bff} и соответствующая продолжительность явления характеризует среднюю (за многолетний период) продолжительность затопления пойм. Обработка данных по 132 постам (за период с 1877 по 1980 гг.) показала, что продолжительность затопления речных пойм в бассейне Волги не превышает 27 дней. Обеспеченность расходов воды Q_{bff} изменяется в диапазоне от 0,01 % до 7,5 % [Власов, Чалов, 1991]. Максимальная продолжительность затопления пойм характерна для рек в верховьях Белой, Вятки, Оки и Камы. С увеличением размера рек повторяемость расхода воды Q_{bff} немного возрастает. В условиях широкопойменного русла эта повторяемость относительно больше по сравнению с участками адаптированного и врезанного русла.

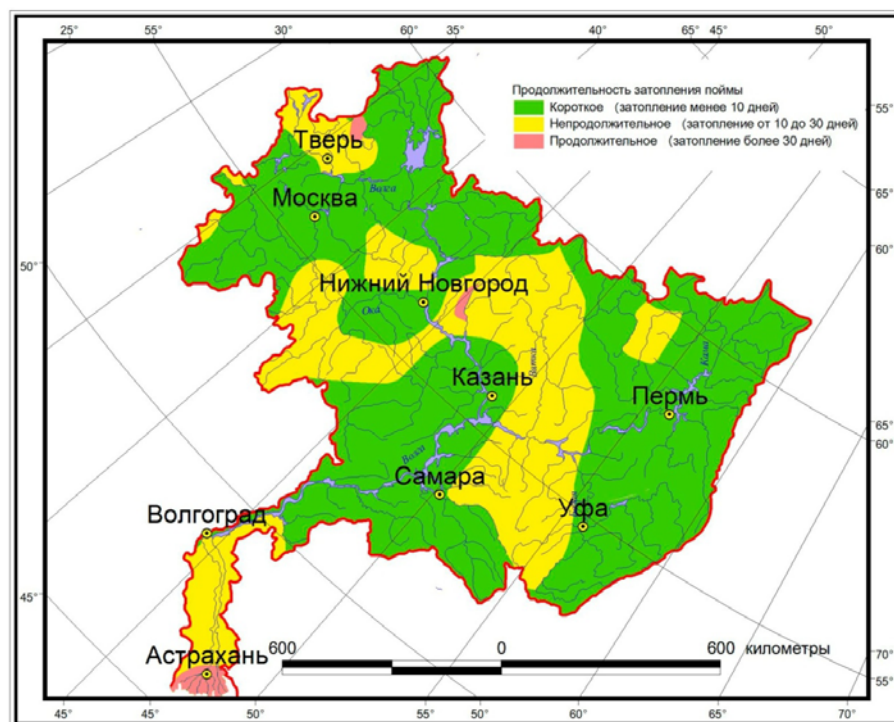


Рис.1. Изменение продолжительности затопления речных пойм в бассейне Волги

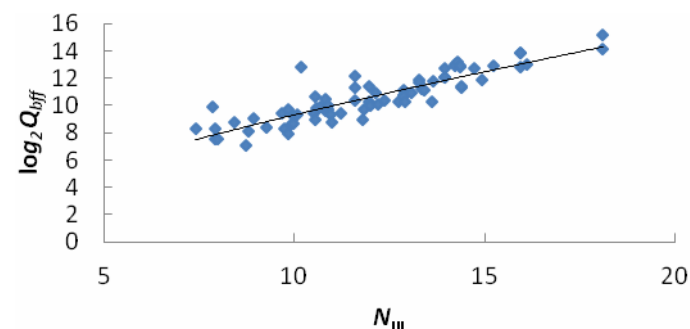


Рис.2. Соотношение между величиной расхода воды Q_{bff} , соответствующего устойчивому затоплению поймы рек в волжском бассейне, и их порядками (N_{III})

Изменение регулирующей роли поймы, связанной с аккумуляцией части стока в пределах пойменных массивов в период их затопления и с возвращением пойменных вод в меженное русло на спаде уровней, зависит от площади поймы. Эта характеристика в общем случае зависит от типа рек и их размера, испытывает большую изменчивость по длине речных долин. Методика определения площади пойм на произвольном участке малых, средних и крупных рек пока не разработана. Необходимость такой методики очевидна. Ее отсутствие затрудняет балансовую оценку накопления речных вод в пойме рек разного размера, препятствует оценке реальных и (или) потенциальных социальных и экономических ущербов в условиях наводнений на участках речных долин.

Анализ проблемы показал, что для этой цели можно использовать региональные (или бассейновые) зависимости между

площадью пойм $F_{\text{п}}$ и порядками рек. При наличии устойчивых связей между этими переменными (средней площадью пойменного массива для участка реки с $N_{\text{ш}} = \text{const}$ и соответствующей величиной $N_{\text{ш}}$), а также гидрографической информации о распределении рек территории по их размеру (длине) появляется возможность для определения затопляемой части площади пойм в пределах субъектов Российской Федерации или отдельных речных бассейнов.

Для проверки этой идеи использованы данные о количестве притоков S длиной менее 10 км, которые позволяют оценить порядок водотока на произвольном его участке [Алексеевский, 2000]. Они позволяют оценить порядки рек (система А.Шайдеггера) по формуле

$$N_{\text{ш}} = 1 + \log_2 S.$$

Использование этой формулы для устьев 9907 рек в бассейне Волги позволило оценить гидрографическое их подобие. Величина порядков для 96 наиболее крупных рек бассейна (с длиной более 200 км) использована для формализации структуры речной сети в бассейне Волги (рис.3). Порядки рек возрастают при переходе от их истока к устьям вследствие впадения притоков. Рассредоточение стока по рукавам характерно лишь для района Волго-Ахтубинской поймы и волжской дельты.

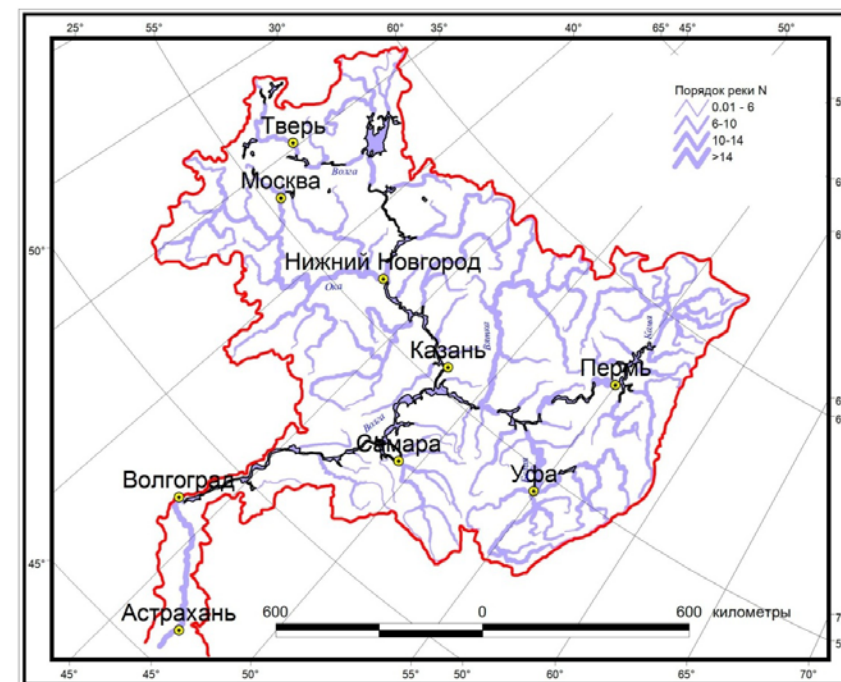


Рис. 3. Порядковая формализация речной сети в бассейне Волги

Распределение рек волжского бассейна по их порядку $N_{\text{ш}}$ характеризует табл.1. Ожидаемый максимум числа рек в волжском бассейне приходится на водотоки малого размера ($N_{\text{ш}} = 3 \div 5$). Число рек последовательно и закономерно убывает при увеличении порядка реки. Количество рек с $N_{\text{ш}} > 11$ не превышает первого десятка. Ниже Волгограда порядок незарегулированной Волги превышал значение $N_{\text{ш}} = 18$.

Для определения площади пойм на участках рек с изменяющимся их порядком $N_{ш}$ использованы топографические карты масштаба 1:50 000 на территорию бассейнов рр. Ока и Вятка. Обработка картографических материалов производилась на основе программного пакета ArcView GIS 3.2. В программной среде проводилась привязка растрового изображения (топографической карты) к географическим координатам, затем, по характерным признакам – высотным отметкам, границам населенных пунктов и растительности – назначались границы поймы и определялась ее площадь. Полученная информация по площадям пойм соотносилась с порядками рек (рис.4).

Таблица. 1. Распределение рек (по величине их порядка в устье) в бассейне Волги

Величина порядка реки $N_{ш}$ в устье	Количество рек с соответствующей величиной $N_{ш}$	Величина порядка реки $N_{ш}$ в устье	Количество рек с соответствующей величиной $N_{ш}$
>18	1	8–9	158
17–18	1	7–8	384
16–17	0	6–7	695
15–16	2	5–6	1312
14–15	2	4–5	1918
13–14	5	3–4	1898
12–13	9	2–3	1282
11–12	23	1–2	698
10–11	41	1	573
9–10	89	нет данных	816

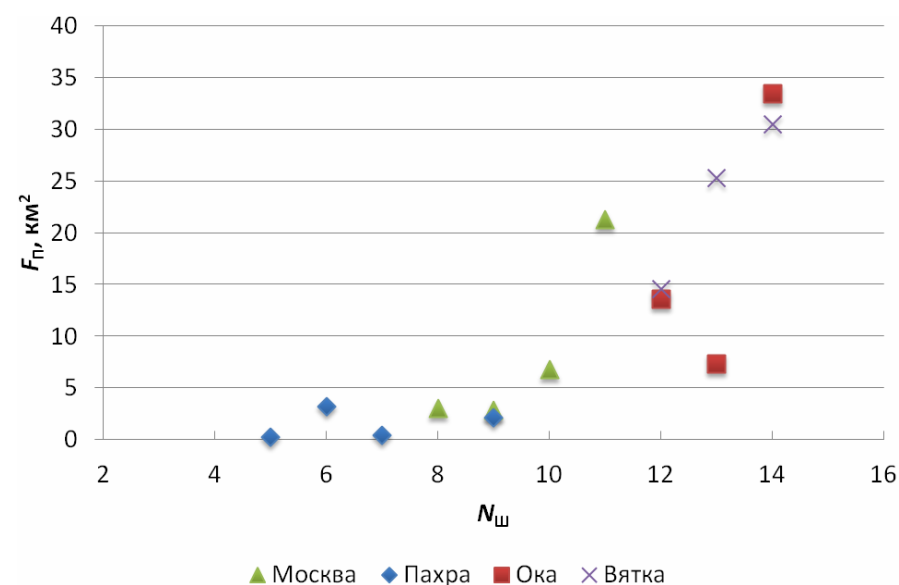


Рис. 4. Соответствие средней площади $F_{п}$ пойм рек волжского бассейна и их порядков $N_{ш}$

Изменение средней площади пойм по длине рек описывается нелинейной возрастающей функцией. С увеличением порядков рек закономерно возрастает средняя площадь пойм. Имеющийся разброс точек указывает на зависимость площади пойм от неучтенных морфологических особенностей речных долин, геоморфологического типа русла на участках рек. Например, средняя площадь поймы Оки при $N_{ш} = 12$ равна $13,5 \text{ км}^2$, а для $N_{ш} = 13$ – $7,3 \text{ км}^2$, что обусловлено сменой двухсторонней поймы на одностороннюю, характерную для участков адаптированного русла.

Наличие соответствия между средней площадью пойменных массивов и порядками рек открывает перспективы определения этих площадей для неизученных участков речных долин. На основе зависимости $F = f(N_{ш})$, ее дальнейшего уточнения за счет увеличения эмпирических данных и дифференциального учета роли геоморфологических факторов, можно оценивать площадь вероятного и фактического затопления освоенных территорий в речных долинах. При учете повторяемости затопления пойм и потенциальных ущербов, зависящих от стоимости основных фондов, численности населения, проживающего в условиях риска затопления, можно целенаправленно и эффективно осуществлять противопаводочные мероприятия в волжском бассейне.

Исследования проведены в рамках исследований по государственному контракту № 02.740.11.0336 (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры...»), частичной поддержке РФФИ (проект 09-05-00339), а также гранта Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских ВУЗах (проект №11.G.34.31.0007).

Список литературы

1. Алексеевский Н.И. Индикационные методы гидроморфологических исследований // Эрозия почв и русловые процессы, 2000. М.: Изд-во МГУ. Вып. 12. С. 232–240.
2. Власов Б.Н., Чалов Р.С. Районирование Европейской территории по условиям прохождения руслоформирующих расходов воды на реках // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1991. №6. С.32-42.
3. Морфология и динамика русел рек Европейской части России и сопредельных государств // Карты для высших учебных заведений. М.: ФСГК России, 1999.
4. Нестеренко Д.П., Косицкий А.Г. Русловая сеть р. Волги и ее индикационные особенности // Материалы VIII Научного семинара молодых ученых при Межвузовском Совете по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ. М.: МГУ, 2010. С.181-184
5. Русловой режим рек Северной Евразии (в пределах бывшего СССР) /Под ред. проф. Р.С.Чалова. М. Изд-во МГУ, 1994. 336 с.
6. Самохин М.А. Генетические особенности формирования уровня режима рек в различных регионах России // Автореф. дисс....канд. геогр.наук. М.: МГУ, 2006. 31 с.
7. Чернов А.В. Геоморфология пойм равнинных рек. М.: Изд-во МГУ. 1983. 197 с.
8. Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В., Лодина Р.В., Панин А.В. Морфодинамика русел равнинных рек. М.: ГЕОС, 1998. 288 с.

КОМПЛЕКСНАЯ МНОГОФАКТОРНАЯ ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ НАВОДНЕНИЙ В РОССИИ

Гладкевич Г.И., Терский П.Н., Фролова Н.Л.
МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва
Email: pavel_tersky@mail.ru

Вопросы исследования такого явления, как наводнение, напрямую связаны с понятиями опасности, уязвимости и природного риска. *Опасность* определяется комплексом природных условий территорий, от которых зависит вероятность развития опасного явления и его интенсивность. *Уязвимость* — степень потерь, возникающих в результате развития потенциально опасного явления, является функцией способности социальных, физических и экономических структур противостоять опасности. *Природный риск* — ожидаемые потери (от гибели и потери здоровья людей, потери собственности, нарушения хозяйственной деятельности), обусловленные проявлением конкретной природной опасности в данном районе за определенный период времени. Количественное определение риска производится, как правило, на основе оценки опасности и уязвимости.

Оценка риска наводнений может быть выполнена в различных масштабах – на региональном (в целом для страны, субъектов РФ), бассейновом и локальном уровне. Уровень обобщения определяет выбор исходной информации, степень детализации, подход к выбору соответствующих показателей, характеризующих негативное воздействие наводнений и формирование решений соответствующего уровня: стратегических, тактических или оперативных. Ниже рассматривается задача оценки риска наводнений на региональном уровне. Из общепринятых в картографировании вариантов выбора

таксономических единиц (выборочная характеристика, геометрические сетки, бассейновый подход, ландшафтно-географический подход, территориально-административное деление и др.) предпочтение отдано территориально-административному делению по следующим причинам: планирование мероприятий по защите от наводнений, их финансирование проводится органами власти и местного самоуправления; сбор и обработка необходимой информации производится, как правило, в рамках административно-территориальных единиц, многие решения, касающиеся действий во время наводнений, предотвращения и возмещения ущерба от наводнений, принимаются на федеральном уровне и на уровне субъектов федерации.

Для оценки риска наводнений требуется решить две задачи:

1) выбрать гидрологические показатели, характеризующие потенциальное затопление при возникновении наводнений, вероятность событий и степень воздействия на население и хозяйство. Должны быть использованы достаточно универсальные для разных регионов характеристики, характеризующие природные факторы опасности наводнений.

2) определить комплекс социально-экономических показателей, отражающих потенциальную уязвимость в случае возникновения наводнения.

Комплекс *гидрологических показателей* включает следующие характеристики, осредненные для субъектов РФ:

- *Максимальное превышение уровней начала затопления прибрежных территорий* (м) [1, 2]. Максимальный слой затопления отмечается для рек бассейна юга Приморского края, Башкортостана, республики Бурятия, Забайкальского края, Иркутской обл. и др.

- *Вероятность уровней начала затопления прибрежных территорий (%)* [1, 2]. Она рассчитывается, исходя из многолетних наблюдений за максимальными уровнями воды на гидропостах и информации о паводкоопасных зонах. В среднем для субъектов РФ она меняется от 15 до 45%.
- *Суммарная продолжительность наводнений (сут.)*. Такая характеристика получена по данным [3] за 1991-2005 гг. Средняя продолжительность одного наводнения 5 суток, а продолжительность отдельных наводнений в некоторых районах превышала 40 суток. При заторах продолжительность одного наводнения может достигать 12-24 дней [4]. Большая суммарная продолжительность наводнений характерна для предгорных районов Кавказа, Алтая, Забайкалья, для рек, бассейны которых расположены в зоне влияния муссонного климата (Приморье и Сахалин).
- *Доля затопляемой площади (%)* (по данным [5]) - часть территории субъекта РФ, подверженная реальному или возможному затоплению при наводнениях и во время высокого половодья.
- *Тип кривой руслоформирующих расходов воды* [6] определяет опасность русловых и пойменных переформирований в речных долинах, которые могут существенным образом сказываться на хозяйственной деятельности на поймах. Зависит от геоморфологического и морфодинамического типа русла. Можно выделить два крупных типа интервалов руслоформирующих расходов воды: они проходят в пойменных бровках, либо при выходе воды на пойму.

Величина уязвимости, необходимая для определения риска наводнений, связана со степенью хозяйственного освоения

затапливаемых территорий. Поэтому для каждого субъекта РФ были выбраны **социально-экономические показатели-индикаторы**, в наибольшей степени определяющие характер и масштабы последствий от наводнений. Они объединяются идентичностью территориального проявления своих количественных и качественных характеристик: ущерб от наводнений пропорционален концентрации производства и населения (количественные характеристики), но также зависит от качественной структуры населения и хозяйства региона [7]. В итоге были выбраны следующие показатели:

- *Плотность населения в регионах* [8].
- *Доля населения, проживающая в зоне потенциального затопления при наводнениях* [5].
- *Индекс развития человеческого потенциала*, для расчета которого используются данные о средней ожидаемой продолжительности жизни при рождении (количество лет), доля грамотных среди взрослых (%), отношение общего числа учащихся к числу молодых людей в школьном и студ. возрасте (%), ВВП на душу населения [9].
- *Стоимость основных фондов в экономике*. Количественные показатели определены по состоянию на 2010 г. на основе официальной статистической информации [8].
- *Антропогенная обусловленность риска стихийных бедствий* [7] - комплексный показатель вероятного риска (в баллах), отражающий потенциальную опасность представленных в регионе видов хозяйственной деятельности. Определяется на основе экспертных оценок.

Схема выбора показателей для оценки опасности наводнений представлена на рисунке 1.

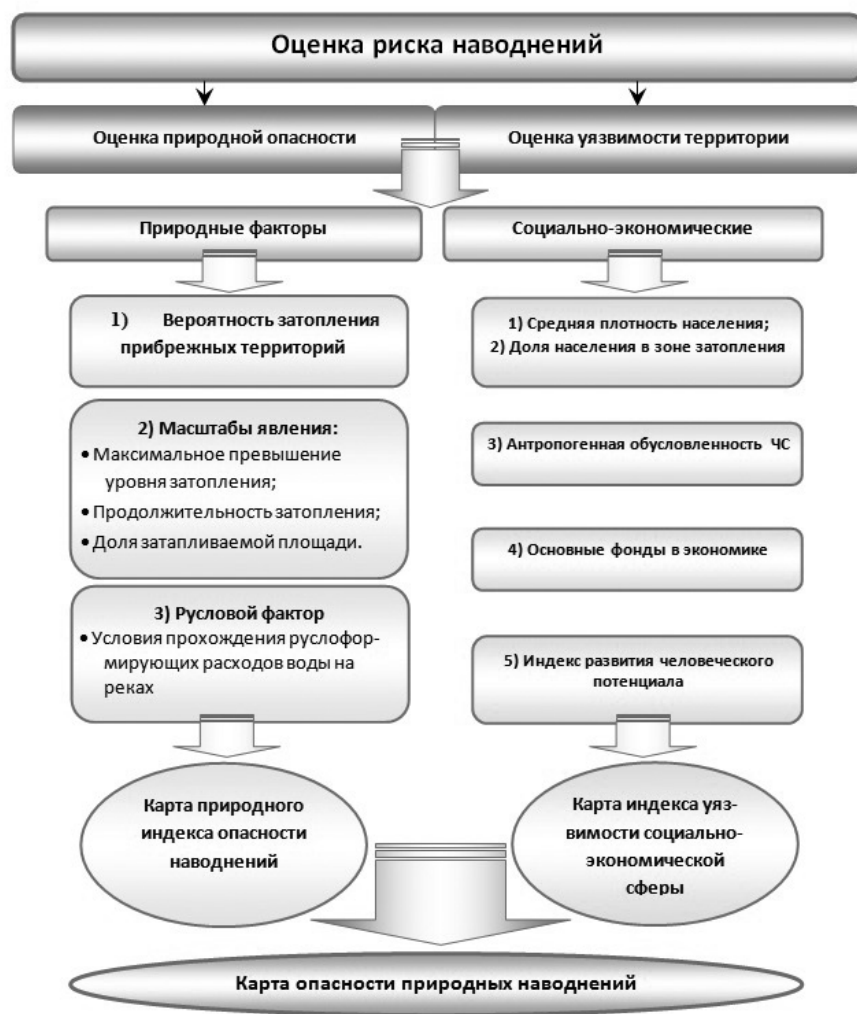


Рис. 1. Схема выбора показателей для оценки опасности (риска) наводнений

Алгоритм комплексной оценки и районирования территории по опасности наводнений включал: 1) Выбор количественных

критериев, показателей, таксономических единиц районирования для оценки опасности наводнений. Составление базы данных; 2) Ранжирование субъектов федерации по уровню опасности; 3) Определение интегральных количественных величин опасности наводнений, которые включают в себя вклад каждого фактора в конечный расчетный индекс; 4) Классификацию субъектов РФ по уровню опасности с использованием ГИС-технологий.

Количественная оценка риска наводнений. Многофакторность опасного воздействия наводнений определяет специфику расчета количественных показателей этой опасности. Общепринятая концепция расчета риска опасных явлений как произведение численных значений вероятности опасного явления и уязвимости территории требует использования достоверных данных об ущербе, которые отсутствуют в настоящее время. Поэтому, в контексте учета большого количества сравнительно независимых социально-экономических и природных факторов было принято решение апробировать методики комплексной количественной оценки различных показателей, ранее использовавшиеся в экономико-географических исследованиях [10, 11].

Реализация данной задачи может быть достигнута на основе комплексного подхода к оценке опасности наводнений в регионах и определения интегрального показателя, характеризующего этот уровень.

Для получения обобщающих комплексных оценок опасности наводнений, учитывая опыт работы с данными методиками в сфере социально-экономической географии регионов [12], принято решение использовать непараметрические методы многомерного анализа: метод суммы мест и метод «Паттерн». Объектом сравнительного

межрегионального анализа являются субъекты Российской Федерации.

Метод суммы мест (МСМ) предполагает ранжирование всех регионов по каждому показателю в группе природных факторов и в группе факторов социально-экономической уязвимости. При этом первые места присваиваются наилучшим их значениям. Интегральные оценки опасности наводнений рассчитываются путем суммирования мест по всем рассматриваемым показателям, взятым с учетом весового коэффициента каждого фактора. МСМ имеет недостаток, состоящий в том, что различие между каждой парой соседствующих в ранжированном ряду распределения регионов всегда является постоянной величиной, оцениваемой в один балл, тогда как в действительности различие показателей может быть весьма значительным.

Поэтому для конечной оценки опасности наводнений за основу был выбран другой распространенный метод расчета интегральных показателей – метод PATTERN - Planning Assistance Through Technical Relevance Number (Помощь планированию посредством относительных показателей технической оценки). Данный метод был разработан в конце 60-х годов в США. В этой методике в качестве индикаторов используются не ранги субъектов по возрастанию величин рассматриваемых характеристик, а сами их величины, нормированные на наибольшие значения (1):

$$t_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{i\max}}, \text{ где} \quad (1)$$

x_{ij} – значения показателей для субъектов РФ,

$i=1, \dots, n$ – номера показателей,

$j=1, \dots, k$ – номера субъектов РФ.

Согласно методике, результирующий комплексный индекс получается путем суммирования полученных таким образом индикаторов с использованием весовых коэффициентов. Хотя результаты, полученные методом PATTERN и МСМ, оказались схожими (коэффициент корреляции составляет 0,80), в дальнейшем для анализа был выбран метод PATTERN по описанным выше причинам.

Весовые коэффициенты определяют численно вклад каждого отдельного фактора в каждой группе: в группе природных факторов и в группе факторов социально-экономической уязвимости территории. Для расчета интегрального индекса также вводятся весовые коэффициенты, определяющие соотношение значимости природных и антропогенных факторов.

Весовые коэффициенты могут значительно варьировать по территории РФ из-за значительного разнообразия условий формирования максимального стока и связанных с ним опасностей, а также неодинакового характера расселения и хозяйственной деятельности на паводкоопасных территориях. Поэтому необходимо унифицировать расчетную методику для всей территории РФ путем введения всеобщих весовых коэффициентов для всех субъектов РФ. При отсутствии необходимой обеспеченности численных данных и эмпирических связей весовые коэффициенты назначаются методом экспертных оценок. Методы экспертных оценок являются одними из важных методов сбора информации, а главное, её анализа, отбора из множества свойств объектов и их взаимосвязей. С результате опроса экспертов, анализа литературных данных (например, [4, 13]), а также сравнения рассчитанных оценок опасности наводнений, полученных различными методиками, получена информация качественного

характера, с помощью которой и были назначены весовые коэффициенты для факторов опасности наводнений.

Результаты расчета индексов опасности наводнений.

Среди природных факторов, влияющих на размер ущерба и соответственно опасность наводнений, эксперты, прежде всего, выделяют продолжительность и глубину затопления пойм. При этом происходит воздействие как на капитальные сооружения и материальное имущество население, так и на сельскохозяйственные культуры, которые погибают при продолжительном затоплении. Поэтому при оценке природной составляющей риска наводнений для этой характеристики был выбран коэффициент 0,5, для глубины затопления – 0,2, для остальных факторов – 0,1.

В числе регионов, подверженных действию наводнений, с точки зрения природных условий особенно выделяются Северный Кавказ, Южный Урал, Западная Сибирь. Почти все регионы с наиболее высокими значениями индекса - более 0,75 (Свердловская область, Кемеровская область, Забайкальский край, Ставропольский край, Дагестан, Адыгея, Красноярский край, Северная Осетия, Томская область, Сахалинская область), имеют максимальную суммарную продолжительность затопления пойм (120-150 сут.) и вероятность затопления прибрежных территорий (до 45%), и при этом очень низкие значения доли затопляемой площади (менее 3%), за исключением республики Адыгея, где доля площади, подверженной затоплению, составляет 16,7%.

Природная опасность наводнений незначительно выражена для северо-западной части ЕТР, а также Чукотки. Это в первую очередь связано с низкими значениями продолжительности затопления пойм, в меньшей степени с сочетанием небольших значений остальных факторов.

По мнению экспертов среди факторов социально-экономической уязвимости территорий наибольший вклад в величину риска наводнений вносит такой показатель, как доля населения, проживающего в зоне потенциального затопления (выбран весовой коэффициент 0,5), также важной характеристикой для характеристики антропогенной освоенности территории является стоимость основных фондов в экономике (весовой коэффициент принят 0,2), остальные три показателя были взяты с коэффициентом 0,1. Наибольшая социально-экономическая уязвимость в случае наводнений наблюдается в тех регионах, где соответственно больше всего населения проживает в зоне потенциального затопления (Кабардино-Балкарская республика, Астраханская область, Северная Осетия, Забайкальский край, республика Тыва). Наименее страдают от наводнений в центральной части ЕТР, в Уральском ФО, на юге Западной Сибири, Иркутской области, в Хабаровском и Камчатском краях благодаря тому, что в зоне возможного затопления проживает очень незначительная доля населения региона, однако в некоторых областях центрального региона (Смоленской, Тверской, Брянской областях), а также в Свердловской, Омской, Оренбургской областях отмечается наивысшая антропогенная обусловленность стихийных бедствий.

Для расчета индекса, характеризующего интегральный риск наводнений, суммарные природные и социально-экономические показатели, по мнению экспертов, берутся в соотношении 1:4. Итогом типологической дифференциации субъектов РФ по степени опасности наводнений стала база данных и созданная на ее основе карта интегральной опасности наводнений по субъектам РФ, в которой отражены факторы природной опасности и социально-

экономической уязвимости территорий в виде классов опасности (рис. 2).

На основании типологии регионов разработана качественная классификация опасности наводнений на территории РФ. Одинаковой штриховкой отмечены группы регионов со сходными признаками опасности наводнений. Шкала опасности изменяется от класса «Низкая опасность» для регионов с низкими значениями природного и антропогенного факторов до класса «Чрезвычайно высокая опасность», в который попадают регионы с очень высокой природной опасностью и социально-экономической уязвимостью территорий (табл. 1). Интегральный индекс опасности наводнений $K_{\text{инт}}$, получен как сумма двух индексов (природной K_1 и социально-экономической составляющей K_2) с учетом весовых коэффициентов (0,2 и 0,8 соответственно).

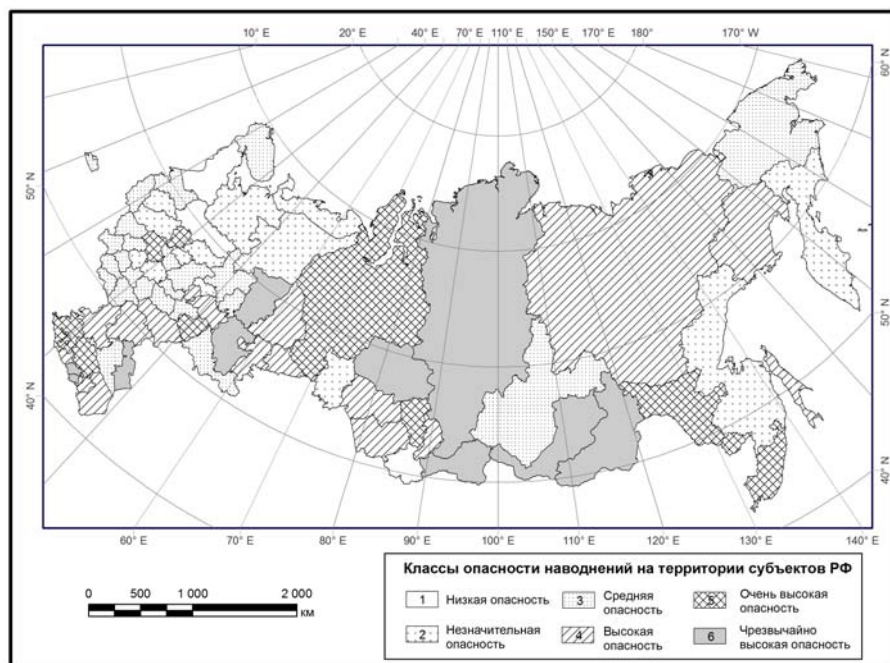


Рис. 2. Карта опасности наводнений на территории субъектов РФ

Реальная угроза населению и материальным ценностям возникает вследствие совокупного действия природных факторов формирования наводнений и социально-экономических предпосылок возникновения материального ущерба.

Таблица 1. Классификация субъектов РФ по степени опасности наводнений

	1	2	3	4	5	6
Степень опасности	Низкая опасность	Незначительная опасность	Средняя опасность	Высокая опасность	Очень высокая опасность	Чрезвычайно высокая опасность
$K_{\text{инт}}$	< 0,2	0,2-0,25	0,26-0,3	0,31-0,35	0,36-0,4	> 0,4

Например, «Средняя опасность» характерна для субъектов как с низкой природной опасностью и относительно низкой социально-экономической уязвимостью ($K_2 = 0,25-0,35$) (Чукотский АО, Ленинградская, Псковская область и др., так и для субъектов со средним индексом природной опасности ($K_1=0,45-0,55$) и весьма низким значением K_2 (< 0,25) – Мордовия, Ульяновская область и др.

Наивысшая степень опасности наводнений отмечается в Забайкальском крае, Астраханской области, Северной Осетии и Кабардино-Балкарской республике (значение индекса $K_{\text{инт}}$ более 0,5). Опасность наводнений в Забайкальском крае связана с тем, что значительная часть населения и хозяйства расположены на поймах рек, при этом продолжительность затопления пойм во время высоких половодий и паводков максимальная по России (до 150 суток суммарно за период 1991-2005 гг.). Существенную часть Астраханской области занимает речная система Нижней Волги, поэтому значительная доля населения вынуждена проживать и вести

хозяйство в пределах речной долины (доля населения области, проживающего в зоне затопления достигает 48%). Подобная ситуация наблюдается в указанных выше республиках Северного Кавказа, расположенных в горной части бассейна р. Терека (доля населения в зоне затопления 29% в Северной Осетии и 53,3% в КБР). Также в республиках Северного Кавказа очень высока вероятность затопления прибрежных территорий (до 45%) и велика роль динамических последствий наводнений – водно-эрозионных процессов.

Регионы с наименьшей опасностью наводнений расположены в северной и северо-западной части ЕТР, в значительной степени в ЦЧР, также в этот перечень попадают Чукотский АО, Камчатский и Хабаровский края, Оренбургская область, Республика Калмыкия и Алтай.

Возможность детальной проверки результатов расчетов комплексных индексов опасности наводнений должна опираться на данные о фактических ущербах от наводнений, определенных для субъектов РФ. В настоящее время таких данных в открытом доступе не существует. Однако существуют данные о предотвращенном материальном ущербе по субъектам РФ [14]. В соответствии с этими значениями на основании рядов индексов природной опасности и социально-экономической уязвимости территорий методом наименьших квадратов (с помощью программного комплекса Statistica) получено уравнение множественной регрессии, по которому рассчитаны величины предотвращенного ущерба, которые достаточно хорошо связаны с фактическими величинами предотвращенного ущерба – коэффициент корреляции составляет 0,68.

Существует ряд работ [3, 14], в которых есть сведения о характере опасностей наводнений по регионам России, а также по отдельным субъектам федерации. В работах В.А. Семенова [3] упоминается о ряде регионов, в которых отмечено наибольшее количество наводнений с учтенным ущербом за 15 лет. Среди них Краснодарский край, Дагестан, Алтайский край, Красноярский край, Читинская область, Свердловская область, Ленинградская область, Архангельская область. Наименьшее количество наводнений зафиксировано в Центрально-Черноземном экономическом районе. В соответствии с докладом Н.С. Грищенко [14], в число первой десятки субъектов Российской Федерации, наиболее подверженных опасности наводнений входят: Приморский край, Астраханская область, Амурская область, Бурятия, Краснодарский край, Сахалинская область, Дагестан, Волгоградская область, Ставропольский край и Кабардино-Балкария.

Все эти субъекты РФ соответствуют 5 и 6 классам опасности по типологической классификации опасности наводнений на территории России, предложенной авторами.

Перспективы оптимизации данной классификации, как средства оценки опасности наводнений, заключаются в расширении базы информации для ее проверки, которая должна включать в себя, в первую очередь, сведения об экономических потерях от наводнений. Типологическое районирование территории России по степени опасности наводнений может быть полезно при планировании хозяйственной деятельности в речных долинах и проведении защитных мероприятий на уровне субъектов РФ.

Литература:

1. Природные опасности России. Гидрометеорологические опасности. М.: «Крук», 2001. С. 25-63.
2. Национальный атлас России. Т.2. Природа. Экология. 2007. 495 с.
3. Семенов В.А., Коршунов А.А. Районирование территории России по опасности высоких наводнений в связи с изменениями климата и улучшение информационного обеспечения о наводнениях //Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях. Международная выставка и конгресс ЭКВАТЭК 2008. Москва 4-5 июня 2008 г., С.142–145.
4. Бuzин В.А. Опасные гидрологические явления. СПб.: изд РГГМУ, 2008. – 228 с.
5. Экстремальные гидрологические ситуации /отв. Ред. Н.И. Коронкевич, Е.А. Барабанова, И.С. Зайцева. – М.: ООО «Медиа-ПРЕСС», 2010. 464 с.
6. Чалов Р.С. Руслведение: теория, география, практика. Том 1: Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел.- М.: Издательство ЛКИ, 2008 г.- 608 с.
7. Гладкевич Г.И., Кружалин В.И., Мазуров Ю.Л. Типологическая дифференциация территории по риску последствий стихийных бедствий // Известия РАН., сер. Географическая. № 6. 2000. с. 57–65.
8. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2010: Р32 Стат. сб. / Росстат. – М., 2010. – 996 с.
9. <http://rgo.ru>
10. Азгальдов Г.Г., Азгальдова Л.А. Количественная оценка качества (Квалиметрия). Библиография. – М.: Изд-во стандартов, 1971.

11. Серебрякова Л.А. Методы оценки уровня социально-экономического развития регионов // Вестник СевКавГТУ. Серия «Экономика». № 3. 2003 г.
12. Гладкевич Г.И., Мозгунов Н.А. Метод ПАТТЕРН в оценке предпочтений использования территории для целей развития сельского туризма Туризм и рекреация: Фундамент. и прикладные иссл.». Труды V Междун. научн-практ. конф. – М., 2010 г. Стр. 110-118.
13. Гидрометеорологические риски / Монография. Под ред. Л.Н. Карлина. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2008. 282 с.
14. Грищенко Н.С., Шевченко Г.В., Марченко А.А. Предотвращение вредного воздействия вод от половодий и паводков на территории пойм рек (озер) Российской Федерации. Тезисы докладов Всероссийского конгресса работников водного хозяйства. Москва, 2003 г. с.191-192.

О ВНУТРИСУТОЧНОМ ХОДЕ ВАЛОВОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ФИТОПЛАНКТОНА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ МОЖАЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Гречушникова М.Г.¹, Андреева И.Ю.¹, Кременецкая Е.Р.²

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, ²ИВП РАН, Москва

E-mail: allavis@mail.ru

Важную роль в формировании режима растворенного в воде кислорода играет образование O_2 в процессе фотосинтеза фитопланктона. Сложность учета этого процесса при моделировании кислородного режима водоемов состоит в том, что он чутко реагирует на изменение метеоусловий.

Величина валовой продукции фитопланктона зависит от численности водорослей и от условий их обитания (температуры среды, обеспеченности биогенными веществами, уровня освещенности, ветрового перемешивания и др.). Однако влияние этих факторов неоднозначно. Так, например, с увеличением освещенности интенсивность фотосинтеза возрастает, однако после достижения определенного критического значения величины освещенности наступает так называемое "световое насыщение" - увеличение первичной продукции прекращается, а при дальнейшем росте освещенности начинает снижаться. Имеются многочисленные адаптации фитопланктона к изменению условий освещенности. Определенную роль здесь играет и температура. Так, интенсивность фотосинтеза, при которой наступает "световое насыщение", с повышением температуры возрастает. Происходит также адаптация к повышенной и пониженной освещенности путем изменения содержания клеточного пигмента [1]. В клетках водных растений,

адаптированных к высокой освещенности, содержание хлорофилла «а» ниже, чем в клетках, адаптированных к низкой освещенности. Это означает, что скорость роста водорослей при высокой освещенности ненамного выше, чем при низкой. Еще одна характерная особенность фотосинтеза состоит в том, что его температурные оптимумы у разных видов растений различны [2].

По [3] для «цветения» водоема, достаточно, например, содержания в воде фосфора в период перемешивания водной толщи в количестве 0.01 мг/л. Однако, в стратифицированном водоеме могут возникать изолированные слои, к которых запас биогенных веществ может истощаться.

Поскольку условия освещенности меняются в течение дня, интересно проследить изменение скорости фотосинтеза в течение суток, т. к. по литературным данным максимум фотосинтеза может наблюдаться в разное время суток (например, в 17 часов...). Кроме того, могут быть различия в продуктивности фитопланктона глубоководной части водоема и на мелководьях. Вопросы, касающиеся первичной продукции фитопланктона и интенсивности фотосинтеза на мелководьях и в глубоководной части водоема, наиболее подробно изучены на Рыбинском водохранилище.

Интенсивность фотосинтеза в водах мелководий водохранилища довольно тесно связана с их типом, т.е. с теми экологическими условиями, в которых развивается фитопланктон [4]. На защищенных и полужащищенных мелководьях фотосинтез, как правило, выше, чем в глубоководной зоне. В районе открытого побережья это соотношение определяется, главным образом, гидрометеорологическими условиями (скоростью и направлением ветра во время наблюдений), от которых зависит интенсивность водообмена между мелководьем и глубоководной зоной. При штиле

на мелководных станциях наблюдаются более высокие величины фотосинтеза, чем в глубоководной зоне, а в ветреную погоду различие между ними сглаживается. Скорость фотосинтеза обычно соответствует количеству фитопланктона и содержанию пигментов [5]. Более высокие величины на мелководных станциях отмечаются во время массового развития здесь сине-зеленых водорослей.

Вывод о более интенсивном фотосинтезе и развитии фитопланктона в большей части мелководной зоны водохранилища подтверждается данными по содержанию основных биогенных элементов. Большинство мелководных станций, в частности, расположенных в защищенных участках прибрежной зоны, характеризуются более высокими концентрациями минеральных соединений азота и особенно фосфора. Защищенные и полузащищенные мелководья характеризуются более высокой интенсивностью биохимических процессов, связанных с обменом биогенных веществ, на что указывают повышенные скорости оборота фосфатов в прибрежье [6]. В таких условиях даже слабо выраженное увеличение концентрации минеральных элементов, в частности фосфатов, может весьма значительно стимулировать развитие фитопланктона и его фотосинтез.

Целью данной работы было проследить изменения в суточном ходе фотосинтеза на мелководьях и в глубоководной части долинного водохранилища при разной гидрологической структуре водной толщи.

Исследования проводились на Можайском водохранилище летом 2011 г. Можайское водохранилище, созданное в 1960 году, расположено на прямолинейном участке долины р. Москвы в 62 км от ее истока. Протяженность водохранилища 28 км; площадь водного зеркала при НПГ 30,7 км²; объем 0,24 км³; максимальная

глубина 22,6 м, средняя - 7,7 м, максимальная ширина 2,6 км, средняя - 1,1 км; средняя амплитуда колебаний уровня воды в течение годового цикла 6 м [7]. В течение летнего периода в нем наблюдается температурная стратификация водной толщи. По трофическому статусу – оно относится к мезотрофным или слабевтрофным водоемам.

В составе фитопланктона Можайского водохранилища отмечены 6 отделов водорослей: зеленые, диатомовые, синезеленые, золотистые, пиропитовые, евгленовые [8]. Причем доминировали в разные периоды - синезеленые, пиропитовые, диатомовые.

Судя по [9, 10], в Можайском водохранилище запас биогенный веществ достаточно высок и лимитирования развития фитопланктона по биогенным веществам не должно быть.

СОСТАВ РАБОТ.

Полевые наблюдения за пространственно-временной изменчивостью продукционно-деструкционных процессов были организованы на УНБ Красновидово Географического факультета на Можайском водохранилище в пределах Красновидовского плеса. Продукционная станция размещалась на буйке, заякоренном над затопленным руслом р. Москвы с глубиной около 12-13 м. Для исследования пространственной неоднородности пробы воды отбирались в центре мелководного залива в 200 м от буйка с глубинами не более 3-4 м. Экспозиция склянок длилась не менее 3 часов. Содержание растворенного кислорода определяли методом Винклера.

Постановка продукционной станции краткосрочной экспозиции обоснована в [11]: короткая экспозиция (от 2 часов) дает возможность зарегистрировать изменения, связанные с внутрисуточным ходом освещенности и облачности, не успевают

накопиться токсичные продукты метаболизма при интенсивном цветении, т. е. нет угнетения популяции. Измерение температуры воды производилось датчиками-самописцами на рейдовой вертикали. Для анализа синоптических условий использовались данные автоматической метеостанции Vantage Pro на берегу плеса и данные Можайской метеостанции с интернет-ресурса [12]. Также в распоряжении авторов имелись данные анализа изменения внутрисуточного содержания общего и минерального фосфора на 27.06, а также дневные пробы за 27.07, 1.08, 4.08 и 9.08.

УСЛОВИЯ ПОГОДЫ

До начала первой серии наблюдений (с третьей декады июня 2011 г. до первых чисел июля) наблюдалась фаза нагревания синоптического цикла: среднесуточная температура воздуха возросла с 15,5 до 24,8°C, а в течение последовавшей затем фазы охлаждения к 6 июля опустилась до 19,5°C (рис. 1). После ливневых осадков 20 июля с практически сплошной облачностью и скоростью ветра до 6 м/с, начался период, характеризовавшийся ростом атмосферного давления с 734 до 745 мм к 23 июля и периодическим выпадением ливневых осадков с возрастанием скорости ветра до 4, иногда 6 м/с, что замедлило общую тенденцию нагревания (воздух прогрелся до 19,2°C 26.07). К началу первого периода

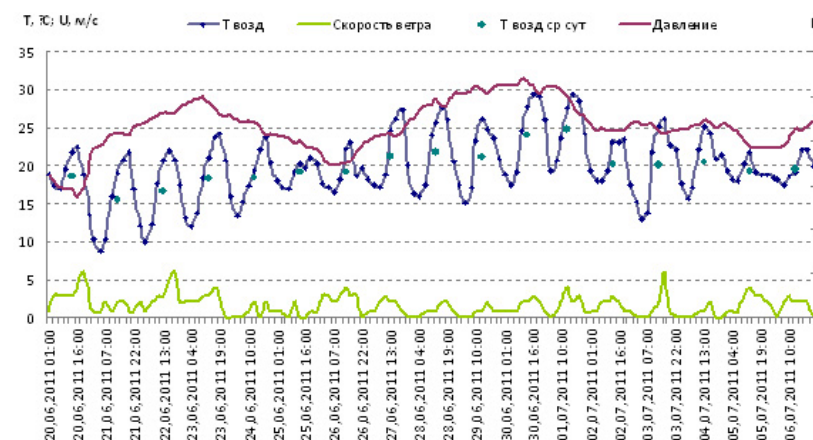


Рис. 1. Изменение метеорологических характеристик 20.06-06.07.2011.

наблюдений (26 июня – 6 июля) атмосферное давление опустилось до 737 мм. С 25 по 27 июля непрерывно шли дожди, скорость ветра была 2-4 м/с, облачность 10 баллов. Аналогичная ситуация наблюдалась в его конце первой серии наблюдений со второй половины 4 июля. Максимум атмосферного давления (747 мм) отмечен 30 июля, а максимум срочной температуры воздуха (29,4°C) – 1 июля. Именно эти два дня были единственными днями без осадков. В остальной период во второй половине дня, как правило, наблюдалось увеличение облачности, осадки в основном ливневого типа с грозами и увеличением скорости ветра (от 0 до 2-3 м/с). Таким образом, первый период наблюдений охватил как фазу наиболее активного нагревания воздуха, характеризующуюся ростом атмосферного давления и небольшими скоростями ветра, так и последующую фазу охлаждения, сопровождавшуюся падением давления, уменьшением температуры воды и ростом скорости ветра.

Второй период наблюдений приходится на начало августа с предшествовавшим сильным похолоданием в конце июля с уменьшением средних суточных температур с 25,0 до 14,9°C к 2.08,

падением давления до 736 мм к 1.08, ливневыми осадками с грозами 28-29.07 и 1-3.08 и скоростью ветра до 3-5 м/с (рис. 2). Далее до 9.08 наблюдалась довольно продолжительная фаза нагревания, когда среднесуточная температура воздуха увеличилась до 21,5°C, максимальная срочная температура была зафиксирована в предыдущий день - 27°C. Давление же достигло своего максимума 747 мм уже к 3 августа, а затем достаточно стабильно держалось около отметки 745 мм и лишь 9 августа отмечено его резкое падение до 739 мм, после чего оно восстановилось на прежнем уровне. Значение среднесуточной температуры воздуха после этого скачка давления и выпадения ливневых дождей 9-11.08 постепенно снизилось до 13,2°C. Средняя скорость ветра в этот период была невелика – около 2 м/с, за исключением максимума – 7 м/с 8.08.

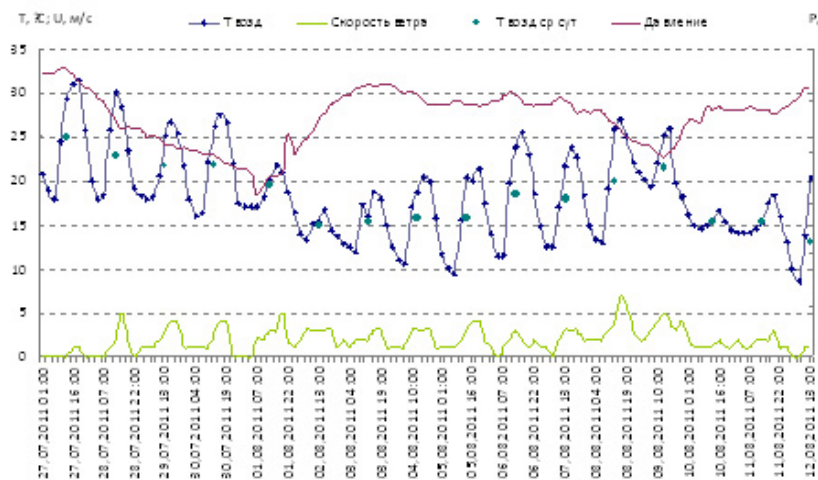


Рис. 2. Изменение метеорологических характеристик 27.07-12.08 2011.

Таким образом, оба периода наблюдений охватили фазы нагревания и охлаждения синоптических циклов. При этом, несмотря на то, что в июне-июле срочные температуры воздуха были выше (до 29,4°C), фаза нагревания была более выражена в августе за счет

большей разности температур наиболее теплого и наиболее холодного дня периода (от 9,4°C до 27°C), их внутрисуточный размах был также больше (до 14,1°C). В конце лета наблюдались бо́льшие скорости ветра, как средние, так и максимальные. Первый период был более дождливым, с частыми грозами, второй – отличался в среднем меньшей облачностью. Особенности погоды привели к формированию различной гидрологической структуры водной массы водохранилища и различному содержанию биогенных веществ (в частности минерального фосфора), что обусловило особенности продукционных процессов в эти два периода.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Проведенные наблюдения выявили как пространственную так и временную изменчивость продукционных процессов.

Первый период наблюдений (26.06 – 06.07) характеризовался сильной стратификацией водной толщи (средний градиент температуры по вертикали изменялся от 0.86 до 1.03°C/м). Синоптический скачка плотности наблюдался на глубине 2-3 м, а в дневные часы возникал и подповерхностный пикноклин. Толщина перемешанного слоя воды в этот период в среднем составляла менее 1 м, лишь к концу периода увеличиваясь до 4-5 м. В гипolimнии (начиная с глубины 8 м) содержание O_2 было менее 1 мг/л. Содержание O_2 в поверхностном слое воды при толщине перемешанного слоя воды составляло 130-140 % насыщения, причем суточный ход O_2 был не выражен (по 27.06). При увеличении толщины перемешанного слоя воды до 4-5 м насыщение поверхностного слоя воды O_2 снизилось до 98%. Насыщение воды на мелководьях кислородом изменялось от 100 до 160 %, увеличиваясь в послеполуденные часы (к 15-16 часам).

Прозрачность воды на рейдовой вертикали изменялась от 1.25 до 1.8 м, на мелководьях от 1- до 1.6 м. Валовая продукция фитопланктона на рейде изменялась от 0.1 до 0.4 мг/л/ч (на 0.5 м), а на мелководьях от 0.15 до 0.58. Причем, в июне-июле максимальные значения валовой продукции наблюдались в 9-11 часов (а не при наибольшем поступлении солнечной радиации). Содержание минерального фосфора ($P_{мин}$) в верхнем слое на рейдовой вертикали (по данным 27.06.11) изменялось от 1 до 6 мкг/л, причем минимальные значения получены в дневные часы, а утром содержание $P_{мин}$ составляло 6 мкг/л. Снижение к полудню содержания $P_{мин}$ до 1 мкг/л могло угнетать развитие фитопланктона.

В августе наблюдения происходили после периода похолодания. Слой скачка опустился до глубины 7-8 м, средний градиент температуры по вертикали уменьшался до 0.51 °С/м. Прозрачность воды изменялась от 0.8 до 1.4 на рейде и от 0.7 до 1.5 на мелководьях, причем к вечеру обычно снижалась.

Насыщение воды кислородом в поверхностном слое на рейдовой вертикали увеличивалось от 85-90% в утренние часы до 120% к вечеру. На мелководье насыщение воды кислородом менялось от 85-98% в утренние часы до 122-131% к вечеру (в период 6-9.08). 11.08 насыщение воды кислородом было 57-65%.

К началу второго периода наблюдений содержание $P_{мин}$ в эпилимнионе (4.08) составило 12 мкг/л. Т.е. по содержанию $P_{мин}$ в августе создались условия благоприятные для цветения фитопланктона (по [3] – 10 мкг/л). Содержание минерального фосфора в дневные часы на рейде не опускалось ниже 6-7 мкг/л, в заливе – 8 мкг/л, т.е. содержание фосфора не лимитировало развитие фитопланктона.

Валовая продукция фитопланктона на рейде изменялась от 0.08 до 0.8 мг/л/ч, а на мелководье – от -0.19 до 0.75 мг/л/ч.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение двух серий наблюдений показало, что в синоптическом масштабе выражено изменение (увеличение) абсолютных величин валовой продукции ($P_{вал}$) на горизонте 0,5 м между сериями наблюдений в июне-июле и августе, связанное со вспышкой цветения сине-зеленых водорослей (рис. 3). Их массовое размножение началось после существенного похолодания в конце июля с ливневыми дождями и паводками, обусловившими поступление в водохранилище дополнительных порций органических веществ, необходимых для развития водорослей. Кроме того, увеличение содержания фосфора связано с **аноксидными условиями в гипolimнионе**. При отсутствии кислорода в придонной воде окисное железо восстанавливается до закисного и вместе с фосфором диффундирует в воду из донных отложений [13]. Уже в конце июня начиная с 7-8 м глубины содержание O_2 было менее 1 мг/л. Аноксидные условия у дна сохранились и в августе. Содержание минерального фосфора в придонной водной массе с конца июня к концу июля увеличилось с 50-100 мкг/л до 500 и даже 590 мкг/л к 9 августа.

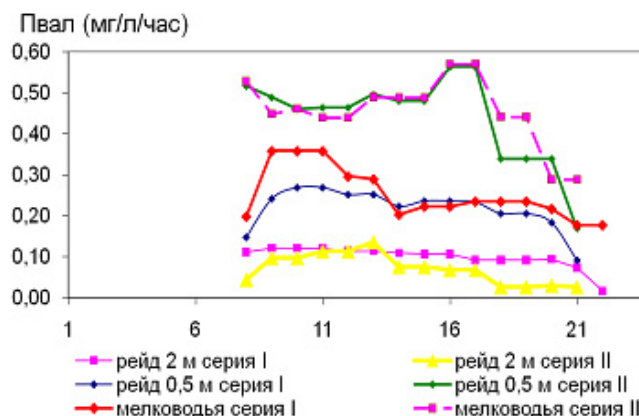


Рис. 3. Пвал (мг/л/час), средняя* по времени на русле (0,5 и 2,0 м) и мелководьях (* для каждого часа осреднялись все имеющиеся значения наблюдений).

Немаловажную роль сыграло и изменение гидрологической структуры водоема: толщина перемешанного слоя с конца июня к началу августа увеличилась от 2 до 5-6 м, за период с 4 по 8 августа до 8 м, а 9 и 11 августа толщина перемешанного слоя с однородным распределением температуры воды достигла 10 м. Заглубление пикноклина позволила части накопленного в гипolimнии фосфора выйти в эпилимнион. Кроме того, подобная однородность создает благоприятные условия для рециркуляции биогенных веществ [15]. На горизонте 2 м величины валовой продукции за августовскую серию наблюдений ниже, чем в июне-июле из-за уменьшения прозрачности воды с 100-120 см до 50-70 см, обусловленного массовым развитием водорослей в вышележащих слоях и затенением. Однако, обращает на себя внимание то, что при уменьшении интенсивности фотосинтеза на горизонте 0,5 м в период с 10 до 15 часов, на горизонте 2 м валовая продукция в эти часы повышена. Очевидно, это связано с тем, что в этот период доминировали синезеленые водоросли, способные регулировать свою

плавать и избегать избыточной инсоляции в верхнем слое воды, опускаясь глубже.

Фактор солнечной радиации статистически значимо выражен для первой серии наблюдений (рис. 2) и определяет четко выраженные максимумы валовой продукции в безоблачные дни 29.06 (12^{30} - 16^{50}), 30.06 (9^{15} - 13^{30}) и 6.07 (7^{40} - 12^{35}). В августе зависимость положительна, но тренд слабо выражен (солнечных безоблачных дней кроме 7.08 в данной серии наблюдений не было, рис. 4). Однако же значения валовой продукции в среднем на 40 и 50% (на мелководьях и рейдовой вертикали соответственно) выше, чем в первую серию.

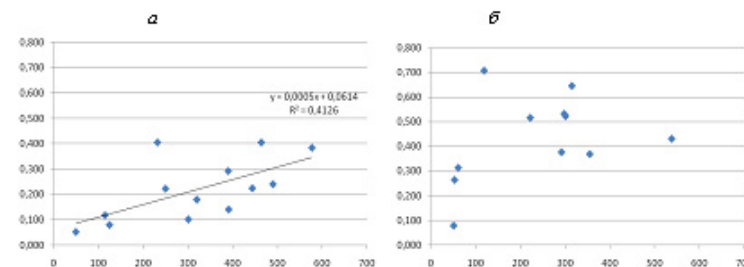


Рис. 4. Зависимость валовой продукции (мг/л/час) на рейдовой вертикали от значений суммарной солнечной радиации (ΣR), осредненных за периоды экспозиции склянок, для первой (а) и второй (б) серий наблюдений.

Обращает на себя внимание различный внутрисуточный ход в сериях наблюдений: для первой серии характерен максимум валовой продукции до 12 часов. По-видимому, это связано с уменьшением содержания минерального фосфора в дневные часы, отмеченного в ходе наблюдений 27.06., а также с развитием кучевой облачности во второй половине дня. В течение второй серии большая облачность, наоборот, наблюдалась в первой половине дня, а содержание минерального фосфора более 6 мкг/л лимитирующим фактором не являлось. Полученные результаты расширяют представление о

внутрисуточном максимуме продукции в зависимости от внешних условий: (например при безоблачном небе он наблюдался в 17:00-19:00 [11, 14]), и подтверждают большую чувствительность процесса фотосинтеза к изменению физико-химических характеристик среды обитания.

Проведенные наблюдения выявили пространственную неоднородность продукционных процессов: в среднем за первую и вторую серию наблюдений значения валовой продукции на мелководьях выше, чем на рейдовой вертикали над затопленным руслом на 23 и 6% соответственно. При детальном анализе выявлено, что наибольшее различие имеет место при ветрах западного сектора, при которых в мелководном заливе, ориентированном на запад, наблюдается нагон, и значения продукции повышаются из-за возрастания численности водорослей. Но нельзя оставлять вниманием и фактор дополнительного поступления фосфора в водную толщу при взмучивании на мелководьях при ветровом перемешивании и свободной конвекции. В среднем за период первой серии наблюдений преобладали юго-восточные ветры (1,4 м/с), а за период второй серии – юго-западные (2,2 м/с). Поэтому считаем обнаруженную пространственную неоднородность значимой, особенно в периоды выраженной антициклонической погоды, подобной той, что наблюдалась в конце июня – начале июля 2011 г. Детальный анализ значений валовой продукции выявил случаи превышения ее значений на рейдовой вертикали над значениями с мелководий в случаях преобладания ветров восточного сектора, а также южных ветров, перемещающих воду от правого берега «мимо» залива, где отбирались пробы на мелководьях.

ВЫВОДЫ

Проведенные учащенные наблюдения за продукционными процессами выявили:

- 1) существенную синоптическую неоднородность, выражающуюся в изменении абсолютных значений валовой продукции и зависимость ее внутрисуточного хода от метеорологических условий (например, облачности) и изменения содержания минерального фосфора;
- 2) пространственную неоднородность, обусловленную сгонно-нагонными явлениями и процессами рециркуляции фосфора при взмучивании донных отложений и в результате ветрового и конвективного перемешивания.

Полученные результаты имеют практическое значение для моделирования внутриводомных процессов и мониторинга экологического состояния водоема.

Литература:

- 1 Йоргенсен С.Э. Управление озерными системами. М.: Агропромиздат, 1985. 159 с.
- 2 Одум Ю. Основы экологии. М.: «Мир», 1975. 740 с
- 3 Хендерсон-Селлерс Б., Марклэнд Х.Р. Умирающие озера. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 278 с.
- 4 Пырина И.Л., Башкатова Е.Л., Сигарева Л.Е. Первичная продукция фитопланктона в мелководной зоне Рыбинского водохранилища в 1971-1972 гг. / Гидробиологический режим прибрежных мелководий Верхневолжских водохранилищ. // Труды Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 33 (36). Ярославль, 1976, с. 106-132.

- 5 Башкатова Е.Л. Фитопланктон прибрежной зоны Рыбинского водохранилища по наблюдениям 1971-1972 гг. / Гидробиологический режим прибрежных мелководий Верхневолжских водохранилищ. // Труды Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 33 (36). Ярославль, 1976, с. 84-105.
- 6 Былинкина А.А., Генкал Л.Ф. Скорость оборота минерального фосфора и поглощения глюкозы в воде прибрежной и глубоководной части Рыбинского водохранилища. / Биогенные элементы и органическое вещество в водохранилищах. // Труды Инст. биол. внутр. вод АН СССР. 1974, вып. 29 (32). Рыбинск, с. 7-16.
- 7 Комплексные исследования водохранилищ, Можайское водохранилище. М.: Изд-во МГУ, вып.3, 467 с.
- 8 Каниковская А.А., Садчиков А.П. Сезонные изменения взаимоотношений фито- и бактериопланктона в толще воды мезотрофного водоема // деп. ВИНТИ, Москва, 1985
- 9 Моделирование режима фосфора в долинном водохранилище // под ред. К.К.Эдельштейна. М.: МГУ, 1995. 79 с;
- 10 Хрусталева М.А. Режим биогенных элементов в Можайском водохранилище // Комплексные исследования водохранилищ, вып. 2. М.: МГУ, 1973. С.71-75
- 11 Гаврилов И.Т. и др. Возможности и перспективы использования установок для изучения процесса фотосинтеза //Гидрохимические исследования поверхностных подземных вод района Можайского водохранилища. Издательство МГУ, 1977. стр.5-16
- 12 www.rp5.ru
- 13 Мартынова М.В.Об участии донных отложений в круговороте фосфора в водоеме //Гидрохимические исследования

- поверхностных подземных вод района Можайского водохранилища. Издательство МГУ, 1977. стр.52-61.
- 14 Сапожников В.В. и др. Процессы формирования качества воды в питьевых водохранилищах. М.: Изд-во МГУ, 1979. С. 25.
- 15 Ершова М.Г. и др. Внутрисуточная трансформация состава воды в Можайском водохранилище//Водные ресурсы, 2000, Т.27, №4, с. 485-497.

**МЕТОД ОЦЕНКИ И СЦЕНАРНЫХ ВАРИАНТОВ ПРОГНОЗА
ВОДНЫХ РЕСУРСОВ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНЫХ
ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА ДЛЯ ПАН-АРКТИЧЕСКИХ
РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Ковалев Е.Э.
Учреждение Российской академии наук Институт водных проблем
РАН, Москва,
E-mail: gusev@aqua.laser.ru

В настоящее время моделирование стока (традиционно определяющего водные ресурсы рассматриваемой территории суши) с пан-Арктических речных бассейнов, составляющего в сумме около 50% притока воды в Северный Ледовитый океан [1], вызывает большой интерес у сообщества модельеров гидрологических процессов в связи с тем, что указанные регионы очень чувствительны к естественным и антропогенным воздействиям. В частности, моделирование климатических изменений с использованием моделей глобальной циркуляции атмосферы показывает, что предстоящее глобальное потепление в наибольшей мере ожидается в северных широтах и будет связано с увеличением в этих районах осадков и более ранним наступлением снеготаяния. [2]. Последние оценки возможных эффектов климатических изменений дают основания предполагать, что сток с арктических речных бассейнов может значительно измениться как в количественном отношении, так и в поведении его годового гидрографа [3, 4].

В связи со сказанным целью настоящей работы явилась адаптация разработанной участниками настоящей работы модели тепловлагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой

SWAP (Soil Water – Atmosphere – Plants) [5] к проведению гидрологических расчетов, проверка ее способности воспроизводить сток рек пан-Арктического бассейна и использование для оценки водных ресурсов в их современном состоянии и при возможном изменении климата до 2050-2060 гг.

В настоящее время в связи с растущей интенсивностью антропогенной деятельности на планете, а также с возможными изменениями климата возрастают требования к точности проведения гидрологических расчетов, прогнозов речного стока, оценки формирования водных ресурсов. Многие из традиционных методов гидрологических расчетов и прогнозов речного стока (в частности, чисто гидрологические модели концептуального типа) при довольно резкой динамике изменения окружающей среды не обладают надлежащим (в смысле точности) качеством для решения таких задач. Обеспечение соответствующего качества оценок характеристик гидрологического режима, формирования водных ресурсов требует методик, основанных на достаточно адекватном моделировании физического механизма процессов тепло- и влагообмена, происходящих на территории речных бассейнов и водосборов. Этим требованиям отвечают модели тепловлагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой (в англоязычной литературе подобные модели характеризуются аббревиатурой LSM – Land Surface Model). Следует отметить, что и развитие гидрологических моделей в последние годы идет по пути их приближения к LSM-моделям. Указанное обстоятельство, а также положительный опыт использования LSM-модели SWAP для воспроизведения гидрографов стока различных рек земного шара в ряде международных проектов (MOPEX, PILPS, Rhone-AGG, GSWP-2, ALMIP и др.) послужило обоснованием использования указанной

модели в качестве основного расчетного инструментария и в данной работе.

Использование SWAP при проведении расчетов составляющих водного баланса для крупномасштабного речного бассейна обычно предполагает разбиение его поверхности на ряд расчетных ячеек (в данной работе размером $1^\circ \times 1^\circ$). В пределах каждой ячейки моделирование ее теплового и водного режимов проводится независимо от других ячеек. Значения стока с расчетных ячеек бассейна (с учетом площадей, рассчитанных на основе реальных водосборных территорий, привязанных к ячейке) служат входной информацией для следующего блока модели – блока трансформации стока в речной сети. В принятой схематизации ячейки бассейна соединены каналами русловой сети, трансформация стока в которых может рассчитываться с использованием различных подходов. В данной работе для этой цели была применена простая линейная модель формирования водного баланса в русле [6].

Информационное обеспечение LSM моделей включает в себя следующие группы данных: актинометрические (приходящая длинноволновая и коротковолновая радиация) и метеорологические (атмосферные осадки, температура и влажность воздуха, атмосферное давление и скорость ветра) характеристики на высоте их измерений, а также некоторые гидроэкологические характеристики рассматриваемой территории, идентифицирующую её в рамках LSM-моделей, а именно, гидрофизические параметры почвы и растительного покрова, характеристики рельефа. В случае крупномасштабного (регионального или глобального) объекта такая информация требуется для каждого расчетного элемента (участка или ячейки сетки) суши, на которые разделен объект (речной бассейн, континент). В этом случае получение достаточно точной информации

представляет значительную проблему.

Главным образом это относится к двум характеристикам: осадкам и приходящей радиации. Во-первых, эти характеристики наиболее изменчивы в пространстве, в основном, по причине изменчивости облачности, пространственная структура которой имеет стохастический характер; во - вторых (и это наиболее важно), именно эти характеристики в большей степени определяют значения выходных переменных LSMs (в частности, речного стока и суммарного испарения).

При задании параметров подстилающей поверхности особенно важна точность задания гидрофизических параметров почвы, хотя корректное задание параметров растительного покрова тоже имеет значение. Почвенные характеристики более критичны в отношении получающихся результатов расчетов водного и теплового балансов.

Таким образом, наиболее важным для расчетов составляющих водного и теплового балансов является более корректное задание характеристик, относящихся прежде всего к осадкам, приходящей радиации и гидрофизическим параметрам почвы.

Основой гидрометеорологических данных послужили результаты непосредственных измерений метеорологических элементов на метеостанциях, расположенных внутри рассматриваемого речного бассейна или рядом с ним. Кроме того, поскольку значения приходящей коротко- и длинноволновой радиации на метеостанциях не измеряются, они были рассчитаны с использованием стандартных метеорологических наблюдений по методике, описанной в [5]. В северных регионах в пределах выбранного бассейна указанных метеостанций обычно не так много и их расположение не совпадает с расположением центров расчетных

ячеек, в связи с чем возникает задача интерполяции измеренных значений метеозлементов по расчетным ячейкам. Для ее решения в данной работе была использована процедура кригинга [7].

При создании базы данных как почвы, так и растительного покрова, адаптированной под модель SWAP, за основу была принята глобальная база данных, предложенная в проекте GSWP-2. Часть используемых в модели параметров является константами, а часть изменяется во времени и представлена в базе данных среднемесячными значениями для 1982 – 1995 гг. (при проведении модельных расчетов для получения значений подобных характеристик с 3-часовым шагом осуществлялась линейная интерполяция их среднемесячных значений между серединами соседних месяцев). Значения параметров в базе данных GSWP-2 были предварительно проанализированы для устранения грубых несоответствий и ошибок.

С целью улучшения качества гидрологических расчетов были применены методы автоматизированной калибровки наиболее важных модельных параметров (т.е. параметров, чувствительность к которым результатов моделирования той или иной переменной, в данном случае стока, наиболее высока), основанные на прямом поиске минимума среднеквадратического отклонения рассчитанных значений стока от измеренных и с одновременным учетом условия, что систематическая ошибка не должна превышать 5%.

Качество расчетов оценивалось по качеству модельного воспроизведения речного стока. Оценка качества расчета стока осуществлялась по трем статистическим критериям соответствия рассчитанных и измеренных его значений: систематической ошибке *Bias*, равной разности между рассчитанными и наблюдаемыми средними значениями стока, коэффициенту корреляции между

рассчитанными и наблюдаемыми величинами *Corr* и эффективности по Нэшу-Сатклиффу [8] *Eff*, определяемой выражением

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{\Omega} (x_{cal} - x_{obs})^2}{\sum_{\Omega} (x_{obs} - \bar{x}_{obs})^2}, \quad (1)$$

где x_{cal} и x_{obs} – рассчитанные и измеренные значения некоторой величины x , Ω – дискретное множество выборки величины x . Обычно полагают, что при $Eff > 0.5$ модель достаточно хорошо воспроизводит динамику x (при $Eff = 1$ расчет следует признать идеальным), если же $Eff < 0$, то временная изменчивость x воспроизводится плохо (в этом случае даже простое осреднение наблюдаемых значений лучше модельного расчета). Здесь уместно вспомнить, что при разработке методик прогнозов стока принята следующая шкала оценки их точности [9]: «хорошая» точность при $Eff \geq 0.75$ и «удовлетворительная» при $0.36 < Eff < 0.75$.

Что касается такой характеристики как *Bias*, то в основу оценки качества моделирования стока с использованием этого критерия могут быть положены соображения о том, что систематическая ошибка суточных, месячных и годовых значений измеренного речного стока обычно не менее 5% [10] (для периодов половодья ошибка измерения стока может быть существенно выше). В связи с этим можно принять, что в случаях, когда $Bias \leq 5\%$, качество расчетов стока можно признать хорошим.

Описанная методология расчета гидрографов стока была применена для ряда рек северной части Европейской территории России. Рассмотрим несколько примеров полученных результатов для последней трети XX века. На рис.1 приведен пример воспроизведения стока р. Печоры за 1986-2000 гг. (калибровочный

период: 1981 -1985 гг.). Приведенный пример, а также статистика качества расчетов за многолетний период ($Bias = -10 \%$, $Eff = 0,82$, $Corr = 0.91$ для р. Печоры показывают, что использование модели SWAP в сочетании с информационным обеспечением, основанном на глобальных базах данных по параметрам подстилающей поверхности (при калибровке наиболее важных модельных параметров) позволяет воспроизводить гидрографы суточного стока р.Печоры с высоким качеством. Аналогичные выводы получены и при расчетах стока рек Мезени, Северной Двины, Онеги, Туломы и Поноя, что позволяет надеяться на использование рассмотренной методологии в задачах сценарного прогнозирования водного баланса северных рек.

Результаты использования глобальных климатических моделей в целом свидетельствуют, что прогнозируемое в будущем глобальное потепление в большей степени скажется именно в высоких северных широтах, приводя к увеличению в этой зоне осадков и усилению снеготаяния [2]. Тем не менее, вопрос о том, как глобальное потепление скажется на гидрологическом цикле и динамике его элементов в арктическом регионе, только начинает исследоваться, полученные предварительные результаты не однозначны и требуют дальнейшего изучения.

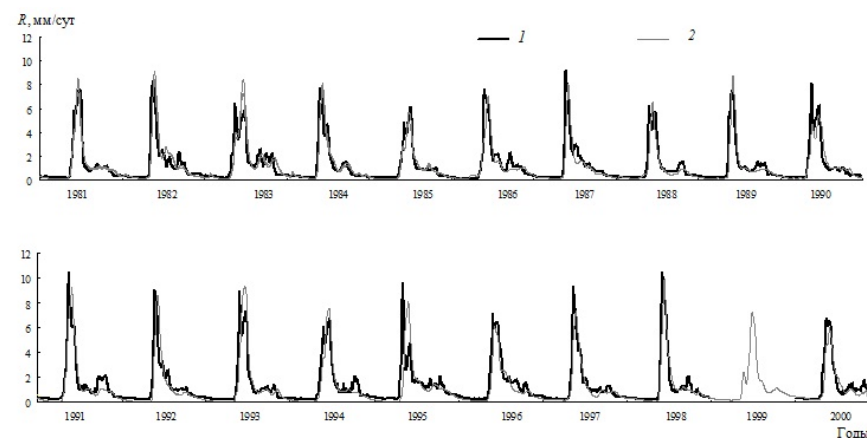


Рис. 1. Наблюденные (1) и рассчитанные по модели SWAP (2) суточные значения стока R р. Печоры в створе ст. Оксино для калибровочного (1981-1985 гг.) и проверочного (1986-2000 гг.) периодов.

Поэтому в работе рассмотрены возможные изменения до 2060 года составляющих водного баланса бассейна одной из рек пан-Арктического региона, а именно – Северной Двины, расположенной в северной части Европейской территории России. Данная часть работы носит, в первую очередь методический характер, т.е. преследует цель построения методики сценарного прогнозирования изменения составляющих водного баланса бассейнов северных рек, а бассейн указанной достаточно крупной реки выбран для апробации разрабатываемой методики. В основу методики решения указанной задачи были положены описанные выше модель взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP, глобальные базы данных по характеристикам подстилающей поверхности суши, а именно – параметрам почвы, растительного покрова и геоморфологическим характеристикам рассматриваемой территории, подвергшиеся уточнению с использованием метода оптимизации наиболее важных параметров, а также сценарные прогнозы изменения метеорологических характеристик в районе рассматриваемых

бассейнов в XXI в., основанные на изменении выброса парниковых газов и аэрозолей в атмосферу в соответствии с тем или иным сценарием социально-экономического развития человеческой цивилизации.

В работе были выбраны три альтернативных сценария Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) – IS92a, с, е, включающих в себя широкий спектр предположений, затрагивающих вопрос о том, как будущая интенсивность выброса парниковых газов может развиваться при наличии или отсутствии той или иной специальной политики, осуществляемой человечеством в области воздействия на климат. Предположения, принятые в указанных сценариях, привнесены в основном из опубликованных прогнозов ведущих международных организаций или из анализа экспертов МГЭИК. Большинство из них были предметом широкого научного обзора.

Сценарий IS92a был принят как стандартный (базовый) для использования в оценке воздействия выбросов парниковых газов на климатические характеристики. При реализации данного сценария население Земли возрастает до 11.3 млрд человек к 2100 г. и экономический рост составляет в среднем 2.3% в год в период 1990–2100 гг. при использовании сочетания традиционных и возобновляемых источников энергии. Сценарий IS92е характеризуется, наряду с другими предположениями, высокими величинами выброса парниковых газов, умеренным ростом населения, высокими темпами экономического роста, значительной интенсивностью использования ископаемого топлива и постепенного отказа от ядерной энергетики. И наконец, сценарий IS92с характеризуется динамикой выбросов CO₂, при которой эмиссия парниковых газов в конце концов падает ниже уровня 1990 г. В этом

сценарии предполагается, что население Земли сначала растёт, затем к середине настоящего столетия снижается; экономический рост достаточно низкий, и существуют жесткие ограничения на использование ископаемого топлива.

Для получения данных по динамике метеорологических характеристик в XXI в., служащих исходной информацией для расчетов по модели SWAP, был использован компьютерный программный комплекс Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change / A Global and Regional Climate Scenario Generator (MAGICC/SCENGEN), представляющий собой по существу генератор климатических сценариев, предназначенный для оценки уязвимости или адаптации различных экосистем или биомов планеты к климатическим изменениям.

Поскольку в настоящей работе расчеты по модели SWAP проводятся с 3-часовым расчетным шагом (в целях учета суточного хода рассматриваемых процессов), необходим соответствующий переход от среднемесячных значений метеорологических характеристик к их значениям с более высоким 3-часовым разрешением. Методика такого перехода была разработана авторами и использована в работе. В результате были проведены расчеты элементов водного баланса в бассейне Северной Двины с 1967 по 2063 гг. для всех трех выбранных климатических сценариев IP92.

На рис. 2 представлены данные по динамике осадков, испарения и стока бассейна р. Северной Двины для отобранных климатических сценариев IS92. Очевидно, что при реализации всех трех климатических сценариев в бассейне увеличиваются осадки и суммарное испарение, уменьшается речной сток. Наибольшие изменения в основном происходят при реализации сценария IS92е, наименьшие – при реализации сценария IS92с. Так, осадки в начале

2060-х годов выросли по сравнению с концом 1960-х годов на 10, 12, 12% (61, 72, 72 мм/год) для климатических сценариев IS92с, а, е соответственно. Суммарное испарение с бассейна за указанный период возросло на 32, 39, и 43% (92, 113, 124 мм/год) для сценариев IS92с, а, е соответственно. Речной сток, напротив, сократился на 11, 14 и 18% (31, 41, 52 мм/год) для сценариев IS92с, а, е соответственно.

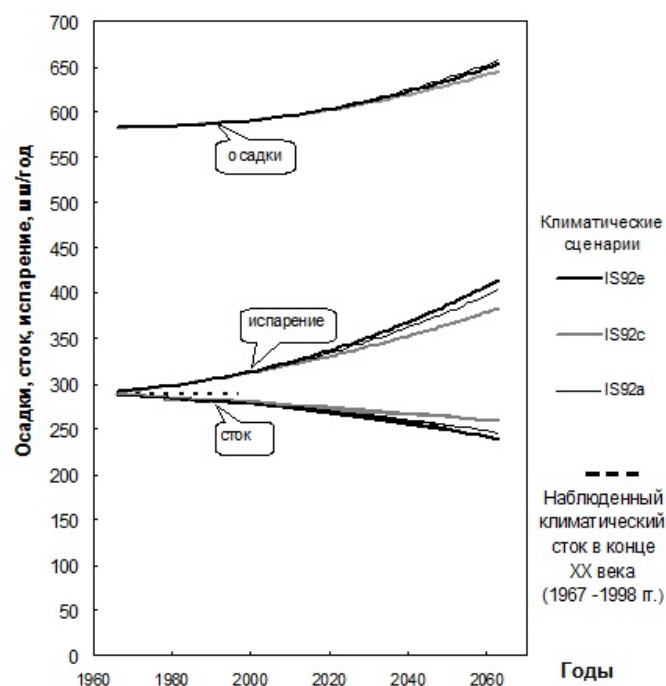


Рис. 2. Изменение климатических значений осадков, испарения и речного стока в бассейне р. Северной Двины для первых двух третей XXI века при трех различных сценариях глобального изменения климата МГЭИК IS92.

Изменились и гидрографы стока. На рис. 3 приведены климатические гидрографы для всех трех сценариев изменения климата за разные периоды осреднения. Видно, что с течением времени пики весеннего половодья уменьшаются, начало стока весеннего половодья немного сдвигается (на более ранние сроки), форма гидрографа слегка «выполаживается». В то же время увеличивается интенсивность стока зимней межени (особенно это заметно для сценария IS92е). Все указанные явления имеют вполне логичное физическое объяснение. Увеличение зимней межени связано с ростом числа и интенсивностей зимних оттепелей, что обусловлено возрастанием температуры воздуха. Возрастание температуры, связанное с увеличением интенсивности поступающей радиации, приводит и к более раннему началу весеннего снеготаяния. Что же касается снижения пиков (и самих объемов) весеннего половодья, то эти явления обусловлены, в первую очередь, тенденцией уменьшения в XXI веке накапливающихся за зиму снеготаяния.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ (контракт 02.740.11.0336) и РФФИ (проект 11-05-00015).

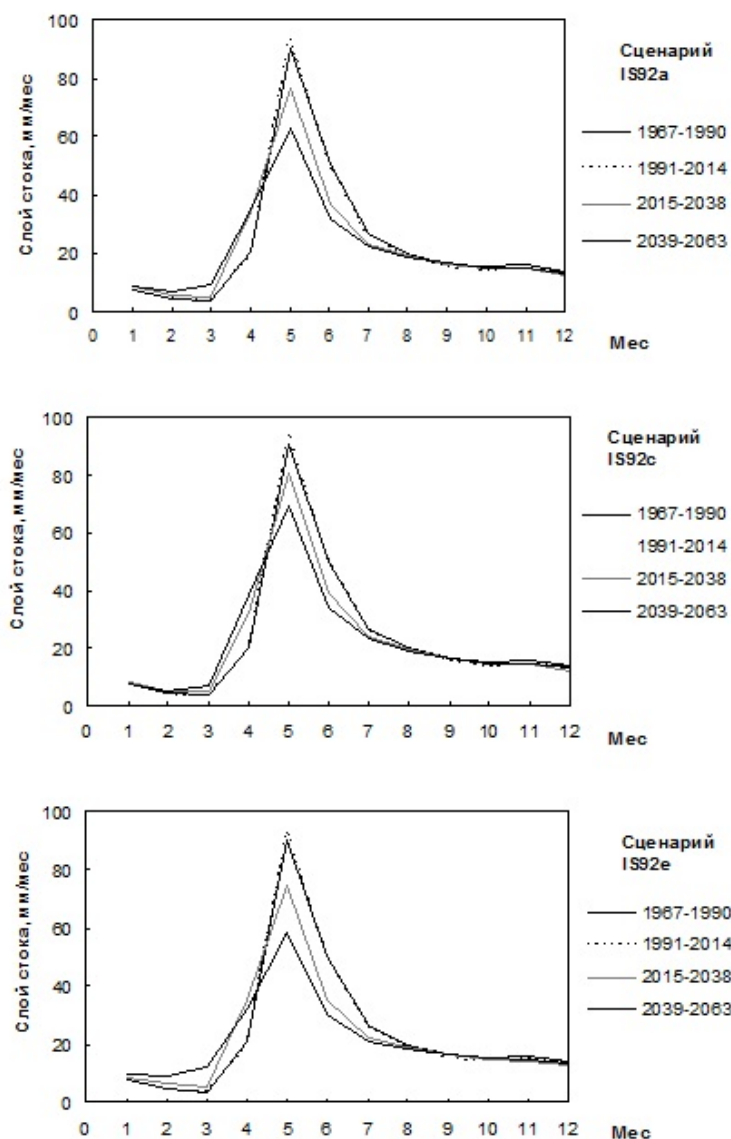


Рис. 3. Изменения климатических гидрографов слоя стока р. Северной Двины для трех сценариев изменения климата МГЭИК IS92.

Литература

1. Barry R.G., Serreze M.C. Atmospheric components of the arctic ocean freshwater balance and their interannual variability. In: The Freshwater Budget of the Arctic Ocean. Edited by Lewis E.L. et al. Springer, New York. 2000. P. 45–56.
2. IPCC: Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds. Houghton J.T., Meira Filho L.G, Callander B.A., Harris N., Kattenberg A., Maskell K.). Cambridge: Cambridge University Press. 1996. 572 p.
3. Шикломанов А.И. Влияние антропогенных изменений глобального климата на сток р. Енисей // Метеорология и гидрология. 1994. № 2. С. 84–93.
4. Miller J.R., Russell G.L. The impact of global warming on river runoff // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. № D3. P. 2757–2764.
5. Гусев Е. М., О. Н. Насонова. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М., Наука. 2010. 328 с.
6. Kanae S., Nishio K., Oki T., Musiake K. Hydrograph estimations by flow routing modeling from AGCM output in major basins of the world // Ann. J. Hydraulic Eng. 1995. V. 39. P. 97 – 102.
7. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики. М.: Мир, 1968. 407 с.
8. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles // J. Hydrol. 1970. V. 10. № 3. P. 282–290.
9. Апполов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 366 с.
10. WMO, 1994. Guide to hydrological practices. WMO-No.168. Geneva: World Meteorological Organization, 1994. 738 p.

БИОТРАНСФОРМАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДНОЙ СРЕДЫ

Долгонос Б. М., Губернаторова Т. Н.
Институт водных проблем РАН, г. Москва
Email: tatiana.ivp.ran@gmail.com

Биодеструкция органического вещества занимает ведущее место среди факторов, регулирующих темп самоочищения водной среды и влияющих через качество вод на благополучие водных экосистем, их биоразнообразие и доступность для человека. Органическое вещество непрерывно распределено по реакционной способности, включая лабильные фракции с небольшими временами распада (часы, сутки), стойкие фракции (лигнин, гумус) с широким спектром времен распада (от нескольких лет до многих тысяч лет), высококонденсированные вещества (ксерогены) с геологическими временами распада. Время распада существенно зависит от природы молекул, их структуры и размеров. Стойкое органическое вещество обычно состоит из макромолекул, образованных из мономерных единиц в процессах полимеризации и поликонденсации. Такие макромолекулы часто обладают хаотической дендроидной или поперечно сшитой структурой. Типичными веществами такого рода являются лигнины и гумусовые вещества. Остро стоит проблема техногенного загрязнения гидросферы органическими отходами производств, которые трудно подвергаются деструкции. Прежде всего, это относится к целлюлозно-бумажной промышленности с ее многотоннажными лигнинсодержащими отходами. Наряду с экологическими проблемами, деструкция органического вещества играет важную роль в планетарном цикле углерода, значительная часть которого протекает в Мировом океане и определяет параметры

климата и состояние биосферы. Многолетние исследования, посвященные изучению кинетики биodeградации стойкой природной органики (на примере природного биополимера – лигнина) изложены в монографии [1].

Ввиду многообразия органических веществ в водной среде, изучение деструкции целесообразно проводить на примере типичного представителя широкого класса соединений. Таким уникальным веществом является лигнин, который считается эталоном неупорядоченного биополимера. Широкая распространенность природного лигнина, который составляет до трети биомассы древесины, и экологическая опасность техногенного лигнина являются основаниями для изучения кинетики его деструкции.

В работе принята методология исследований, которая основана на трехуровневой иерархической схеме (рис. 1), включающей на микроуровне – изучение механизмов деструкции, на мезоуровне – описание кинетики процесса, на макроуровне – нахождение общей скорости минерализации органического вещества [1-3].

На микроуровне изучена структурная организация лигнина, представляющего собой смесь высокомолекулярных полифункциональных соединений, построенных из метоксилированных в различной степени *п*-оксифенилпропановых мономеров. Можно выделить несколько иерархических структурных уровней, различающихся по сложности: молекулярный, топологический, надмолекулярный, коллоидный [4-6].

Молекулярный уровень рассматривает взаимодействие фенилпропановых звеньев через установление межмономерных связей. На этом уровне наблюдаются комбинации нескольких

мономерных звеньев (гваяцильного, сиригильного и *p*-оксифенилпропанового типа) и нескольких типов межмономерных связей (эфирные, углеродные); в образовании межмономерных связей может участвовать практически любой углеродный атом.



Рис. 1. Блок-схема иерархического моделирования деградации органического вещества.

Топологическая структура – это уровень структурной организации, который характеризует связность мономерных

элементов без учета конкретного химического содержания. Она может быть описана на основе теории графов, например, с использованием статистики разных типов узлов, ребер, циклов, цепей. Дополнительно может учитываться конфигурация (геометрическое расположение атомов, определяемое фиксированными химическими связями между соседними звеньями) и конформация макромолекулы (структура, которая реализуется при вращении сегментов цепи или мономерных звеньев вокруг отдельных связей).

Надмолекулярная структура описывает взаимное расположение химически однотипных фрагментов макромолекул, ответственных за плотность упаковки.

Уровень коллоидной организации имеет дело с коагуляционными агрегатами, сформированными из макромолекул лигнина. Количественными характеристиками коллоидной структуры служат размеры и форма агрегатов, степень их упорядоченности.

Каждый последующий уровень организации более сложен и генетически в значительной мере предопределен предыдущим.

Характерная особенность лигнина как полимера – многообразие первичных микроструктур, гетерогенность и хаос на молекулярном уровне, которые во многом обусловлены структурой мономерного феноксильного радикала, способного существовать в различных мезомерных формах. Макромолекулы лигнина образуются при случайной рекомбинации феноксильных радикалов, поэтому уже на начальной стадии роста макромолекулы возникает большое число различных первичных микроструктур – дилигнолов, которые являются повторяющимися элементами структуры. В целом, топологическая структура макромолекул лигнина – дендроидная (в виде графа-дерева) с редкими внутримолекулярными сшивками

(циклами). В древесине лигнин существует в виде хаотической гелеобразной бесконечной сетки, а в водной среде – в виде золя с широким спектром размеров и структур макромолекул-кластеров [7].

Фрактальные свойства макромолекул. В [4, 8] установлено, что конфигурация макромолекул природного лигнина отвечает модели хаотически разветвленного фрактального кластера (рис. 2).



Рис. 2. Модель фрактального кластера (расчет методом Монте-Карло [8]).

Для фрактального кластера массы M и размера L имеет место степенная зависимость

$$M \approx M_1 (L/L_1)^d, \text{ где } M_1 -$$

масса мономера (в случае лигнина – фенилпропанового звена), L_1 – средний размер мономера, d – фрактальная размерность кластера, $1 \leq d \leq 3$. Так как $n = M/M_1$ – число мономеров в кластере, то указанную зависимость можно представить в виде $n \approx (L/L_1)^d$. Поверхность S фрактального агрегата также связана степенной зависимостью с его размером $S \approx L_1^2 (L/L_1)^D$, где D – фрактальная размерность поверхности кластера, $2 \leq D \leq 3$. Все соотношения записаны с точностью до множителя (форм-фактора) порядка 1. Отметим частные случаи: для компактного (нефрактального) кластера $d = 3$; для гладкой поверхности $D = 2$; для

неупорядоченной поверхностной структуры со свойствами объема кластера $D = 3$; коллоидные частицы, полученные в результате гидролиза и полимеризации кремнийсодержащего мономера тетраэтилортосиликата в присутствии основного катализатора, обладают рыхлой фрактальной поверхностью с $D = 2.7$ [9].

В работе [4] методами молекулярной динамики проведено исследование различных аспектов структурной организации природного лигнина и его макромолекулярных биосинтетических аналогов – дегидрополимеров. Было показано, что макромолекулы лигнинов являются фрактальными кластерами с хаотически разветвленными цепями. Были рассчитаны фрактальные размерности макромолекул, выращенных по механизму агрегации кластер-частица; результаты таковы: $d = 2.62 \pm 0.27$ при синтезе дегидрополимеров *in vitro* при интенсивной подаче мономера в зону реакции (так называемый bulk-метод); $d = 2.44$ для образцов лигнина механического размола; $d = 2.48 \pm 0.14$ для разных фракций диоксанлигнинов; $d = 2.54 \pm 0.10$ для компьютерных трехмерных кластеров с вероятностью присоединения частиц к кластеру, варьируемой в интервале 0.2–1 (всюду разброс относительно среднего составляет ± 2 стандартных отклонения).

Объединение частиц во фрактальный кластер может происходить путем установления одного или нескольких контактов в последовательные моменты времени. Первый контакт может быть нежестким, так что частицы могут поворачиваться до образования следующего контакта, и только после установления третьего контакта возникает жесткая связь. Рост числа контактов приводит к увеличению фрактальной размерности кластера. Например, при образовании фрактальных кластеров в растворах [10] на малых временах (секунды, минуты) формируются кластеры с размерностью

$d = 1.75$, что отвечает механизму кластер-кластерной агрегации. Увеличение времени роста до часов и суток приводит к размерности $d = 2.05$, что говорит о постепенном уплотнении структуры кластеров за счет внутримолекулярной переориентации и образования новых связей.

Молекулярная масса макромолекул зависит от их состава и от способа выделения. Различия между среднечисловой M_n (которая равна среднеарифметической массе молекул в образце) и средневесовой молекулярной массой M_w (учитывающей распределение молекул по массам) демонстрируют высокую степень полидисперсности органического вещества. По массе M_w можно судить о среднем числе фенилпропановых звеньев (C_9 -единиц) в составе макромолекулы на основе соотношения $n = M_w / M_1$, где $M_1 \sim 180$ Да – средняя масса звена.

Для измельченных хвойных лигнинов найдено, что величины M_w лежат в пределах 7–11 кДа (40–60 звеньев) при отношении $M_w / M_n = 3.1–3.4$. Однако в других случаях получены значения M_w в диапазоне 15–21 кДа (80–120 звеньев) и даже 77–85 кДа (430–470 звеньев). Выделяемые фракции сильно полидисперсны и содержат полимерные молекулы со среднечисловой массой M_n от 2 до 19 кДа. Имеются также сведения о низкомолекулярных лигнинах бука, березы, осины, которые имеют $M_w / M_n = 2.3–2.6$, $M_w = 3.7–5.5$ кДа (20–30 звеньев) [11, 12]. Молекулярные массы фракций для образцов диоксанлигнинов сосны в диоксане изменяются от нескольких единиц до 100 кДа (до 550 звеньев), а для лигнина механического размола – до 64 кДа (до 350 звеньев) [4], по другим же

данным [13] – до 600–1000 кДа (3300–5500 звеньев). Таким образом, лигнин в водной среде представляет собой смесь молекул с широким спектром молекулярных масс: от нескольких мономерных единиц до нескольких тысяч. Еще большей массы могут достигать агрегаты, образующиеся в результате коагуляции макромолекул.

Деструкция макромолекул лигнина осуществляется ферментами грибов (лигнинпероксидаза, марганецпероксидаза, лакказа, гибридная пероксидаза) [14, 15]. Схема деструкции показана на рис. 3.

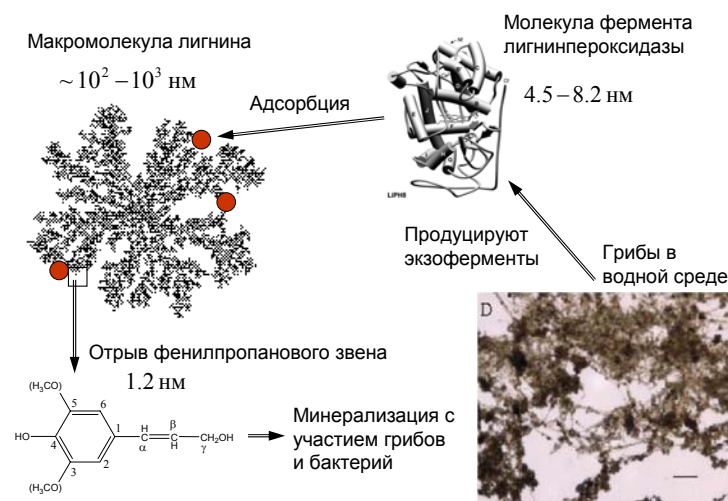


Рис. 3. Цикл деструкции макромолекул лигнина.

Кинетика ферментативной деструкции рассматривается как последовательность элементарных актов распада – отрыва мономеров (фенилпропановых звеньев) от поверхности [16, 17, 20]. Вероятность акта распада зависит от двух факторов: 1) от

вероятности адсорбции молекулы фермента поверхностью макромолекулы, где фермент передает электрон ближайшему мономерному звену непосредственно или через медиатор; 2) от вероятности отщепления звена от каркаса макромолекулы. Согласно принципу Флори, вероятность отщепления не зависит от размера макромолекулы, однако вероятность адсорбции фермента существенно зависит от числа звеньев n в макромолекуле. Поэтому в целом частота распадов, обозначаемая k_n , будет зависеть от n . Вероятность адсорбции фермента макромолекулой пропорциональна ее поверхности S , поэтому $k_n \sim S$. Для фрактальной макромолекулы ее масса M и поверхность S выражаются через радиус R по соотношениям $M \sim R^d$, $S \sim R^D$. Так как масса пропорциональна n , то $n \sim R^d$. Следовательно, $R \sim n^{1/d}$ и $S \sim n^{D/d}$. Отсюда получается зависимость

$$k_n = k(n) = k_1 n^v, \quad (1)$$

где $v = D/d$ – фрактальный индекс макромолекулы, $\frac{2}{3} \leq v \leq 3$.

Последовательность актов распада макромолекулы представляется в виде схемы

$$\dots \rightarrow (n+1) \xrightarrow{k_{n+1}} (n) \xrightarrow{k_n} (n-1) \rightarrow \dots,$$

из которой следует кинетическое уравнение

$$dN_n / dt = k_{n+1} N_{n+1} - k_n N_n,$$

где N_n – концентрация молекул размера n . Так как для макромолекул $n \gg 1$, целесообразно перейти от дискретного описания к непрерывному. Для этого вместо концентрации N_n вводится плотность распределения $f(n, t)$ и предыдущее уравнение преобразуется к виду

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial k(n)f}{\partial n}. \quad (2)$$

При $t = 0$ задано начальное распределение макромолекул по размерам $f = f_0(n)$. Уравнение (2) с указанным начальным условием решается методом характеристик. Решение имеет вид

$$f = \left(\frac{z(n)}{n} \right)^v f_0(z(n)), \quad z(n) = (n^{1-v} + (1-v)k_1 t)^{1/(1-v)}, \quad v \neq 1, \quad (3)$$

$$f = e^{k_1 t} f_0(n e^{k_1 t}), \quad v = 1. \quad (4)$$

В (3) должно выполняться условие $n^{1-v} + (1-v)k_1 t > 0$, которое при $v > 1$ ограничивает область изменения переменной: $0 < n < z_t$, где $z_t = [(v-1)k_1 t]^{-1/(v-1)}$.

Распределение (3)–(4) позволяет найти число мономерных звеньев в еще не распавшихся макромолекулах (в расчете на единицу объема системы):

$$c(t) = \int_0^\infty n f(n, t) dn. \quad (5)$$

Искомая концентрация органического углерода находится как $C = n_1 c$, где n_1 – число атомов углерода в мономерном звене (для лигнина $n_1 = 9$).

Важным случаем является моодисперсное начальное распределение макромолекул по размерам, плотность которого выражается через дельта-функцию $f_0(n) = N_0 \delta(n - n_0)$, где n_0 , N_0 – средний размер и концентрация макромолекул в начальный момент. Подстановка в (3) приводит к плотности распределения

$$f(n, t) = N_0 \delta(n - n_t), \quad n_t = \left(n_0^{1-\nu} - (1-\nu)k_1 t \right)^{1/(1-\nu)}, \quad \nu \neq 1.$$

Отсюда следует, что концентрация макромолекул остается постоянной ($=N_0$) до тех пор, пока размер макромолекул n_t не уменьшится до нуля. По мере уменьшения n_t распределение $f(n, t)$ сдвигается в область малых размеров n . Полученное распределение при подстановке в (5) дает концентрацию

$$c/c_0 = \left(1 - (1-\nu)n_0^{\nu-1}k_1 t \right)^{1/(1-\nu)}, \quad \nu \neq 1; \quad c/c_0 = e^{-k_1 t}, \quad \nu = 1,$$

где $c_0 = n_0 N_0$ – начальная концентрация мономерных звеньев.

Дифференцирование по времени приводит после ряда преобразований к уравнению (в общем случае – нелинейному)

$$dc/dt = -k_\nu c^\nu, \quad (6)$$

справедливому при любых значениях ν . При $\nu > 1$ зависимость концентрации от времени такова:

$$c = c_0 (1 + t/T)^{-\varepsilon}, \quad (7)$$

где $\varepsilon = 1/(\nu - 1)$. Время T характеризует длительность начальной стадии процесса. При $t \gg T$ деструкция переходит в медленную асимптотическую стадию $c \approx c_0 (t/T)^{-\varepsilon}$, протекающую по степенному закону, для которого вообще нет характерного масштаба времени.

Распад сульфатных лигнинов. Теоретические соотношения применялись к экспериментальным данным [19] по деструкции сульфатных лигнинов, выделенных из сточных вод предприятий целлюлозно-бумажной промышленности Восточной Сибири. Изучался раствор лигнина в воде оз. Байкал и р. Ангара, а также комбинированная система вода–донные отложения. Измерялись

ХПК, цветность, содержание лигнина и другие показатели. В результате обработки данных получены следующие значения модельных параметров для ХПК и цветности (табл. 1).

Таблица 1. Средние значения параметров модели для ХПК и цветности
(среднее $\pm$ стандартное отклонение) (ДО – донные отложения)

Среда	$\square$	$\square$	T , сут
Р. Ангара, вода	3.5 ± 0.2	0.40 ± 0.03	140 ± 10
Р. Ангара, вода–ДО	2.1	0.93 ± 0.01	100 ± 10
Оз. Байкал, вода	3.2 ± 0.2	0.48 ± 0.05	80 ± 20
Оз. Байкал, вода–ДО	1.5	2.0 ± 0.1	280 ± 10

В системе вода–донные отложения показатель степени $\varepsilon = 1/(\nu - 1)$ больше, чем без донных отложений, что можно интерпретировать как более быстрое снижение рассматриваемых показателей с течением времени при наличии донных отложений за счет сорбции и переработки органического вещества в слое осадка, где содержание микроорганизмов выше, а значит, больше концентрация экзоферментов.

В случаях, когда $\varepsilon < 1$, распад продолжается намного дольше начальной стадии процесса (составляющей ~ 100 сут). Для системы байкальская вода–донные отложения $\varepsilon > 1$. Распад в основном осуществляется за время ~ 280 сут.

Эффективный порядок реакции $\square$ находится в пределах 1.5–3.5. Во всех случаях зависимость (7) можно использовать для

описания кинетики распада сульфатных лигнинов, о чем свидетельствует небольшой разброс экспериментальных точек относительно теоретической кривой (стандартное отклонение 2–5%).

Распад хлорированных сульфатных лигнинов. В [20] приводятся данные по распаду хлорированных сульфатных лигнинов, полученные по той же методике, что и для сульфатных лигнинов. Хлорлигнины образуются на разных стадиях целлюлозно-бумажного производства и представляют собой соединения с молекулярной массой порядка 10 кДа, которые в природной водной среде разлагаются до хлорфенолов и других низкомолекулярных соединений, отличающихся более высокой токсичностью и мутагенностью. Данные измерений обработаны на основе теоретического соотношения (7). Осредненные значения модельных параметров для трех серий опытов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Осредненные значения параметров для деструкции хлорированных сульфатных лигнинов в разных сериях опытов (указано среднее $\pm$ стандартное отклонение)

Среда	$\square$	$\square$	T , сут
I. Вода	6.6 ± 3.8	0.21 ± 0.11	70 ± 18
I. Вода–ДО	2.07 ± 0.06	0.94 ± 0.05	250 ± 130
II. Вода	4.5 ± 0.7	0.30 ± 0.06	130 ± 60
II. Вода–ДО	4.3 ± 0.6	0.31 ± 0.06	39 ± 6
III. Вода	1.7 ± 0.1	1.4 ± 0.1	540 ± 140
III. Вода–ДО	2.2 ± 0.1	0.83 ± 0.07	110 ± 30

Видно, что осредненный порядок реакции варьирует в пределах 1.7–6.6. Параметр $\square > 1$ лишь для системы «III, вода»; в этом случае характерное время процесса больше 3 лет. В основном

же $\varepsilon < 1$, и, хотя начальная стадия распада не столь продолжительна, процесс в целом имеет протяженную асимптотическую стадию, которая может продолжаться несколько лет. Сильный разброс времени распада и других кинетических параметров связан с наличием широкого спектра хлорлигнинов, обладающих разной реактивностью.

Таким образом, зависимость (7) адекватно описывает экспериментальные данные: отклонение варьирует в интервале 2.5–7.3%.

Выводы. Разработана математическая модель кинетики биодеструкции лигнина, учитывающая закономерности строения данного класса веществ и механизмы их деструкции. Анализ построенной нелинейной модели показывает наличие степенной кинетики деструкции. Показано, что степенная кинетика деструкции является следствием фрактальной структурой макромолекул. Получена зависимость концентрации органического вещества от времени в процессе деструкции. Построенные теоретические соотношения позволяют интерпретировать эмпирические данные по кинетике деструкции органического вещества. Установленный степенной закон распада говорит о том, что: 1) деструкция многокомпонентного органического вещества в водной среде протекает намного дольше, чем принято считать на основании оценок по линейным моделям; 2) риск накопления органических токсикантов в водных объектах более высок, чем считалось ранее; 3) необходим пересмотр методики расчета предельно допустимых сбросов с учетом замедленного распада стойкой фракции органического вещества по степенной кинетике.

Список литературы.

1. Долгоносов Б.М., Губернаторова Т.Н. Механизмы и кинетика деструкции органического вещества в водной среде. М.: Красанд/URSS, 2010. 208 с.
2. Долгоносов Б.М., Губернаторова Т.Н. Нелинейная кинетика деструкции стойкого органического вещества в водной среде // Физические проблемы экологии. 2009. Т. 16. С. 117–129.
3. Dolgonosov B.M., Gubernatorova T.N. Modeling the Biodegradation of Multicomponent Organic Matter in an Aquatic Environment: 1. Methodology // Water Resources. 2010. V. 37. № 3. P. 311–319.
4. Карманов А.П. Лигнин. Структурная организация и самоорганизация // Химия растительного сырья. 1999. № 1. С. 65–74.
5. Карманов А.П. Характеристика лигнина клеточных оболочек // Высокомолекулярные соединения. 2000. Т. 42. № 7. С. 1213–1220.
6. Карманов А.П., Монаков Ю.Б. Образование пространственно-периодических структур при биосинтезе дегидрополимеров // Химия древесины. 1994. № 1. С. 62–64.
7. Dolgonosov B.M., Gubernatorova T.N. Modeling the Biodegradation of Multicomponent Organic Matter in an Aquatic Environment: 2. Analysis of the Structural Organization of Lignin // Water Resources. 2010. V. 37. № 3. P. 320–331.
8. Карманов А.П. Самоорганизация и структурная организация лигнина. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2004. 269 с.
9. Шефер Д., Кефер К. Структура случайных силикатов: полимеры, коллоиды и пористые твердые тела // Фракталы в физике. М.: Мир, 1988. С. 62–71.
10. Berry R.S. // Clusters of Atoms and Molecules: Theory, Experiment, and Clusters of Atoms. Berlin: Springer, 1994. Ch. 2.8. P. 187–205.

11. Рабинович М.Л., Болобова А.В., Кондращенко В.И. Теоретические основы биотехнологии древесных композитов. М.: Наука, 2001. Кн. 1. 264 с.
12. Решетникова И.А. Деструкция лигнина ксилотрофными макромицетами. М.: Изд-во МГУ, 1997. 197 с.
13. Brunow G. Methods to reveal the structure of lignin / Eds. Hofrichter M., Steinbüchel A. Berlin: Wiley–VCH, 2001. V. 1. P. 89–116.
14. Губернаторова Т.Н. Биоэкология: пути и основные этапы ферментативной деструкции лигнинов в водной среде // Инж. экология. 2006. № 6. С. 32–46.
15. Gubernatorova T.N., Dolgonosov B.M. Modeling the Biodegradation of Multicomponent Organic Matter in an Aquatic Environment: 3. Analysis of Lignin Degradation Mechanisms // Water Resources. 2010. V. 37. № 3. P. 332–346.
16. Долгоносов Б.М., Губернаторова Т.Н. Нелинейные механизмы трансформации примесей в водной среде // Водн. ресурсы. 2005. Т. 32. №3. С. 322–336.
17. Долгоносов Б.М., Губернаторова Т.Н. Кинетика ферментативной деструкции органических макромолекул с фрактальной структурой // Теор. основы хим. технологии. 2007. Т. 41. № 6. С. 671–680.
18. Dolgonosov B.M., Gubernatorova T.N. Modeling the Biodegradation of Multicomponent Organic Matter in an Aquatic Environment: 4. Degradation Kinetics Model // Water Resources. 2010. V. 37. № 3. P. 347–360.
19. Тимофеева С. С., Бейм А. М., 1990. Закономерности трансформации лигнинных веществ в воде водоемов Восточной Сибири // Водные ресурсы. № 2. С. 115–120.

20. Тимофеева С. С., Бейм А. М., 1996. Закономерности экологической трансформации хлорлигнинов в природных водах // Водные ресурсы. Т. 23. № 4. С. 467–471.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ

Даценко Ю.С., Пуклаков В.В., Ершова М.Г., Эдельштейн К.К.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва,
Email: yuri0548@mail.ru

В современной гидрологии водохранилищ для решения диагностических (исследовательских) и прогностических (проектных) задач стало возможным, а нередко и необходимым, наряду с анализом полевых наблюдений использовать математические модели техногенного водоема. Расчетами по таким моделям воспроизводят присущие ему особенности гидрологического режима, т.е. закономерные изменения динамического, ледово-термического, оптико-седиментационного, гидрохимического и гидробиологического состояния в течение годового или многолетнего циклов изменчивости гидрометеорологических условий. По существу, такими расчетами восполняется физически и химико-биологически обоснованная существенно нелинейная интерполяция взаимозависимых значений гидрологических характеристик между их измеренными величинами в отдельные моменты в имеющихся точках наблюдений, либо оцениваются вероятные значения неизмеряемых гидрологических характеристик или их прогнозируемые значения.

Математические модели, предназначенные для описания процессов круговорота веществ и формирования качества воды в экосистеме водоемов всегда содержат как минимум два относительно самостоятельных блока: гидрологический

(гидротермодинамический), определяющий перенос и перемешивание пассивных субстанций в результате процессов внутреннего водообмена водоема, и экологический, описывающий внутриводоемную трансформацию неконсервативных химических и биологических переменных. Наиболее сложный комплекс внутриводоемных процессов возникает в глубоких и стратифицированных летом и зимой долинных водохранилищах многолетнего регулирования. В таких водохранилищах наблюдается значительная пространственная неоднородность показателей состояния экосистемы, обусловленная особенностями термодинамических процессов водообмена в различных частях водохранилища. Эта неоднородность наиболее выражена в летний вегетационный период, когда интенсивность продукционно-деструкционных процессов в экосистеме и характер внутреннего водообмена сильно зависят от изменчивых синоптических ситуаций.

Цель данной работы – на нескольких примерах показать плодотворность использования диагностических расчетов экологически значимых переменных по боксовой гидрологической модели водохранилища, разработанной В.В. Пуклаковым в 1987 г. [1,2] и совершенствующейся до сих пор на кафедре гидрологии суши географического факультета МГУ. В 2009–2011 гг. им разработан более сложный алгоритм универсальной гидрологической модели водохранилища (ГМВ–МГУ). Она предназначена для воспроизведения гидрологического режима в участках (отсеках) не только долинных, но и котловинно-долинных водохранилищ, на акваториях озероподобных плёсов, в которых ведущую роль во внутреннем водообмене в безлёдный период играют ветровые циркуляционные системы. В модели:

1) вновь модернизированный алгоритм тепломассообмена (ТМО), названный *STREAM*, стал ее термодинамическим блоком, в который как подблок включена программа многоуровневой двухмерной сеточной гидродинамической модели, апробированной в экологических исследованиях Рыбинского водохранилища [3, 4]. Этот подблок используется для расчета ветровых течений в отсеках широких котловин;

2) разработан второй блок «Изменение неконсервативных веществ» (ИНКВ), в котором после расчета по *STREAM* температуры, адвективной трансформации химического состава воды и концентрации аллохтонной взвеси в боксах, выполняется вычисление изменения среднесуточных значений O_2 , растворенных и взвешенных биогенных и органических веществ вследствие седиментации и продукционно-деструкционных процессов.

По мере развития модели всё острее вставали две методические проблемы:

I – обеспечение достаточно надёжной информацией файла исходных ежесуточных данных о гидролого-гидрохимическом режиме поступающего в водохранилище стока с его водосбора;

II – обеспечение достаточно надёжных данных о гидроэкологическом состоянии всех участков водохранилища в конкретные сутки синоптических циклов. Это необходимо для файла начального состояния водоема и, в особенности, для проверки и доказательства адекватности модельных результатов. Решение обеих проблем – насущно для использования как боксовых, так и гидродинамических моделей, предназначенных для воспроизведения гидрологического режима водохранилищ.

Алгоритм ГМВ–МГУ состоит из двух взаимосвязанных блоков – ТМО и ИНКВ – изменения неконсервативных экологически

значимых веществ, каждый из которых включает комплекс соответствующих расчётных подпрограмм. К экологически значимым веществам нами относятся следующие моделируемые переменные: биомассы трех групп фитопланктона (диатомовые, зелеными и синезелёные), концентрации стойкого и лабильного органического вещества, концентрации биогенных элементов (минеральные и органические формы азота и фосфора), растворенный кислород.

Расчет этих химических и биологических переменных производится по уравнениям баланса массы в соответствии с концептуальными схемами взаимосвязей этих переменных в водной экосистеме. Изменения переменных в каждом боксе отсека воспроизводятся в модели после просчета их потоков в блоке ТМО по специальным подпрограммам, содержащим принятую в лимнологии параметризацию процессов, трансформирующих неконсервативные вещества. Примеры схем наиболее сложных и значимых переменных – концентрация растворенного кислорода и группы фитопланктона приведены на рис. 1.

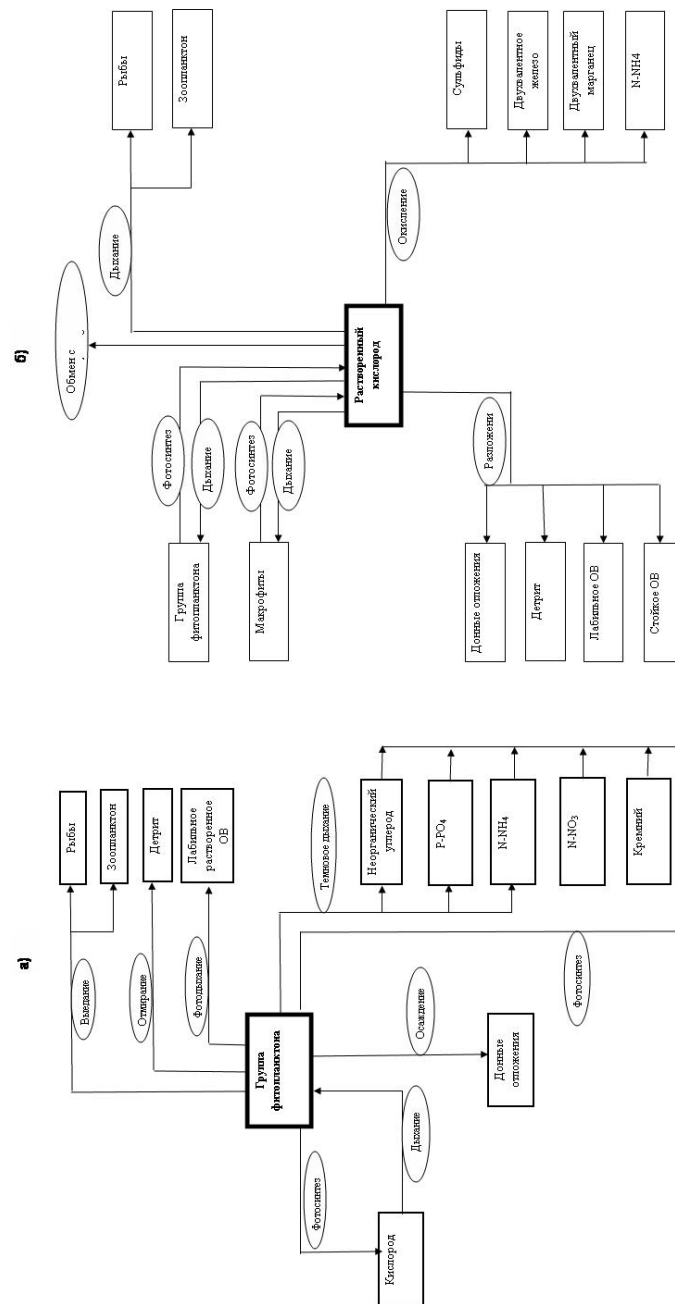


Рис. 1. Схемы связей в фитопланктонной (а) и кислородной (б) подпрограммах ГМВ-МГУ.

С целью валидации модернизированного алгоритма ГМВ-МГУ летом 2011 г. на Можайском водохранилище проведен цикл полевых наблюдений. Он включал стартовую гидрологическую съемку водоема 13 июня для оценки вертикального распределения гидрологических и экологически значимых веществ на 19 станциях в центре каждого отсека, на которые разделен в модели долинный водоем. При работе с двух катеров её продолжительность составила менее 9 часов. Спустя две недели, в течение которых периодически велись наблюдения за притоком воды и растворенных веществ по Москва-реке, 27 июня была выполнена трижды (в 6–7 ч. утра, в полдень и вечером в 22–23 ч.) с тех же катеров детальная съемка отсека № 13 (Красновидовский плес площадью 1,6 км², глубиной до 13,5 м), удаленный на 8,5–10 км от гидроузла (при длине водоема 28 км) на 10 станциях у заранее расставленных равномерно по акватории буев (из них 4 станции в москворецком русле, 3 – над затопленной поймой и 3 – над надпойменной террасой при глубине 3–4 м). Одновременно на одной из глубоководных станций, расположенной в центре плёса с расчаленного на 3 якоря катамарана проводились каждые 3 часа в течение суток такие же наблюдения как на остальных станциях. Кроме того, с помощью подвешенной с него термоксы велась автоматическая регистрация температуры воды на 6 горизонтах через 2 м глубины с интервалом 15 мин. Осреднением всех этих наблюдений по отдельным горизонтам в пространстве плеса и в течение суток получены среднесуточные значения температуры воды T , ее удельной электропроводности K_{18} , приведенной к 18°C, концентрации HCO_3 и CO_3 , минерального PO_4 и общего фосфора TP , O_2 , окисляемости воды БО и ПО, отобраны пробы на состав фито- и зоопланктона, которые обрабатываются гидробиологами.

Сравнение вертикального распределения в отсеке центрального района водохранилища рассчитанных по модели и по наблюдения среднесуточных значений характеристик, наиболее тесно связанных с интенсивностью продукционно-деструкционных процессов показано в табл. 1 и на рис.2.

Таблица 1. Среднесуточная температура воды в Красновидовском плесе (отсек № 13)

Горизонт, м	Расчет по подбюку <i>SREAM</i>	Расчет по данным наблюдений			Ошибка модельного расчета
		в трех съемках плеса	на станции в центре плеса		
			зондирования через 3 ч.	запись через 15 мин.	
0,5	23,2	21,9	21,9	21,9	1,3
2	21,7	21,5	21,5	21,4	0,2
4	19,9	20,7	20,6	21,0	-0,8
6	17,8	16,9	17,0	18,6	0,9
8	15,6	13,0	12,7	14,0	2,6
10	13,5	11,7	11,8	12,3	1,8

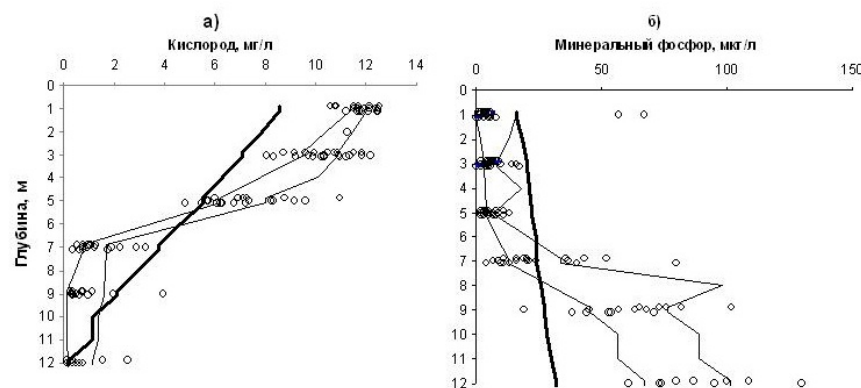


Рис. 2. Вертикальное распределение концентраций растворенного кислорода, мкг/л, (а) и минерального фосфора, мкг/л, (б), определенных в пробах с горизонтов 1, 3, 5, 7, 9, и 12 м на 10 станциях в плесе (точки), границы доверительного интервала среднего значения (– тонкие линии) и рассчитанное значение по алгоритму ИНКВ модели (черная линия)

Практически полное совпадение значений среднесуточной температуры по данным утренней, дневной и вечерней съёмок плеса с учащенными зондированиями центральной вертикали свидетельствуют о репрезентативности этих съёмок для валидации модельных расчетов. Лишь в нижнем горизонте слоя температурного скачка на глубине 8 м данные зондирования на центральной станции всего на $0,3^{\circ}\text{C}$ ниже, чем в съемках. Именно на этом горизонте получена не только наиболее завышенная модельная ошибка ($2,6^{\circ}\text{C}$), но и большее среднесуточное значение T по автоматической записи, характеризующейся особенно сильной пульсацией температуры, что характерно при наличии внутренних волн.

Ввиду сильной пространственной неоднородности концентраций PO_4 и O_2 , на что указывает значительный диапазон их значений (рис. 2) при синхронном отборе проб в съемках плеса для оценки наиболее вероятного среднесуточного значения на каждом

горизонте был рассчитан доверительный интервал по формуле $\text{ДИ} = x_{\text{ср.}} \pm 3\sigma_x/n^{0.5}$, где σ_x – среднеквадратическое отклонение от среднего значения $x_{\text{ср.}}$ и $n = \leq 30$ – число проб, отобранных с одного и того же горизонта в трех съемках плеса. Как видно на рис. 2а, в верхней наиболее продуктивной половине водной толщи рассчитанное содержание фосфатов практически совпадает с верхней границей ДИ, а придонных слоях оно занижено приблизительно на удвоенный ДИ, что можно считать удовлетворительным [5]. Кислородную стратификацию модельный расчет воспроизводит не хуже, лишь в самом верхнем горизонте занижение составляет около 3 мг/л.

Модельные расчеты растворенного кислорода проведены для Можайского водохранилища по данным за пятилетний период (1998–2002 гг.). Эти годы различались по гидрологическим и синоптическим условиям и, соответственно, по уровню интенсивности продукционно-деструкционных процессов. Поэтому на фоне общих закономерностей кислородного режима в этот период проявлялись и межгодовые особенности изменений растворенного кислорода.

Наиболее общие черты кислородного режима в водохранилище – образование и постепенное в течение лета заглубление термоклина и оксиклина, их квазигоризонтальное положение вдоль водоема и короткопериодные колебания градиентов, в целом сохраняются от года к году. Однако, колебания уровня воды в водохранилище и изменчивость синоптических ситуаций как в отдельные годы, так и в течение вегетационного сезона вносят закономерные изменения. В многоводные годы в водохранилищах многолетнего регулирования при высоком, как правило, положении уровня процесс расслоения водной массы выражен менее отчетливо, градиенты в слое температурного и

кислородного скачка меньше, и вероятность появления зон аноксии в гипolimнионе мала. В маловодные годы при низком уровне и в условиях жаркой погоды, обычно сопровождающей маловодье, продукционно-деструкционные процессы протекают более напряженно и градиенты пространственных изменений содержания кислорода возрастают.

В водной толще водохранилищ положение слоя с наибольшим вертикальным градиентом кислорода почти горизонтально и в соответствии с асимметрией ложа толщина гипolimниона плавно увеличивается к плотине. Как положение термоклина и оксиклина, так и градиенты в них не остаются постоянными, и, в зависимости от синоптических условий, испытывают короткопериодные колебания, непосредственно влияющие на характер вертикального распределения кислорода. В качестве примера на рис.3. приведены результаты модельного расчета изменчивости распределения концентрации растворенного кислорода в продольной плоскости долинного водохранилища в течение вегетационного сезона.

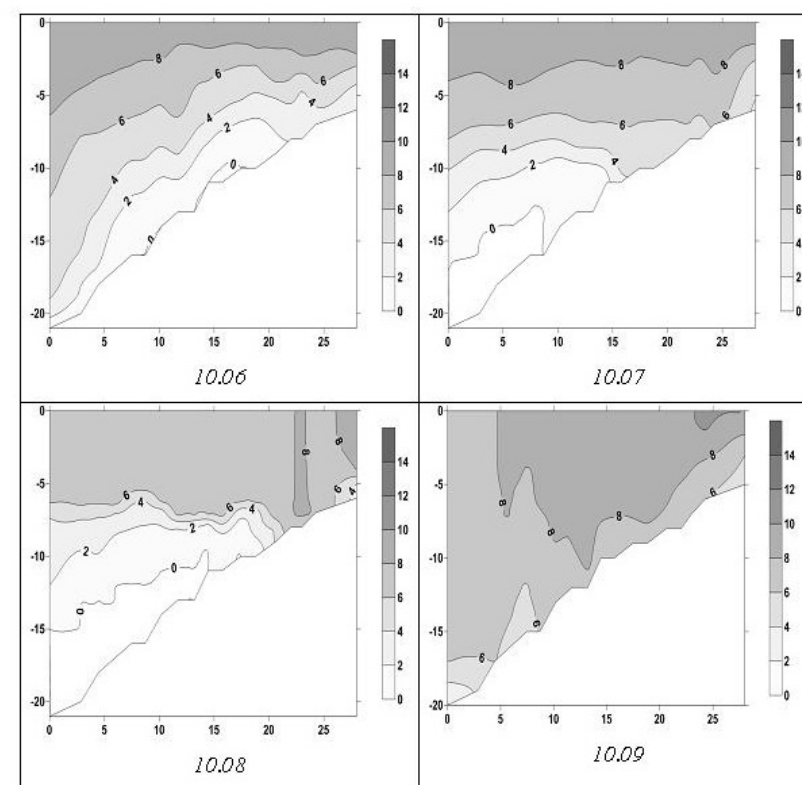


Рис. 3. Распределение растворенного кислорода (мг/л) в Можайском водохранилище в летний период многоводного 1998 г.

Верификация кислородного подблока ГМВ-МГУ проводилась по данным режимных наблюдений на рейдовой вертикали Красновидовского плеса Можайского водохранилища. Ее результаты показали, что среднее квадратическое отклонение рассчитанных величин от наблюдаемых в разные годы колеблется от 1,8 до 3,3 мг/л, что в целом является хорошим результатом. Что же касается характера вертикального распределения содержания растворенного кислорода, то качество имитации различно в разные сезоны года.

Минимальные погрешности – в период осенней гомотермии, когда во всей толще воды содержание растворенного O_2 становится одинаковым. Максимальные несоответствия вычисленных и наблюдаемых величин возникали в отдельные годы весной, когда рассчитанная дата схода льда отличалась от фактической. Вслед за разрушением ледяного покрова в водохранилище очень быстро происходит полное вертикальное перемешивание и насыщение воды кислородом в результате аэрации. В связи с этим различие даже в несколько суток в дате реального и модельного освобождения водоема ото льда может давать большое расхождение величин содержания кислорода.

В летний период содержание растворенного O_2 в фотической зоне определяется главным образом продукционными процессами. Вследствие этого отклонения расчетных концентраций от фактических связаны, главным образом, с неточностями имитации развития фитопланктона, для которого характерна значительная пространственная неравномерность распределения. Модель же описывает режим характеристик водной массы одной вертикалью в расчетном отсеке. Помимо этого, рейдовые наблюдения за распределением содержания растворенного кислорода обычно проводятся в светлое время суток, когда интенсивность фотосинтеза в воде близка к максимальной, а в результате имитации вычисляются среднесуточные значения характеристик. Все это может давать в верхнем 3-4-метровом слое отклонения смоделированных концентраций растворенного кислорода от фактических в 2–3 мг/л.

Наибольший интерес при моделировании и анализе экологического состояния водоема представляет переменная «фитопланктон», которая в модели представлена диатомовыми, зелеными и синезелеными водорослями. Важность этой переменной

определяется ролью первичной продуктивности в экологических процессах в водоеме и пристальному вниманию к ней как к характеристике качества воды в водохранилищах питьевого водоснабжения.

Экологический блок ИНКВ модели ГМВ-МГУ, включающий подблок фитопланктона, использован нами для Рыбинского водохранилища, для которого описание процессов внутреннего водообмена дополнено расчетами ветровых циркуляций. Верификация расчетов фитопланктона проводилась по данным регулярных рейсовых наблюдений, осуществлявшихся ежегодно сотрудниками Института биологии внутренних вод РАН с частотой два раза в месяц. Также как и расчеты внутреннего водообмена, расчеты биомассы фитопланктона проведены для маловодного 1962 и многоводного и дождливого 1964 гг., наиболее полно обеспеченных надежной гидрометеорологической информацией.

Для верификации результатов расчета выбирались отсеки водохранилища, соответствующие расположению стандартных станций съемок водохранилища. В соответствии с принятой схематизацией к ним относились 3 отсека Шекснинской лопасти, 2 отсека Моложской лопасти и 2 отсека Волжской лопасти, составляющие акваторию Главного плеса, в котором находилось 6 станций этих съемок. Поскольку данные о биомассе фитопланктона относятся к сливным пробам воды, т.е. представляют собой осредненные значения биомассы по всем станциям, то для сравнения расчетных и определенных альгологами величин произведено осреднение рассчитанных биомасс в перечисленных отсеках. Это осреднение проведено с дискретностью 2 недели, т.е. на те даты, когда проводились съемки водохранилища. Результаты этого сравнения представлены на рис. 4.

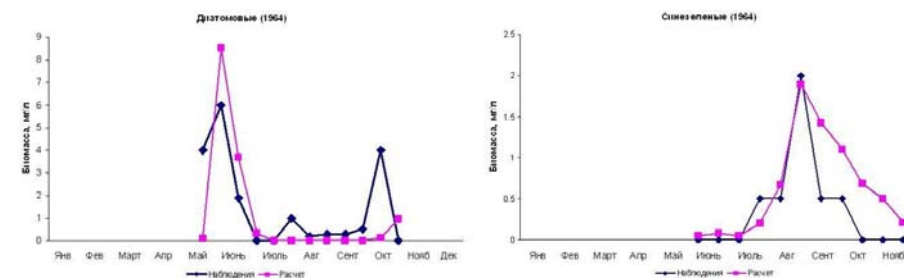


Рис.4. Рассчитанные по модели и по основным пробам значения биомассы диатомовых (А) и синезеленых (Б) водорослей в Главном плесе Рыбинского водохранилища в 1964 г.

Как видно, модель вполне удовлетворительно воспроизводит характер сезонных изменений фитопланктона в Рыбинском водохранилище. Как неоднократно указывалось [6, 7], в сезонной динамике фитопланктона Рыбинского водохранилища можно выделить четыре стадии. Весенний подъем биомассы обусловлен развитием диатомовых водорослей, летний диатомовыми и синезелеными. Между весенним и летним подъемами биомассы наблюдается летняя депрессия – «фаза чистой воды», которая прослеживается во многих стратифицированных мезотрофных и эвтрофных водоемах. Осенний пик выражен не всегда и обычно связан с обильной вегетацией диатомовых водорослей. Чаще осенью наблюдается плавное снижение биомассы синезеленых. Максимальная биомасса обычно наблюдается весной и колеблется от 4 до 30 мг/л.

Все отмеченные черты режима фитопланктона в водохранилище воспроизведены модельным расчетом по данным лет экстремальной водности, за исключением летнего развития диатомовых водорослей. Расчетные биомассы весеннего развития диатомовых и летнего – синезеленых как максимальные, так и средние оказались близки наблюдаемым на водоеме. По модели

рассчитывается также биомасса зеленых водорослей, которая как в модели, так и по наблюдениям, оказалась крайне малой – менее 0,5 мг/л.

Анализ факторов развития фитопланктона показал, что доминирующее влияние на интенсивность цветения водоема в большинстве случаев оказывала концентрации минерального фосфора в водоеме, поле которой формируется внешней нагрузкой и комплекса внутриводоемных процессов, описываемых в блоке *STREAM* модели.

Таким образом, модельные диагностические расчеты гидрологического режима и изменения экологического состояния водохранилищ водных объектов служат эффективным методом восполнения знаний о развитии внутриводоемных процессов, подверженных сильной синоптической изменчивости, а в регулируемых гидроузлами участках гидрографической сети (водохранилищах и руслах ниже плотин) еще и режимом пусков воды и колебаниями ее уровня.

Выводы.

Гидрологическая модель водохранилища, дополненная блоками изменения неконсервативных веществ позволяет удовлетворительно воспроизводить и анализировать пространственно-временные поля важнейших экологических переменных в водохранилищах различного типа и в годы различной водности. Валидация модели, проведенная по данным специальных учтенных наблюдений в Красновидовском плесе Можайского водохранилища, показала удовлетворительное совпадение наблюдаемых и измеренных значений моделируемых переменных.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 09-05-00029)

Литература

1. Пуклаков В.В. Гидрологическая модель водохранилища: руководство для пользователей. М.: ГЕОС, 1999. 96 с.
2. Пуклаков В.В., Гречушникова М.Г. Имитация гидрологического режима Рыбинского водохранилища на основе модели ТМО // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т.1. Пермь, 2009. С. 120–125.
3. Демин Ю.Л., Ахвердиев И.О., Литвинов А.С., Поддубный С.А. О роли бароклинных эффектов в динамике Рыбинского водохранилища. Водные ресурсы, 1991, № 4. С. 55–65. на с.3
4. Поддубный А.С., Сухова Э.В. Моделирование влияния гидродинамических и антропогенных факторов на распределение гидробионтов в водохранилищах. Рыбинск: Изд-во Рыбинский Дом печати, 2002. 120 с.
5. Эдельштейн К.К., Даценко Ю.С., Пуклаков В.В. Экспериментальная оценка погрешности модельного расчета стратификации водной толщи в водохранилище // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5 География, 2005, № 6. С. 20–24.
6. Рыбинское водохранилище и его жизнь. Л., 1972. 364с.
7. Корнева Л.Г. Фитопланктон Рыбинского водохранилища: состав, особенности распределения, последствия эвтрофирования // Современное состояние экосистемы Рыбинского водохранилища. СПб., 1993. с.50-113.

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА РЕК БАССЕЙНА ДОНА

Киреева М.Б., Фролова Н.Л.

Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,
Москва

Email: kireeva_mb@mail.ru

Введение. Основной особенностью современных изменений водного режима рек бассейна Дона является перераспределение стока внутри года, происходящее при относительном постоянстве среднегодовых расходов воды.

Наиболее ярко изменения водного режима проявляются в перераспределении стока между половодьем и маловодным периодом года, что коренным образом меняет форму и общий вид гидрографа стока. При этом увеличение стока за маловодный период происходит как за счет роста зимних расходов воды, связанного с увеличением количества оттепелей, так и за счет роста летних минимальных расходов, обусловленных увеличением суммы атмосферных осадков.

Основная причина изменения стока воды за различные сезоны года, безусловно, носит климатическую природу и связана с изменениями атмосферной циркуляции в данном регионе, проявляющейся в смене характера зим, увеличении количества атмосферных осадков в летний период. Более подробно климатические изменения в бассейне Дона рассмотрены в [1, 2].

Увеличение температуры воздуха в холодный период, рост числа, продолжительности и «глубины» оттепелей, сокращение длительности холодного периода года являются предпосылками к перестройке водного режима рек, связанной со значительным

сокращением стока за половодье, увеличением естественной зарегулированности стока.

Реки бассейна Дона имеют ярко выраженное половодье, приуроченное к таянию снежного покрова, обычно происходящему в конце марта – начале апреля, с максимальными расходами в 10-15 раз превышающими меженные значения. Половодье как фаза водного режима играет исключительную роль в формировании стока воды в бассейне в течение всего года, определяя не только потенциальные запасы воды на период летне-осенний межени, но и характер прохождения дождевых паводков в случае выпадения значительного количества жидких осадков.

Изменения характеристик весеннего половодья в бассейне Дона. Пространственное распределение слоя стока за половодье в целом подчиняется зональным закономерностям, уменьшаясь с северо-запада на юго-восток от 85 до 20 мм, и в среднем составляя 55 мм (расчеты велись для базового периода 1961 – 1990 гг.). Доля весеннего стока в суммарном годовом стоке увеличивается на территории бассейна Дона в юго-восточном направлении. В бассейне верхнего Дона с волной половодья проходит лишь 30-35% годового стока, а для водосборов юго-восточной части бассейна эта величина составляет более 55%. Половодье на реках бассейна обычно начинается в конце февраля – начале марта, при этом наиболее ранние сроки начала наблюдаются на северо-западе. Позднее всего половодье начинается на реках восточной части водосбора (бассейн Иловли и Медведицы). Для рек бассейна Дона характерно значительное превышение максимальных расходов воды над меженными: для малых, пересыхающих рек это соотношение может достигать 1:200, для средних – 1:25, для больших – 1:10.

Происходящие в настоящий момент климатические изменения приводят к существенной деградации половодья рек бассейна Дона как фазы водного режима в целом. Динамика слоя стока воды за половодье имеет сложный характер, но для всего бассейна Дона однозначно можно говорить о сокращении слоя стока половодья на 10-30%. Кроме того, по имеющимся данным для половины из 20 постов выявлено значимое увеличение дисперсии слоя стока за половодье. Даже само выделение половодья как отдельной фазы водного режима на гидрографах стока становится исключительно сложной задачей. Увеличение числа оттепелей приводит к «размазыванию» начала многоводной фазы (рис. 1). В начале половодья, а часто и в течение всего зимнего периода, возникает несколько пиков повышенной водности, связанных с зимними оттепелями. Вследствие этого, еще до начала волны половодья, происходит частичная сработка запасов воды в снежном покрове, что, естественно, сокращает объем и максимальный расход половодья, увеличивая зимний меженный сток. В этом случае возникает неопределенность в выделении начала половодья. С целью количественно оценить происходящие процессы в случае со сложной формой гидрографа половодья было принято считать за момент его начала дату, соответствующую устойчивому переходу температуры воздуха через ноль, без дальнейших «возвратов холодов».

Максимальное сокращение половодного стока наблюдается в верховьях Дона (выше г/п Лиски), где слой стока за половодье наибольший для всего бассейна. На всех постах изменения носят абсолютно идентичный характер: с начала 1930-х годов весенний сток здесь сократился с 80 мм до 40 мм в 2000-е годы, что составляет более 30% суммарного стока за половодье (рис. 2).

Несколько иная картина складывается в среднем течении Дона и бассейне Хопра (за исключением р. Ворона). Сокращение половодного стока в этом регионе менее интенсивное – не более 20 мм, в процентном отношении данная величина составляет 10-20% стока за половодье. Наименьшее в абсолютных значениях сокращение стока наблюдается в бассейне р. Медведица и р. Иловля, и составляет менее 10 мм (рис. 2). Однако в процентном отношении данные изменения также соответствуют около 20%, ввиду того, что сток половодья здесь относительно невелик (порядка 30-40 мм, с учетом того, что для верхнего Дона эта величина составляет более 60 мм).

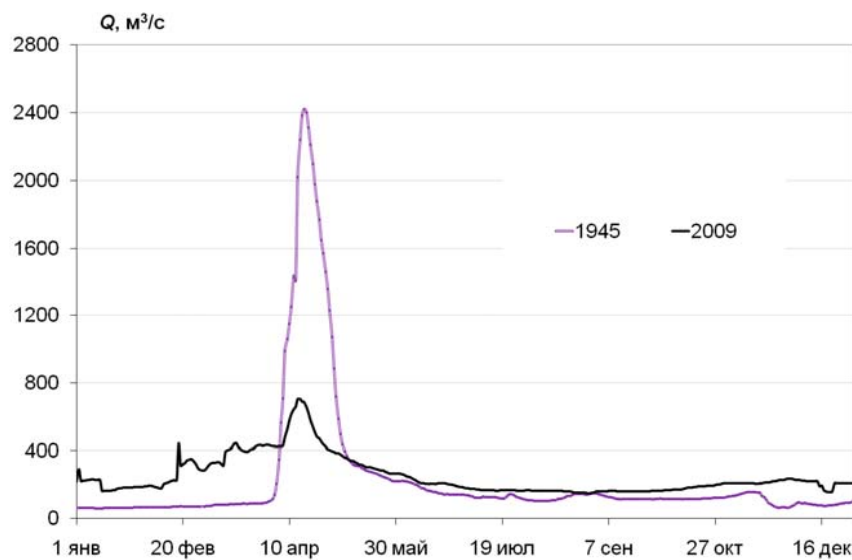


Рис. 1. Типовая форма гидрографов стока для периода 1936 – 1969 гг. (1945 г.) и 1970 – 2009 гг. (2009 г.)

Наиболее ярко изменения весеннего стока и деградация половодья в бассейне Дона проявляются в динамике максимальных

расходов воды. Статистический анализ рядов показал, что для абсолютно всех постов наблюдается статистически значимый отрицательный тренд (по критерию Спирмена) [3].

Сильнее всего снижение максимальных модулей стока проявляется в бассейнах средних рек и верховьях крупных рек. В верховьях Дона (г. Задонск) с начала 30-х годов прошлого столетия по 2000-е годы максимальный модуль стока сократился со 100 до 40 л/(с·км²), для р. Сосны – со 140 до 40 л/(с·км²), для р. Воронеж (г. Липецк) и р. Битюг (г. Бобров) – с 80 до 20 л/(с·км²), для р. Вороны (г. Борисоглебск) – с 60 до 20 л/(с·км²) (рис. 3).

Столь яркая тенденция к снижению максимальных расходов, безусловно, вызвана не только климатическими изменениями, но и влиянием антропогенного фактора, поскольку снижение максимальных расходов не сопровождается столь же сильным уменьшением объемов стока за половодье.

Сокращение максимального модуля стока в бассейне Дона в среднем составляет 40-60%. На карте (рис. 4) четко выделяются три однородных района, сменяющих друг друга с севера-запада на юго-восток: 1) верховья Дона (включая бассейн р.Сосна) и Воронежа - здесь сокращение максимального модуля стока составляет 40-60 л/(с·км²); 2) среднее течение Дона, бассейн Хопра и верховья Медведицы - здесь сокращение максимального модуля стока составляет 10-30 л/(с·км²); 3) нижнее течение Дона, бассейн Медведицы, Иловли, реки правобережья Цимлянского водохранилища: здесь сокращение максимального модуля стока менее 10 л/(с·км²).

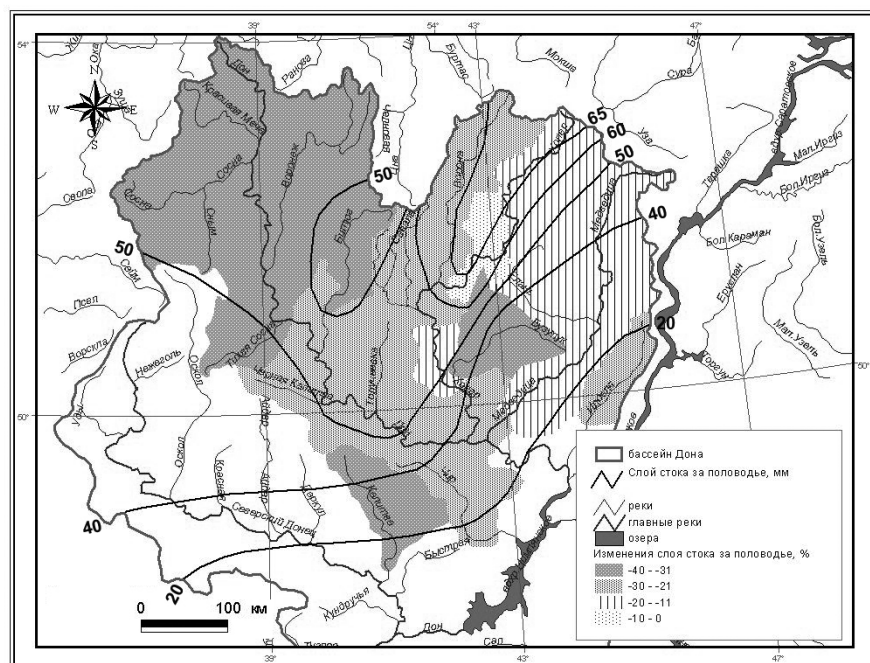


Рис. 2. Изменение (%) слоя стока за половодье за 1970-2008 гг. по сравнению с 1936-1969 гг.

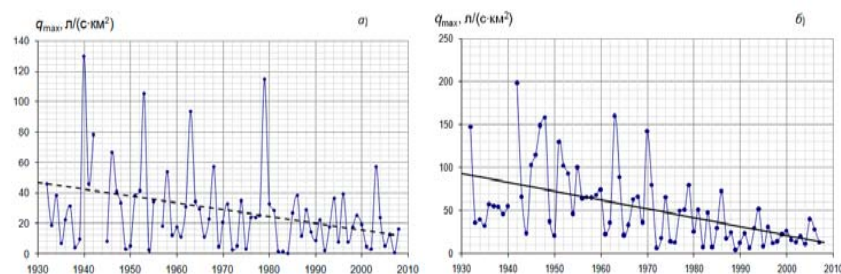


Рис. 3. Изменение максимальных модулей стока
а) р. Воронеж - Липецк; б) р. Чир – ст. Обливская

Проверка рядов максимальных модулей стока по критерию Фишера (за период 1930 – 2007 гг.) показала, что почти на всех реках 105

наблюдается значительное снижение дисперсии. Высокая дисперсия максимальных расходов воды в течение 1930-1969 гг. обусловлена неоднородностью выборки максимальных расходов воды. Высокие значения максимального модуля стока наблюдались в те зимы, когда формировался мощный снежный покров, отсутствовали оттепели.

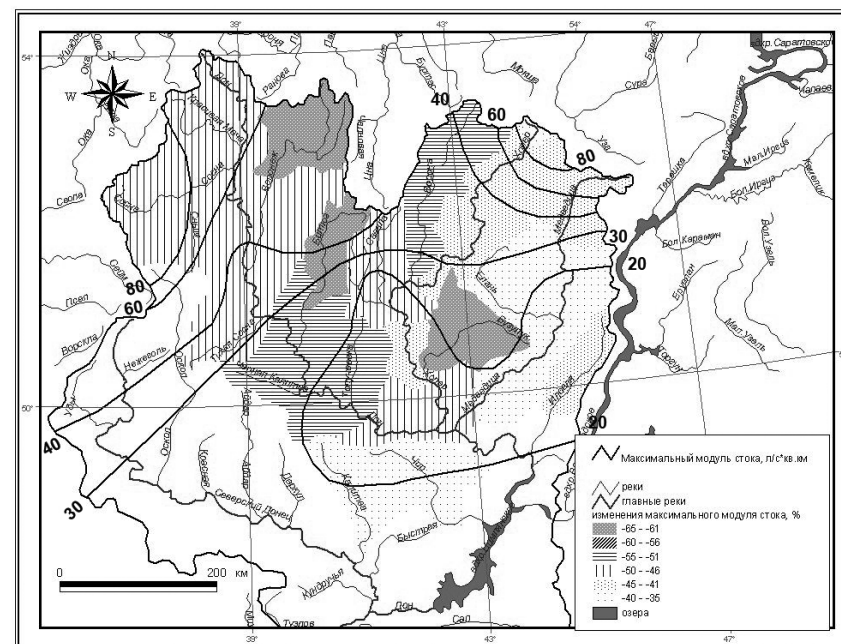


Рис. 4. Изменение (%) максимальных модулей стока весеннего половодья за период 1970-2008 гг. по сравнению с 1935-1969 гг.

В тоже время в 1930-е годы, также как и сейчас, были и так называемые «сиротские зимы», когда максимальный модуль половодья был сравним с современными значениями. Таким образом, причиной высокой дисперсии максимальных расходов и модулей стока является их генетическая неоднородность.

Сроки начала и окончания половодья имеют некоторое условное значение, ибо выделение момента начала половодья

оказывается достаточно сложной задачей, о чем упоминалось ранее. С некоторой долей условности можно говорить о том, что в настоящий момент практически на всех постах имеется статистически значимый тренд сдвига даты начала половодья и максимального расхода воды на более ранние сроки.

Наиболее сильные изменения в дате начала половодья происходят в западной части бассейна Дона. Здесь дата начала волны половодья сместилась на 9 – 12 дней в сторону более ранних значений. В восточной части бассейна дата начала изменилась примерно на неделю. Дата начала весеннего половодья обнаруживает тесную связь с датой перехода среднесуточных температур к положительным значениям (рис. 5), что в общем-то позволяет производить построение зависимостей и рассматривать этот показатель в качестве условно объективной характеристики половодья.

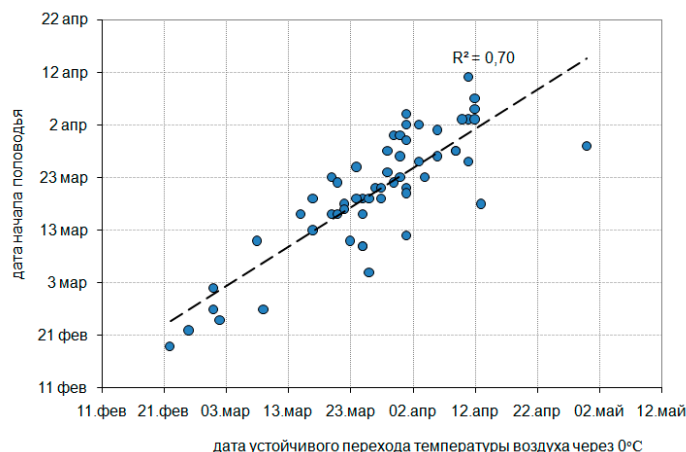


Рис. 5. Связь начала половодья и даты устойчивого перехода к положительным температурам
(на примере м/с Ливны и р. Сосны-г. Елец)

Дата окончания половодья – также довольно сложно определяемая характеристика. В условиях отсутствия общей методики ее определения, характеристика изменений этого показателя может быть рассмотрена лишь с некоторой долей условности. Тем не менее, общей тенденцией для современного периода является «запаздывание» дат окончания половодья. В среднем дата смещается в сторону более поздних на 5 – 10 дней.

Суммарно эффект сдвига даты начала половодья на более ранние сроки и запаздывание его окончания приводит к тому, что продолжительность половодья увеличивается со статистически значимым трендом практически на всех реках. В зависимости от масштаба реки и положения водосбора продолжительность половодья увеличивается на 10 – 20 дней.

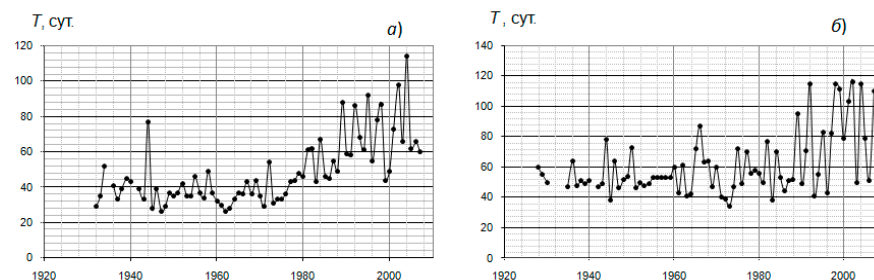


Рис.6. Динамика продолжительности половодья (сут.)

а) р. Воронеж – г. Липецк; б) р. Дон – Лиски

Изменения среднегодового и минимального стока. На современном этапе для рек бассейна Дона характерно относительное постоянство среднегодовых расходов воды. Изменения средней водности рек всего бассейна, причем как больших рек, с площадью водосбора более 50 000 км², так и малых, не превышают 10-20 %. Среднегодовой модуль стока по современным оценкам меняется в

пределах бассейна от 0,6 л/(с·км²) на юго-востоке, до 7 л/(с·км²) на северо-западе.

Для водного режима рек бассейна Дона характерно формирование летне-осенней межени с июня по октябрь, часто прерываемой дождевыми паводками, но иногда плавно переходящей в зимнюю межень. Периоды наименьшей водности обычно попадают на июль-октябрь и декабрь-январь. Осредненный расход за эти два промежутка времени может характеризовать средний меженный сток. Модуль среднего меженного стока на современном уровне изменяется в пределах бассейна от 0,3 л/(с·км²) на юго-востоке (левобережье Цимлянского водохранилища) до 5 л/(с·км²) на западе, северо-западе бассейна (верховья Дона, Северского Донца). Минимальные месячные расходы чаще всего наблюдаются зимой или осенью. Модуль минимального месячного стока меняется в пределах бассейна от 0,1 л/(с·км²) в среднем течении Дона, до 3 л/(с·км²) на северо-западе бассейна.

Происходящие изменения минимального стока в бассейне Дона связаны с изменениями характеристик многоводной фазы водного режима и общим перераспределением стока внутри года. Относительное постоянство среднегодовых расходов воды и сокращение половодного стока приводят к интенсивному увеличению водности межени. Основной современной особенностью динамики водного режима является значительное увеличение как средних меженных, так и минимальных месячных расходов воды. Бесспорно, основной причиной роста минимальных расходов является изменение характеристик многоводной фазы водного режима. Сокращение стока половодья компенсируется увеличением водности межени. Наиболее тесный характер носит зависимость

минимального месячного расхода воды и слоя стока за половодье (рис. 7).

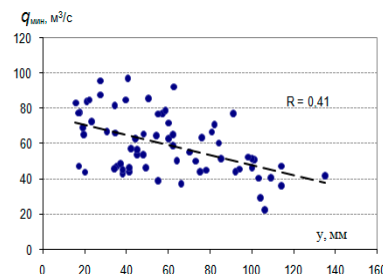


Рис. 7. Зависимость минимального месячного расхода воды от слоя стока за половодье для р. Дон – г. Задонск



Рис. 8. Изменения среднего меженного летнего (VII-IX) (1) и зимнего (XII-II) (2) стока р. Дон – г. Задонск

Увеличение меженного стока происходит как за счет зимней, так и за счет летне-осенней межени. Изменения среднего меженного зимнего и летнего стока происходят относительно синхронно, но с некоторым сдвигом (рис. 8). Наибольший коэффициент корреляции между средними меженными расходами составляет 0,66 и достигается при увязывании текущего летнего расхода с последующим за ним зимним расходом (рис. 9).

Первопричиной изменения меженного стока р.Дон является изменение метеорологических факторов. Для оценки их роли были рассчитаны парные и множественные коэффициенты корреляции меженного стока с осадками за холодный и теплый периоды года. Коэффициенты корреляции меженного стока с осадками за холодный период предшествующего года равны 0,4-0,46, с осадками за холодный период со сдвигом два года – 0,3-0,38, с осадками за теплый период текущего года – 0,5-0,55. Множественный коэффициент корреляции меженного стока с вышеперечисленными

переменными равен около 0,7-0,75 (рис. 10). Связь меженного стока со значениями температуры воздуха как за холодный, так и за теплый периоды отсутствует.

Статистически значимый рост минимальных месячных расходов воды фиксируется практически для всех постов в бассейне. При этом интенсивность роста минимальных месячных расходов составляет в среднем 15% за 10 лет. Изменения минимального месячного стока хоть и носят повсеместный характер, но имеют различную интенсивность в разных частях бассейна (рис. 11).

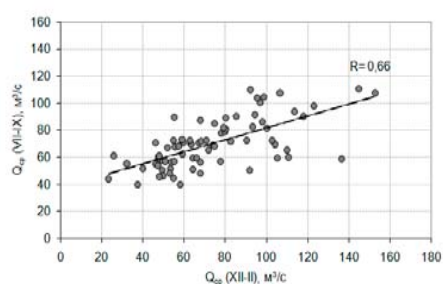


Рис.9. Связь среднего меженного летнего и зимнего расхода воды р. Дон – г. Задонск

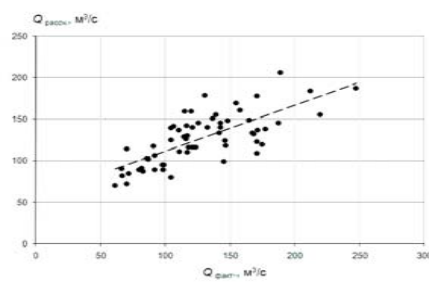


Рис.10. Связь фактических и рассчитанных по уравнению множественной регрессии значений меженного стока р.Дон –ст. Лиски

Наибольшие изменения минимального месячного модуля стока происходят в верхнем течении Дона, Хопра и Медведицы. Причем в верховьях Дона изменения несколько меньше и составляют 20-50 %. Ниже по течению они достигают максимальных значений (более 200% для р. Дон – г. Павловск). В низовьях Дона увеличение минимального месячного модуля составляет около 20 %.

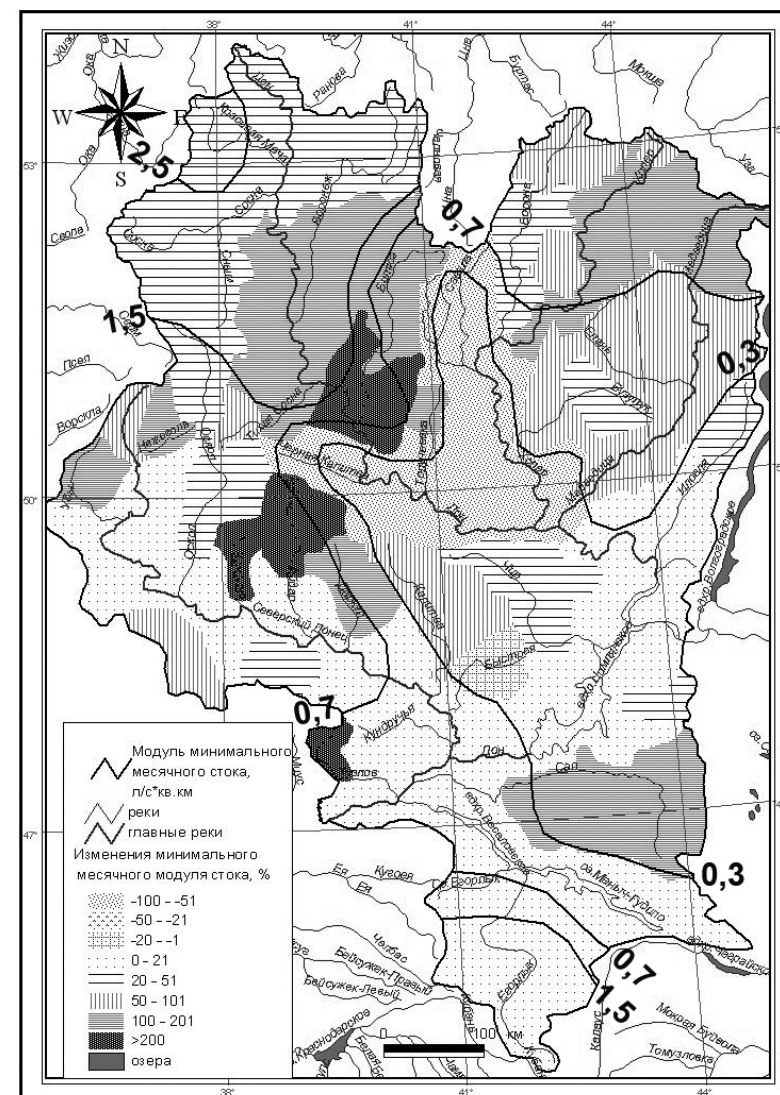


Рис. 11. Минимальный месячный модуль стока л/(с·км²) за 1970-2008 гг. и его изменение по сравнению с 1935-1969 гг.

Заключение. Основной тенденцией изменения водного режима является перераспределение стока внутри года при относительном постоянстве общей водности бассейна. Для всех постов с различной степенью выраженности фиксируется сильное сокращение доли стока за половодье в среднегодовом стоке воды. Наиболее значительные изменения доли стока за половодье наблюдаются в верховьях бассейна Дона и Хопра, а также в бассейне Битюга, Вороны и Калитвы: здесь доля стока снизилась более чем на 20% за период 1970 – 2008 гг. по сравнению с периодом 1935 – 1969 гг.

Изменение доли стока за половодье, происходящее на фоне сравнительно неизменной нормы годового стока, вызывает интенсивный рост меженных расходов воды. Вследствие этого, происходит существенное снижение внутригодовой неравномерности стока за счет изменения соотношения меженного и половодного стока. Недостаток стока в половодье компенсируется подземным притоком в реки, особенно в зимний период. Увеличение естественной зарегулированности стока в бассейне характерно для абсолютно всех рассмотренных створов во всех частях водосбора (более 40 постов) (рис. 12).

Увеличение естественной зарегулированности стока значительно отражается на форме гидрографов. Во внутригодовом распределении стока при осреднении гидрографов по десятилетиям (рис. 13) заметно последовательное снижение максимальных расходов за половодье, распластывание его волны, а также постепенное увеличение меженных расходов. Наиболее высокие меженные расходы отмечаются в 2000-х годах. Максимальные расходы наблюдаются в более ранние сроки, продолжительность подъема половодья уменьшается, а спада – увеличивается. Таким

образом, осредненные гидрографы «заваливаются», приобретают более асимметричную форму, что связано с причленением оттепелей к волне подъема половодья. Происходящее смещение величины и даты максимального расхода, сокращение объема половодья, его «растягивание» во времени а также компенсационный рост меженных расходов воды коренным образом меняют форму гидрографа (рис.13).

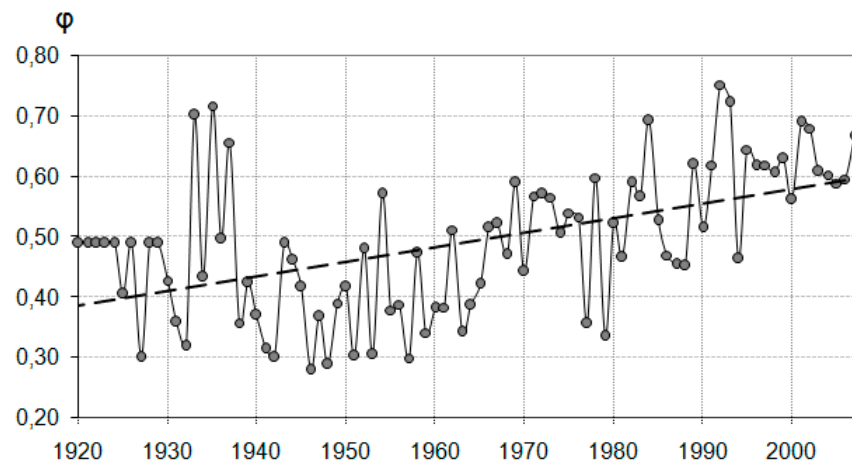


Рис. 12. Изменение коэффициента естественной зарегулированности стока (р. Хопер – г. Балашов)

Одновершинные гидрографы с четким максимумом в середине апреля, обусловленным таянием снежного покрова и характерные для восточно-европейского типа водного режима по классификации Б.Д. Зайкова сменяются гидрографами с гребенчатой формой в фазу повышенной водности, характерными для западноевропейских рек, причем превышение максимальных расходов воды над меженными сокращается с 10-15 раз до 3-5.

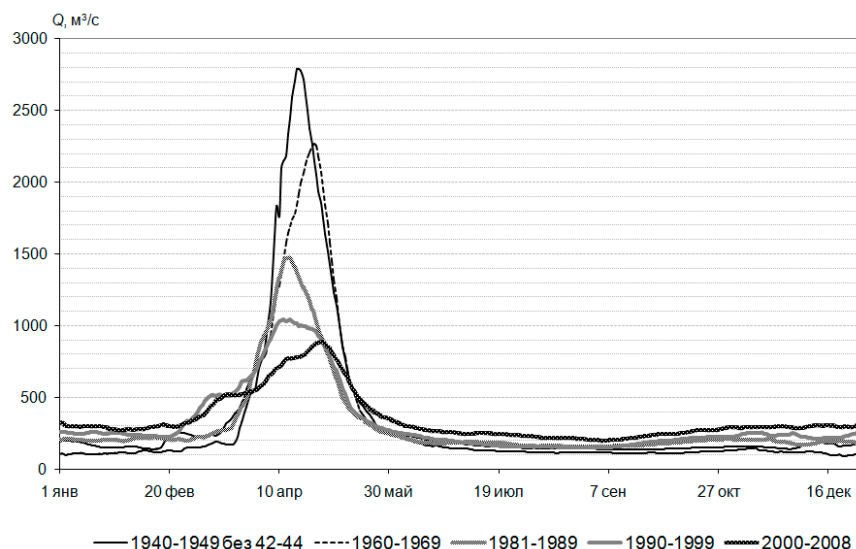


Рис. 13. Осредненные по десятилетиям гидрографы р. Дон – ст. Казанская

Литература

1. Киреева М.Б., Фролова Н.Л. Бессточные периоды на реках бассейна Дона // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 4, с. 47-54.
2. Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B, Safronova T.I. Climate-Induced Changes in Groundwater Runoff in Don Basin // Water Resources, 2010, Vol. 37, No. 5 с.733–742.
3. Христофоров А. В. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Изд-во МГУ, 1988. 131 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕНОСА ВЛАГИ И МЕДИ ДЛЯ ПОЧВ ВОДОСБОРА ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Кочарян А.Г., Суворов П.Б., Гусев Е.М.
Учреждение Российской академии наук Институт водных проблем
РАН, Москва,
E-mail: volvo95@bk.ru

В системе водоснабжения г. Москвы главенствующую роль играет Иваньковское водохранилище. Благодаря ему Волжская водная система обеспечивает гарантированную водоотдачу в $81 \text{ м}^3/\text{с}$. Гарантированная водоотдача двух других водных систем – Москворецкой и Вазузской составляет 32 и $19 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно.

Экологическое состояние и качество воды Иваньковского водохранилища в значительной степени определяется состоянием и характером использования его водосборной территории, поскольку именно на ней протекают основные процессы, формирующие химический состав вод водных объектов. На водосборной площади сосредоточены все источники загрязнения поверхностных и подземных вод: как точечные, так и распределенные по всей площади водосбора. В отличие от сосредоточенных, рассредоточенные или диффузные источники загрязняющих веществ (ЗВ) отличаются большой динамикой функционирования и значительной нестационарностью воздействия, что создает проблемы с количественной оценкой их влияния на водный объект и трудности с их контролем. Поэтому для адекватной оценки поступления загрязненных вод в водохранилище необходимо уметь достаточно точно рассчитывать характеристики стока с водосбора и влагопереноса в почвах.

Один из наиболее перспективных методов получения такой оценки – физико-математическое моделирование процессов массообмена в почвенном профиле рассматриваемых объектов. Осуществление данного типа моделирования требует задания почвенных параметров, идентифицирующих соответствующие экосистемы, в первую очередь гидрофизических параметров почвы, используемых при описании влаго- и солеобмена в ненасыщенных средах на основе решения уравнений влаго- и солепереноса и примером физико-математической модели может быть HYDRUS [1]. Настоящая работа, носящая в значительной мере методический характер посвящена экспериментальному определению параметров переноса воды и тяжелых металлов (на примере меди) для пахотной территории водосбора Иваньковского водохранилища.

Приведем основные уравнения влаго- и солеобмена, которые служат основой расчета интенсивности протекания указанных процессов и для которых необходимо определить соответствующие параметры. К ним относятся известное уравнение влагопереноса (в отсутствие растительного покрова)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

где θ – влажность почвы, q – вертикальный поток воды в почве, t – время, z – вертикальная координата (при положительном направлении оси z вверх);

уравнение, определяющее поток воды в почве

$$q = -\left[K\left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1\right)\right], \quad (2)$$

$$K = K(\theta), \quad h = h(\theta). \quad (3)$$

где K и h – коэффициент влагопроводности почвы и капиллярно – сорбционный потенциал почвы, соответственно;

уравнения переноса меди и ее взаимодействия с почвой

$$\frac{\partial \theta c_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho s_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_1 \frac{\partial c_1}{\partial z} \right) - \frac{\partial q c_1}{\partial z} - \mu_1 \theta c_1, \quad (4)$$

$$s_1 = \frac{k_1 c_1^{\beta_1}}{1 + \eta_1 c_1^{\beta_1}}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta c_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho s_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_2 \frac{\partial c_2}{\partial z} \right) - \frac{\partial q c_2}{\partial z} + \mu_1 \theta c_1, \quad (6)$$

$$s_2 = \frac{k_1 c_2^{\beta_2}}{1 + \eta_2 c_2^{\beta_2}}. \quad (7)$$

где уравнение (4) описывает перенос меди, подаваемой сверху в виде соли $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ (такую часть меди будем называть активной и обозначать индексом 1), а также ее взаимодействие с почвенно – поглощающим комплексом (ППК) и почвенным раствором (ПР), уравнение (5) – изотерму равновесия катиона меди формы 1 между ПР и ППК, уравнение (6) – перенос меди, появившейся в результате реакции меди с органическими (прежде всего с фульвокислотами) и другими соединениями ПР (такую часть меди будем обозначать индексом 2), уравнение (7) – изотерму равновесия соединений меди формы 2 между ПР и ППК.

В уравнениях (4) – (7) c_1 и c_2 обозначают концентрации меди в ПР, существующей в форме 1 и 2, соответственно; s_1 и s_2 – концентрации меди в ППК в формах 1 и 2, соответственно; μ_1 – константа реакции, определяющая переход меди из формы 1 в форму 2; $D_1 \cong D_2 = D$ – коэффициент дисперсии рассматриваемых веществ в ПР; k_1 , k_2 , β_1 , β_2 , η_1 , η_2 – эмпирические константы в уравнения равновесия (5) и (7).

В данной работе мы рассмотрим методы и результаты определения констант только в гумусовом слое (горизонте А)

рассматриваемого участка водосбора. В этом слое почва содержит органические вещества и в ПР имеются фульвокислоты, гуминовые кислоты, аминокислоты, сахара и т.д., которые в процессе прохождения через почву меди в форме 1 дают возможность появиться в ПР и меди в форме 2.

На выбранном участке водосбора Иваньковского водохранилища вблизи г. Конаково был отобран из горизонта А ряд почвенных монолитов высотой 5 см с ненарушенной структурой для получения в лабораторных условиях характеристик $K = K(\theta)$ и $h = h(\theta)$, определяющих влагообмен в почве, а также монолитов высотой 10 см, давших возможность так же в лабораторных условиях определить гидрохимические характеристики μ_1 , D , k_1 , k_2 , β_1 , β_2 , η_1 , η_2 .

В гидрофизике почв на основе теоретических и экспериментальных исследований указанных характеристик для различных как по генетическому признаку, так и механическому составу типов почв разработан ряд параметризаций функций $h(\theta)$ и $K(\theta)$, т.е. получены обобщенные математические формулировки связи h и K с θ , использующие ряд параметров, идентифицирующих конкретную почву. В настоящее время наиболее удачной, достаточно универсальной и очень часто используемой при решении агрофизических, гидрологических, климатических и экологических задач является параметризация ван Генюхтена–Муаллема зависимостей $h(\theta)$ и $K(\theta)$ [2]. Данная параметризация основана на модели распределения почвенных пор по их размерам, предложенной Муаллемом. В этом случае связи $h(\theta)$ и $K(\theta)$ выглядят следующим образом:

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) = \left[1 + (\alpha h)^n \right]^{1/n-1}, \quad (8)$$

$$K(S_e) = K_0 S_e^L \left\{ 1 - \left[1 - S_e^{n/(n-1)} \right]^{1-1/n} \right\}^2, \quad (9)$$

где θ_r , θ_s , α , n и L – параметры связей $h(\theta)$ и $K(\theta)$ (для краткости – параметры ван Генюхтена), идентифицирующие конкретную почву (значение L обычно принимается равным 0.5) и зависящие в основном от ее механического состава, содержания в ней органического вещества и некоторых других показателей, K_0 – коэффициент фильтрации почвы (коэффициент влагопроводности при полном насыщении почвы).

В данной работе зависимость капиллярного потенциала почвы от ее влажности для каждого из отобранных образцов была определена в Институте гидрологии Словацкой академии наук (ИГ САН) на основе метода мембранного пресса. Полученная для каждого образца зависимость $h(\theta)$ была аппроксимирована уравнением (1). Таким образом, для каждого образца были определены параметры θ_r , θ_s , α , n .

Значения коэффициентов фильтрации K_0 почвенных образцов были получены также в Институте гидрологии (ИГ) Словацкой академии наук на капилляриметре методом падающего давления. Полученные значения θ_r , θ_s , α , n и K_0 дают возможность на основе (8) и (9) рассчитать зависимость $K(\theta)$. На рис.1 приведены примеры полученных характеристик h и K для одного из исследованных образцов.

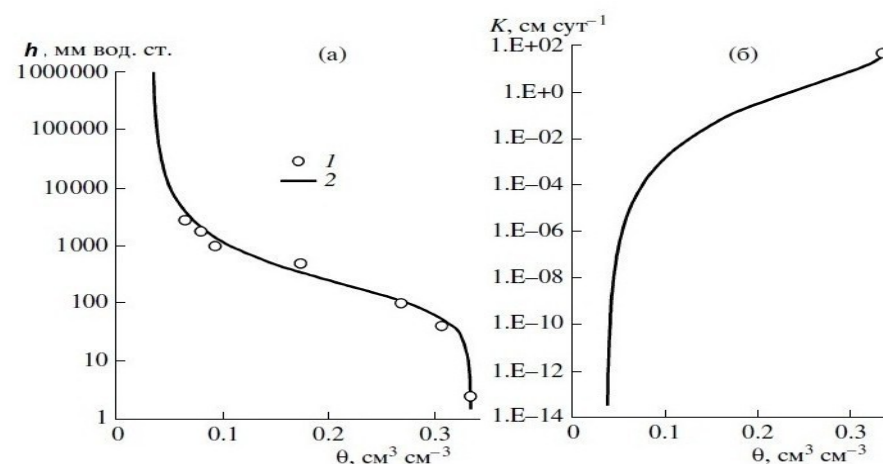


Рис. 1. Пример зависимостей капиллярно-сорбционного потенциала h и коэффициента влагопроводности почвы K от ее влажности θ , полученные для одного из почвенных образцов. 1-данные экспериментальных исследований, 2-аппроксимация $h(\theta)$ и $K(\theta)$ зависимостями Ван Генюхтена-Муаллема.

Поскольку гидрофизические характеристики почвы имеют достаточно сильную пространственную изменчивость как по горизонтали, так и по вертикали, во многом обусловленную случайной осцилляцией указанных выше факторов, определяющих значения гидрофизических свойств почвы, значения параметров θ_r , θ_s , α , n и K_0 , полученные для образцов почв каждой экосистемы, были осреднены для получения более устойчивых их значений, характеризующих выбранный участок почвы (табл.1.)

Таблица 1. Параметры ван Генюхтена, коэффициенты фильтрации почвы в районе агроэкосистемы водосбора Иваньковского водохранилища и их среднеквадратические погрешности, полученные при определении указанных характеристик.

θ_s , см ³ см ⁻³	θ_r , см ³ см ⁻³	α , см ⁻¹	n	K_0 см сут ⁻¹
0.41 ± 0.02	0.033 ± 0.008	0.014 ± 0.004	1.58 ± 0.08	$80 \exp(\pm 0.67)$

Полученные данные дают возможность на основе уравнений (1) и (2) рассчитывать водный режим почв сельскохозяйственных экосистем Иваньковского водохранилища.

Перейдем к определению гидрохимических характеристик выбранной почвы, определяющих перенос и трансформацию меди в почвенном профиле горизонта А.

Метод, который дает возможность определить эти параметры, основан на решении с помощью компьютерного комплекса HYDRUS обратной задачи переноса и трансформации меди следующими параметрами μ_1 , D , k_1 , k_2 , β_1 , β_2 , η_1 , η_2 для горизонта А почвенного профиля. Для этого используются уравнения (1) – (7), начальные и граничные условия для переноса воды и соответствующих форм меди и полученная экспериментально либо информации о динамике концентраций форм меди в ПР, либо информация о динамике нижнего граничного условия в задаче о переносе меди, также полученная из опытных данных. В настоящей работе был использован 2-ой вариант.

Суть его заключалась в следующем. Была поставлена серия опытов с почвенными монолитами, через которые сверху пропускался раствор $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ с постоянной скоростью q , определяемой коэффициентом фильтрации почвы (и поэтому

разной в разных опытах) и с постоянной во времени концентрацией меди (также задаваемой различной в разных опытах). На нижней границе определялась динамика концентраций c_1 и c_2 . Именно эта информация и служила основой решения обратной задачи, т.е. расчетов параметров μ_1 , D , k_1 , k_2 , β_1 , β_2 , η_1 , η_2 .

При описанной постановке опытов начальные условия для задачи трансформации меди записывались как

$$c_1(z) = 0, \quad c_2(z) = 0, \quad (10)$$

верхние граничное условие как

$$(c_1 q)_0 = \text{const1}, \quad (c_2 q)_0 = \text{const2}, \quad (11)$$

нижние граничные условия как

$$\left. \frac{\partial c_1}{\partial z} \right|_{-H} = 0, \quad \left. \frac{\partial c_2}{\partial z} \right|_{-H} = 0, \quad (12)$$

(здесь H - толщина монолита).

Значения const1 и const2 определяются степенью диссоциации молекул $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ в начальном растворе.

Ряды же измеренных на нижней границе монолита ($-H$) значений $c_1(t)$ и $c_2(t)$, как было отмечено выше, служили информацией для решения обратной задачи в программе HYDRUS при определении гидрохимических параметров.

Что касается влагопереноса, то, поскольку монолит постоянно находился в насыщенном состоянии, верхнее и нижние условия в задаче влагопереноса записывались как

$$q_0 = q_H = \text{const3} = q, \quad (13)$$

Отметим, что при определении гидрохимических параметров принималось приближение $\beta_1 = \beta_2 = 1$, $\eta_1 = \eta_2 = 0$, в силу чего необходимо было определить только параметры μ_1 , D , k_1 , и k_2 .

Остановимся на полученных результатах. На рис. 2 приведены результаты опыта использованного для определения указанных выше параметров.

При этом оптимальные значения гидрохимических параметров почвы оказались равными соответственно: $\mu_1 = 0.036 \text{ мин}^{-1}$, $D = 40 \text{ см}^2/\text{мин}$, $k_1 = 0.76 \text{ см}^3/\text{г}$ и $k_2 = 1.0 \text{ см}^3/\text{г}$.

Следующие три аналогичных опыта фильтрации раствора $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ в почвенных монолитах служили проверкой того, насколько хорошо при полученных значениях μ_1 , D , k_1 , и k_2 воспроизводится динамика значений концентраций c_1 и c_2 на выходе из монолитов при других начальных концентрациях $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ и других скоростях фильтрации. На рис. 3 и 4 показаны результаты сопоставления рассчитанных и измеренных значений выходных значений c_1 и c_2 . Данное сопоставление показало, что при полученных гидрохимических характеристиках почвы горизонта А различие между измеренными и рассчитанными концентрациями на выходе меди в формах 2 и 1 находятся в пределах точности экспериментальных измерений.

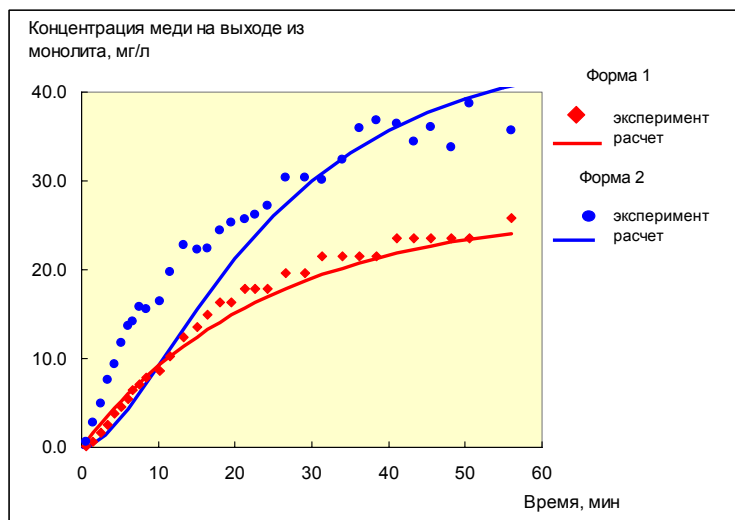


Рис. 2. Динамика концентрации меди в ПР на выходе из монолита в опыте 1, который послужил основой для определения гидрохимических параметров почвы в отношении переноса и трансформации соединений меди в почвенном горизонте А. Начальная концентрация меди в ПР – 110 мг/л.

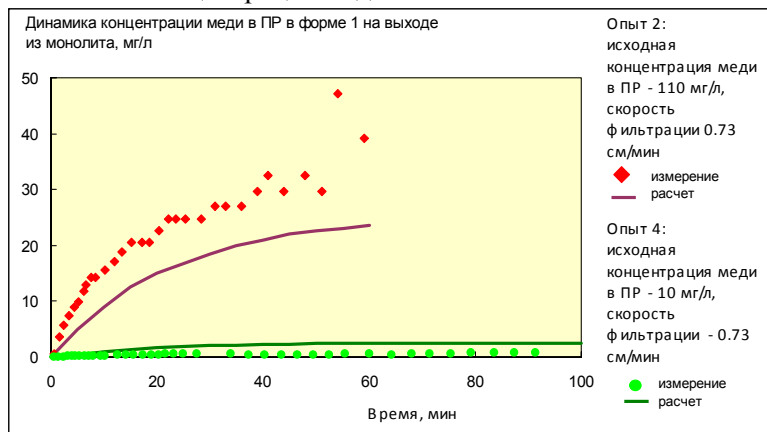


Рис. 3. Результаты проверочных опытов по исследованию динамики концентрации меди в ПР в форме 1 на выходе из почвенного монолита во время фильтрации раствора $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$.

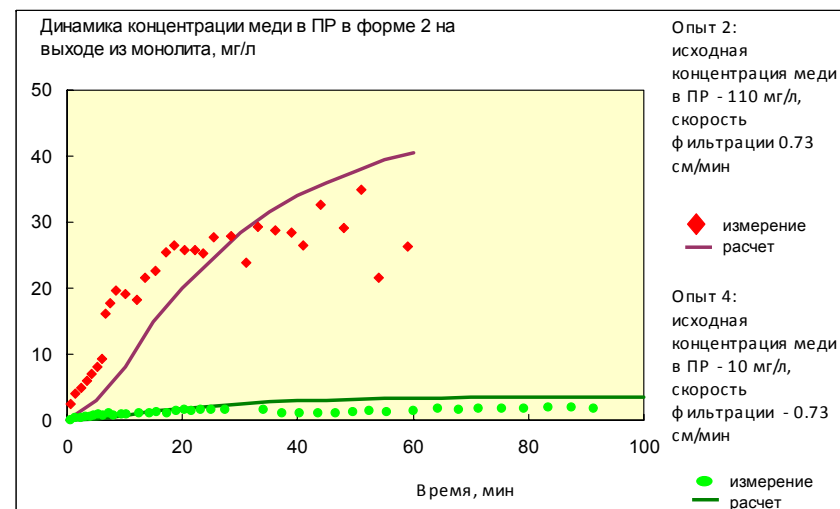


Рис. 4. Результаты проверочных опытов по исследованию динамики концентрации меди в ПР в форме 2 на выходе из почвенного монолита во время фильтрации раствора $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$.

Выводы:

Разработана методика, позволяющая при различных параметрах почвы и различных химических характеристиках входного раствора рассчитать скорость выноса и трансформацию различных соединений элементов из гумусового горизонта почвы. Методика апробирована на примере выноса и трансформации меди из горизонта А.

Литература

1. Simunek J., Huang K., Sejna M., Van Genuchten M.Th. The HYDRUS-ET software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. Bratislava: Institute of hydrology SAV, 1997. Version 1.1. 184 p.
2. Van Genuchten M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 1980. V. 44. № 7. P. 892–898.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОГЕННОГО УМЕНЬШЕНИЯ СТОКА НА УСЛОВИЯ ЗАТОПЛЕНИЯ ПОЙМЫ НА РОССИЙСКО-КИТАЙСКОМ УЧАСТКЕ ДОЛИНЫ Р. АРГУНЬ

Кривушин М.В.

Кафедра гидрологии суши МГУ, г. Москва,

E-mail: krivushin_martin@mail.ru

В последнее десятилетие бассейн р. Аргунь подвергается значительному антропогенному воздействию, в основном в его верховьях, на территории КНР, где формируются до 70% стока р. Аргунь. Наиболее значимым в экологическом отношении может оказаться проект обводнения оз. Далайнор водами р. Хайлар. Данный проект, в совокупности с другими гидротехническими мероприятиями на водосборе р. Аргунь, может иметь опасные негативные последствия для российско-китайского участка реки, представляющего особую экологическую и водохозяйственную ценность не только для России, но и для Китая. В аспекте экологического благополучия региона особое значение имеют условия затопления поймы на широкопойменном участке р. Аргунь от с. Молоканка до впадения р. Гэньхэ. Условия затопления пойменного массива на данном участке долины в большей степени определяют существующее разнообразие животного и растительного мира.

В работе выполнен анализ затопления поймы на участке реки от с. Молоканка до с. Средняя Борзя в зависимости от современных и ожидаемых колебаний уровня воды в русле р. Аргунь. Участок долины реки разделен на сегменты, для которых обоснованы зависимости площади затопления от изменения уровня воды на опорных гидрологических постах. На основе полученных зависимостей получены сценарные оценки изменения площади

затопления поймы при различных вариантах уменьшения годового стока воды р. Аргунь (на 10, 20, 30 и 40%) вследствие проведения водохозяйственных мероприятий на территории КНР.

ГЕОГРАФО-ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАССЕЙНА Р. АРГУНЬ

Основные природные особенности бассейна реки

Река Аргунь является правым притоком р. Амур. Она берет начало на западном склоне Большого Хингана и на протяжении 669 км течет по территории Китайской Народной Республики (КНР), где имеет название Хайлар (рис. 1).

Общая длина реки 1620 км [1]. На 669 км от устья р. Аргунь вступает в пределы Российской Федерации и далее является естественной границей между Россией и Китаем. В пределах российской территории длина Аргуни составляет 951 км. Площадь бассейна р. Аргуни (без водосбора оз. Далайнор) равна 164 000 км². С учетом площади водосбора озера Далайнор бассейн Аргуни занимает 285 тыс. км².

Бассейн Аргуни с водосбором оз. Далайнор вытянут с юго-запада на северо-восток. Большая часть водосбора Аргуни находится в диапазоне высот от 1000 до 1500 м, при этом высота гор ниже высотного положения климатической снеговой линии, что является причиной отсутствия в бассейне реки ледников и постоянного снежного покрова.

Современная гидрографическая сеть наиболее развита в северной части бассейна, особенно на западных склонах Большого Хингана. В многоводные периоды связь р. Аргунь с оз. Далайнор восстанавливается через протоку Мутную. Водосбор озера включает бассейны рр. Керулен и Халхин-Гол. Площадь водосбора

оз. Далайнор составляет немногим более 180 тыс. км², что приблизительно на 20 тыс. км² превышает площадь бассейна Аргуни, если в качестве ее верхнего течения принимать р. Хайлар.

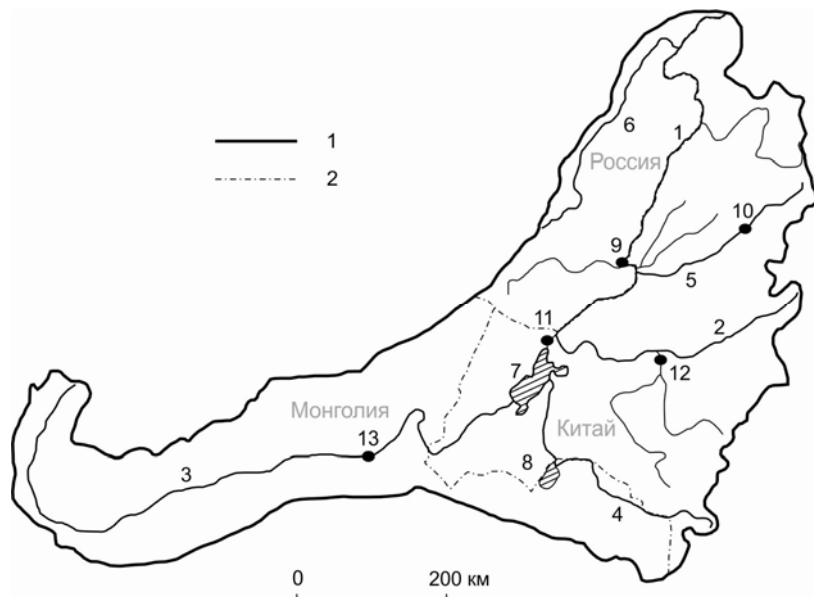


Рис. 1. Бассейн р. Аргунь. Реки: 1 – Аргунь, 2 – Хайлар, 3 – Керулен, 4 – Халкин-гол, 5 – Гэнхэ, 6 – Газимур; озера: 7 – Далайнор, 8 – Буир-Нур; города: 9 – Приаргуньск, 10 – Гэнхэ, 11 – Чжалайнор, 12 – Хайлар, 13 – Чойбалсан. 1 – граница бассейна р. Аргунь, 2 – государственные границы.

К наиболее крупным правобережным притокам Аргуни относятся: Гэнхэ (Ган) и Хаул (Хаул-Гол) с Дэрбулом, Марэкта, Бэйсытэхэ (Быстрая), Шен-Сянь-Ту-Хэ, Ньюрхэ и Цзилюхэ. Из левобережных притоков выделяются реки: Урулюгуй, Уров, Урюмкан, Газимур, Верхняя, Средняя и Нижняя Борзя. После выхода к российско-китайской границе и до с. Староцурухайтуй р. Аргунь не имеет крупных

притоков. Бессточные области на территории российской части бассейна составляют 5460 км². Их наличие оказывают заметное влияние на формирование стока р. Аргунь.

Бассейн р. Аргунь расположен в умеренном климатическом поясе. Средняя многолетняя температура июля изменяется от 17–18°C на северо-востоке до 20°C на юге бассейна. Годовая разность максимальных и минимальных температур воздуха превышает 40°C. Режим осадков на исследуемой территории определен влиянием муссонной циркуляции, поэтому отношение летних осадков к годовой сумме превышает 60%. Количество зимних осадков составляет 2,5–3,5% от их годовой суммы. Годовая сумма осадков изменяется от 200 мм до 400 мм. В многоводные годы количество осадков в 2–3 раза превышает осадки за маловодные годы.

Одной из особенностей региона является обилие глобально значимых экологических районов: Даурский степной (часть бассейнов Онона и Аргуни, бессточная Торейская котловина), бореальные леса Сибири (водораздел Аргуни и Онона), водно-болотные угодья в долине р. Аргуни [2]. Среднее течение Аргуни – ключевая орнитологическая территория международного значения. В зоне сухих даурских степей водно-болотные угодья выступают в качестве экологического каркаса региона, обеспечивающего существование большей части обитающих здесь видов позвоночных животных. Водно-болотные угодья в долине р. Аргунь признаны тремя странами (Россия, Китай, Монголия) и мировым сообществом в качестве уникального участка, имеющего глобальную природоохранную ценность, особенно для перелетных птиц. С китайской стороны в бассейне и пойме р. Аргунь расположено три природоохранных резервата охраняющих болота: «Эрка» (район Манжоули), «Хулиету» (район Ченбаерху), «Болото Эргуна» (район

Эргуна). Особо охраняемая территория «Пойма Средней Аргуни», включающая пояс болот длиной 150–200 км вдоль российско-китайской границы (от Абагайтуя до Приаргунска) – естественный связующий элемент между российской и китайской частью международного заповедника «Даурия» [3].

Гидрологический режим реки и использование водных ресурсов

Среднегодовой сток реки Аргунь в створе Олочи составляет $4,68 \text{ км}^3/\text{год}$ (1963–1971 гг.), средний расход воды равен $148 \text{ м}^3/\text{с}$, годовой слой стока – $44,2 \text{ мм}$, модуль стока – $1,40 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$. По другим данным, полученным реконструкцией ряда наблюдений на г/п Олочи по соответствующему ряду на р. Хайлар (г. Цаган, КНР) за период 1955–1984 гг. норма годового стока равна $205 \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует годовому объему стока $W_Q = 6,46 \text{ км}^3$, слою стока 61 мм и модулю стока $1,94 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$. По этим данным бассейн Аргуни относится к территориям с низкой водообеспеченностью. Модуль стока воды равен $1,7 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$. В бассейне Керулена он составляет $0,2 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$, а в Забайкальской части водосбора Аргуни – $2,8 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ [4].

Внутригодовое распределение водности р. Аргунь является типичным для данного региона (Рис. 2).

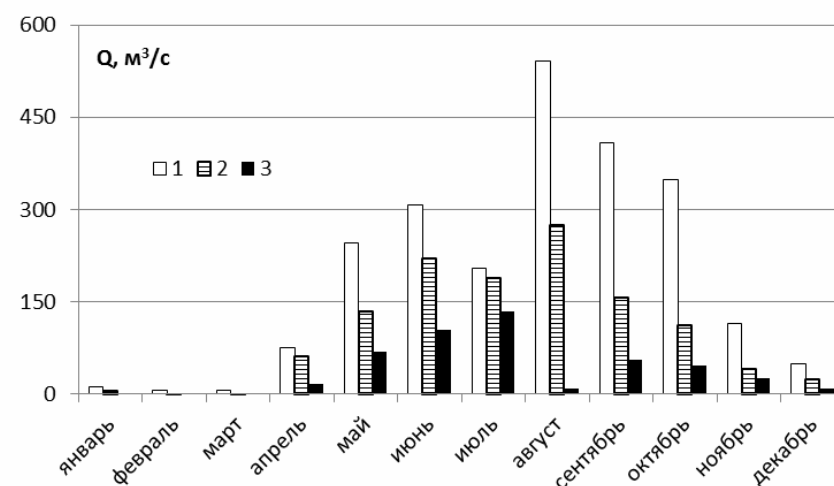


Рис. 2. Внутригодовое распределение стока р. Аргунь – Олочи для лет: 1 – повышенной, 2 – средней, 3 – пониженной водности.

Для большинства рек рассматриваемого региона характерна повышенная водность в теплое время года. Основной подъем уровней воды связан с летними паводками и приходится на июль–август (рис. 3). Паводки часто следуют один за другим, поддерживая повышенную водность рек в течение довольно длительного периода времени (100–150 дней). В теплый период года обычно формируется от 4–6 до 6–9 паводков.

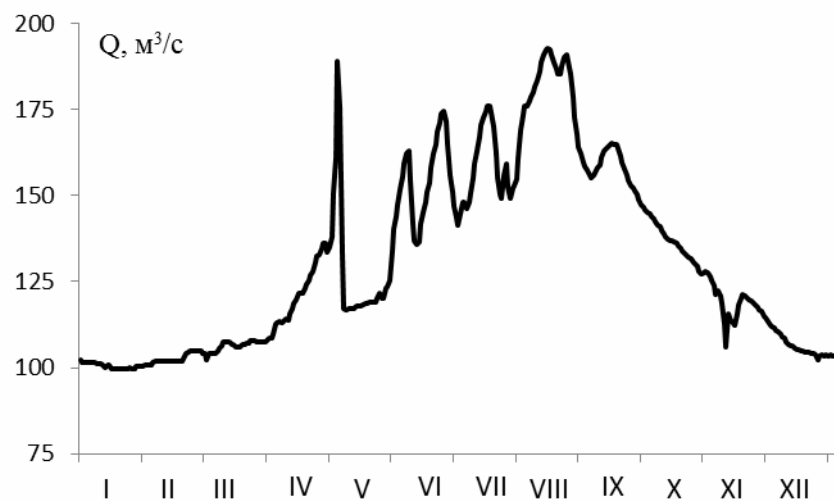


Рис. 3. Типовой гидрограф для года средней водности –
р. Аргунь, г/п Олочи, 1977 г.

Основное питание рек в бассейне Аргуни и оз. Далайнор – дождевое. Доля этого источника питания составляет 50–70% общего годового стока. На снеговое питание приходится 10–20%, на подземное питание – 10–30% [1]. В теплый период года (IV–X) формируется до 90–96%, зимой (XI–III) – 4–10% годового стока.

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ЗАТОПЛЕНИЯ ПОЙМЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ СТОКА Р. АРГУНЬ

Для решения задачи, связанной с оценкой влияния техногенного уменьшения стока р. Аргунь на условия затопления поймы на российско-китайском участке реки, обоснованы зависимости между площадью водной поверхности в долине Аргуни S и уровнями воды H , т.е. функции $S = f(H)$. Для этого потребовалось решить проблему получения данных о пространственном

распределении площади затопления, уровнях воды, выявить особенности их использования на разных участках исследуемой территории. Для задания уровней воды использованы дискретные в пространстве сведения об уровнях воды на гидрологических постах. Имеющиеся 4 поста располагаются на большом расстоянии друг от друга (рис.4), имеют относительно короткий период наблюдений (в половине случаев не превышающий 10 лет), что затрудняет обработку данных статистическими методами.

Рассматриваемый отрезок реки длиной 530 км был разбит на отдельные участки. Выделение границ участков производилось на основе соблюдения следующих правил:

- участок должен характеризовать один морфодинамический тип русла,
- участок должен быть не слишком большим, в связи с возможным увеличением погрешности, связанной с его удалением от опорных гидрологических постов,
- участок должен иметь достаточную информационную обеспеченность (данные о площади водной поверхности, уровнях воды).

Для задания уровней воды на участках 1-4 была использована информация по в/п Молоканка, на участке 5 и 6 – по в/п Кути, на остальных (7-10) – по в/п Новоцурухайтуй (табл.1). Водомерный пост Олочи находится за пределами изучаемого отрезка долины р. Аргунь. Несмотря на самый продолжительный ряд наблюдений данные по этому посту нельзя использовать вследствие большой удаленности от района исследований и значительного влияния притоков на водный режим этого района.

Площади водной поверхности (в долине реки в конкретные даты) получены на основе дешифрирования космических снимков со

спутниковых систем SPOT 4-5, Landsat 7, Aster Terralook. Наименьшее разрешение снимков составляло 30 м. Учет погрешности, связанной с разрешением космических снимков, осуществлялся путем определения устойчивости кривых связи площадей затопления и уровней воды, поскольку влияние разрешения снимков на результаты дешифрирования отражается на разбросе точек в поле изменения соответствующих переменных.

Таблица 1. Перечень используемых гидрологических постов на российско-китайском участке р. Аргунь

Пост	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Период действия
Молоканка	945	56100	с 2001 г.
Кути	705	62600	с 2003 г.
Новоцурухайтуй	603	96000	с 1904 г.
Олочи	425	106000	с 1899 г.

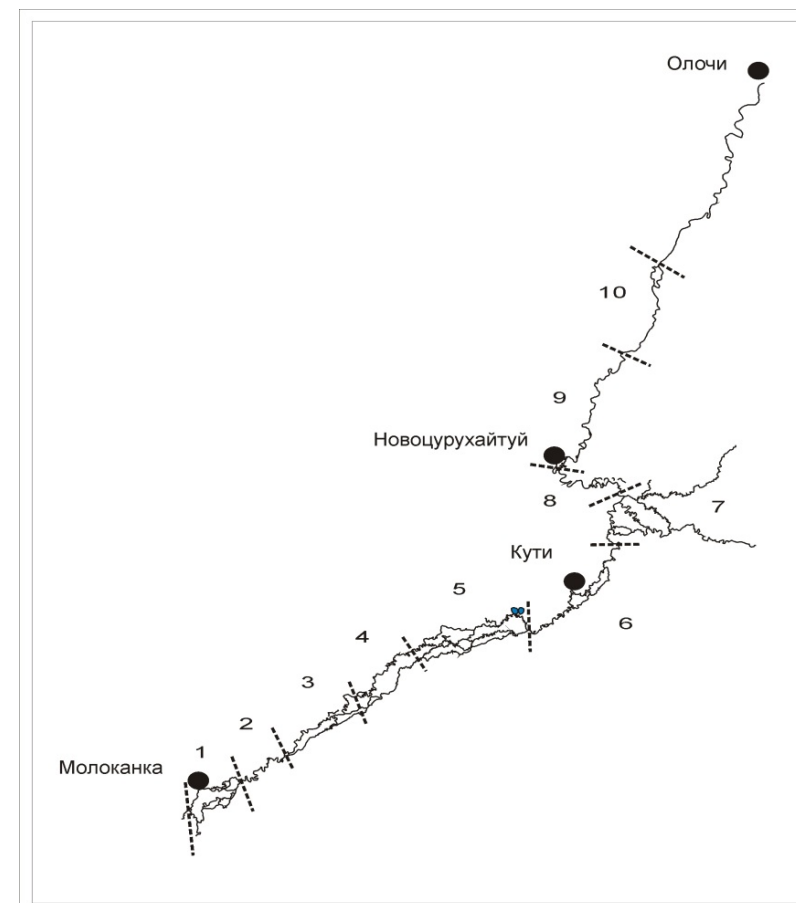


Рис. 4. Российско-китайский отрезок р. Аргунь.

Географические названия – опорные гидрологических посты;
1,2,...10 – номера участков исследования.

Рассматриваемый участок долины р. Аргунь по морфологическим признакам делится на две части: до и после впадения р. Гэнхе (Верхнеаргунская котловина) в р. Аргунь. Граница между участками 7 и 8 соответствует границе, на которой

происходит смена условий формирования русла реки. Наибольший интерес для исследования условий затопления поймы имеет верхний участок, который отличают небольшие скорости течения, значительная многорукавность и значительная ширина поймы. Для нижнего участка характерны большие уклоны и неразветвленное (слабо разветвленное) русло. Для этого участка планируемое изъятие части стока Аргуни на китайской территории не будет заметно изменять условия заливания поймы паводковыми водами. Поэтому данный участок в дальнейшем не анализировался с точки зрения воздействия хозяйственной деятельности на затопление поймы между с. Средняя Борзя и с. Олочи.

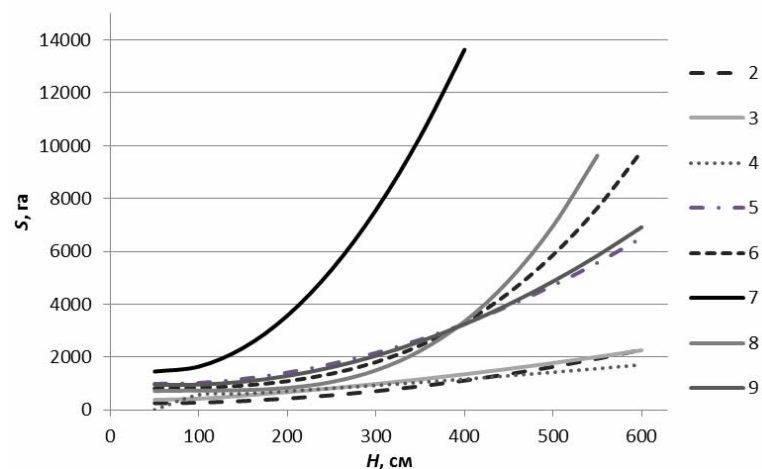


Рис. 5. Совмещенный график зависимости $S=f(H)$ для всех участков

Для других выделенных участков определен характер зависимости изменения площади затопления от уровня воды на опорных гидрологических постах (рис. 5, табл.2). Использование построенных зависимостей площади затопления поймы от изменений уровня воды корректно в пределах диапазона уровней воды,

учтенного при обосновании этих зависимостей. Это обстоятельство ограничивает возможности их прогнозного значения в некотором диапазоне изменения обеспеченности используемых расходов воды. Имеющиеся зависимости $S = f(H)$ эффективны для уровней воды, обеспеченностью которых меньше или равна 1% для в/п Молоканка и Кути, до 20% – для в/п Новоцурухайтуй.

Поскольку уровни воды имеют стоковый генезис, то зависимости, приведенные в табл.2, позволяют оценить изменение относительных площадей затопления при антропогенной трансформации расходов воды (с учетом функций $Q=f(H)$ на гидрологических постах). Неопределенность величины планируемого изъятия стока обусловила использование четырех сценариев его изменения на рассматриваемом участке р. Аргунь – на 10, 20, 30 и 40%. Базовое значение для расчетов имел расход воды 20% обеспеченности (табл. 3), который обеспечивает минимальную погрешность эмпирических зависимостей $S = f(H)$.

Оказалось, что сокращение площади затопления вследствие планируемой хозяйственной деятельности тем больше, чем сильнее уменьшается сток воды. Уменьшение площади заливания поймы для рассмотренных участков в долине р. Аргунь характеризует рис. 6. Оно колеблется от 3–6% (для сценария уменьшения стока на 10%) до 12–29 % для наихудшего варианта развития событий (уменьшение стока на 40%).

Таблица 2. Уравнения зависимости $S = f(H)$ и оценка точности результатов (V^* - среднеквадратическое отклонение, R^2 – коэффициент детерминированности [5])

№	Опорный гидрологический пост	Уравнение зависимости	R^2	V^* , га	Кол-во эмпирических данных
2	Молоканка	$S = 0,006H^2 + 0,346H + 243$	0,94	55,0	16
3	Молоканка	$S = 0,003H^2 + 1,927H + 322$	0,94	46,9	13
4	Молоканка	$S = 0,001H^2 + 1,833H + 519$	0,81	92,8	14
5	Кути	$S = 0,018H^2 + 0,362H + 963$	0,90	224	11
6	Кути	$S = 0,00005H^3 + 0,001H^2 + 0,6972H + 794$	0,95	157	15
7	Ново-Цурухайтуй	$S = 0,103H^2 - 22H + 2629$	0,97	365	13
8	Ново-Цурухайтуй	$S = 0,0001H^3 - 0,031H^2 + 3,3495H + 615$	0,95	143	18
9	Ново-Цурухайтуй	$S = 0,022H^2 - 3,132H + 1056$	0,94	102	15
10	Ново-Цурухайтуй	$S = 3,7314H + 360$	0,72	210	15

Таблица 3. Расчетные значения расходов воды для основных водомерных постов по длине р. Аргунь

Пост		Молоканка	Кути	Новоцурухайтуй
$Q_{20\%}, \text{м}^3/\text{с}$		145	170	520
Уменьшение стока, %	10	131	153	468
	20	116	136	416
	30	102	119	364
	40	87	102	312

Для участков №№2 и 9 уменьшение площадей заливания соизмеримо с долей уменьшения стока воды. Эта закономерность справедлива и в отношении изменения интегральных значений площади затопления для двух выделенных макроучастков – от с.Молоканка до впадения р. Гэньхэ и от Трехречья до с. Средняя Борзя. Это означает, что связь между площадью затопления поймы в долине реки и изменением расходов воды в период максимального стока имеет линейный характер.

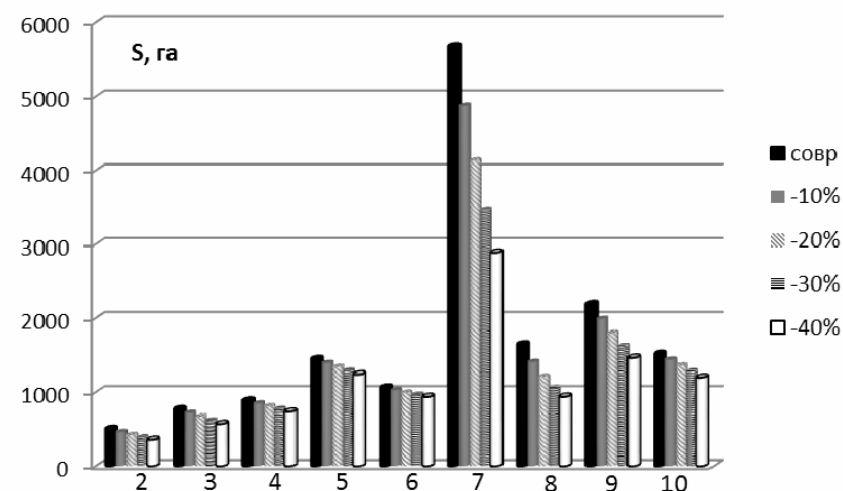


Рис. 6. Изменение площади затопления поймы на отдельных участках долины Аргуни при сценарных расчетах уменьшения стока на 10, 20, 30 и 40%

Наибольшее сокращение площадей затопления ожидается на участках №№7, 8 и 9. Участок №7 соответствует району Трехречья – наиболее ценному в экологическом плане участку р. Аргунь, в пределах которого расположен экологический резерват «Болота Эргунь». Уменьшение стока уже на 10% процентов может оказать

значительное негативное влияние для болотных экосистем данного участка. Процентное изменение этих площадей превышает соответствующее изменение доли стока воды. Срезание пиков высоких вод для данного участка приведет к тому, что уменьшится глубина затопления и продолжительность этого процесса.

Таким образом, значительных изменений в условиях затопления поймы р. Аргунь на участке российско-китайской границы (при планируемом изъятии стока реки на территории КНР) не ожидается. Тем не менее, на ряде отрезков реки они окажутся вполне заметными. К таким отрезкам долины Аргуни относится «Трехречье», для которого ожидаемые изменения условий затопления поймы значительны. При наиболее неблагоприятном развитии событий здесь возможно уменьшение площади заливания поймы речными водами на 45% по сравнению с современными условиями.

При подготовке данной статьи были использованы материалы отчета о научно-исследовательской работе кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова «Комплексная оценка состояния водных ресурсов и водохозяйственного комплекса бассейна реки Аргунь (включая бассейны реки Хайлар и озера Далайнор)», а также отчета по государственному контракту №19 Читинского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды «Оценка влияния изъятия части стока реки Аргунь на территории КНР на гидрологическое состояние российской части её бассейна».

Список использованной литературы

1. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 18. Дальний Восток. Вып. 1. Верхний и средний Амур. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 881 с.

2. Меновщиков А.П. Экологические проблемы бассейна реки Амур. Аналитическая записка. КПП по Читинской области. 2007. 8 с.
3. Аналитическая записка «Трансграничные водно-экологические проблемы в бассейне р. Аргунь. Чита. Восток НИИВХ, 2007. 18 с.
4. Чечель А.П. Водные ресурсы и водно-ресурсные проблемы приграничных территорий в бассейне истоков Верхнего Амура // Сборник докладов научно-практической конференции «Международное сотрудничество стран северо-восточной Азии: проблемы и перспективы. 20–22 октября 2010 г. Чита. 2010. С. 464–469.
5. Христофоров А.В. Надежность расчетов речного стока. М.: Изд-во МГУ, 1993. 166 с.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВОДНОСТИ РЕК ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

Макарова О.А., Сотникова Л.Ф.

Институт водных проблем РАН (ИВП РАН), Москва,

Email: diss.mak@gmail.com

Анализ многолетних данных гидрологических наблюдений позволил оценить величину водных ресурсов в крупнейших речных бассейнах нашей страны. В таблице 1 приведены статистические параметры годового стока по основным створам бассейна Волги. Статистические параметры условно-естественного годового стока (таблица 1) уточнены с использованием более совершенных методов оценки (метод наибольшего правдоподобия). В результате изменились параметры асимметрии (C_s) многолетнего ряда, что может повлиять на значения обеспеченных величин стока, особенно в зоне обеспеченности более 50%.

Таблица 1. Статистические параметры годового, меженного и половодного стока по различным участкам бассейна Волги

Створы бассейна	годовой			половодный			меженный			n
	W км ³	C_v	C_s/C_v	W км ³	C_v	C_s/C_v	W км ³	C_v	C_s/C_v	
Ока- Г. Горбатов	39.0	0.23	1.0	23.5	0.28	1.5	15.7	0.27	2.0	115
Кама- Н. Камск. г/у	91.0	0.21	1.0	55.6	0.24	2.0	35.4	0.29	2.0	90
Волга – Рыбинский г/у	33.0	0.25	1.0	19.0	0.27	1.5	14.0	0.40	2.0	115
Волга- Волгогр. г/у	255	0.18	1.0	150	0.19	1.5	105	0.25	2.0	115

Последние годы характеризуется повышенной водностью Волги: обеспеченность ($P\%$) годового стока в створе Волгоградского

гидроузла, равного 280,1 км³, что равно обеспеченности в 30%. Рассматривая отдельные стоковые участки бассейна р. Волги, можно оценить различный вклад этих частей в формирование общего стока. Так, средняя водность периода 1987–2005 гг. по бассейну р. Оки практически не отличается от многолетней и составляет 39,6 км³, т.е. имеет обеспеченность, близкую к 50%.

Существенные различия объемов стока за указанные периоды наблюдаются по р. Каме: за указанный выше период сток составил 97,7 км³, что соответствует обеспеченности в 35% и, наконец, сток Верхней Волге – 35,3 км³ ($P=40\%$). Вместе с тем, рассматриваемый период включает очень маловодный 1996 г., обеспеченность годового стока которого составляет 92%.

Маловодный 1996 год показал, что проблема рационального использования водных ресурсов остается достаточно актуальна и остра при наступлении маловодных лет и периодов. Повышенная водность за последние десять лет практически не изменила средние многолетние характеристики стока.

Изменения во времени годовых значений условно-естественного стока Волги свидетельствует о наличии в этом распределении восходящих трендов линейного характера, причем не только в распределении годовых значений стока за многолетний период данных наблюдений (рис. 1), но и в сезонных значениях, главным образом в период межени.

На территории Европейской части России за последние десятилетия годовая температура воздуха повысилась, и в основном в

зимний период. В результате речной сток внутри года приобрел более равномерное распределение: снизился в половодье и повысился в меженный период, когда превалирует подземный сток (в сравнении с данными при нормальных климатических условиях). Более равномерное распределение речного стока в течение года благоприятно для ряда водоемких отраслей экономики. Но неизвестна степень стабильности этих процессов. Кроме того, нельзя исключить возможность косвенных негативных последствий, связанных с изменениями в процессах гидрологического цикла, например, за счет заболачивания значительных территорий.

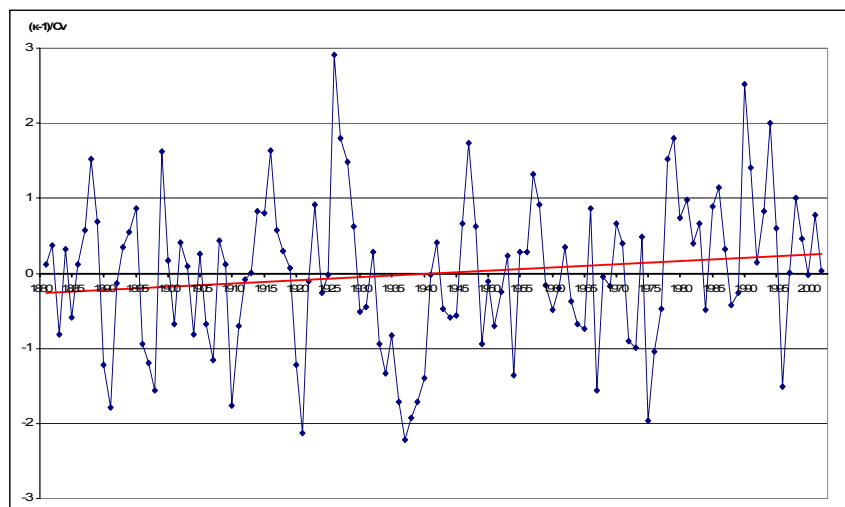


Рис. 1. Нормированная кривая годового стока р. Волги у г. Волгограда за период наблюдений с 1881 по 2002 г.г. с линией тренда

Неравномерность распределения водных ресурсов по территории и во времени, особенно при длительном периоде низкого

стока, в совокупности основных речных бассейнов может лимитировать водопотребление в отдельных районах страны. Это обуславливает необходимость разработки подходов к решению комплексной проблемы обеспечения водой, включая расчетные приемы в зоне избыточного увлажнения. надежного определения гидрологических характеристик.

За период 1978-96 гг. по данным ГГИ увеличение меженного стока в целом по бассейну Волги достигает 20—40 % от нормы. Это связано с увеличением водности в меженные месяцы (летние и зимние), снижением стока весеннего половодья и увеличением годового стока в бассейне самой Волги и ее притоков. Динамика величин меженного стока для водосбора рек Волги после 70-х годов дают основания считать, что межень, формируемая в основном подземным стоком, возросла практически по всему водосбору Волги (створ Волгограда) по данным гидрогеологов ИВП РАН [Джамалов] примерно на 15 %, в верховьях (створ Ивановского гидроузла) — на 20-25 %, по створу г. Н.Новгород — до 30 %.

Иначе картина водности за последние десятилетия складывается в бассейнах рек, водосборы которых находятся в зонах недостаточного увлажнения. К таким бассейнам относится бассейн р. Дон. Интегральные кривые позволяют оценивать водность разных периодов относительно всего имеющегося ряда наблюдений и оценить водность циклов в течение длительного ряда наблюдений. Совмещенные нормированные и интегральные кривые по некоторым створам бассейна р. Дона приведены на рисунке 2 и 3.

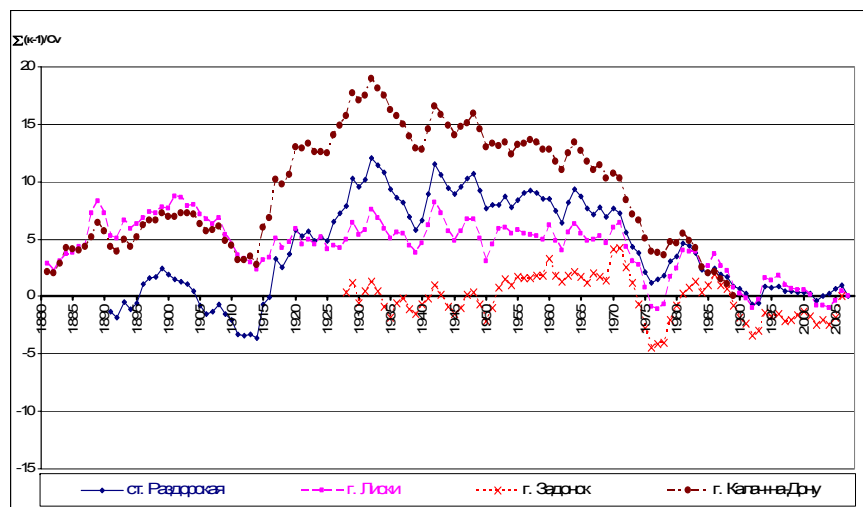


Рис. 2 Интегральные кривые годового стока р. Дон в различных створах

Кривые демонстрируют синхронность водности в бассейне. Эти же кривые служат для выбора репрезентативной выборки из имеющегося ряда стоковых наблюдений. Нормирование суммарных отклонений по коэффициенту изменчивости позволяет провести сравнение этих кривых не только по разным створам одной реки, но и для разных рек.

На графике (рис. 3) показаны многолетние суммарные кривые колебаний стока по бассейну Дона. Начиная с 70-х годов прошлого столетия по всему бассейну Дона идет понижение водности.

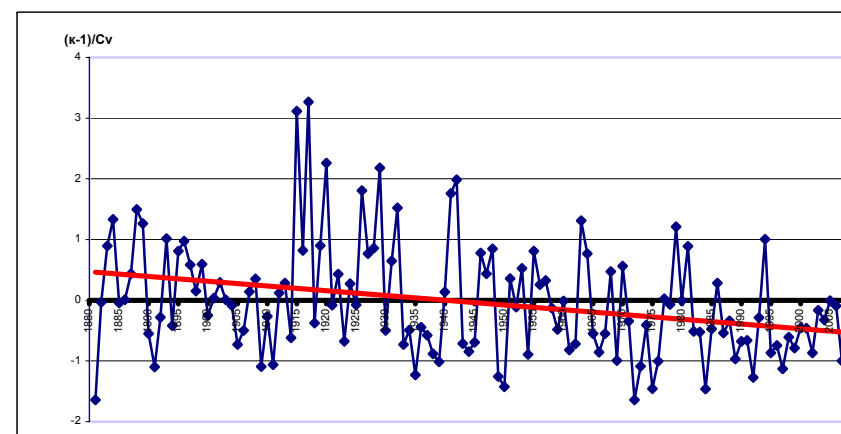


Рис. 3 Нормированная кривая годовых значений стока р. Дон с линией тренда

Формирование стока по бассейну Дона происходит под влиянием климатических факторов в иных условиях хода осадков и температуры приземного слоя воздуха, чем для зоны достаточного увлажнения (водосборные площади Волги): увеличения водности здесь не наблюдается, а имеет место снижение стока, что и демонстрируют графики (рис. 2, 3).

В таблице 2 подсчитаны значения обеспеченности годового стока в бассейне р. Дона в среднем за период 1990-2007г.г., который по большинству основных рек европейской части России характеризуется повышенной водностью. Величины обеспеченностей свидетельствуют о низкой водности этого периода. Только по притоку Дона – реке Хопер в его верхнем течении, бассейн которого расположен в более увлажненном районе, водность несколько выше обеспеченности 50 %

Таблица 2. Обеспеченность годового стока в бассейне Дона за последние годы

Годы/ств.	Лиски	Казанская	Цимлянская ГЭС	Раздорская	р.Хопер- Новохоперск
1990	66,4	56,2	74,2	52,5	40,6
1991	78,1	50	73,4	60,2	20,3
1992	88,3	80	96,1	81,4	85,1
1993	20,3	-	54,7	41,5	45,3
1994	5,47	7,8	12,5	9,3	-
1995	59,4	50	83,6	47,5	35,2
1996	40	43,7	79,7	43,2	54,6
1997	87,5	85,8	93,8	59,3	59,3
1998	68	50	71,9	42,4	39
1999	54,7	56,2	80,5	46,6	45,3
2000	60,9	59,3	60,9	44,1	14,1
2001	68,8	68,7	61,7	49,2	14,8
2002	82,8	73,4	83,6	71,2	40,6
2003	57,8	37,5	51,6	30,5	18,7
2004	65,6	50	55,5	39	30
2005	30	30	43	28,8	30
2006	22,7	25	49,2	33,1	20
2007	64,8	40	88,3	86,4	40
среднее	P%=57	P%=49	P%=67	P%=48	P%=37

Таким образом, в регионах, увлажненность территории которых недостаточна, наблюдается уже сейчас снижение обеспеченности водными ресурсами, что может осложнить и без того непростую и напряженную водохозяйственную ситуацию на юге России. Граница изменения направленности тренда по величине

водности в многолетнем ряду стока проходит примерно по широте 54-55⁰ с. ш. Такая тенденция безусловно скажется и на изменении экологической ситуации в рассматриваемых регионах.

СОВРЕМЕННЫЕ И ОЖИДАЕМЫЕ ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДЕЛЬТАХ ОСНОВНЫХ РЕК РОССИИ

Михайлов В.Н.¹, Алексеевский Н.И.¹, Магрицкий Д.В.¹, Михайлова М.В.², Исупова М.В.²

¹ Географический факультет МГУ, Москва ² ИВП РАН, Москва
Email: mv.mikhailova@gmail.com

Введение. Дельты – это низменности в пределах устьевых областей рек, сложенные речными и частично морскими или озерными отложениями, расчлененные изменчивой сетью рукавов и протоков и имеющие специфическое морфологическое строение, гидрологический режим и ландшафт. Речные дельты обладают богатыми природными ресурсами (водными, земельными, биологическими, минеральными) и активно используются морским и речным водным транспортом, сельским и рыбным хозяйством. Во многих дельтах высокая плотность населения, здесь обычно находятся крупные портовые города. Дельты – экологически уязвимые природные объекты, часто подверженные негативному воздействию речных и морских факторов.

В формировании дельт как особых географических объектов ведущая роль принадлежит гидролого-морфологическим процессам, под которыми понимается динамика вод, наносов, дна и берегов водотоков и морского края дельты.

Задача статьи – рассмотреть основные закономерности гидролого-морфологических процессов в дельтах рек и проанализировать современные и ожидаемые процессы в дельтах основных рек России по четырем регионам: морям Арктики, Азовскому, Каспийскому и Балтийскому морям.

Закономерности гидролого-морфологических процессов в речных дельтах. Современные и ожидаемые в XXI в. изменения строения и режима дельт определяются, во-первых, специфическими устьевыми гидролого-морфологическими процессами в этих объектах, во-вторых, естественными и антропогенными изменениями внешних факторов этих процессов и, в первую очередь, стока воды и наносов рек, уровня приемных водоемов (океанов, морей, озер), приливов, штормовых нагонов, морского волнения, и, в-третьих, влиянием местных климатических и геологических условий и, в-четвертых, воздействием водохозяйственных мероприятий в пределах самих дельт.

Основные положения теории гидролого-морфологических процессов в речных дельтах изложены в [1–3]. К числу таких процессов относятся сложная динамика гидрографической сети дельт, активизация и отмирание рукавов, динамическое взаимодействие и смешение вод рек и моря, перераспределение стока по рукавам дельт, динамика морского края дельт (МКД).

Авторами сделаны оценки происходящих и ожидаемых изменений перечисленных выше внешних факторов устьевых процессов. В результате обобщения литературных данных [4, 5] и материалов собственных исследований установлено следующее: 1) в результате изменения климата естественный водный сток рек в областях Земли с достаточным и избыточным увлажнением увеличивается и будет возрастать и в дальнейшем, а в областях с недостаточным увлажнением и, особенно, сухих, наоборот, будет уменьшаться. К первым относятся реки в высоких широтах Евразии и Сев. Америки, многие реки в Юго-Восточной Азии и части Южной Америки, ко вторым – реки Центральной Азии, части Африки, Центральной Европы, Австралии; 2) будет продолжать сокращаться

водный сток в низовьях рек, находящихся в областях интенсивного орошения земель; 3) в изменениях стока наносов (современных и ожидаемых) тенденции противоречивы. Естественное увеличение водного стока приводит к некоторому возрастанию и стока наносов, в то же время сток наносов резко сокращается в результате крупного водозабора и, особенно, сооружения водохранилищ. Сток наносов, наоборот, может возрастать в результате усиления эрозии в речных бассейнах при вырубке лесов, распашке земель, выпасе скота; 4) уровень Мирового океана и связанных с ним морей повышается с ускоряющейся интенсивностью, а влияние этого повышения в районах дельт усугубляется естественной и, особенно, антропогенной просадкой грунта; 5) заметно активизируется циклоническая деятельность во всем мире, и как тропические, так и внетропические циклоны вызывают все более сильные штормовые нагоны в устьях рек, сопровождающиеся наводнениями и разрушительным волнением; 6) на фоне возрастающего среднего уровня моря увеличиваются и параметры приливов.

В условиях усиления воздействия на дельты перечисленных внешних факторов речные дельты становятся одними из самых уязвимых природных объектов на планете и, более того, могут рассматриваться как эффективные индикаторы глобальных и региональных, естественных и антропогенных изменений природной среды на континентах и в морях [6].

Результаты исследования воздействия изменений местного и регионального климата на режим речных дельт подтвердили явные признаки его потепления, начиная со второй половины XX в. Такая тенденция и проявилась в низовьях почти всех рек России, особенно на юго-западе ее Европейской территории. В дельтах ряда рек увеличился местный (боковой) приток вод во время снеготаяния и

паводков. В дельтах арктических рек изменение температурного режима сказалось на смягчении ледовых условий и на состоянии многолетней мерзлоты.

Влияют на развитие дельт и геологические факторы. Известно, что дельты, особенно крупные, тяготеют к местам тектонического прогибов и разломов земной коры. Однако интенсивность современного тектонически обусловленного опускания поверхности дельт мала и обычно не превышает 1 мм/год. Несравненно большую роль в развитии современных дельт играет естественная и, особенно, антропогенная просадка грунта, вызванная откачкой нефти, газа и пресных подземных вод.

Сильное воздействие на дельты оказывают местные гидротехнические и водохозяйственные мероприятия. Опыт, полученный авторами проекта при исследовании дельт многих российских и зарубежных рек, позволил сформулировать основные гидролого-морфологические последствия таких мероприятий. Основные последствия следующие: 1) обвалование рукавов дельт обычно ведет к существенному уменьшению площадей заливания дельт, что защищает сельхозугодья, населенные пункты и хозяйственные объекты. Однако сплошное обвалование имеет и существенные негативные последствия: в результате исключения дельтовых земель из водообмена, в руслах рукавов в период половодья возрастают как расходы, так и уровни воды. Это может спровоцировать перелив вод через защитные дамбы и их прорыв; 2) углубление рукавов (и особенно устьевых баров) для целей судоходства, как правило, сопровождается перераспределением стока в углубленные рукава, усилением проникновения в них морских вод; 3) к пространственному перераспределению стока в пределах дельт ведут также перекрытие рукавов, их искусственное спрямление и др.

гидротехнические меры; 4) к обводнению и опреснению водных объектов в дельтах приводят специальные мелиоративные мероприятия (с сооружением вододелиителей, шлюзов-регуляторов, низконапорных плотин, систем оросительных и обводнительных каналов и т.д.).

Главный итог анализа изменений строения и режима дельт рек мира – прогрессирующее усиление воздействия внешних факторов (изменения стока рек и уровня моря, штормовых нагонов и морского волнения), приводящее к деградации дельт и их ландшафта, размыву их морских берегов, осолонению поверхностных и подземных вод. Аналогичные процессы уже начали сказываться и в дельтах российских рек. Развитие этих неблагоприятных процессов в XXI в. будет только усиливаться.

Основные результаты анализа мирового опыта в изучении дельт основных рек мира, изложенные выше, учтены при оценках произошедших и ожидаемых изменений строения и режима дельт рек России, приведенных ниже по отдельным регионам страны.

Дельты российских рек, впадающих в арктические моря.

Дельты российских рек, впадающих в Северный Ледовитый океан (СЛО), являются важнейшими географическими элементами береговой зоны и оказывают большое влияние на экологические и социально-экономические условия региона [7, 8].

Свыше 10% общей протяженности материковых берегов Северного Ледовитого океана (в границах РФ) приходится на дельтовые берега [8]. Из них больше половины составляют морские берега основных и наиболее крупных дельт региона. Это дельты рек Сев. Двины, Печоры, Оби, Пура, Таза, Енисея, Оленека, Лены, Яны, Индигирки и Колымы. Каждая из этих дельт индивидуальна по

своему местоположению, размеру, строению, природным условиям и режиму.

Самую большую площадь имеет дельта р. Лены – 32 тыс. км² [7, 8]. Это самая большая речная дельта в России и пятая в мире. Значительными размерами обладают также дельты рек Яны (6600 км²), Индигирки (5000), Енисея (4500), Печоры (3205), Оби (3250) и Колымы (3250 км²). Наименьшая площадь дельты у р. Оленека – ~550 км².

Дельты арктических рек находятся на разных стадиях и в многорукавной фазе своего развития. Они могут быть отнесены: 1) к дельтам выполнения лагун и затопленных нижних участков речных долин (у рек Печоры, Оби, Пура, Таза и Енисея), 2) к дельтам выдвижения на открытое взморье (у Сев. Двины, Яны, Индигирки и Колымы) с выдвинутыми за генеральную береговую линию морей устьевыми барами и отдельными участками дельт, 3) к классическим дельтам выдвижения на открытом взморье (у Лены и Оленека), большая часть которых находится за генеральной линией коренных морских берегов.

Главной особенностью многолетней изменчивости стока у большинства арктических рек явилось его увеличение с 1980-х гг., как реакция на изменение климатических условий в регионе. В результате на 3–13% (в 1976–2006 гг. в сравнении с периодом 1936–1975 гг.) увеличились водные ресурсы Сев. Двины и Печоры, Енисея, больших рек водосбора моря Лаптевых и западной части водосбора Восточно-Сибирского моря, включая Индигирку. Рост годового стока был наиболее выраженным у Енисея, Хатанги, Анабара и Оленека.

На величину и режим стока воды в низовьях и устьях больших сибирских рек влияют сооружение и эксплуатация крупных

водохранилищ и почти неощутимо – мероприятия по изъятию и переброске стока.

Изменения водных ресурсов и водного режима арктических рек в XXI в. продолжатся. В меньшей степени они будут обусловлены нарастанием масштабов хозяйственной деятельности на речных водосборах [4, 8]. Более существенные изменения стока арктических рек в XXI в. будут связаны с глобальным потеплением и изменением региональных климатических условий [4, 5, 8]. К середине XXI в. относительное увеличение водных ресурсов Сев. Двины, Печоры, Оби, Енисея и Лены может составить в среднем от 4 до 14% и более. Наибольшее относительное увеличение стока прогнозируется для Лены (максимально до 35%) и Колымы (43%), а в абсолютных величинах – для Оби, Енисея и особенно Лены.

В результате глобального потепления и его последствий для гидросферы и криосферы Земли уровень Мирового океана, в том числе и СЛО, начал повышаться. Величины линейного тренда подъема уровня неодинаковы для разных морей. Для Баренцева, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей скорости изменения среднегодового уровня положительны и в 1946–1995 гг. составили соответственно 0,2, 1,5, 2,1, 1,5 и 2,3 мм/год.

Наиболее важной характеристикой гидрологического режима дельт является распределение и перераспределение стока воды по системам дельтовых рукавов, а также прогноз этого перераспределения.

Интенсивность морфологических процессов в арктических дельтах невелика (причина – малый сток наносов рек). Наибольшая интенсивность размыва (термоэрозии) и намыва берегов дельтовых рукавов в арктических дельтах составляет 2–10 м и более [8].

Основные изменения гидрологического режима, морфологического строения и экосистем арктических дельт в XXI в. будут связаны, в основном, с увеличением стока арктических рек, естественными и антропогенными изменением водного, термического и ледового режима этих рек и их взморьев, с потеплением в регионе и деградацией многолетней мерзлоты, подъемом среднего уровня арктических морей, увеличением масштабов хозяйственной деятельности в самих дельтах.

Свою долю стока в XXI в. увеличат те рукава, у которых она, по имеющимся за период натурных наблюдений и расчетным данным, возрастала при переходе от межени к половодью. Это, в частности, мелководные и широкие дельтовые водотоки. Общее для арктических рек увеличение расходов воды ослабит влияние нагонных и приливных повышений уровня воды, уменьшит повторяемость и дальность проникновения в рукава морских вод.

В то же время, повышение уровня моря на фоне увеличения температуры морской воды и усиления волнового воздействия ускорит термоабразионное и механическое разрушение морских берегов дельт.

Дельты рек, впадающих в Азовское море. Основные реки водосбора Азовского моря – Дон и Кубань. Они же имеют в своих устьях довольно крупные дельты. Дельта р. Дона – многорукавная, выполнения полузакрытого отлогого устьевое взморья – Таганрогского залива. Дельта р. Кубани – малорукавная, выполнения древней лагуны с выдвинутыми за генеральную береговую линию устьевыми барами и частными дельтами главных рукавов. Площадь дельт Дона и Кубани – соответственно 540 и 4870 км² [7].

Ожидаемые климатические изменения и планируемые водохозяйственные мероприятия, загрязнение вод и продолжающееся

освоение природных ресурсов в дельтах, безусловно, скажутся на морфологическом облике и гидрологическом режиме дельт Дона и Кубани. В целом это увеличит для местной экономики, устьевых экосистем и населения разнообразные риски и, как следствие, ущербы. Некоторые из этих изменений и их последствий наблюдаются уже сейчас.

Среднегодовое количество стока воды Дона и Кубани в их устьях (на МКД) равно за 1930–2007 гг. соответственно 22.9 и 12.4 км³/год. Это ~94% суммарного притока речных вод в Азовское море.

Водный режим и величины водного стока рек Дона и Кубани существенно изменились после осуществления в середине и второй половине XX в. ряда крупномасштабных водохозяйственных мероприятий на водосборах и на самих реках.

Режим Дона в низовьях и в дельте изменился после сооружения в 1952 г. Цимлянского водохранилища вследствие внутригодового стока и безвозвратного забора воды на орошение, промышленно-коммунальное и сельскохозяйственное водоснабжение. Аналогичные изменения режима отмечены на Кубани после сооружения Краснодарского водохранилища в 1972 г.

Несмотря на существенное воздействие хозяйственной деятельности на водные ресурсы бассейнов Дона и Кубани, определяющими факторами вековой и многолетней изменчивости годового стока воды по-прежнему остаются климатические.

Для Дона к середине и концу XXI в., вероятнее всего, следует ожидать уменьшения водных ресурсов [4]. В ближайшие 10–20 лет сток Кубани в вершине дельты по сравнению с его величиной для базисного периода (1961–1990 гг. – 14.4 км³/год) может увеличиться к 2020-м годам на 5–10% [4, 9].

Наблюдается хорошо выраженный, существенный рост средних уровней в прибрежных районах и в целом Азовского моря в течение XX в. и в начале XXI в., причем различный для разных постов.

В XX в. и начале XXI в. произошло перераспределение стока между основными рукавами дельты Кубани [9].

Повышение уровня Азовского моря и уменьшение величины выноса на устьевое взморье речных наносов вызвали изменение характера динамики МКД Дона и Кубани. В настоящее время на МКД Кубани доминируют процессы размыва [9]. Существенные изменения режима дельт Кубани и Дона происходят во время наводнений.

Прогнозируемое уменьшение водоносности Дона и, возможно, Кубани ускорит сосредоточение стока в крупных и углубляемых рукавах и отмирание неглубоких малых и средних водотоков.

В дельте Дона продолжится повышение уровней воды в рукавах, как результат повышения уровня Азовского моря и Таганрогского залива и опускания суши. В дельте Кубани глубинная эрозия русел замедлится или прекратится вовсе. Выдвижение дельты Кубани в Азовское море, даже в районах устьев рукавов Кубань и Протока, прекратится. Усилится абразия берега на всех участках МКД с интенсивностью до 5 м/год.

Все выше перечисленные изменения самым неблагоприятным образом отразятся на экосистемах дельт и, в первую очередь, на аквальных, на условиях жизни населения, работе промышленных, сельскохозяйственных и коммунальных предприятий.

Дельты российских рек, впадающих в Каспийское море. Основные российские реки, впадающие в Каспийское море, – это

Волга, Терек и Сулак. Всего в Каспий впадает свыше 130 рек. Их суммарный водный сток составляет в среднем $300 \text{ км}^3/\text{год}$; при этом на долю трех упомянутых российских рек приходится почти 87% (Волги – 83, Терека – 3, Сулака – 1%) [7, 10]. Дельты Волги и Терека по размерам занимают первое (11.0 тыс. км^2) и второе (8.9 тыс. км^2) место в Европе. Дельта Сулака имеет в настоящее время площадь $\sim 44 \text{ км}^2$ [10].

Многолетние изменения уровня Каспия – главный внешний фактор, повлиявший на дельты рассматриваемых рек. Как и для всех рек мира, уровень приемного водоема служит общим базисом эрозии и тем уровнем, к которому в большинстве случаев «привязаны» морские берега дельт и к которому выклиниваются кривые свободной поверхности в реках или рукавах дельт, обусловленные речным стоком.

Вторым по важности внешним фактором, влияющим на дельты, является сток воды и наносов рек. Его изменения у каспийских рек были как естественными, так и (особенно для стока наносов) антропогенными.

Изменения строения и режима дельт в XX в. могут быть подразделены на три периода: снижения уровня моря по 1977 г. и его повышения в 1978–1995 гг. и некоторой стабилизации в последующие годы. Одно и то же снижение среднегодового уровня Каспия с 1900 по 1977 г. на 3.44 м вызвало ускоренное выдвижение всех дельт в море, но с совершенно разной интенсивностью и, вопреки положениям классической геоморфологии, сопровождалось не только усилением эрозии и врезанием русла, но в некоторых случаях и активной аккумуляцией речных наносов и повышением русла. Как показали результаты исследований, в том числе с участием авторов статьи [1–3, 7, 10–14], эти различия объясняются

существенной разницей в рельефе и уклоне дна устьевого взморья, обнажившегося в результате падения уровня моря, а также в величине стока наносов рек.

Реакция дельты Волги на понижение уровня Каспия была очень своеобразной. Эти особенности связаны, прежде всего, с «буферной» ролью обширного и очень отмелого устьевого взморья. Положение МКД Волги начиная с 1962 и вплоть до 1991 г., несмотря на продолжающееся понижение уровня моря до 1978 г. и последующее его повышение, практически не изменялось.

По мере снижения уровня Каспия быстро увеличилась площадь дельты Сулака с 6.2 до 70.6 км^2 за 1862–1978 гг. Сильная эрозия, вызванная снижением уровня моря, распространилась вдоль Сулака на десятки километров [10, 15]. Она была усугублена спрямлением русла и сокращением его длины в 1957 г.

Одно и то же повышение среднего уровня Каспия в период 1978–1995 гг. на 2.35 м привело в устьях разных рек, впадающих в этот водоем, к разным последствиям. Прежде всего, стало очевидным, что воздействие на дельты повышающегося уровня приемного водоема зависит от того, совпадают ли при подъеме уровня отметки водной поверхности в море и на МКД. Такое совпадение характерно для устьев рек с приглубым взморьем (устье Сулака, Новая дельта Терека). В этих случаях начавшийся в 1978 г. подъем уровня моря практически сразу же создал подпор в русле и при небольшом стоке наносов, как в устье Сулака, к затоплению приморских частей дельты. Иная ситуация сложилась в Новой дельте Терека, в устье главного рукава дельты – Каргалинский Прорыв. Суммарный сток наносов рукава за период 1978–1995 гг. оказался намного больше объема подпорной призмы, сформировавшейся в результате повышения уровня моря. Это и явилось причиной того,

что несмотря на значительный рост уровня моря, Новая дельта Терека продолжала выдвигаться в море и за рассматриваемый период ее длина увеличилась с 0.6 до 2.0 км, а площадь с 1.4 до 7.5 км².

Приморская часть дельты Волги и ее морской край по-прежнему сохранили стабильность. Во время повышения уровня моря постепенно затоплялось мелководное взморье

Характер гидролого-морфологических процессов в дельтах рассматриваемых рек в будущем будет в первую очередь зависеть от направленности и величины понижения или повышения уровня Каспия.

Дельты российских рек, впадающих в Балтийское море. Устьевые области российских рек, впадающих в Балтийское море, – Невы, Немана (Нямунаса) и Преголи – относятся к дельтово-эстуарному типу. Их главные части – крупные водоемы эстуарного типа. Дельты Невы и Немана (Нямунаса) имеют площадь 83 и 600 км² соответственно. Дельты региона из-за небольшого стока наносов рек изменяются слабо. Водный сток Невы, Немана (Нямунаса) и Преголи по состоянию на середину 1980-х гг. составлял в среднем 78.4, 19.9 и 2.64 км³/год соответственно [7]. По более новым данным [4] средний водный сток Невы, Немана (Нямунаса) по состоянию на 2005 г. равен соответственно 78.5 и 19.2 км³/год. Согласно климатическим прогнозам [4] сток Невы к середине XXI в. возрастет на 3.5–12%, а Немана (Нямунаса) уменьшится на 4–12%.

Изменения дельт в XXI в. будут определяться, во-первых, климатически обусловленным изменением стока рек, о котором было сказано выше, во-вторых, эвстатическим повышением уровня Балтийского моря, который может составить >2 мм/год, в-третьих, активизацией циклонов и вызванных ими штормовых нагонов (это касается, прежде всего, дельты Преголи).

Выводы. Изменения дельт рек России в текущем столетии будет определяться, во-первых, уже наметившейся тенденцией современных изменений их режима и строения; во-вторых, ожидаемыми изменениями внешних факторов устьевых процессов и, в первую очередь, стока воды и наносов рек и уровня приемных водоемов; в-третьих, возможным в будущем изменением местных климатических условий; в-четвертых, характером планируемых местных гидротехнических и водохозяйственных мероприятий.

В целом характер гидролого-морфологических процессов в дельтах российских рек, впадающих в арктические моря, сохранится таким, каким был во второй половине XX в. В то же время в XXI в. ожидается дальнейшее климатически обусловленное увеличение стока воды рек и, возможно, небольшое антропогенное сокращение стока наносов. Не исключено усиление воздействия на дельты морских факторов.

Режим, морфологическое и экологическое состояние устьев рек Преголя, Неман (Нямунас), Нева, Северная Двина, Дон, Кубань регулируются человеком. Прогностические оценки изменения дельт рек этой группы в XXI в. менее определены по сравнению с дельтами предыдущей группы. Это объясняется большой зависимостью возможных их изменений в будущем от того, какие гидротехнические и водохозяйственные мероприятия будут здесь осуществлены.

Режим и строение дельт рек, впадающих в Каспийское море (Волги, Терека и Сулака), будут зависеть, прежде всего, от изменений уровня Каспийского моря, надежные прогнозы которых пока отсутствуют.

Список литературы

1. Михайлов В.Н., Рогов М.М., Чистяков А.А. Речные дельты. Гидролого-морфологические процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 280 с.
2. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. М.: Изд-во МГУ, 1998. 176 с.
3. Полонский В.Ф., Лупачев Ю.В., Скриптунов Н.А. Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчета (прогноза). СПб.: Гидрометеиздат, 1992, 383 с.
4. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГТИ, 2008. 598 с.
5. Climate Change 2007. Synthesis Report. Summary for Policymakers // <http://www.ipcc.ch>
6. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Дельты как индикаторы естественных и антропогенных изменений режима рек и морей // Водные ресурсы. 2003. Том 30. №6. С. 655–666.
7. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
8. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / Под ред. Н.И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2007. 585 с.
9. Гидрология дельты и устьевого взморья Кубани / Под ред. В.Н. Михайлова, Д.В. Магрицкого, А.А. Иванова. М.: ГЕОС, 2010. 728 с.
10. Михайлов В.Н., Магрицкий Д.В., Кравцова В.И., Михайлова М.В., Исупова М.В. Воздействие изменений уровня Каспийского моря и водохозяйственных мероприятий на гидрологический режим и морфологию устьев рек // Вестник Моск. ун-та. Сер.5. География. 2011. №2. С.85–95.

11. Исупова М.В. Многолетние изменения уровней воды в устьевой области Волги и их зависимость от колебаний уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 2008. Том 35. №6. С. 643–662.
12. Руслловые процессы в дельте Волги / Под. ред. Н.И. Алексеевского. М.: Географический факультет МГУ, 1997. 163 с.
13. 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. 278 с.
14. Алексеевский Н.И., Айбулатов Д.Н. Динамика гидрографической сети и морского края дельты Волги с 1800 по 2010 г. // Вестник Моск. ун-та. Сер.5. География. 2011. №2. С. 96–103.
15. Гидрология устьев рек Терека и Сулака / Под ред. А.Н. Косарева и В.Н. Михайлова. М.: Наука, 1993. 160 с.

РАЗРАБОТКА СТОХАСТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ПОГОДЫ ДЛЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Морейдо В.М.

Институт водных проблем РАН, Москва

E-mail: moreido@mail.ru

Введение. В настоящее время детерминистические модели формирования речного стока все более широко применяются в развитых странах для решения научных и прикладных задач гидрологии суши. Среди наиболее значимых приложений для таких моделей представляется их использование для оценки антропогенных изменений и изменений климата на водосборы, а также оценка экстремальных изменений стока, не наблюдавшихся за время инструментальных измерений.

Детерминистические модели формирования стока объединяют в себе современные представления о гидрологических процессах, протекающих на водосборе и, как правило, опираются на широкий спектр входной информации. Неопределенность, связанная с ограниченным количеством такой информации, является как основной проблемой физико-математических моделей, так и их существенным свойством, не исчезающим по мере совершенствования представлений о процессах, описываемых в модели [Гельфан, 2007]. Учет такого рода неопределенностей производится включением в модели источников стохастической информации, уравнивающих недостаток детерминистической информации о гидрометеорологических величинах и параметрах водосбора представлениями об их вероятностных свойствах. Так, например, недостаток информации о метеорологических воздействиях на речной водосбор может быть компенсирован

созданием стохастической модели случайных входов (так называемых «генераторов погоды»), учитывающих природную пространственно-временную изменчивость метеорологических величин.

В рамках данного исследования была предпринята попытка создания стохастического генератора погоды, который бы учитывал как специфические потребности моделей гидрологического цикла при воспроизведении временных рядов метеорологических величин, так и особенности метеорологических характеристик формирования талого стока, актуальных для большинства водосборов России. Одним из требований, предъявляемых к модели, было использование минимально возможного числа параметров, необходимых для работы модели, а также простота их определения путем анализа исходных данных, имеющихся в открытом доступе.

Таким образом, был выбран набор критериев и статистических тестов, которые учитывают гидрологическую ориентированность испытываемого генератора и призваны показать применимость полученных рядов данных для использования в моделях формирования стока.

В качестве объекта исследования был выбран бассейн р. Вятка, расположенный в северо-восточной части Европейской территории России. Климат данного района характеризуется хорошим увлажнением, устойчивым продолжительным зимним периодом, в течение которого выпадает 40 – 50 % годовой суммы осадков и теплым влажным летом. Водный режим рек района характеризуется высоким весенним половодьем, сформированным преимущественно талыми водами, летне-осенней меженью с невысокими непродолжительными паводками и устойчивой зимней меженью. Район достаточно хорошо освещен данными

климатических и гидрологических наблюдений, что делает его привлекательным в свете поставленных задач.

В работе были использованы данные среднесуточных наблюдений за метеорологическими параметрами, полученные из открытых источников (Интернет-сайты ВНИИГМИ-МЦД, Global Summary of the Day, tutiempo.com). Были использованы значения среднесуточных температур воздуха, количества осадков и относительной влажности воздуха на опорных метеорологических станциях, расположенных в районе бассейна Вятки (табл. 1). Наблюдения за климатом в этом районе ведутся на протяжении более 130 лет. Средняя длина ряда наблюдений составила 101 год.

Таблица 1. Перечень метеостанций, использованных в работе

Индекс	Название	Начало наблюдений	Конец наблюдений	Кол-во лет наблюдений
22887	Котлас	01.01.1936	31.12.2009	73
23804	Сыктывкар	01.04.1888	31.12.2009	121
27037	Вологда	01.01.1939	31.12.2009	70
27196	Киров	01.01.1881	31.12.2009	128
27333	Кострома	01.01.1925	31.12.2009	84
27459	Н.Новгород	01.01.1881	31.12.2009	128
27595	Казань	01.01.1881	31.12.2009	128
28224	Пермь	01.09.1882	31.12.2009	127
28411	Ижевск	01.01.1958	31.12.2009	51

Для оценки параметров модели была создана база данных в СУБД MS Access. В ней на языке запросов SQL были созданы шаблоны запросов для анализа исходных рядов данных наблюдений на метеорологических станциях. Так, все данные прошли

дополнительные проверки на отсутствие ошибок, а значения среднесуточной относительной влажности воздуха в дни без осадков были пересчитаны в значения дефицита влажности воздуха.

Описание основных схем моделирования и аппроксимации значений. В основу моделирования метеорологических величин была положена схема т.н. дисагрегации (disaggregation) [Mejia, Rouselle, 1976]. В основе данной схемы лежат предположения, что среднегодовые значения метеорологических элементов более статистически устойчивы, чем среднемесячные и среднесуточные значения. Учитывая то, что среднемноголетние значения основных метеорологических величин хорошо описываются нормальным законом распределения, количество параметров, необходимое для их моделирования, существенно меньше, чем при моделировании среднесуточных значений.

Для моделирования среднегодовых величин использовались генераторы псевдослучайных чисел, доступные в библиотеке численных методов MSFLib. Генераторы были предварительно проверены несколькими тестами на статистическую устойчивость, отсутствие внутренних корреляций и возможность повторного моделирования случайных последовательностей.

Для перехода от среднегодового значения той или иной метеорологической величины к ее сезонному ходу в настоящей модели использовалась аппроксимация по периодической функции вида

$$q_i = a_1 + a_2 \sin \left\{ \frac{2\pi}{N} i \right\} + a_3 \cos \left\{ \frac{2\pi}{N} i \right\}, \quad (1)$$

где q_i – искомое значение элемента, i – номер элемента в последовательности (номер месяца или суток от начала года), N –

длина последовательности (12 или 365 для аппроксимации внутригодового хода среднемесячных или среднесуточных величин, соответственно). Параметры a_1 , a_2 и a_3 оценивались по методу наименьших квадратов. При этом очевидно, что параметр a_1 численно равен среднему арифметическому исходной выборки.

Моделирование выпадения и среднесуточного количества осадков. В основу модели выпадения осадков была взята простая Марковская цепь I порядка, параметры для которой определялись по исходному ряду наблюдений на рассматриваемых метеостанциях. Модель ДМЦ1 с двумя состояниями – наиболее широко используемая модель для описания суточных осадков. Марковское свойство последовательности дней с осадками и без, описываемое моделью, состоит в том, что будущее состояние условно независимо от всех прошлых состояний при заданном текущем состоянии:

$$\Pr[J_n=j, | J_0, J_1, \dots, J_{n-2}, J_{n-1}=i] = \Pr[J_n=j|J_{n-1}=i] \quad (2)$$

где $i, j = 0, 1$ – состояние; $n = 1, 2, \dots$ – номер временного шага. Модель ДМЦ1 характеризуется следующими параметрами:

матрицей переходных вероятностей

$$P_{ij} = \Pr[J_n=j|J_{n-1}=i] \quad (3)$$

и вероятностями начальных состояний

$$\pi_i = \Pr[J_0=i], \quad (4)$$

$$i, j = 0, 1; n = 1, 2, \dots$$

При этом $P_{10}+P_{11}=1$ и $\pi_1 = 1 - \pi_0$.

Параметры переходных вероятностей оценивались по двум статистикам исходного ряда: $P_1 = \Pr(J_n=1)$ – безусловной вероятности выпадения осадков, равной математическому ожиданию величин J_n и $r_1 = \text{Corr}(J_n, J_{n+1})$ – коэффициенту корреляции между величинами J_n в

соседние сутки [Katz, Parlange, 1998]. Независимые переходные вероятности находятся из выражений:

$$P_1 = \frac{P_{01}}{P_{10} + P_{01}}, \quad (5)$$

$$r_1 = P_{11} - P_{01}. \quad (6)$$

Величина $\pi_i = \Pr[J_0=i]$ принималась равной P_1 .

Модель ДМЦ1 была впервые предложена для описания последовательностей выпадения суточных осадков в работе [Gabriel, Neuman, 1962]. До настоящего времени несколькими десятками авторов было показано, что модель адекватно описывает процесс выпадения осадков в разных физико-географических условиях.

Количество осадков за сутки удовлетворительно описывается двухпараметрическим гамма-распределением [Кучмент, Гельфан, 1993].

Моделирование среднесуточной температуры воздуха. Для получения значений среднесуточной температуры воздуха в данной работе была использована аддитивная модель временного ряда, в которой среднегодовая температура представляется суммой двух компонент: детерминистического тренда и случайного отклонения от тренда. Детерминистическая компонента находилась путем дисагрегации среднегодовой температуры в среднесуточную по периодической функции (1), а случайная компонента – по модели авторегрессии I порядка (AR1). В свою очередь, значение среднегодовой температуры воздуха генерировалось методом Монте-Карло по исходным параметрам ряда среднегодовых температур воздуха на каждой станции.

В процессе подготовки набора параметров данной модели было проверено предположение, что ряд среднегодовых значений

температуры подчиняется нормальному закону распределения. На рис. 1 представлена аппроксимация ряда среднегодовых температур воздуха теоретической функцией распределения вероятностей, которая иллюстрирует это предположение.

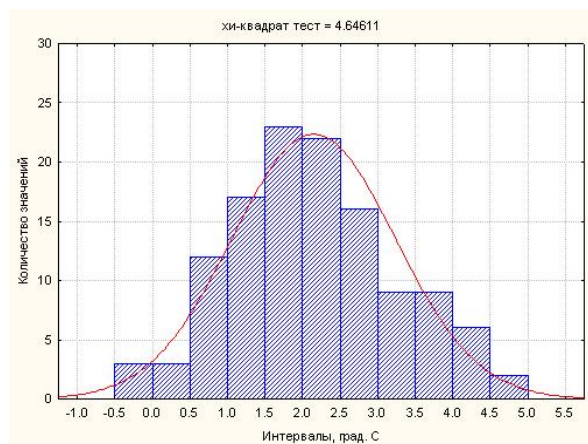


Рис. 1. Теоретическая функция распределения вероятности для ряда температур воздуха на м/с Киров

В отличие от распространенной схемы моделирования среднесуточных температур воздуха в зависимости от наличия или отсутствия осадков в данные сутки, в настоящей работе параметры генератора температуры определялись для всего внутригодового хода без связи с осадками.

Автокорреляционная функция определялась для значений нормированной среднесуточной температуры воздуха

$$q_n = \frac{t_i - \mu_n}{\sigma_n}, \quad (7)$$

где t_i – значение ежедневной температуры воздуха исходного ряда, μ_n – оценка средней многолетней температуры за n -ые сутки в году, σ_n – оценка СКО.

Итоговое значение среднесуточной температуры воздуха, таким образом, было получено по следующей зависимости:

$$t_n = \varphi \cdot t_n^* + \alpha_n, \quad (8)$$

где n – номер дня в году, $n = 1, 365$; φ – параметр авторегрессии, равный коэффициенту корреляции между величинами q_n и q_{n-1} ; t_n^* – значение среднесуточной температуры, дисагрегированное по аппроксимационной функции; α_n – белый шум с нулевым средним и дисперсией, равной $\sigma_a^2 = (1 - \phi^2)$. Графическое представление результата такого наложения представлено на рис. 2.

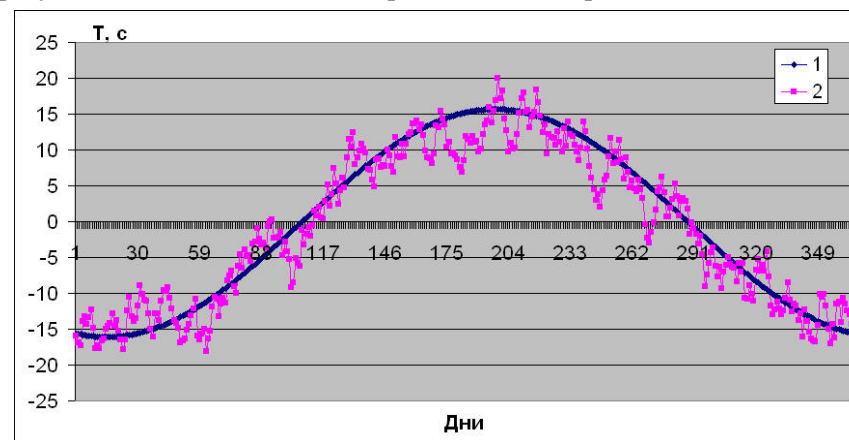


Рис. 2. Сгенерированный внутригодовой ход температуры воздуха (1 – дисагрегированный ряд аппроксимации внутригодового хода, 2 – наложение белого шума)

Моделирование дефицита влажности воздуха в день без осадков. В отличие от среднесуточной температуры, моделирование

среднесуточного значения дефицита влажности воздуха проводилось только для дней без осадков. Было принято допущение, что в день с осадками значение влажности воздуха равняется влажности насыщения и дефицит равен 0. Схема генерирования значений во многом схожа с таковой для среднесуточных температур, с одним существенным отличием. В процессе подбора параметров аппроксимации внутригодового хода дефицита влажности было обнаружено, что периодическая функция (1) плохо воспроизводит значения, близкие к 0, уходя в область отрицательных значений (рис. 3). Учитывая то, что в зимние месяцы дефицит влажности стремится к 0 мбар, использование такой аппроксимации привело бы к существенным ошибкам в результирующих значениях. Для подбора более адекватных параметров аппроксимации исходный ряд значений был прологарифмирован (рис. 3).

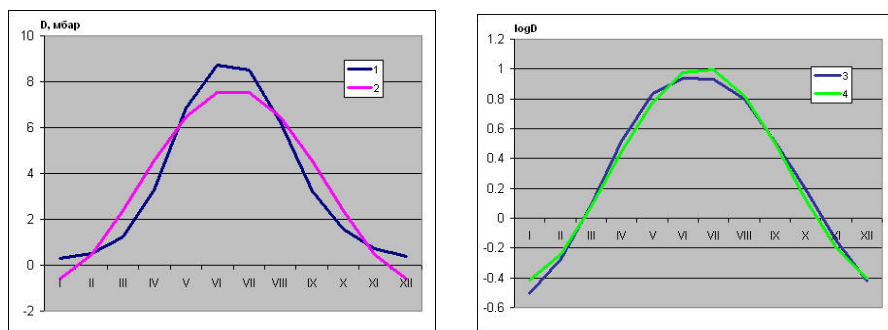


Рис. 3. Аппроксимация исходного ряда (1) и прологарифмированного ряда (3) дефицита влажности воздуха в день без осадков (показаны среднемесячные значения)

Итоговая схема генерирования значений дефицита влажности воздуха в день без осадков выглядит следующим образом. На первом

этапе методом Монте-Карло генерировался ряд значений средних многолетних дефицитов влажности заданной длины. Затем каждое из этих значений дисагрегировалось в среднесуточное по периодической функции (1) (рис. 4). На последнем этапе отбрасывались значения для дней с осадками, после чего значения логарифмов дефицита влажности пересчитывались обратно в дефицит.

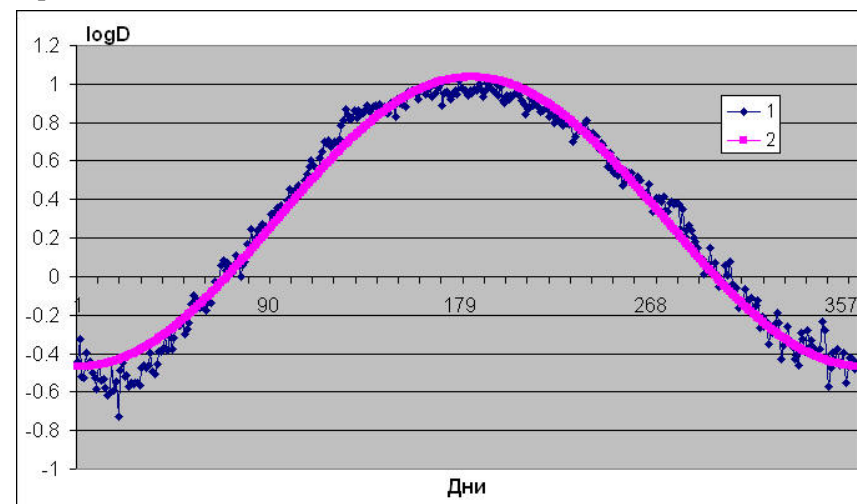


Рис. 4. Аппроксимация (2) среднесуточных значений (1) дефицита влажности воздуха

Итоговое количество параметров модели, необходимое для идентификации – 20.

Оценка результатов моделирования. В данном разделе приводятся результаты оценки качества моделирования метеорологических величин рассматриваемым генератором. Объем оцениваемой выборки во всех случаях равен 1000 лет. Метеорологические величины генерировались независимо, но для некоторых критериев оценивались совместно.

Модель осадков оценивалась двумя различными наборами критериев. Вначале сгенерированные последовательности дней с осадками и без осадков тестировались на адекватность воспроизведения естественных характеристик. Затем проверялось смоделированное количество осадков за различные периоды времени.

Критериями для оценки качества генерирования случайных последовательностей выпадения осадков являлись суммарное количество дней с осадками в году, количество дней с осадками по месяцам и количество последовательностей дней с осадками и без осадков различной длины.

Суммарное количество дней с осадками в году во всех случаях было воспроизведено моделью достаточно хорошо (табл. 2).

Генерирование последовательностей дней с осадками оценивалось для длин от 1 до 30 (последовательностей длиной более 30 дней в целом не было отмечено). При этом 1 день с осадками считался за последовательность с единичной длиной.

Таблица 2. Сравнение количества дней с осадками и без по исходному и синтезированному ряду

Метеостанция	Количество дней с осадками в году	
	Факт	Модель
Котлас	197	196
Сыктывкар	185	185
Вологда	183	183
Киров	188	189
Кострома	186	186
Нижний Новгород	172	172
Казань	159	159
Пермь	189	189
Ижевск	173	174

В целом, для различных станций последовательности дней с осадками были смоделированы очень хорошо. Максимальная разница

составила 1 день при общей тенденции увеличения разницы по мере увеличения длины последовательности. Наихудшие результаты были показаны для последовательностей длиной 5 и 8 дней (рис. 5).

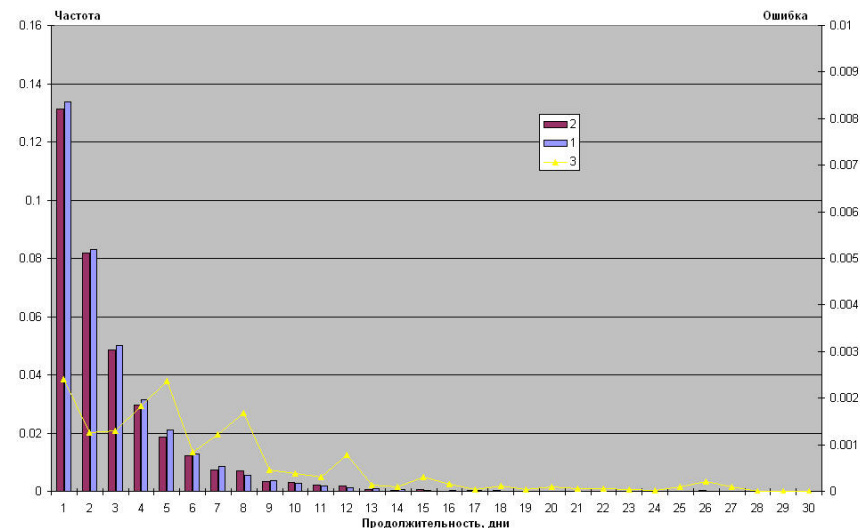


Рис. 5. Оценка моделирования последовательностей дней с осадками на м/с Ижевск

Моделирование количества среднесуточных осадков.

Оценка качества моделирования суммы осадков проводилась на основании сопоставления среднегодовых сумм осадков и их среднеквадратических отклонений, внутригодового распределения количества осадков по месяцам и сумм осадков за дни с температурой больше и меньше 0°C.

Значения среднегодовых сумм осадков и их СКО в целом по всем станциям были воспроизведены хорошо (рис. 6); максимальная ошибка определения сумм не превысила 2,5%.

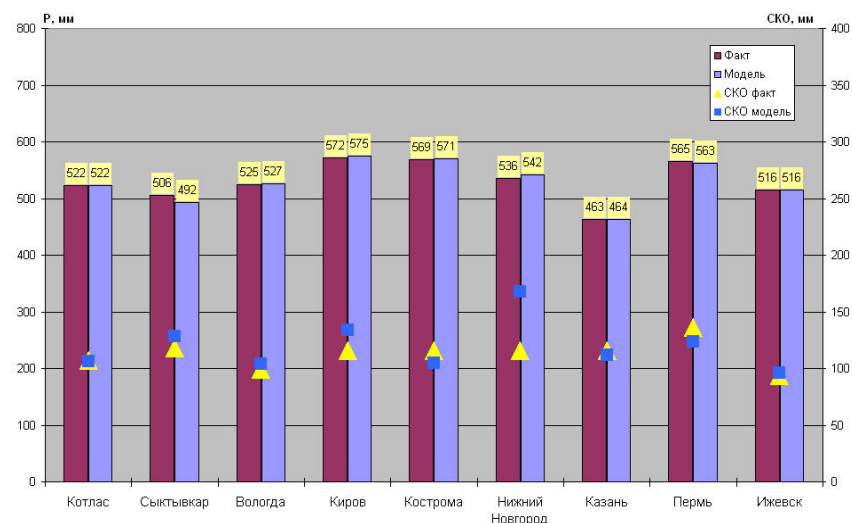


Рис. 6. Сравнение среднегодовых сумм осадков и их СКО по станциям

Внутригодовое распределение количества осадков анализировалось путем сопоставления среднемесячных сумм осадков и интегральных значений сумм осадков с начала года. Суммы осадков по месяцам были воспроизведены с большими погрешностями, чем среднегодовые: ошибка определения в среднем составляет 10 – 15% (рис. 7).

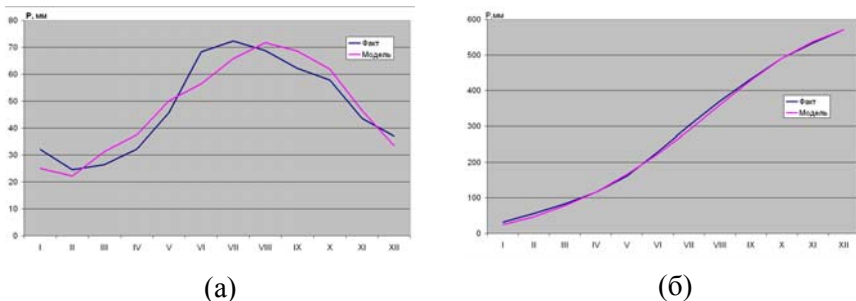


Рис. 7. Внутригодовой ход среднемесячных сумм осадков (а) и интегральная кривая сумм осадков по месяцам (б) для м/с Кострома

Тем не менее, накопление сумм осадков по месяцам воспроизводится достаточно хорошо, что позволяет говорить, например, о возможном адекватном воспроизведении влагосодержания в снеге при применении смоделированных рядов в модели формирования стока.

Несмотря на то, что осадки и температура генерировались независимо, проверялось количество осадков при температуре ниже и выше 0°C (рис. 8). Можно констатировать, что модель занижает количество осадков в дни с $t > 0^{\circ}\text{C}$ (ошибка до 13%) и сильно преувеличивает в дни с $t < 0^{\circ}\text{C}$ (ошибка до 40%).

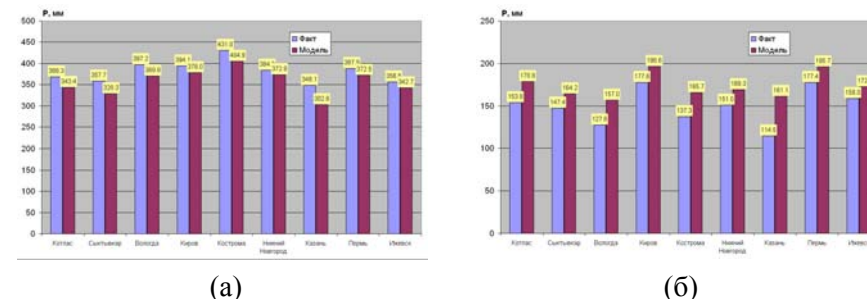


Рис. 8. Суммы осадков при $t > 0^{\circ}\text{C}$ (а) и $t < 0^{\circ}\text{C}$ (б)

Предположительно, это связано как с выбранной схемой независимого моделирования температуры и осадков, так и с указанными погрешностями в моделировании внутригодового хода осадков.

Несмотря на это, сопоставление среднемесячных сумм осадков за период с ноября по март и с апреля по октябрь (период, критический для накопления снежного покрова, формирующего половодье, и период с преимущественно дождевым питанием рек) показало хорошее соответствие между фактическими и смоделированными значениями (рис. 9). Ошибка не превысила 7 и 5% для каждого из периодов, соответственно.

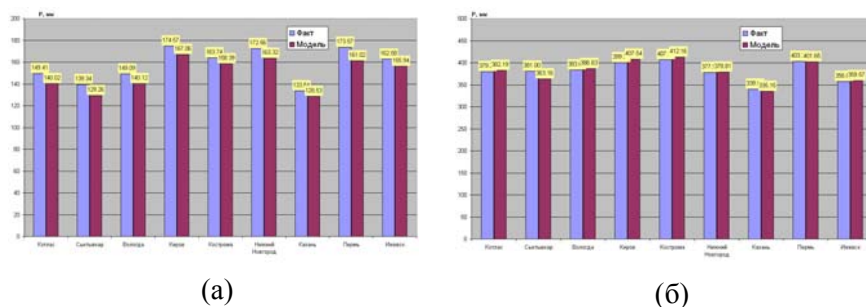


Рис. 9. Суммы осадков за ноябрь-март (а) и апрель-октябрь (б)

Моделирование среднесуточных температур. Качество моделирования температур воздуха проверялось по сопоставлению средних годовых температур и их СКО, внутригодового хода температур по месяцам и средней температуре за дни с осадками и без. Дополнительно было введено два критерия, проверяющих адекватность воспроизведения обеспеченности среднесуточных температур по градациям, и адекватность моделирования даты перехода температуры через 0°C весной и осенью.

Воспроизведение среднесуточной среднегодовой температуры воздуха и ее СКО можно характеризовать как хорошее (рис. 10). Максимальная ошибка не превысила 5%. Внутригодовой ход температуры воздуха также был воспроизведен достаточно хорошо, без существенных отклонений (рис. 11).

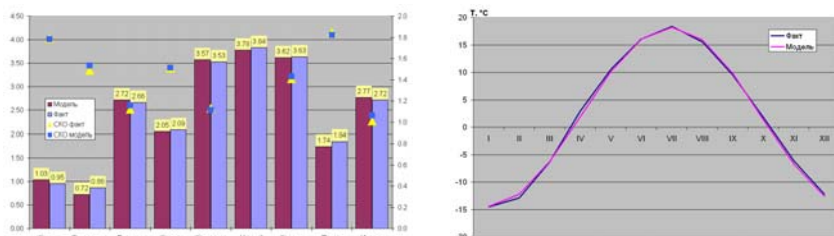


Рис. 10. Средняя температура и ее СКО по станциям

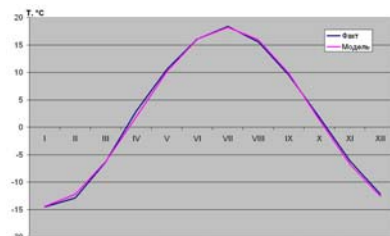


Рис. 11. Внутригодовой ход температуры воздуха на м/с Пермь

Оценка воспроизведения в модели перехода температуры через 0°C весной и осенью оценивалась путем сопоставления среднесуточного значения вероятности перехода через 0°C в определенную декаду года (рис. 12). Сравнения показали близкие значения вероятностей перехода, что позволяет констатировать хорошее воспроизведение моделью этой характеристики.

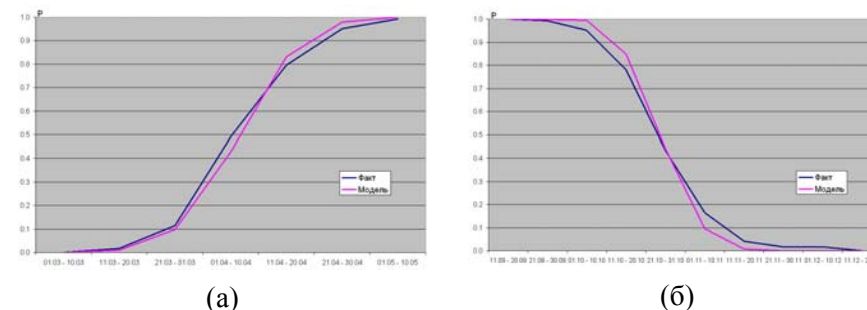


Рис. 12. Вероятность перехода декадной температуры воздуха через 0°C весной (а) и осенью (б) на м/с Киров

Значения вероятности перехода рассчитывались для каждой декады с начала года и усреднялись по всей выборке для фактического и модельного ряда. Адекватное воспроизведение данной характеристики означает применимость данной расчетной схемы для моделирования формирования и стаивания снежного покрова, а также выпадения осадков в твердом и жидком виде.

Дополнительно, оценивалось число дней с температурой не менее определенного значения (рис. 13).

Особенно существенным является воспроизведение в модели количества дней с температурой около 0°C . В случае м/с Киров расхождение между фактическим и смоделированным значением составило 3 суток, что позволяет оценить воспроизведение этой характеристики в модели как хорошее.

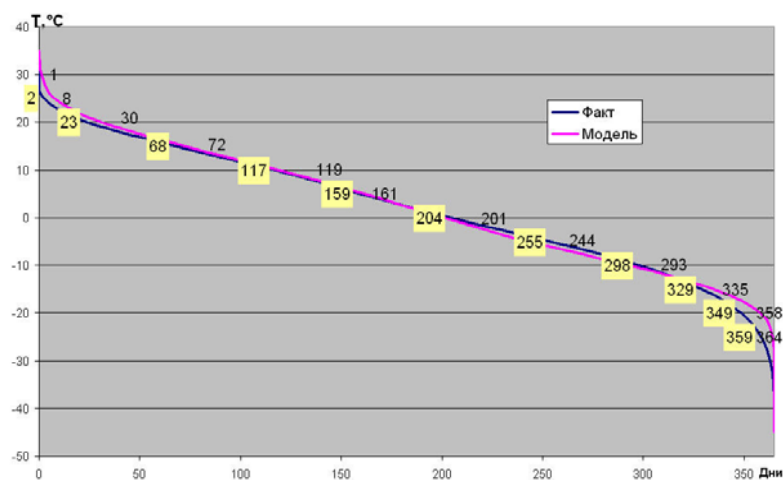


Рис. 13. Количество дней в году с температурой не ниже данной для м/с Киров

Моделирование дефицита влажности воздуха. Оценка модели влажности воздуха производилась сопоставлением среднегодового значения дефицита влажности в день без осадков и его СКО, а также сравнением внутригодового хода дефицита влажности по месяцам. Благодаря простой схеме моделирования, генератор показал хорошие результаты расчета (табл. 3), ошибка воспроизведения среднегодового дефицита влажности не превысила 5%.

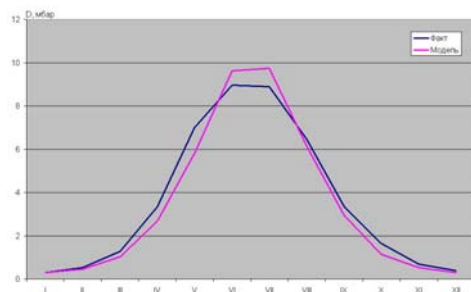


Рис. 14. Внутригодовой ход дефицита влажности воздуха

Таблица 3. Сопоставление фактических и смоделированных значений среднегодового дефицита влажности воздуха

Метеостанция	Факт	Модель	Ошибка, %
Котлас	2.65	2.77	4
Сыктывкар	2.92	2.89	1
Вологда	2.61	2.63	1
Киров	3.57	3.77	5
Кострома	3.18	3.20	1
Н. Новгород	3.93	3.87	2
Казань	4.01	4.03	0
Пермь	3.60	3.57	1
Ижевск	3.59	3.78	5

Внутригодовой ход также был воспроизведен достаточно хорошо. Исключение составили летние месяцы, для которых практически во всех случаях аппроксимация показывала завышенные значения.

Заключение. В рамках данной работы была предпринята попытка создания независимого генератора рядов метеорологических величин в точке для нескольких метеостанций с длинными рядами наблюдений. Оценка работы модели показала применимость выбранного подхода для генерирования длинных рядов метеорологических воздействий на речные водосборы. Дальнейшая работа предполагает несколько критических улучшений и новых схем расчета, среди которых следует выделить:

- генерирование пространственно коррелированных метеорологических величин на сети метеорологических станций

- апробация модели в качестве стохастического входа в модели формирования снежного покрова и речного стока
- разработка схем интерполяции метеорологических воздействий на регулярную пространственную расчетную сетку
- использование ГИС-технологий для идентификации расчетных схем и параметров модели

На каждом этапе потребуется проводить тщательную проверку модели на устойчивость и адекватность воспроизведения исходных характеристик данных наблюдений, для чего будут созданы дополнительные критерии и методики оценки.

Список литературы

1. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007
2. Gabriel K.R., Neyman G.A. Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel-Aviv// Quart. J.R. Meteorol. Soc. 1962
3. Mejia, J.M. and Rouselle, J., 1976. Disaggregation models in hydrology revisited. Water Resour. Res., 12, 185–186
4. Katz R.W., Parlange M.B. Overdispersion phenomenon in stochastic modeling of precipitation. // J. Clim. 1998. N 11. P. 591 – 601.
5. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Динамико-стохастические модели формирования речного стока. М.: Наука, 1993

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ПРОГНОЗ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА РЕК ТЕРСКОГО БАССЕЙНА

Рец Е.П.

Кафедра гидрологии суши МГУ, г. Москва,

E-mail: retska@mail.ru

В годовом цикле изменения водности рек отчетливо выделяются многоводные и маловодные сезоны. Речной сток, наблюдавшийся в маловодные сезоны при отсутствии значительных паводков, принято называть *меженным*, а время, в котором он наблюдается – *меженным периодом*. В меженном периоде имеется отрезок времени, когда сток является наименьшим. Период наименьшего стока продолжительностью до 30 суток называется *периодом минимального стока* [1].

Бассейн р.Терек является одной из наиболее развитых в сельскохозяйственном отношении территорий Российской Федерации, с чем связано активное использование водных ресурсов и важная роль водного хозяйства. Это определяет актуальность исследования минимального стока рек Терского бассейна.

При этом, бассейн р. Терек является одним из наиболее сложных в природном отношении регионов России. Контрастность рельефа и климата создает предпосылки для большой пространственной изменчивости условий формирования минимального стока в пределах речного бассейна, что значительно осложняет его исследование.

Пространственное распределение характеристик водного стока рек бассейна р.Терек в меженный период

Наиболее надежной характеристикой минимального и меженного стока считаются минимальные 30-суточные расходы воды [2]. При этом необходимо произвести четкое разделение межени на летне-осеннюю и зимнюю, и вести расчеты. При этом во избежание разделения зимнего сезона рассматривается не календарный, а водохозяйственный год [2].

Для рек Терского бассейна обычно характерна длительная устойчивая зимняя межень, вследствие чего, минимальный 30-суточный и минимальный месячный расходы практически совпадают [3]. Также, для расчетов предпочтительнее выбирать величины осредненные за некоторый довольно длительный период, чем среднесуточные значения, поскольку увеличение периода осреднения расходов воды ведет к повышению надежности при расчете по кривой расходов вследствие компенсации отклоняющихся в ту или иную сторону величин [2]. Поэтому при исследовании минимального стока рек Терского бассейна, основной расчетной характеристикой водного стока был принят минимальный месячный расход воды.

Вследствие особенностей питания горных рек в период минимальной водности, пространственное распределение минимального стока зависит от пространственного распределения осадков и геологических особенностей территории. В горных территориях количество осадков обычно увеличивается с высотой местности [4], в связи с чем наблюдается общая тенденция увеличения минимального месячного модуля стока с возрастанием средней высотой водосбора. Однако локальные особенности геологического строения бассейна р.Терек настолько оказывают настолько сильное влияние на пространственное распределение

минимального месячного модуля стока, что получить четкую зависимость его от средней высоты водосбора оказалось невозможно. Поэтому для оценки минимального месячного расхода воды для тех рек р.Терек, на которых не производились наблюдения, необходимо проводить картирование минимального месячного модуля стока. Для решения подобной задачи в рамках данной работы для учета особенностей пространственного распределения минимального месячного модуля стока были использованы данные наблюдения на постах, а также нижняя огибающая поля точек на зависимости модуля минимального месячного стока от высоты водосбора. Целесообразность использования нижней огибающей обосновывается тем, что в таком случае на карту будут нанесены гарантированно не завышенное значение минимального модуля стока для каждого конкретного участка бассейна р.Терек (рис. 1).

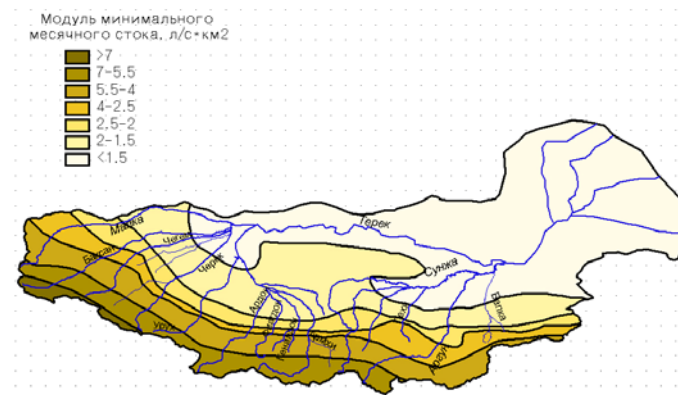


Рис. 1 Карта-схема гарантированного среднего модуля минимального месячного стока рек Терского бассейна.

Относительный вклад межennale периода в годовоой сток может характеризовать значение *среднего отношения минимального месячного расхода воды к среднегодовому*. Была получена зависимость данной характеристики от средней высоты водосбора

для рек Терского бассейна (рис. 2). Данная зависимость хорошо иллюстрирует тенденцию увеличения доли меженного стока в годовом с уменьшением водности рек, связанным с уменьшением средней высоты местности.

Наиболее репрезентативной временной характеристикой меженного периода рек горных территорий было признано *распределение номера лимитирующего месяца*. Эта характеристика оказалась довольно информативной для рек Терского бассейна. Практически распределение номера лимитирующего месяца получается следующим образом: для каждого поста по всему периоду наблюдений подсчитывается число появлений разных месяцев в качестве лимитирующих. После чего рассчитывается доля каждого месяца в общем числе лет (рис. 3). Если на реке выделяется летне-осенняя межень, расчет всех величин ведется отдельно для зимней, летне-осенней межени и года в целом.

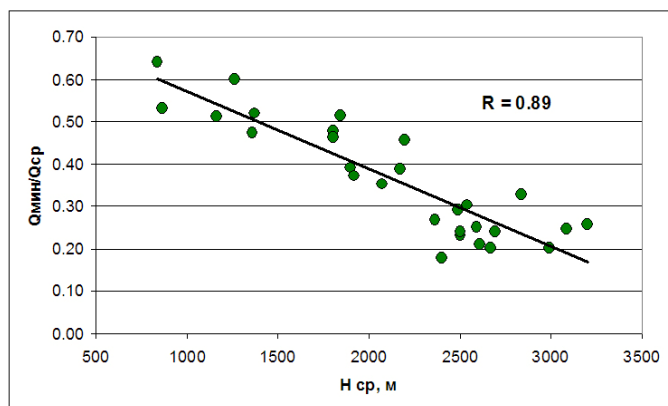


Рис. 2 Зависимость отношения минимального месячного расхода воды к среднегодовому от средней высоты водосбора

Для бассейна р.Терек характерны следующие особенности распределения номера лимитирующего месяца. У рек, берущих начало в высокогорье, со средними высотами бассейна > 2000 м

половодье охватывает период с апреля-мая по сентябрь-октябрь. После спада половодья наступает зимняя межень, для которой характерно постепенное истощение запасов воды в бассейне. Лимитирующим является чаще всего II или III месяц (рис. 3 а, б). Появление января или даже декабря в качестве лимитирующего периода говорит о более раннем переходе температуры через 0°C в нижних высотных зонах или выпадении осадков на незамерзшую часть водосбора.

С выходом на равнину режим рек изменяется. Все большую часть площади водосбора занимают нижние высотные зоны, а, следовательно, возрастает роль снегозапасов в этих зонах и осадков, выпадающих на их поверхность. Для отдельных частей бассейна раньше происходит переход температуры через 0°C . Из-за этого начало периода увеличения расходов смещается на более ранние месяцы (январь-февраль), соответственно сдвигается и номер лимитирующего месяца (рис. 3 в, г). Эти изменения довольно четко прослеживаются по длине больших рек. Кроме того, наблюдается «распластывание» графика по длине реки (рис. 3 в, г). Оно может быть связано с увеличением числа низких высотных зон, на которых часто вообще не наблюдается устойчивого перехода температуры через 0°C . По этой причине, вероятность прерывания зимней межени выпавшими дождевыми осадками или оттепелью увеличивается. Следовательно, из-за большой изменчивости характера этих процессов из года в год, номер лимитирующего месяца будет также часто меняться.

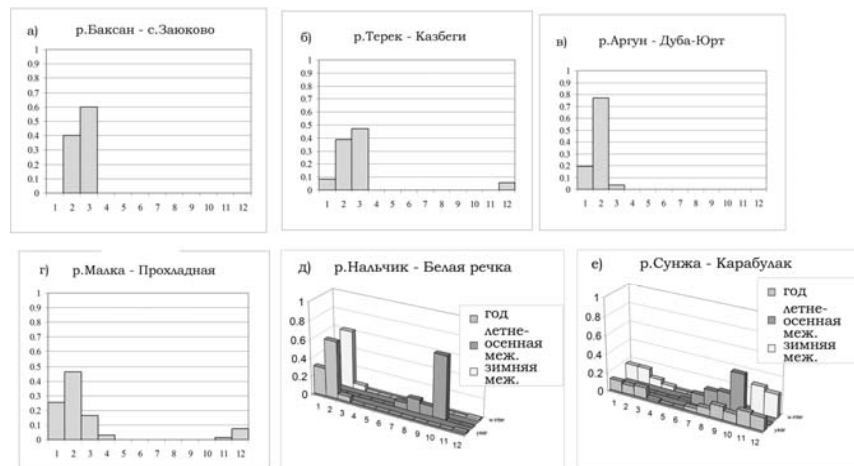


Рис 3. Распределение лимитирующего месяца для некоторых рек Терского бассейна. По оси абсцисс расположены месяцы года, по оси ординат показана частота появления месяца в качестве лимитирующего.

У рек со значением средней высоты водосбора 700-1200 м, и рек, берущих начало на высотах ниже ~ 2500 м, ледниковое питание и снеговое питание из высокогорных областей отсутствует или имеет незначительно малую долю. Для таких рек характерно менее продолжительное половодье, начинающееся в марте-мае, в зависимости от средней высоты водосбора, и заканчивающееся в июне-июле. В соответствии с этим, во внутригодовом распределении стока этих рек можно, наряду с зимней, выделить летне-осенную межень. Она начинается в июле-августе и продолжается до октября, иногда прерываясь осенними паводками. Летне-осенная межень выражена в разной степени в различных речных бассейнах. В некоторых, например р.Нальчик - с.Белая речка, р.Фортанга– с.Бамут, ее можно выделить далеко не во все года и, обычно, она бывает многоводнее зимней. Для этих бассейнов межень представляет собой единую кривую спада водных запасов русловой сети и зоны аэрации, и лимитирующими, следовательно, являются зимние месяцы (рис. 3

д). Для других рек, например, р.Белка – г.Гудермес, р.Сунжа - пгт.Карабулак, летние месяцы выступают в качестве лимитирующих со сравнимой или большей вероятностью, чем зимняя межень (рис. 3 е). Летне-осенный и зимний меженный периоды здесь часто бывают разделены осенним паводком.

Для рек с летне-осенной меженью часто впадение крупных притоков ледникового питания вызывает «заполнение» летне-осенной межени. Так впадение сначала р.Асса (перед г.Грозный), а затем – р.Аргун (перед с.Брагуны) в р.Сунжа изменяет структуру межени: лимитирующими становятся зимние месяцы, а в створе с.Бамут летне-осенная межень вообще больше не выделяется.

Для распределения номера лимитирующего месяца можно рассчитать среднее значение номера лимитирующего месяца по формуле для оценки математического ожидания дискретных случайных величин. Для рек Терского бассейна значение математического ожидания номера лимитирующего месяца имеет четко выраженную зависимость от средней высоты водосбора (рис. 4):

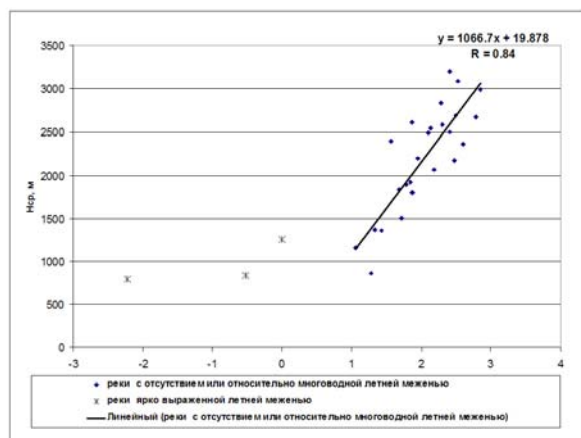


Рис. 4 Зависимость мат. ожидания номера лимитирующего месяца от средней высоты водосбора для рек Терского бассейна

Многолетние колебания минимального месячного стока рек Терского бассейна

При исследовании многолетних колебаний речного стока применяется теория случайных процессов [5]. Задача статистического оценивания характеристик случайного процесса по его единственной реализации имеет наиболее простое решение, если это «белый шум», т.е. последовательность независимых и одинаково распределенных случайных величин. При этих условиях выводы о функции распределения могут быть получены классическими методами математической статистики.

Процесс невозможно рассматривать как «белый шум», если он нестационарен. Нестационарность колебаний стока бывает часто вызвана изменением климатических условий и антропогенным влиянием, которая проявляется в уменьшении или увеличении его математического ожидания и дисперсии, коэффициентов корреляции между значениями стока различных, в том числе смежных лет [5].

Другой важной особенностью процесса многолетних колебаний речного стока, отличающей его от «белого шума», является цикличность, т.е. тенденция к группировке лет повышенной и пониженной водности. В гидрологических расчетах стохастические связи между стоком предшествующих и последующих лет описывают корреляционной функцией $r(\tau)$, главным образом рассматривается корреляция между стоком смежных лет $r(1)$.

Согласно проведенным в рамках данной работы исследованиям, для минимального стока для рек бассейна р.Терек характерна цикличность. Коэффициент $r(1)$ для большей части рек превышает 0,3 и в отдельных створах достигает 0,7-0,85 (р.Малка – г.Прохладный, р.Малка – ст.Прохладная, р.Гизельдон – с.Даргавс, р.Сунжа – пгт.Карабулак). Такая сильная внутрирядная скоррелированность вызывает смещение стандартных статистических оценок характеристик минимального стока. По результатам исследования многолетних колебаний минимального месячного стока в бассейне р.Терек получено, что стандартная оценка $r(1)$, при длине ряда меньше 50 может быть занижена на 10 и более процентов. При значении коэффициента корреляции смежных лет $< 0,5$ стандартная оценка σ (а следовательно, и оценка C_v обычно меньше своей исправленной величины на 1-4%, а при больших значениях $r(1)$ смещение может достигать до 10-20%, особенно при небольшой длине ряда наблюдений.

Анализ разностно-интегральных кривых минимального месячного и среднегодового расхода воды в модульных коэффициентах, нормированных на C_v , позволил выявить особенности многолетних колебаний минимального стока рек Терского бассейна.

Для больших и средних рек эти колебания складываются из многолетних колебаний минимального стока основных рек-притоков, их формирующих. Совпадение многолетних циклов колебания минимального стока на реке и ее крупных притоках ведет к увеличению выраженности данных циклов после их слияния. В результате такого наложения амплитуда колебания разностно-интегральной кривой увеличивается, и маловодные периоды становятся более глубокими. При слиянии рек, для которых характерна асинхронность циклов многолетних колебаний минимального месячного стока, разностно-интегральная кривая становятся более пологая: маловодные и многоводные периоды компенсируют друг друга.

Для анализа формирования многолетних циклов колебания минимального стока рек были выбраны гидрологические посты, находящиеся в верховьях всех наиболее крупных рек, для которых были построены разностно-интегральные кривые минимального месячного и среднегодового расхода воды в модульных коэффициентах, нормированных по C_v , за период 1945-1995 гг., когда в бассейне р.Терек работало наибольшее число гидрометрических постов. В результате было выявлено 3 типа многолетних колебаний минимального месячного расхода воды.

К первому типу (р.Терек-Владикавказ на рис. 5) относятся верховья большинства рек бассейна (Терек, Малка, крупные притоки Терека в верховьях, крупные притоки р.Сунжа). Для них характерны, прежде всего, частые чередования относительно маловодных и многоводных периодов, можно выделить до 3-х циклов водности за период с 1945-1995 г (с 1945 по 1958-1960, с 1958-1960 по 1975-1985 и с 1975-1981 по 1995). Для таких рек характерен более высокий коэффициент корреляции между минимальным месячным и

среднегодовым расходом $r(q_{\text{мин.мес}}, q_{\text{ср}})$, чем коэффициент корреляции между минимальными месячными расходами смежных лет $r(1)$. Кроме того, разностно-интегральная кривая минимального стока имеет практически синхронный ход с разностно-интегральной кривой среднегодового расхода воды. Таким образом, многолетние колебания минимального месячного стока в большей мере определяются колебаниями климатических величин, регулирующее воздействие геолого-геоморфологических особенностей водосборов оказывает малое влияние [6].

Второй тип многолетних колебаний минимального стока распространен в высокогорной и среднегорной части бассейна от верховьев р.Чегем на западе до верховьев р.Ардон на востоке (р.Ардон – Тамиск на рис. 5). Для них выявляется только один цикл за рассматриваемый период. Вероятно, за счет большой регулирующей способности распространенных здесь гидрогеологических массивов, многолетние колебания минимального стока мало чувствительны к климатическим воздействиям и замедленно реагируют на них. Об этом также свидетельствует также характерная для рек этого типа асинхронность колебаний минимальных месячных и среднегодовых расходов воды. Разностно-интегральная кривая среднегодовых расходов воды для рек данного типа в основном соответствует колебаниям водности рек 1 типа, следующих за изменениями климатических характеристик. Коэффициент внутрирядной скоррелированности для рек 2 типа $r(1)$ значительно превышает коэффициент корреляции между минимальным месячным и среднегодовым расходом $r(q_{\text{мин.мес}}, q_{\text{ср}})$.

Третий тип (р.Сунжа – Карабулак на рис. 5) представлен относительно небольшим числом рек, водосборы которых расположены в средне-низкогорной части бассейна р.Терек (верховья

р.Сунжа, р.Нальчик). В многолетних колебаниях минимального месячного и среднегодового расхода воды прослеживается ярко выраженный маловодный период с 1945 по 1962 – 1967 г., многоводный период с 1962-1967 по 1975-1980, и средний по водности период с 1980 по 1995 г. Для данных рек характерны очень высокие значения $r(1)$ как для минимального месячного, так и для среднегодового расхода воды, а также большие значения коэффициента корреляции между минимальным месячным и среднегодовым расходом $r(q_{\text{мин.мес}}, q_{\text{ср}})$.

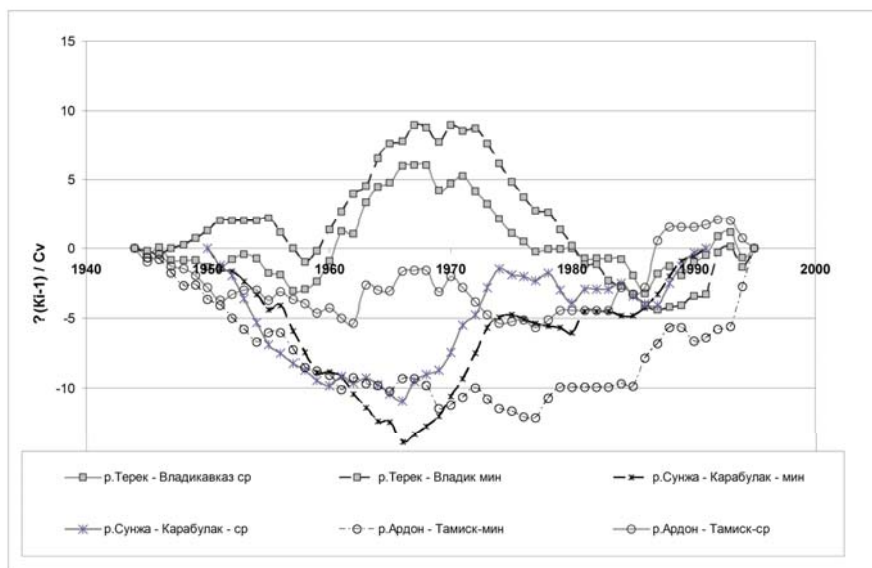


Рис. 5 Разностно-интегральные кривые минимального месячного и среднегодового расхода воды для некоторых рек Терского бассейна

Прогноз минимального стока рек горных территорий. В области прогноза минимального стока рек наибольшее распространение получили методы прогноза, основанные на наличии инерции гидрологических явлений и возможности экстраполяции интегральных гидрологических характеристик (кривых спада,

отображающих изменения суммарных запасов воды в речном бассейне или речной системе).

В основном, исследования в области использования данного метода для прогноза минимального стока проводились для равнинных бассейнов. Кривые спада в этом случае характеризовали истощение запасов русловой сети или сезонных запасов грунтовых вод. В горных речных бассейнах мы сталкиваемся с очень быстрым добеганием как вод русловой сети, так и вод подповерхностного слоя [3,7], что ограничивает возможность прогноза по кривым спада. Использование метода кривой спада для прогноза водного стока рек в таком случае становится возможным только после прохождения многоводного периода, при переходе рек на подземное питание, т.е. в период устойчивой зимней межени [3,6].

В таком случае обычно переходят к шагу времени, равному одному месяцу и используют прием, описанный в [7,8]. Ищется зависимость вида:

$$Q_n = aQ_{n-k} + b,$$

Где Q_n , Q_{n-k} – средний расход воды n -ого и $n-k$ -ого месяца соответственно, $k > 1$. Заблаговременность в таком случае будет равна k месяцев.

Согласно полученным результатам, а также исследованиям других авторов [7,9], в условиях устойчивой зимней межени связь между среднемесячными расходами воды прослеживается довольно долго, до 5 месяцев. Но при увеличении заблаговременности прогноза минимального месячного расхода воды, теряется его точность: уменьшается коэффициент корреляции и увеличивается показатель S/σ (рис. 6). Для исследованных рек Северного Кавказа показатель S/σ оставался меньше 0.8 при заблаговременности прогноза от 1 до 3 месяцев. Усложнение прогностической

зависимости посредством введения дополнительных членов, характеризующих водность предшествующих месяцев, практически не увеличивает точность прогноза и уменьшает его эффективность.

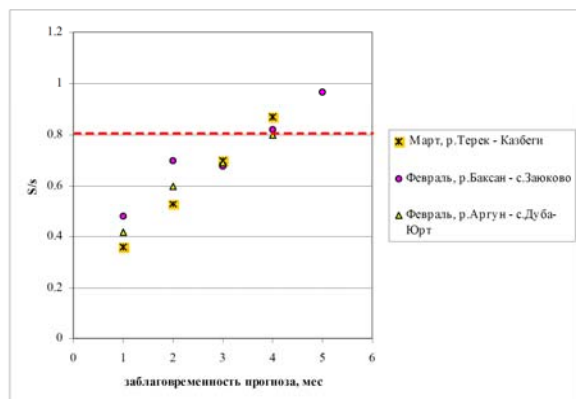


Рис. 6 Зависимость показателя S/σ от заблаговременности прогноза минимальных месячных расходов воды для некоторых рек Терского бассейна

1. Владимиров А.М. Сток рек в маловодный период года. – Л., Гидрометиздат, 1976– 265с.
2. Владимиров А.М. Гидрологические расчеты. – Л.:Гидрометиздат, 1990 – 364 с.
3. Rets E., Kireeva M. Hazardous hydrological processes in mountainous areas under the impact of recent climate change: case study of Terek River basin. Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources (Proc. of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010). IAHS Publ. 340, 2010.
4. Barry R.G. Mountain weather and climate change, New York, Cambridge University Press, 2008 – 532 p.
5. Христофоров А.В. Теория случайных процессов в гидрологии. – М.: изд-во МГУ, 1994. – 143 с.

6. Христофоров А.В., Кармолдаев Ж.Ж. Сток горных рек в маловодный период, его расчеты и прогнозы – Бишкек:ИЛИМ, 1994. – 147 с.
7. Христофоров А.В., Юмина Н.М., Кириллов А.В., Рец Е.П. Прогнозирование стока рек Терского бассейна // Водное хозяйство России, №4, 2007
8. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1, Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. – Л.:Гидрометеиздат, 1989. – 358 с.
9. Юмина Н.М. Водный режим рек Северного Кавказа: Дисс. канд. геогр. наук, М., 2008. – 193 с.

СОВРЕМЕННЫЕ ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ: ФОРМИРОВАНИЕ, ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТЬ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Фролова Н.Л.¹, Джамалов Р.Г.², Игонина М.И.^{1,2}

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, ²Институт водных проблем

Российской академии наук, Москва

E-mail: mashka_@bk.ru

Введение. В связи с глобальным изменением климата была проведена переоценка водных ресурсов на Европейской территории России. Построены карты годового стока рек ЕТР за 1970-2005 гг., водообеспеченности на единицу площади и на одного человека и использования водных ресурсов. Такие оценки необходимы для повышения эффективности водопользования и для предотвращения неблагоприятных экологических последствий.

Основные закономерности формирования водных ресурсов на Европейской территории России (ЕТР). Вследствие разнообразия природных особенностей Европейской территории России, которая располагается в пределах различных географических зон: от арктической – на побережье и островах Северного Ледовитого океана – до субтропической – на Черноморском побережье Кавказа, распределение ресурсов поверхностных и подземных вод по территории крайне неравномерно и во многих случаях не соответствует плотности населения и размещению промышленности и сельского хозяйства. В европейской части России, где сосредоточено 80% населения страны, водные ресурсы рек оцениваются в 897 км³, что составляет 21% суммарных водных ресурсов нашего государства. Значения стока равнинных рек уменьшаются по направлению от северных районов к южным, а в

горах – увеличиваются в соответствии с высотой местности. Значения годового слоя стока на ЕТР колеблются от 2000-3000 мм (горные районы Кавказа) до 10-5 мм и менее (полупустынные районы Прикаспийской низменности) [1].

Изменения за последние десятилетия годового стока рек, протекающих в разных природных зонах, различны. Неоднородная реакция речного стока в разных природных зонах Русской равнины на многолетние изменения характеристик климата обусловлена следующими взаимосвязанными основными причинами: различиями в условиях увлажнения территорий этих зон; различиями в степени залесенности водосборов и в мощности зоны аэрации; хозяйственной деятельностью человека.

Происходящие климатические изменения отразились на величине годового и сезонного стока рек. Исследования показали, что в последние десятилетия фаза повышенной водности отмечается на преобладающей части ЕТР. 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. Анализ данных метеорологических и воднобалансовых станций позволили сделать следующие выводы для этой территории [1]:

- по всем станциям со второй половины 1970-х годов отмечается значительное увеличение годовых сумм осадков (на 40-80 мм), причем наиболее существенное - в летне-осенний период (на 20-50 мм), а за зимний период на 5-25 мм;
- - рост осадков происходит на фоне потепления (до 1-1,2°C) холодного периода года и некоторого ее снижения в летний сезон (на 0,1-0,3°C);

- наблюдается повышение влагозапасов в метровом слое почвогрунтов, особенно в летне-осенний период (на 5-25%);
- повысились уровни основных водоносных горизонтов на 50-100 мм, увеличилось подземное питание рек.

Наибольшее увеличение годового стока (рис. 1) (на 15–30 %) наблюдается на реках ЕТР, расположенных примерно между 56° и 60° с. ш. (левобережные притоки Волги в её верхнем и среднем течении, часть бассейна Камы). Примерно также увеличился сток притоков Волги в лесостепной зоне. К северу и югу от этой полосы прослеживается увеличение водности, но менее значительное. Годовой сток выше среднего на 5-15% для левобережных притоков Волги, в верховьях Днепра, на левобережных притоках Дона, на реках горной части бассейна Кубани. На остальной части ЕТР современные изменения стока были незначительны, более того наблюдалась слабая тенденция уменьшения годового стока. Ареал наибольшего увеличения годового стока соответствует границе лесостепной-лесной зоны (средняя часть бассейна Оки), бассейн Вятки и Унжи. При продвижении на запад и восток эти изменения становятся незначительными.

Рассматривая рис.1, отметим, что наибольшее увеличение годового стока характерно для ЕТР для бассейна Ветлуги, Вятки, Б.Кинеля и низовьев Камы (около 15-30% по сравнению с периодом 1935-1969 гг.).

Различная реакция колебаний водности рек на изменение климатических условий после середины 70-х годов в лесной и лесостепной зонах может быть объяснена отличием ведущих факторов формирования годового стока. В лесной зоне годовой сток почти линейно реагирует на увеличение годовых осадков [2]. В лесостепной зоне эта связь ослабевает, ведущими становятся

факторы, определяющие объем весеннего половодья [3]. Здесь действует более сложный механизм отклика на изменение региональных климатических условий: зимние температуры повысились, более частыми стали оттепели, уменьшилось промерзание почвогрунтов - в результате повышение зимних осадков частично компенсируется ростом потерь талых вод на увлажнение почвы с последующим увеличением испарения в весенне-летний период; при высоком здесь дефиците испарения некоторое понижение летних температур не играет решающей роли в этом процессе.

Реакция годового стока на изменения климата в последней четверти XX в. выразилась в повышенной водности рек на территории в основном Верхне-Волжского бассейна. На главных реках (Оке и Волге до их слияния) в 1978-1999 гг. наблюдался рекордно высокий сток редкой повторяемости, превысивший норму на 10-11%. Суммарный сток с территории Верхне-Волжского бассейна в этот период оказался выше нормы на 11% и ни разу не был превышен за предшествующие 100 лет (1877-1977 гг.) в периоды соразмерной длительности [4].

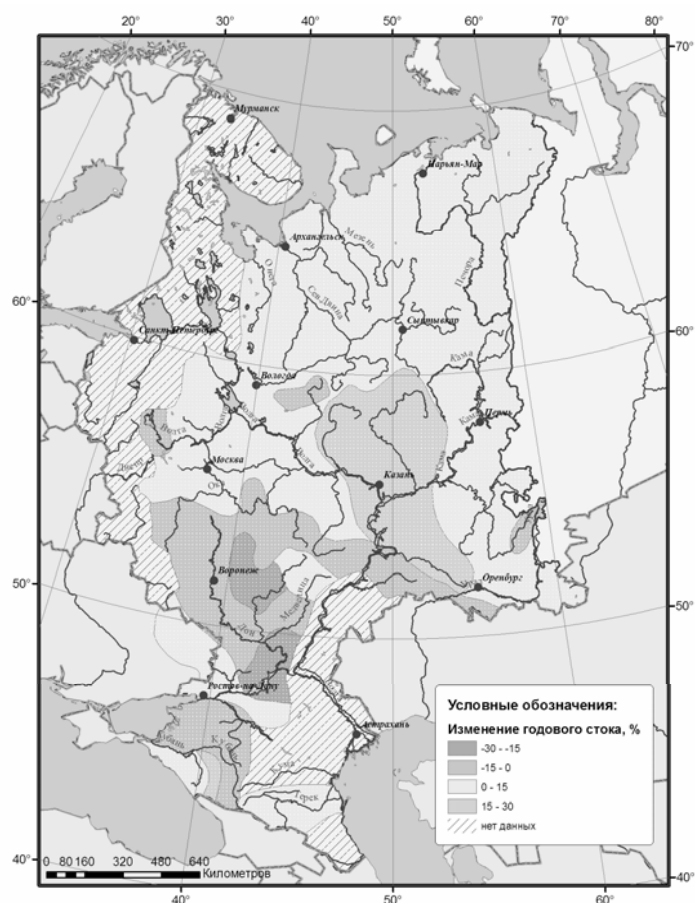


Рис. 1. Изменения (%) годового стока рек ЕТР за 1970-2005 гг. по сравнению с периодом 1935-1969 гг.

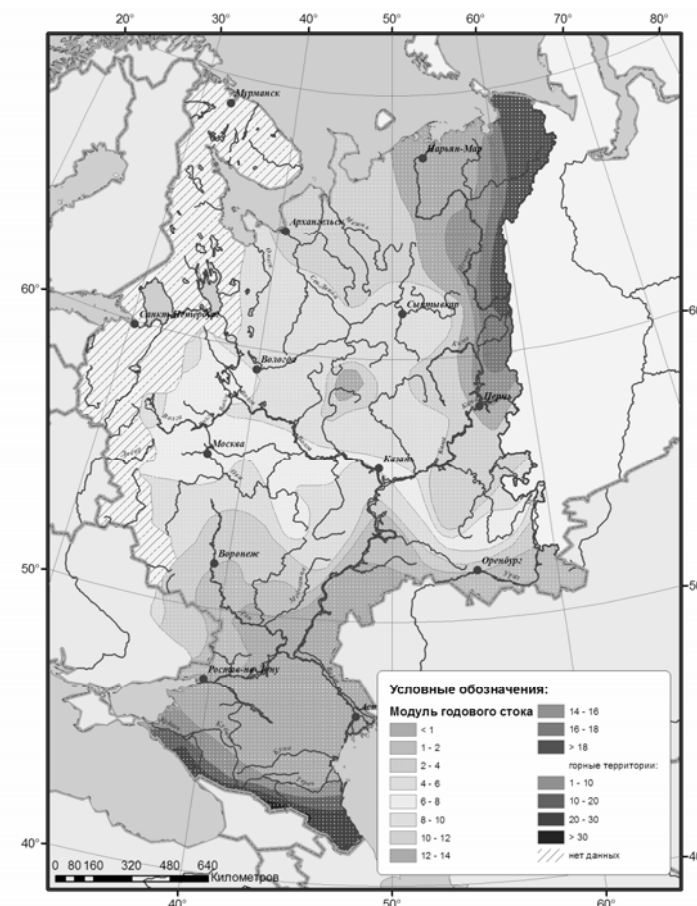


Рис. 2. Карта среднего многолетнего модуля годового стока за период 1970-2005 гг.

Важным является оценка дефицита водных ресурсов. Мы принимаем, что дефицит водных ресурсов равен разности величины предельно допустимого изъятия и общего водопотребления. Предельно допустимое изъятие оценивается как разность общего и экологического стока определенной обеспеченности [5]. Расчет проводился для года 50 и 95% обеспеченности.

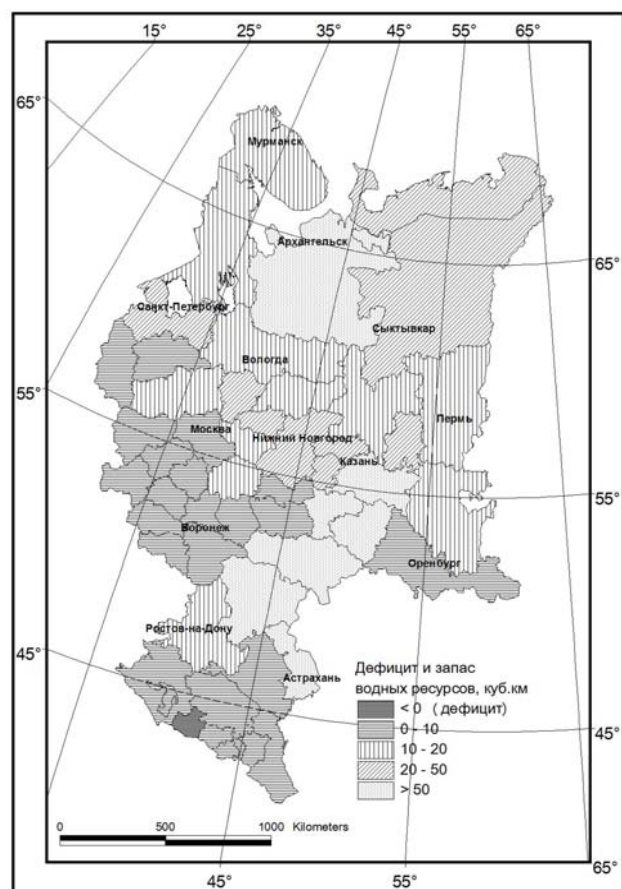


Рис.3. Дефицит и наличие водных ресурсов для среднего по водности года, км³ (водные ресурсы [6], водопотребление [7])

Водообеспеченность ЕТР. Под водообеспеченностью понимается количество воды, приходящейся на одного жителя. Водообеспеченность - это отношение среднееголетних возобновляемых водных ресурсов (ВВО) к численности населения (ЧН). Водообеспеченность (тыс.м³ в год на одного жителя) = ВВО (км³/год) / ЧН (млн.). Для анализа состояния водных ресурсов по

данным об удельной водообеспеченности принимается классификация И.А.Шикломанова [1]:

< 1.0 – катастрофически низкая водообеспеченность;

1.01 – 2.0 - очень низкая водообеспеченность;

2.01 – 5.0 – низкая водообеспеченность; 5.01 – 10 – средняя водообеспеченность;

10.01 – 20 – высокая водообеспеченность; > 20 – очень высокая водообеспеченность.

Приведенная классификация позволяет выявить регионы с различным уровнем водных ресурсов и водообеспечения, что дает возможность принять необходимые и своевременные меры по регулированию или сокращению водопотребления для устранения дефицита водных ресурсов. Для наглядности была построена карта, исходя из представленной выше классификации (рис.5). Водные ресурсы были взяты за 2005 год, а водопотребление – за 2002.

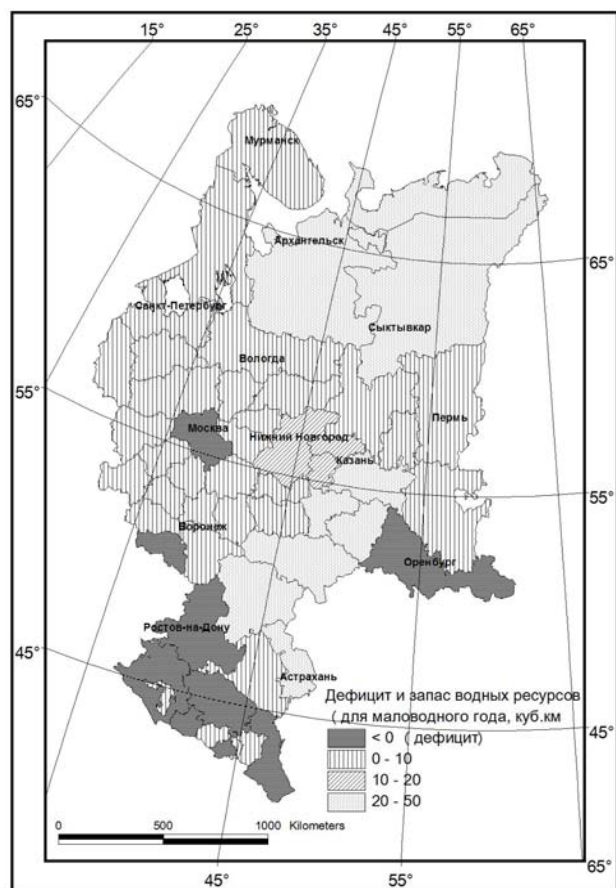


Рис.4. Дефицит и наличие водных ресурсов для маловодного года, км³ (водные ресурсы [6], водопотребление [7])

Максимальной удельной водообеспеченностью обладает Ненецкий автономный округ. Наименьшей удельной водообеспеченностью обладают субъекты, где проживает большая доля населения России (в первую очередь Центральный и Южный округа) (рис.5). Всего 9 регионов имеют низкую водообеспеченность и 1 регион - очень низкую водообеспеченность. Эти субъекты

расположены как раз на территории ЕТР - в основном в Центральном (Орловская область (4,77 км³/млн.чел. в год), Тамбовская область (3,48 км³/млн.чел. в год), Курская область (3,08 км³/млн.чел. в год), Московская область (2,72 км³/млн.чел. в год), Белгородская область (1,79 км³/млн.чел. в год) и Южном округах (Краснодарский край (4,49 км³/млн.чел. в год), республика Ингушетия (3,85 км³/млн.чел. в год), республика Калмыкия (3,77 км³/млн.чел. в год), Ставропольский край (2,01 км³/млн.чел. в год), в Приволжском ФО (Пензенская область (3,85 км³/млн.чел. в год)). Перечисленные регионы имеют или ограниченные водные ресурсы, или высокую численность населения, или совокупность этих факторов, что обуславливает низкую водообеспеченность.

Использование водных ресурсов. Нагрузка на водные ресурсы характеризуется коэффициентом использования водных ресурсов $K_{исп.}$, равным отношению в процентах величины полного водопотребления к возобновляемым водным ресурсам. При этом возобновляемые водные ресурсы представляют собой сумму местных водных ресурсов, формирующихся в пределах рассматриваемого региона, и притока речных вод с соседних территорий.

Несмотря на то, что суммарные среднесезонные возобновляемые водные ресурсы ЕТР достаточно велики и оцениваются в 949 км³/год [1], имеется целый ряд субъектов ЕТР, которые располагают ограниченными водными ресурсами. К ним, например, можно отнести республику Мордовию, Белгородскую, Брянскую, Воронежскую, Калужскую, Курскую, Липецкую, Московскую, Новгородскую, Оренбургскую, Псковскую, Орловскую, Пензенскую, Смоленскую, Тамбовскую, Тульскую области и почти все субъекты Южного ФО [1].

Для анализа состояния водных ресурсов была использована классификация И.А.Шикломанова [1] по коэффициенту использования $K_{исп.}$ или нагрузки на водные ресурсы:

1-я категория: $K_{исп.} < 10\%$ - низкая нагрузка на водные ресурсы; как правило, регионы не испытывают серьезных проблем с водообеспечением (за исключением проблем загрязнения).

2-я категория: $K_{исп.} = 10-20\%$ - умеренная нагрузка на водные ресурсы. Уровень водообеспечения становится фактором, ограничивающим развитие региона.

3-я категория: $K_{исп.} = 20-40\%$ - высокая нагрузка на водные ресурсы. Для устойчивого развития необходимо регулировать предложение и спрос на воду.

4-я категория: $K_{исп.} = 40-60\%$ - очень высокая нагрузка на водные ресурсы. Имеет место серьезный дефицит воды и настоятельная необходимость регулирования и ограничения водопотребления, привлечения дополнительных источников водоснабжения. Дефицит водных ресурсов становится фактором, сдерживающим экономический рост и повышение уровня благосостояния населения.

5-я категория: $K_{исп.} > 60\%$ - критически высокая нагрузка. Дефицит водных ресурсов становится критическим фактором развития экономики и жизнедеятельности.

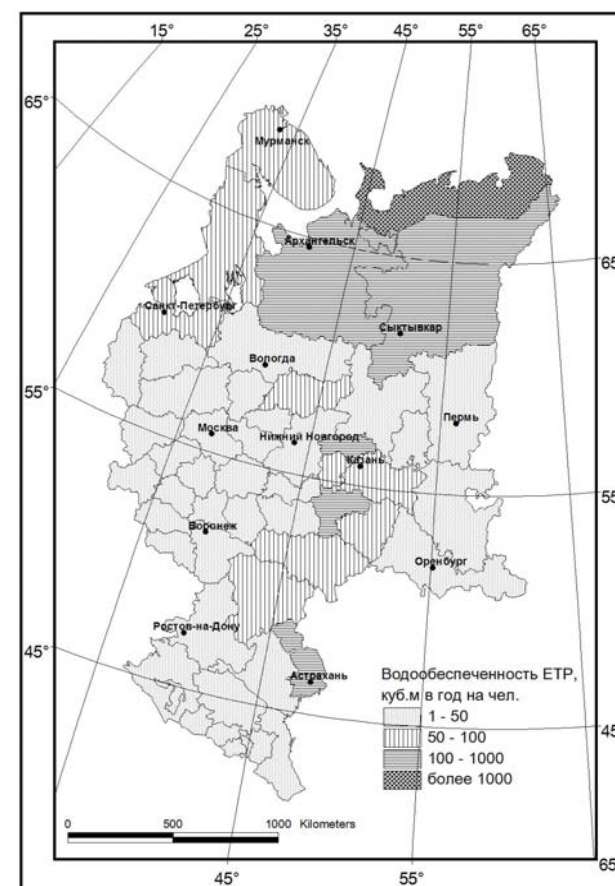


Рис. 5. Водообеспеченность ЕТР, км^3 в год на млн. чел.)
(водные ресурсы – [6], численность населения – [8]) за 2005 год

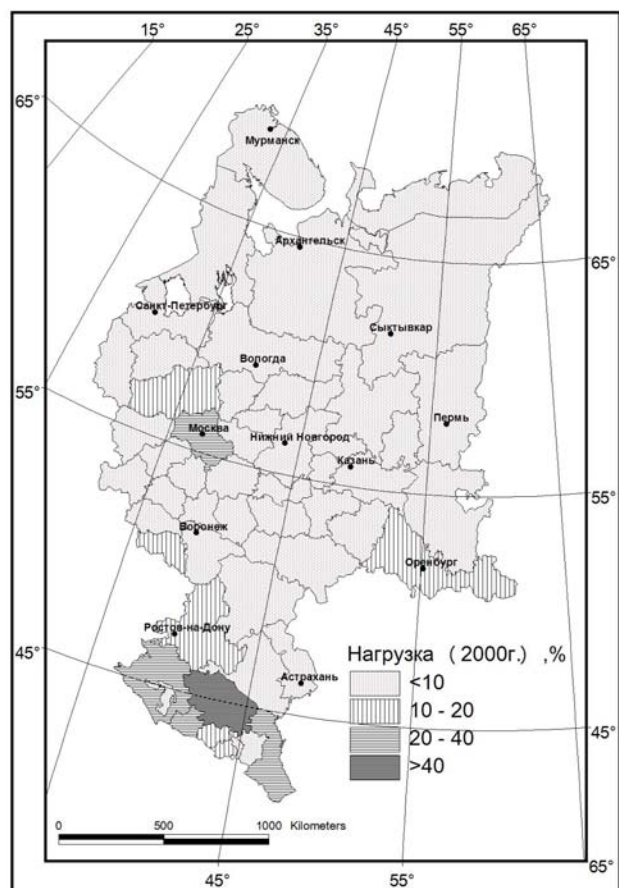


Рис.6. Нагрузка на водные ресурсы в 2000 году по территории ЕТР, %

Подавляющее большинство субъектов ЕТР имеют низкую нагрузку на водные ресурсы ($K_{исп.} < 10\%$). Высокая нагрузка ($K_{исп.} > 20\%$) отмечается в основном для субъектов, расположенных в Южном федеральном округе. Это связано с недостатком местных водных ресурсов. На территории ЮФО формируется только 62

км³/год возобновляемых водных ресурсов, из которых 53 км³/год – местные водные ресурсы. Транзитом проходит 270 км³/год.

Площадь регионов, имеющих высокую нагрузку на водные ресурсы – около 10% Европейской территории России.

Следует отметить, что некоторые из представленных регионов имеют возможность обеспечивать свои потребности за счет речного стока, поступающего из прилегающих регионов. К примеру, на территории Астраханской области практически вообще не формируются поверхностные водные ресурсы.

Высокая нагрузка на водные ресурсы может быть связана и с густо населенными и экономически развитыми регионами ЕТР, как например, в Москве и Московской области.

Таблица 1. Субъекты ЕТР с высокой нагрузкой на водные ресурсы ($K_{исп.} > 20\%$)

Субъект РФ	Нагрузка, %				
	1980*	1990*	2000*	2005**	2009**
Московская область	27,8	25,4	24,1	8,3	9,1
республика Дагестан	41,5	28,1	21,5	16,2	14,2
республика Ингушетия	133,8	59,5	9,9	3,6	5,8
республика Карачаево-Черкессия	37,1	37,8	39,5	0,9	0,7
республика Северная Осетия	5,4	21,1	19,8	2,7	2,9
Краснодарский край	30,7	38,6	30,9	13,5	13,5
Ставропольский край	122,4	108,6	40,6	50,6	48,6
Ростовская область	23,4	25,6	17,0	8,7	8,5
Оренбургская область	3,7	21,1	14,8	12,7	12,9
Челябинская область	16,8	21,3	18,2	10,8	9,2

* Использование воды [7], водные ресурсы [6];

****Использование воды [9], водные ресурсы [6]**

Как следует из таблицы 1 для большинства регионов отмечается снижение нагрузки на водные ресурсы. Возможно, это связано с уменьшением производительных мощностей в 1990-е годы. Довольно сильно выражено падение нагрузки у республики Ингушетия. Возможно, на Северном Кавказе в связи с частыми конфликтами возникают проблемы с забором воды.

Все, представленные в таблице 1 регионы относятся к крайне неблагоприятным регионам с очень неэффективным использованием водных ресурсов [1]. Некоторые из этих регионов находятся в основной зоне орошаемого земледелия юга европейской территории России, что требует больших затрат воды.

Заключение. По изложенным выше классификациям можно выявить регионы с различным уровнем использования водных ресурсов и водообеспечения. Это дает возможность принять необходимые и своевременные меры по регулированию или сокращению водопотребления для устранения дефицита водных ресурсов.

Литература

1. Водные ресурсы России и их использование /Под ред. И.А.Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
2. Оценка ресурсов и качества поверхностных вод (на примере Московского региона). М.: МГУ, 1989. 197 с.
3. Оценка потерь талых вод и прогнозы объема стока половодья. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 189 с.
4. Акименко Т.А, Евстигнеев В.М. Климатические изменения водности рек центра Русской равнины в конце XX века // В кн.:

Современные глобальные изменения природной среды. Т.1, М.: Научный мир, 2006. С.382-389.

5. Фащевский Б.В. Экологическое обоснование допустимой степени регулирования речного стока. Минск: ЦНИИ комплексного использования водных ресурсов, 1989. 160 с.
6. Государственный водный кадастр «Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество» – М.: Метеоагентство Росгидромета, 1981-2010.
7. Думнов А.Д., Борисов С.С. Учёт использования воды: основные этапы становления и проблемы современного анализа (краткий обзор// Бюллетень «Использование и охрана природных ресурсов».- 2003.-№9-10
8. http://www.gks.ru/bgd/free/b04_03/Isswww.exe/Stg/d01/65oz-shisl28.htm (2010) Федеральная служба государственной статистики
9. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2009 году».-М.: НИА-Природа, 2010.-288с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК