

ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ГИДРОЛОГИИ

*Сборник научных трудов
гидрологического факультета*



Министерство образования и науки Российской Федерации

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ГИДРОЛОГИИ

**Сборник научных трудов
сотрудников гидрологического факультета**



**Санкт-Петербург
2004**



УДК 556.048 + 556.63

Проблемы современной гидрологии. Сборник научных трудов сотрудников гидрологического факультета. – СПб: Изд. РГГМУ, 2004. – 202 с.

Редакционная коллегия: проф. А.М. Догановский, проф. (отв. редактор), В.Г. Орлов, проф. В.В. Коваленко, проф. Н.Б. Барышников, проф. А.М. Владимиров, Н.В. Викторова (отв. секретарь)

Приводятся теоретические и практические результаты исследований в области водных ресурсов, расчетов и прогнозов стока воды, русловых процессов, оценки качества речных вод.

Рассчитан на научных сотрудников, аспирантов и студентов гидрометеорологических специальностей.

Theoretical and practical results of water resources investigations, computation and forecast of river runoff, channel erosion, estimation of river water quality are presented in this collection book.

The publication is for specialists in hydrology, students of hydrological and meteorological institutions and universities.

- © Коллектив авторов, 2004
- © Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2004

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сборник научных трудов сотрудников гидрологического факультета РГГМУ посвящается ученым гидрологам, внесшим весомый вклад в дело развития основных научных направлений гидрологии в становление и развитие гидрометеорологического института и воспитавших специалистов в различных направлениях гидрологической науки, экологии, охраны поверхностных вод.

Сборник подготовлен к открытию очередного VI гидрологического съезда, приведенные в сборнике научные исследования представляют основное направление творческой работы ученых гидрологического факультета и затрагивают многие вопросы повседневных проблем в области гидрологии не только Северо-Западного региона, но и всей страны.

Традиционно продолжают исследования водного баланса гидрологических объектов в целом и его отдельных составляющих. Статья А.М. Догановского, Н.В. Мякишевой, Т.И. Прокофьевой посвящена водному балансу соленых озер. Проблемам расчета испарения посвящены статьи А.Н. Постникова и А.П. Тенилова.

Актуальное гидроэкологическое направление представлено большим количеством работ. В статьях В.В. Костко рассматриваются основные проблемы, возникающие при разработке методических указаний по проектированию водоохранных зон. Различные подходы при оценке возможных изъятий воды из русловой сети без ущерба для экологии речной системы исследуются в статье В.Г. Орлова. Продолжаются исследования, начатые в 1976 г. на кафедре гидрогеологии и геодезии, рассматривающие влияние крупных промышленных объектов на режим подземных вод. Результатом указанных исследований явилась методология эколого-гидрогеологических исследований на техногенно нагруженных территориях, представленная в статье Н.А. Бродской. Методические принципы установления нормативов допустимого воздействия загрязняющих веществ на водные экосистемы рассмотрены в статье Г.Н. Угренникова и Ф.М. Вакса.

Определенный интерес представляет статья А.М. Владимирова, посвященная чрезвычайно важному направлению в гидрометеорологии – «Опасные гидрологические явления».

Ряд статей посвящен проблеме влияния изменения климата на гидрологические объекты. В русле этого направления исследуются тенденции изменения подземного стока (Т.И. Прокофьева), чувствительность критериев оптимальной плотности гидрологической

сети (И.И. Пивоварова, Е.В. Гайдукова), характеристики минимального стока и чувствительность к их изменениям отраслей народного хозяйства (Н.В. Викторова, М.Н. Громова). Статья М.А. Науменко посвящена факторам-индикаторам климатических изменений, влияющих на экосистемы озер.

Теоретические исследования, направленные на повышение надежности гидрологических расчетов, представлены в статьях В.Г. Орлова, А.В. Сикана.

Нашла свое отражение и методическая работа сотрудников факультета. Так в статье Ю.А. Кузьмина рассматриваются вопросы модернизации учебных программ по курсу «Основы геофизики».

Работы сотрудников кафедры гидрофизики и гидропрогнозов посвящены новейшим методам прогноза различных элементов водного режима. В статье С.В. Шаночкина представлены результаты апробации распознающей системы перцептронного типа. Исследования Э.А. Домингеса направлены на разработку метода стохастического прогноза притока воды к водохранилищу с целью выхода на оптимальную выработку электроэнергии.

Гидроэнергетическое направление представлено работами, выполненными под руководством Г.С. Арсеньева и посвященными проблемам, связанным с пропуском половодий и паводков через ГЭС.

По кафедре гидрометрии продолжают исследования по теории движения наносов и русловых процессов. В частности исследовалось влияние эффекта взаимодействия на транспорт донных наносов русловым потоком (Н.Б. Барышников, Д.И. Исаев), а также применение методики оценки русловых деформаций к конкретным рекам, в частности р. Оредеж (А.А. Левашов, И.А. Левашова).

Продолжаются также и экспериментальные исследования сотрудников факультета. В статье А.В. Илларионова рассматривается новый подход к идентификации мест размывов трубопроводных переходов на основе метода визуализации акустического поля с помощью гидрофона. Исследования С.Д. Винникова посвящены определению нагрузки на вертикальную цилиндрическую опору от раздробленного льда.

Отличительной особенностью сборника является активное участие в научных исследованиях студентов и аспирантов факультета.

Широкий круг вопросов, рассмотренный в издаваемом сборнике, несомненно заинтересует научных работников, специалистов в области гидрологии, аспирантов и студентов-гидрологов.

*В память о тех, кто нас учил и
создавал наш институт и наш
гидрологический факультет*

В 2004 году исполняется 100 лет бывшим сотрудникам ЛГМИ-РГГМУ, вклад которых в деле становления института-университета, в развитие гидрологического факультета и в подготовке специалистов-гидрологов для страны огромен.

Коллектив гидрологического факультета университета всегда помнит о вкладе выдающихся педагогов и ученых в развитие института и считает своим долгом отметить их многолетнюю работу и основные этапы их жизни в связи со 100-летием со дня их рождения. Это Виктор Иванович Полтавцев, Павел Николаевич Морозов, Борис Павлович Панов, Сергей Викторович Шмидт.

Виктор Иванович Полтавцев

Кандидат технических наук, доцент, ректор нашего института с 1946 по 1952 год.

Виктор Иванович Полтавцев является одним из основателей системы гидрометеорологического образования в нашей стране.

Жизненный путь его неразрывно связан с судьбой нашей Родины. Это и армейская закалка, комсомольская юность, но самое

главное – беззаветная преданность своей стране на всех крутых поворотах истории. Его жизнь – это твердость убеждений и полное соответствие своей деятельности этим убеждениям.



Как педагог Виктор Иванович являлся образцом отношения к учебным делам. Он великолепный лектор, многие помнят его отточенные фразы лекционного курса по гидравлике. Его справедливые требования на экзаменах никогда не вызывали обид. Все было объективно.

Большое внимание Виктор Иванович уделял базе практи-

ки, понимая, что наши специалисты не могут быть полноценными без специальных практических навыков.

В 1957 году по договоренности с руководством ЛГУ был произведен обмен помещениями и общежитиями института с университетом. Мы получили больший по размеру корпус, опять же на берегу р. Невы, и общежитие на ул. Стахановцев 17. Это очень положительный факт, показывающий дальновидность Виктора Ивановича, который как бы предвидел необходимость стране специалистов гидрологов. В новом корпусе были условия и их использовали в строительстве практически новых гидравлических и других лабораторий. Лаборатории служили и служат не только для учебных целей, но и для выполнения научных исследований, которые легли в основу многих диссертационных работ и в настоящее время.

Виктор Иванович Полтавцев всю свою сознательную жизнь, какие бы посты он ни занимал, отдавал делу подготовки специалистов в области гидрометеорологии. Многие его ученики благодарны ему за те знания, которые он дал им и научил практическому их применению.

Павел Николаевич Морозов

Кандидат геолого-минералогических наук, доцент. Ректор института с 1952 по 1963 год, одновременно он и заведующий кафедрой гидрогеологии. Этот человек является одним из основателей системы образования гидрометеорологического направления в нашей стране. Его жизненные этапы также связаны с судьбой нашей страны, с ее историческими вехами. При его непосредственном участии прошел переезд ЛГМИ в новое здание на Малоохтинском 98, и в общежитие на Стахановцев 17. При его поддержке создавались на новом месте лаборатории, которые функционируют до сих пор. Учебные и производственные практики закрепляли получен-



ные знания студентов и помогали многим из них найти свое место в жизни страны.

Руководя кафедрой гидрогеологии, Павел Николаевич сформировал коллектив единомышленников, преподавателей энтузиастов учебного процесса. Их роль в становлении кафедры и факультета велика.

Будучи ректором, Павел Николаевич никогда не отказывал в приеме любому сотруднику института и студенту. К нему всегда шли со своими проблемами, и он помогал их решить. Его участие в становлении базы практики неосценимо. И многие это помнят. Дисциплины его кафедры существуют в учебном плане до сих пор и интерес к ним не ослабевает, а полученные знания всегда находят практический выход. Многие его выпускники с гордостью могут сказать, что они учились у Павла Николаевича,

Борис Павлович Панов

Доктор географических наук, профессор. Его жизненный путь как специалиста географа начался после окончания географического факультета ЛГУ. В течение ряда лет он сотрудник ГТИ, а затем ЛГУ.

Направление деятельности Б.П. Панова многогранно, он активный участник многих экспедиционных исследований в Средней Азии, Забайкалье, Монголии, Казахстане, что помогло ему в становлении как известного специалиста-географа.

Борис Павлович участник Великой Отечественной войны, он находился на фронте с 1941 по 1945 год. После окончания войны, он сотрудник ГТИ, занимается научными разработками в области географии, гидрологии, его исследования в этом направлении широко известны и внесли вклад в развитие гидрологии. С 1947 года до конца своей жизни он работает на кафедре гидрологии суши ЛГМИ, где прошел путь от простого преподавателя до профессора кафедры, декана гидрологического факультета.



Роль Бориса Павловича в учебном процессе факультета его развитии, неоспорима. Им написаны учебники, учебные пособия, которые по настоящее время не потеряли своего значения. Основное направление его научно-педагогической работы — физическая география, закономерности строения речной сети, зимний режим рек и др. Его энциклопедические знания по гидрологии поражали слушателей, студенты с интересом воспринимали его рассказы о экспедиционных работах, это не только ученый, но и практик-исследователь. Многие его ученики продолжают славные традиции российских гидрологов.

Сергей Викторович Шмидт

Кандидат технических наук, доцент. Много лет проработал заместителем декана гидрофака. До прихода в ЛГМИ Сергей Викторович прошел большую жизненную школу как инженер-изыскатель Ленгидропроекта. Работа изыскателя позволила ему найти себя в стенах ЛГМИ как преподавателя-практика, прекрасно владеющего опытом изыскательской работы и умением передать её студентам-гидрологам. Сергей Викторович, как заместитель декана гидрофака, был душой студенческого коллектива. Он всегда был готов придти на помощь, ответить на любой вопрос и помочь решить проблему студента.

Его большую организационную работу по формированию студенческого коллектива, спортивной жизни института помнят до сих пор. Часто успех нашей сборной (женской) по баскетболу, а это I место среди ВУЗов СССР, во многом зависел от жизненной позиции Сергея Викторовича, его отношения к членам сборной. И это не забывается. А сколько сил и энергии Сергей Викторович вложил в учебную базу ЛГМИ, в проведение учебных и производственных практик.



Все это было, и забыть это просто нельзя. Все выпускники, которые имели какие-то контакты с Сергеем Викторовичем, на всю жизнь запомнили этого жизнелюбивого, справедливого и душевного человека. Человека с большой буквы.

Его учебник «Водно-технические изыскания» до сих пор используется в учебном процессе.

Итак, это наши юбиляры, которым в 2004 году исполнилось бы 100 лет! Они ушли из жизни раньше, но их дела, их жизненная позиция говорит о многом, и есть что вспомнить, и есть чему учиться. Жизнь наших нынешних ведущих преподавателей тому пример и молодое поколение, не будучи знакомо с В.И. Полтавцевым, П.Н. Морозовым, Б.П. Пановым, С.В. Шмидтом, должно знать, что они были в нашем институте и до сих пор для многих являются образцом преподавателей.

Мы гордимся, что знали их, учились у них и память наша сохранит их на всю оставшуюся жизнь. Спасибо, что они были

*Орлов В.Г.
выпускник 1957 года,
декан заочного факультета,
профессор кафедры гидрологии суши*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СИБИРСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ НА ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ В НИЖНИХ БЬЕФАХ ГИДРОУЗЛОВ

Результатом регулирования стока водохранилищами гидротехнических установок является снижение максимальных естественных расходов (уровней) воды в период половодья и резкое увеличение меженных расходов воды, особенно в зимний период. Наблюдаемое изменение водного режима и соответственно теплового потока приводит к изменению ледотермического режима реки на протяжении нижнего бьефа, а именно сроков вскрытия и замерзания реки, толщины льда, продолжительности ледостава. Это негативно сказывается на жителей прибрежных районов, так как нарушаются ледовые переправы, а за счет увеличения влажности воздуха активизируются острые респираторные заболевания. Поэтому при проектировании и эксплуатации водохранилищ гидроузлов чрезвычайно важно знать степень воздействия водохранилищ на водный и ледотермический режим реки и на каком удалении от гидроузла выявленное влияние затухает.

Данная проблема рассмотрена на примере каскада водохранилищ на р. Ангаре и водохранилища Вилюйской ГЭС I, II на р. Вилюй. В настоящее время на р. Ангаре действуют Иркутское, Братское и Усть-Илимское водохранилища. Основные показатели их приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры Ангарского каскада водохранилищ

Водохранилище	Год ввода в эксплуатацию	Годовой сток, $\bar{W}_r$ км ³	Полезный объем, $V_{\text{полез}}$ км ³	$\beta = V_{\text{полез}} / \bar{W}_r$
Иркутское	1958	63,7	46,4	0,73
Братское	1966	91,3	48,2	—
Усть-Илимское	1979	101,6	2,8	—
Итого		101,6	97,4	0,96

Вилюйский гидроузел введен в эксплуатацию в 1970 году. Контролируемый годовой сток в створе гидроузла составляет 20,5 км³, а полезный объем водохранилища 22,4 км³, т. е.

$$\beta = V_{\text{полез}} / \bar{W}_r = 1,1$$

Обычно необходимые сведения о зарегулированных расходах и уровнях воды на протяжении нижнего бьефа гидроузла получают путем численного решения основных уравнений Сен-Венана. Эти расчеты весьма трудоемки и требуют подробной информации о русле и пойме на значительном удалении от гидроузла, поэтому чаще всего не могут быть применены.

Упрощенные же методы расчета, исключаяющие необходимость морфометрических характеристик русла, разработаны для призматических русел и на реках с пойменными участками могут привести к значительным погрешностям. При этом, использование этих методов не позволяет дать оценку изменения ледотермического режима на протяжении нижнего бьефа.

Для решения поставленной задачи был использован следующий прием, применяемый в практике водохозяйственного проектирования. Из длительного ряда наблюдений за стоком в створе гидроузла выбираются два периода – до строительства гидроузла, т.е. бытовой, и после строительства гидроузла, т.е. эксплуатационный, с близкими по величине параметрами годового стока. При этом, годы первоначального наполнения водохранилищ исключаются. Эксплуатационный период соответствует совместной работе всех водохранилищ. Расчетный бытовой период для Ангары принят с 1936 по 1955 год включительно, а эксплуатационный – с 1978 по 1988 год. Для Вилюя эти периоды приняты соответственно с 1948 по 1966 и с 1970 по 1987 годы. Учитывая, что количественная оценка изменения водного и ледотермического режима производилась путем сравнения осредненных данных по периодам, полученные выводы могут быть вполне достоверными.

Естественный режим стока любой реки имеет отпечаток определенной зарегулированности, оцениваемый коэффициентом ϕ , численно равный отношению базовой площади кривой продолжительности среднемесячных расходов воды к площади за год. С помощью водохранилищ за счет перераспределения стока из половодья на межень степень зарегулированности, т.е. ϕ , должна повышаться. Для оценки величины изменения ϕ на протяжении нижних бьефов рассчитаны и построены кривые продолжительности среднемесячных уровней воды, что вызвано отсутствием стоковых дан-

ных. Но так как мы оцениваем не абсолютное значение ϕ , а только его приращение, данный прием вполне допустим.

Изменение гидрологического режима под воздействием каскада водохранилищ на р.Ангаре дано в табл.2.

Анализ данных таблицы показывает следующее.

Среднемесячные уровни воды у с.Кежма снизились в среднем за теплый период до 57 см или на 58% по отношению к естественным. По мере удаления от створа Усть-Илимской ГЭС это влияние затухает и у с.Рыбное эти цифры снижаются соответственно до 29 см или 28%. Уровни воды в среднем за холодный период резко увеличиваются до 99 см или 91% у с.Кежмы. У с. Рыбное это повышение незначительно и составляет 35 см или 28%.

Коэффициенты ϕ в условиях регулирования стока водохранилищами не повышаются, а снижаются – у Кежмы на 0,17 и далее на 0,06 – 0,07. Это вполне оправдано, так как за счет снижения половодных расходов и резкого увеличения зимних расходов (уровней) воды идет разбалансирование достаточно высокой естественной зарегулированности стока озерной реки ($\phi_{ест.} = 0,7 - 0,8$).

Таблица 2

Определение величин изменений гидрологических характеристик в расчетных створах после создания каскада водохранилищ на р.Ангаре (по отношению к бытовым условиям)

Характеристика	Створы		
	Кежма	Богучаны	Рыбное
Расстояние от гидроузла Усть-Илимской ГЭС, км	181	491	606
Расчетный период:			
– до строительства каскада водохранилищ	1936 – 1955	1936 – 1951, 1953 – 1955	1936 – 1948, 1956
– после строительства каскада водохранилищ	1978 – 1988	1978 – 1988	1978 – 1988
Изменение уровня воды, см (%) / период :			
– за теплый период (V–VIII)	–57 (58)	–46 (43)	–29 (28)
– за холодный период (XII–III)	99 (91)	114 (75)	35 (28)
Изменение ϕ , $\Delta\phi$ (%)	–0,17 (21)	–0,07 (10)	–0,06 (8)
Изменение продолжительности ледостава, дней (%) / период	2 (1)	11 (6)	23 (13)
Изменение толщины льда, см (%) / период	–2 (3)	0	–18 (28)
Изменение температуры воды в теплый период (V–X), °C(%) / период	–0,4 (4)	–2,1 (18)	–2,2 (16)

Толщина льда практически не изменилась за исключением с. Рыбное, где она снизилась в среднем за зимний период на 18 см, что требует дополнительных исследований.

Средняя температура воды теплого периода снизилась в пределах 2°C за счет снижения расходов воды.

За счет позднего очищения реки ото льда весной и более позднего установления ледостава осенью продолжительность ледостава практически не изменилась за исключением с. Рыбное.

Если отбросить некоторые аномалии в с. Рыбное можно утверждать, что существенное влияние ангарских водохранилищ на гидрологический режим свободного участка р.Ангара будет наблюдаться в пределах 600 км от створа Усть-Илимской ГЭС.

Величины изменений гидрологических характеристик р. Вилюй в расчетных створах после создания Вилюйского водохранилища в табл. 3.

Таблица 3

Определение величины изменений гидрологических характеристик р.Вилюй в расчетных створах после создания Вилюйского водохранилища (по отношению к бытовым условиям)

Характеристика	Створы			
	Сюльдюкар	Вилючан	Сунтар	Верхне-Вилюйск
Расстояние от гидроузла, км	194	399	603	908
Расчетный период:				
– до строительства водохранилища	1948–1966	1948–1966	1948–1966	1948–1966
– после строительства водохранилища	1970–1987	1970–1987	1970–1987	1970–1987
Изменение уровня воды, см (%) / период :				
– за теплый период (V–VI)*	–250 (40)	–152 (26)	–248 (43)	–74 (13)
– за холодный период (XII–III)**	356 (456)	283 (250)	264 (360)	178 (220)
Изменение ϕ , $\Delta\phi$ (%)	0,22 (34)	0,16 (22)	0,14 (21)	0,15 (23)
Изменение продолжительности ледостава, дней (%) / период	–14 (7)	–16 (7)	–6 (3)	–10 (5)
Изменение толщины льда, см (%) / период	–10 (12)	–8 (9)	–15 (22)	–16 (17)
Изменение температуры воды в теплый период (V–X), °C(%) / период	–2,21 (18)	0,2 (2)	0,5 (4)	1,0 (8)

* – период наполнения водохранилища

** – период прохождения максимума электрической нагрузки

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Среднемесячные уровни воды у п. Сюльдюкар в мае–июне снизились по отношению к естественным до 40%, а в период с декабря по март увеличились в 4,5 раза. По мере удаления от створа ГЭС влияние водохранилища будет затухать. Так у с.Верхне-Виллойск в 900 км от ГЭС срезка уровней в мае–июне составляет всего 13%, а уровни воды в период с декабря по март увеличиваются только в 2,2 раза.

Степень влияния водохранилища на режим уровней нижнего бьефа отражает и коэффициент ϕ . В зарегулированных условиях он возрастает по отношению к естественным условиям на 0,22 или 34% в Сюльдюкаре. В Верхне-Виллойске (900 км от ГЭС) это приращение ϕ снижается до 0,15 или 23%.

2. Изменение температуры воды отмечается только на участке в 200 км. Ниже 200 км от ГЭС изменение температуры воды находится в пределах точности измерения.

3. Некоторое снижение продолжительности ледостава (до 16 суток по отношению к естественным условиям) отмечается на участке до 400 км. В остальных пунктах (600 км и далее от ГЭС) эти изменения не существенны.

При проектировании Виллюйского гидроузла с водохранилищем глубокого многолетнего регулирования стока давался прогноз, что влияние его на гидрологический режим нижнего бьефа будет прослеживаться только до устья р.Виллюй.

Выявление возможных количественных изменений гидрологических характеристик р. Лены проведено в трех расчетных створах: Жигаиск (1789 км от ГЭС), Джарджан (2031 км от ГЭС) и Кюсюр (2332 км от ГЭС или 211 км от устья р. Лены). Бытовой и зарегулированный периоды приняты те же, что и для р. Виллюй. Анализ гидрологических характеристик на р.Лене показал, что все изменения характеристик находятся в пределах точности их расчетов, а следовательно Виллюйское водохранилище практически не оказывает влияния на гидрологический режим р.Лены.

Литература

1. Арсеньев Г.С. Основы управления водными ресурсами водохранилищ. Учебное пособие.– СПб: Изд. РРГМУ, 2003– 78 с.

СОЦИАЛЬНЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОПУСКА ПОЛОВОДИЙ И ПАВОДКОВ ЧЕРЕЗ САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ГИДРОУЗЕЛ

Основные сооружения Саяно-Шушенского гидроузла отнесены к I классу капитальности и в соответствии со СНиПом 11-50-74 для него вероятность превышения максимальных расходов принята для поверочного расчетного случая – 0,01% с гарантийной поправкой (г.п.), а для основного расчетного случая – 0,1%.

Пропуск воды через гидроузел обеспечивается агрегатами ГЭС и эксплуатационным водосбросом. Пропускная способность всех гидроагрегатов составляет 3600 м³/с при установленной мощности станции 6400 МВт, а эксплуатационного водосброса при отметке НПУ 540,0 м – 13000 м³/с. Уровень форсировки при пропуске поверочного случая составил 544.5 м для половодья, для дождевых паводков – 543.4 м. Расходы воды вероятностью превышения 0,1% пропускаются практически без форсировки. Сбросные расходы воды при пропуске стока вероятностью превышения 0,01% с г. п. составили соответственно для весеннего половодья – 15900 м³/с и для дождевых паводков – 9700 м³/с, вероятностью превышения 0,1% – 12100 м³/с и 9700 м³/с.

В проектном режиме Саяно-Шушенская ГЭС начала работать с 1990 г.

Уже в первые годы эксплуатации Саяно-Шушенской ГЭС был выявлен ряд проблем при пропуске максимального стока:

1. Максимальные уровни в нижнем бьефе гидроузла оказались выше проектных, поэтому при пропуске половодий и паводков вероятностью превышения 0,01% с г. п. сбросные расходы воды ограничиваются 13300 м³/с по условиям неподтопления вентиляционной системы здания Саяно-Шушенской ГЭС. В связи с нереализованностью проекта защиты поселка Черемушки в нижнем бьефе сбросной расход воды вероятностью превышения 0,1% ограничивается величиной 7000 м³/с.

2. Недостаточность пропускной способности линий электропередач привела к ограничению выдаваемой мощности Саяно-Шушенской ГЭС до 4000 МВт вместо 6400 МВт.

3. Были также выявлены негативные процессы в системе “плотина – основание”. Следствием этого стало изменение статической схемы работы плотины и увеличение фильтрации.

4. Еще до завершения строительства, в 1985 г., при пропуске паводка с расходом воды намного меньше расчетного – $4500 \text{ м}^3/\text{с}$, произошло разрушение бетонных плит водобойного колодца. Опыт его эксплуатации после ремонта показал, что предельным для водобойного колодца является величина расхода воды $5000 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для решения первых трех проблем был разработан диспетчерский график с созданием резервных емкостей, необходимых для принятия водохранилищем расчетных паводков июля – августа вероятностью превышения $0,01\%$ с г. п. и непревышением отметки водохранилища – $540,0 \text{ м}$. Сбросные расходы воды при этом ограничивались величиной $13300 \text{ м}^3/\text{с}$, а при пропуске половодий и паводков вероятностью превышения $0,1\%$ – $7000 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для решения проблем связанных с водобойным колодцем было предложено проектирование дополнительного берегового водосброса на Саяно-Шушенской ГЭС, который улучшит ситуацию с пропуском максимального стока через водосбросные сооружения Саяно-Шушенской ГЭС.

В таблице 1 приведены сопоставимые результаты пропуска половодий и паводков при одиночной работе эксплуатационного водосброса и совместной его работе с береговым водосбросом. Была подсчитана продолжительность работы эксплуатационного водосброса различными расходами в двух вариантах: при его одиночной и совместной работе с береговым водосбросом.

Выполненные расчеты позволяют сделать следующие выводы:

1. При пропуске максимального стока вероятностью превышения $0,01\%$ с г. п. максимальный расход эксплуатационного водосброса уменьшился с $11200 \text{ м}^3/\text{с}$ в половодье и паводок июля соответственно до $7400 \text{ м}^3/\text{с}$ и $7130 \text{ м}^3/\text{с}$.

2. Для всех обеспеченностей резко уменьшилась работа расходами воды $4900 \text{ м}^3/\text{с}$, максимальное уменьшение составило 18 дней в паводок июля вероятностью превышения $0,01\%$ с гарантийной поправкой.

3. Увеличилась продолжительность работы водосброса расходами воды менее $4000 \text{ м}^3/\text{с}$ для всех обеспеченностей.

Таблица 1

**Результаты пропуска половодий и паводков
через Саяно-Шушенский гидроузел**

Вероятность превышения, %	Максимальные расходы воды, м³/с						Максимальный уровень водохранилища, м
	Естественный приток	Сбросные					
		нижний бьеф	ГЭС	Водосбросы			
				Эксплуатационный	Береговой	сумма	
Весеннее половодье (1.05 – 30.06)							
Работа эксплуатационного водосброса							
0,01 с г.п.	24700	13300	2100	11200			538,8
0,1	17600	7000	2100	4900			535,6
Совместная работа эксплуатационного и берегового водосброса							
0,01 с г.п.	24700	13300	2100	7400	3800	11200	538,8
0,1	17600	7000	2100	2260	2640	4900	535,6
Дождевой паводок – июль							
Работа эксплуатационного водосброса							
0,01 с г.п.	15700	13300	2100	11200			539,5
0,1	11300	7000	2100	4900			537,6
Совместная работа эксплуатационного и берегового водосброса							
0,01 с г.п.	15700	13300	2100	7130	4070	11200	539,5
0,1	11300	7000	2100	1530	3370	4900	537,6

Таким образом, ввод берегового водосброса позволит снизить работу эксплуатационного водосброса расходами воды более 4900 м³/с в два раза в период пропуска паводков вероятностью превышения 0.01% с г.п. и исключить его работу подобными расходами воды в других расчетных случаях. Это позволит эксплуатировать водобойный колодец в "щадающем" режиме без использования критических для его сохранности расходов воды (> 4900 м³/с).

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ПРОПУСКА РАСЧЕТНЫХ Половодий и Паводков ЧЕРЕЗ КАСКАД ЕНИСЕЙСКИХ ГЭС

На реках с каскадным расположением гидроузлов расчетный максимальный расход воды проектируемого гидроузла должен определяться с учетом класса его постоянных гидротехнических сооружений. Во всех случаях, независимо от класса, сооружений гидроузлов, расположенных в каскаде, пропуск расхода воды основного расчетного случая не должен приводить к нарушению нормальной эксплуатации основных гидротехнических сооружений ниже расположенных гидроузлов.

При проведении расчетов пропуска половодий и паводков через каскад гидроузлов с регулирующими водохранилищами необходимо предварительно рассчитать и построить гидрографы притока к верхнему гидроузлу каскада и боковой приточности между гидроузлами. Расчетный приток к нижерасположенному гидроузлу в каскаде определяется как сумма расходов воды, сбрасываемых в нижний бьеф вышерасположенного гидроузла, и боковой приточности с водосбора между ними. При этом вероятность превышения максимальных расходов и объемов притока к нижерасположенному гидроузлу должна соответствовать нормативной вероятности.

Методические трудности построения гидрографа притока к гидроузлам и участкам реки, расположенным выше рассматриваемого створа, состоят в неопределенности обеспеченности (вероятности превышения) максимальных расходов воды и объемов стока приточности с участков водосбора, формирующих половодный или паводочный сток нормируемой вероятности превышения в замыкающем створе.

В настоящее время в проектной практике используются два способа определения проектного притока к створам проектируемых гидроузлов в каскаде.

1. Метод «остаточного объема», используемый в каскаде из двух гидроузлов, сооружения которых отнесены к одному и тому же классу. Метод сводится к реализации уравнения

$$W_{2p} = W_{1p} + W_{6.пр p (1-2)},$$

где W_{2p} и W_{1p} – объемы стока за весенне-дождевой период в створах гидроузлов соответственно нижнего (2) и верхнего (1) нормативной вероятности превышения p ;

$W_{6.пр p (1-2)}$ – объем боковой приточности на участке 1 – 2 за тот же период неизвестной вероятности превышения $p (1 - 2)$.

Зная W_{2p} и W_{1p} , определяют $W_{6.пр p (1-2)}$ и по кривой распределения объемов стока боковой приточности (параметры которой предварительно рассчитаны) снимают $p(1-2)$, соответствующую $W_{6.пр}$.

Обеспеченность максимальных расходов воды весеннего половодья и дождевых паводков принимается равной обеспеченности объемов стока за весенне-дождевой период.

Порядок расчета следующий:

1) По полному ряду наблюдений за стоком определяют статистические параметры (среднее значение, C_v , C_s/C_v) максимальных расходов весеннего половодья и дождевых паводков, а также объемов стока за весенне-дождевой период в створах верхнего (1) и нижнего (2) гидроузлов и боковой приточности между ними.

2) По разности объемов стока вероятностью превышения 0,01 % с гарантийной поправкой (г. п.) (для первого класса сооружений) в створах 2 и 1 определяют так называемый *остаточный объем* и по кривой распределения объемов бокового притока – соответствующую ему расчетную обеспеченность (вероятность).

3) По нескольким, наиболее неблагоприятным моделям весенних половодий и дождевых паводков известными способами рассчитывают и строят гидрографы притока вероятностью превышения 0,01 % с г. п. к створу верхнего гидроузла (1) и боковой приточности рассчитанной вероятности превышения.

4) Трансформируя гидрографы весеннего половодья и дождевого паводка водохранилищем верхнего гидроузла, получают соответствующие гидрографы сбросных расходов в его нижнем бьефе.

5) Суммируя гидрографы сбросных расходов весеннего половодья и дождевых паводков с соответствующими гидрографами боковой приточности, получают гидрографы притока к нижнему гидроузлу вероятностью 0,01 % с г. п.

6) Трансформируя последние водохранилищем в створе нижнего гидроузла, получают гидрографы сбросных расходов воды при пропуске расчетных расходов весеннего половодья и дождевого паводка в замыкающем створе каскада. В качестве расчетных принимаются наибольшие значения максимальных уровней водохранилища и максимальных сбросных расходов.

2. Метод, разработанный специалистами Гидропроекта и использованный для определения проектного притока к створу Средне-Енисейской ГЭС на р. Енисее в условиях регулирования стока р. Ангары Иркутским, Братским, Усть-Илимским и Богучанским водохранилищами, а стока Енисея – Красноярским водохранилищем. Построение гидрографов для всех участков каскада выполнялось по моделям многоводных половодий реальных лет – общих для всех ступеней с приведением к объему стока расчетной обеспеченности в замыкающем створе.

Для примера ниже приведены расчеты вероятности превышения составляющих суммарного притока к замыкающему гидроузлу в каскаде на примере Енисейского каскада гидроэнергетических установок.

В состав Енисейского каскада входят (сверху вниз) Саяно-Шушенский гидроузел (в дальнейшем СШГЭС) с водохранилищем годичного регулирования стока; Майнский, осуществляющий суточное регулирование и Красноярский гидроузел (в дальнейшем КГЭС) с водохранилищем многолетнего регулирования стока. Регулирование половодий на р. Енисей производится Саяно-Шушенским и Красноярским водохранилищами.

Приток к створу КГЭС складывается из суммы сбросных расходов в створе СШГЭС и бокового притока с участка между ними. Гидроузлы на р. Енисей отнесены к I классу сооружений, поэтому вероятность превышения максимальных расходов и объемов половодья для поверочного случая принята 0,01 % с гарантийной поправкой (г. п.). Остается неясной вероятность превышения расходов к объемам половодья боковой приточности, которая в сумме со сбросными расходами СШГЭС обеспеченностью 0,01 % с г. п. давала бы расходы и объемы половодья в створе КГЭС той же обеспеченности.

Математически, исходя из теории вероятности, казалось бы, что, если при определении притока ко второй ступени каскада при-

нять одинаковую вероятность превышения притока к верхнему гидроузлу и боковой приточности между первым и вторым гидроузлами, например 0,01 %, то вероятность превышения суммарного притока ко второму гидроузлу может составить 0,00001 %. Это справедливо при отсутствии корреляционной связи между составляющими суммарного притока к замыкающему створу.

Для реализации двух вышеуказанных способов определения вероятности превышения расходов и объемов половодья боковой приточности по полному ряду наблюдений за стоком р. Енисей были рассчитаны статистические параметры (среднее значение, C_v , C_s/C_v) объемов стока за весенне-дождевой период (май – сентябрь) в створах СШГЭС и КГЭС, а также боковой приточности между ними. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные статистические характеристики объемов стока за весенне-дождевой период (n – период наблюдений; W – средний за период объем стока, км³; W_p – максимальный объем вероятностью превышения, км³)

Створ	n	W	C_v	C_s/C_v	W_p		
					0,01 % г.п.	0,01 %	0,1 %
СШГЭС	1903/04	37,9	0,16	2	67,6	65,2	59,5
	1999/00						
Боковая приточность	1903/04	32,1	0,17	2	59,06	56,8	51,7
	1990/91						
КГЭС	1903/04	69,2	0,16	2	124,4	119,7	108,6
	1990/91						

По разности объемов стока вероятностью превышения 0,01 % с г.п. в створах КГЭС и СШГЭС определен остаточный объем (боковой приточности), равный 56,8 км³.

По табл. 1 расчетная обеспеченность его соответствует 0,01 %.

Обеспеченность максимальных расходов воды весеннего половодья принимается равной обеспеченности объемов стока за весенне-дождевой период.

Для расчета вероятности превышения составляющих суммарный приток к створу Красноярского гидроузла вторым способом отбираем из ряда наблюдений модели самых многоводных лет – в данном случае 1936, 1941 и 1966 годы. Объем гидрографа половодно-дождевого периода в створе Красноярского гидроузла принимаем за 100 % и рассчитываем проценты естественного распределения

стока между его составляющими. Затем объем стока нормируемой обеспеченности в створе Красноярского гидроузла, принимаемый также за 100 %, распределяем между его составляющими исходя из ранее определенного естественного процента распределения.

По табл. 1 определяем для полученных таким способом объемов стока в створах СШГЭС и КГЭС и боковой приточности расчетную их обеспеченность. Результаты проведенного анализа по моделям многоводных лет представлены в табл. 2.

Таблица 2

Распределение вероятностей превышения объемов весенне-дождевого периода между составляющими суммарного притока к створу Красноярского гидроузла по моделям многоводных лет (W – естественный объем, км³ и % его распределения; W_p – величина обеспеченных объемов стока, км³; p – их расчетная обеспеченность, %)

Год	Створ	W	%	W_p	p
1936	СШГЭС	51,9	53,1	66,1	между 0,01 и 0,01 с г.п.
	Боковая приточность	45,8	46,9	58,3	между 0,01 и 0,01 с г.п.
	КГЭС	97,7	100,0	124,4	0,01 с г.п.
1941	СШГЭС	48,9	52,3	65,1	0,01
	Боковая приточность	44,6	47,7	59,3	0,01 с г.п.
	КГЭС	93,5	100,0	124,4	0,01 с г.п.
1966	СШГЭС	54,5	53,4	66,4	между 0,01 и 0,01 с г.п.
	Боковая приточность	47,5	46,6	58,0	между 0,01 и 0,01 с г.п.
	КГЭС	102,0	100,0	124,4	0,01 с г.п.

Анализ таблицы показывает, что вероятность превышения объемов весеннего половодья СШГЭС и боковой приточности к створу КГЭС только в 1941 г. составила соответственно 0,01 и 0,01 с г.п. в остальные многоводные годы больше 0,01 %, но меньше 0,01 % с г.п. С точки зрения безопасности гидротехнических сооружений лучше вероятность превышения объемов весенне-дождевого периода в створе СШГЭС и боковой приточности принять соответствующей в створе КГЭС, т.е. 0,01 % с г.п.

Это вполне возможно, учитывая высокие коэффициенты корреляции между расходами в створе СШГЭС и боковой приточности, боковой приточности и расходами в створе КГЭС, расходами в створе СШГЭС и КГЭС, равными соответственно 0,77; 0,87 и 0,90.

Таким образом, второй способ даст более повышенную вероятность превышения объемов и расходов весенне-дождевого периода для боковой приточности по сравнению с методом «остаточного объема». Делать при этом какие-то окончательные выводы в отно-

шении используемых способов преждевременно. Второй способ требует проверки на более длительном ряду наблюдений за стоком и для большего числа моделей многоводных лет.

Техника дальнейших расчетов простая. По моделям многоводных половодий и действующим нормативам рассчитываем и строим гидрографы половодий в створе СШГЭС и боковой приточности расчетной обеспеченностью 0,01% с г. п. Затем трансформируют построенные гидрографы половодий в створе СШГЭС. Суммируя гидрографы сбросных расходов в створе СШГЭС с гидрографом боковой приточности, получают гидрограф притока к створу КГЭС. Рассчитанные гидрографы притока к створу КГЭС по трем моделям многоводных лет трансформируют по принятым диспетчерским правилам пропуска расчетных половодий. В качестве расчетной принимают ту модель, по которой определяется наибольший форсированный уровень водохранилища и наибольший сбросной расход. В данном примере такой моделью является многоводный 1941 г., отличающийся самым неблагоприятным внутриводоходным распределением стока. Результаты пропуска расчетного половодья через КГЭС приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты пропуска половодья через КГЭС
 (Q_{макс} – максимальный естественный расход воды, м³/с;
 Q_{пр} – максимальный приточный расход воды при работе с СШГЭС, м³/с;
 Q_{сбр} – максимальный сбросной расход воды, м³/с; Q_{гэс} – расход ГЭС, м³/с;
 ΔZ – величина форсировки уровней верхнего бьефа над НПУ – 243 м, м;
 ΔQ – уменьшение максимальных расходов воды, м³/с)

Показатель	Величина
Q _{макс}	45700
Q _{пр}	33400
Q _{сбр}	21600
В том числе Q _{гэс}	7200
ΔZ	1,8
ΔQ _{макс}	24100
ΔQ _{пр}	11800

Вероятность превышения объемов и расходов воды дождевых паводков в створах СШГЭС и боковой приточности принимается также соответствующей в створе КГЭС, т.е. 0,01% с г.п. Пропуск их осуществляется с отметки НПУ при полном раскрытии водосброса или с ограничением максимальных сбросных расходов, если таковые имеются. Значительно уступая по объему половодьям, пропуск

дождевых паводков через гидроузлы СШГЭС и КГЭС производится при меньших по сравнению с половодьем форсированных уровнях водохранилища.

Выводы

Вероятность превышения стока весеннего половодья в каскаде из двух гидроузлов и боковой приточности между ними может быть одинаковой и соответствовать нормируемой в замыкающем створе.

Литература

1. Арсеньев Г.С., Иваненко А.Г. Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты. Учебник. Л.: Гидрометеониздат, 1993. – 272 с.
2. Арсеньев Г.С. Основы управления водными ресурсами водохранилищ. Учебное пособие. СПб: Изд. РГГМУ, 2003. – 78 с.
3. Асарин А.Е., Бестужева К.Н. Водноэнергетические расчеты. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.

УДК 565.536

*Барышников Н.Б. проф., д.г.н.,
Немчинов К.В. асп., Самсонов М.В. студ.*

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭФФЕКТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ НА ТРАНСПОРТИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ РУСЛОВОГО ПОТОКА

При гидротехническом проектировании и строительстве, а так же планировании различных водохозяйственных мероприятий, обязательным условием является наличие исходной информации о стоке наносов. Особенно большое значение информация о наносах имеет при проектировании мостовых переходов, водозаборов и других сооружений. Действительно, по данным различных авторов от 15% до 50% аварий мостовых переходов обусловлено недостаточным учетом расходов наносов и русловых процессов.

Как известно [5, и др.], речные наносы подразделяют на две группы – взвешенные и донные, хотя объективные критерии такого деления фактически отсутствуют. При этом считается, что наносы полученные прибором для отбора проб взвешенных наносов (вакуумный батометр или батометр-бутылка), являются взвешенными, а донным батометром – донными. В тоже время в любой из этих приборов попадают как взвешенные, так и донные наносы.

Ряд исследователей [2, 9 и др.] считают, что наносы следует подразделить на руслоформирующие или русловые и нерусловые, то есть поступающие на формирование поймы. Положительным моментом такого деления является наличие методики расчетов, позволяющей определить крупность фракции, разграничивающей наносы на указанные выше две группы [9]. Эта методика не является строгой и имеет ряд недостатков, но все-таки она позволяет объективно определять какие фракции наносов следует отнести к каждой из двух групп.

На сети гидрометслужбы осуществляются регулярные наблюдения за стоком взвешенных наносов, сведения о которых публиковались в гидрологических ежегодниках. Значительно хуже обстоит дело с донными наносами. Действительно, в 60-х годах на станциях гидрометслужбы были прекращены измерения расходов донных наносов. Это было обусловлено несовершенством методов их измерения, низкой точностью и малой надежностью получаемой информации. Следствием этого явилось большое количество формул для расчетов расходов донных наносов, точнее транспортирующей способности русловых потоков. Большинство методов расчетов основано на зависимости вида: $G = \alpha(V/V_k)^m$. В качестве примера, можно привести формулы, предложенные В.Н. Гончаровым

$$G = 1,2(1 + \varphi) V_k \kappa (V/V_k)^{4,33}, \quad (1)$$

Г.И. Шамовым

$$G = 0,95 \sqrt{\kappa} V^3 / V_k^3 (V - V_k) (\kappa/h)^{0,25}, \quad (2)$$

И.И. Леви

$$G = 0,002 (V/\sqrt{g\kappa})^3 (V - V_k) (\kappa/h)^{0,25}, \quad (3)$$

К.В. Гришаниным

$$G = 0,015 (V/V_k)^3 \kappa (V - V_k), \quad (4)$$

где G – расход донных наносов на единицу ширины потока;

V и V_k – средняя и средняя критическая скорости руслового потока;

κ – средняя крупность;

φ – параметр турбулентности наносов;

m – показатель степени.

Как вытекает из анализа формул, приведенных выше и других формул такого же вида, транспортирующая способность в основном зависит от относительной средней скорости потока. Неоднократные

попытки уточнить величину показателя степени m , предпринимавшиеся различными авторами, позволили рекомендовать ее равной 3–4. По-видимому, на его величину существенное влияние оказывает состояние потока, характеризующее числом Фруда, крупность перемещаемых наносов и другие факторы.

Интересные результаты исследований доложил на III Всесоюзном гидрологическом съезде В.Е.Любимов. Используя данные натурных измерений донных наносов, перемещавшихся в безгрядной и донногрядной фазах, он выполнил расчеты по формулам (1) – (3) и пришел к следующим выводам:

- расчет расходов наносов по этим формулам иногда дает близкие к натурным данным результаты. При этом формула Шамова преуменьшает расход наносов. Формулы Гончарова и Леви для наносов крупностью $0,20 \text{ мм} < k < 0,40 \text{ мм}$ дают вполне удовлетворительные результаты, но по формуле Леви нулевой расход наносов при малых скоростях получается тогда, когда уже наблюдается перемещение наносов, что объясняется несовершенством формулы Леви для расчета критических скоростей;

- для песков крупностью $k < 0,15 \text{ мм}$ формулы Шамова и Леви мало пригодны, а формула Гончарова дает преувеличение.

Формула Гришанина была предложена ее автором значительно позднее и практически никем не проверялась и не оценивалась. В тоже время оценка формул (1) – (4), выполненная в РГГМУ, показала их недостаточную эффективность.

Учитывая, что основной сток наносов происходит в периоды паводков и половодий, необходимо оценить влияние эффекта взаимодействия потоков на транспортирующую способность руслового потока. Рядом авторов [4, 10 и др.] разработаны типизации процессов взаимодействия потоков, в основу которых положено взаимное расположение динамических осей взаимодействующих потоков. В частности, Н.Б. Барышниковым выделено пять типов (рис. 1) для участка расположенного ниже расчетного створа, но для условий стационарной задачи [4]. Для нестационарных условий установлено [4, 6], что при подъеме уровней, когда наблюдается растекание масс руслового потока по пойме, процесс близок ко второму типу взаимодействия потоков (рис.1).

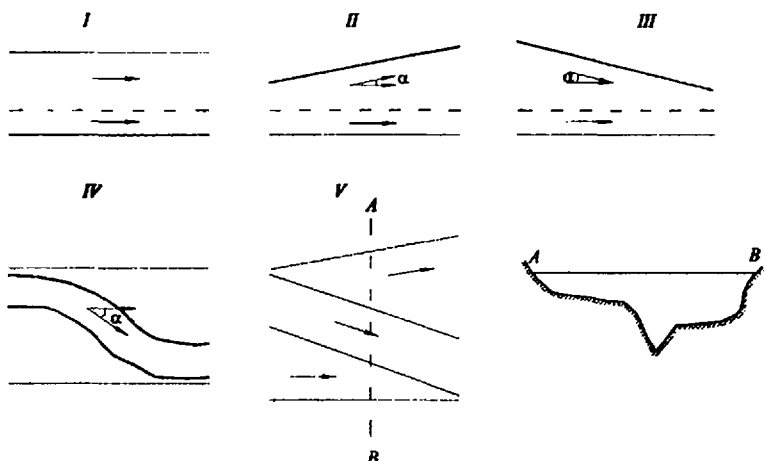


Рис.1. Схема взаимодействия руслового и пойменных потоков

При этом поперечные уклоны водной поверхности направлены от руслового потока к пойменному. На спаде половодья или паводка наблюдается противоположное явление, т.е. массы пойменного потока поступают в русло, тормозя русловой поток. Поперечные уклоны водной поверхности соответственно направлены в сторону руслового потока.

К сожалению, натурные данные по этой проблеме отсутствуют, а лабораторные – крайне ограничены. Исключением является информация специализированной станции в Яжелбицах на реке Полонь, где измерения стока наносов в донногрядовой форме выполняются с помощью специальной аппаратуры. К сожалению, данные этих измерений не публикуются, частично результаты анализа этой информации опубликованы Б.Ф. Снисенко и Ю.М. Корчохой [11].

Помимо стационарных наблюдений, имеются сведения об исследованиях процессов затопления различных пойменных массивов [8, 11 и др.] при пропуске паводков малой обеспеченности. Наиболее детальные данные приведены в работе З.М. Великановой и Н.А. Ярных на примере пойменного массива на р.Оби у г. Барнаула [8], где оси руслового и пойменного потоков пересекались под углом близким к 90° . Благодаря тому, что половодье продолжалось длительное время, русло реки было почти полностью заполнено ру-

словыми наносами и часть их через понижения в прирусловых валах (прорвы) стала поступать на пойму. Наносы откладывались на пойменном массиве в виде конусов выноса, наибольшая длина которых достигала 150–200 м (от бровки), а толщина 1,5 м. Приведенные в работе [8] сведения о крупности наносов позволяют считать, что в верхней части пойменного массива наблюдалось осаждение русловых наносов ($k=0,16-0,24$ мм).

К сожалению, информация о скоростях и глубинах в основном русле в местах интенсивного выноса русловых наносов на пойму не опубликована. Возможно эти измерения в период паводков не производились. Анализ лоцманских карт, которые составляются по данным промеров в меженные периоды, позволил установить, что, как правило, именно в этих местах располагаются перекатные участки. Учитывая, что рядом исследователей [1, 7 и др.] давно установлен факт интенсивного роста отметок дна на большинстве перекатов в периоды подъема половодий и паводков и их снижение на спаде половодья и в меженный период, можно считать, что в этих местах на подъеме половодья наблюдаются интенсивные отложения наносов.

В 1967 г. в РГГМУ под руководством Н.Б. Барышникова [3] были проведены экспериментальные исследования по выявлению влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока. С этой целью в малом гидравлическом лотке с переменным уклоном было смоделировано русло шириной 0,2 м, с поймой шириной 0,2 м и длиной 2,8 м. Глубина русла (до бровки поймы) составляла 0,05 м. Оси русла и поймы на экспериментальной установке были параллельны. Поверхность поймы и дно русла покрыты стеклом, толщиной 4мм.

Эксперименты выполнялись по разработанной в РГГМУ методике, в соответствии с которой измерения выполнялись в русловом потоке изолированном от пойменного тонкостенной стеклянной перегородкой. Расходы наносов при этом измерялись объемным методом, т.е. наносы собирались в специальную емкость, затем высушивались и взвешивались. Одновременно выполнялись измерения расходов и скоростей течения. Расходы воды измерялись как с помощью водослива, так и методом скорость – площадь. Причем расхождение данных измерений этими методами не превышало 3–

5%. Измерения выполнялись по всей амплитуде колебаний уровня, примерно через один см. После получения устойчивой зависимости $G = f(H)$ или $G = f(Q)$ для руслового потока, изолированного от пойменного, стеклянная перегородка снималась и эксперименты производились в том же диапазоне колебания уровней, но при взаимодействии руслового и пойменного потоков.

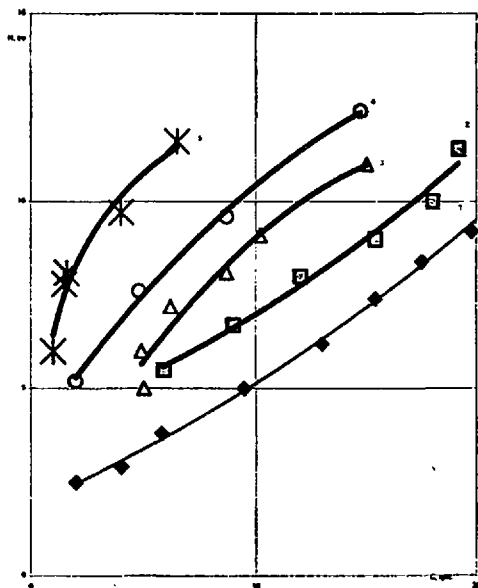


Рис. 2. Зависимость $G=f(H)$

1 – изолированное русло; 2, 3, 4, 5 – русло с поймой шероховатостью k_n соответственно 0,5; 1; 2; и 3 см.

Как видно на рисунке 2, для условий изоляции руслового потока от пойменного получена устойчивая зависимость $G=f(H)$. Аналогичный вид имеет зависимость $G=f(Q)$. В то же время исходные данные полученные при взаимодействии руслового и пойменного потоков после выхода воды на пойму образуют несколько кривых зависимостей $G=f(H)$ и $G=f(Q)$, расположенных левее аналогичных кривых для изолированного русла (рис.2). Причем уменьшение расходов наносов тем больше, чем больше шероховатость поймы при прочих равных условиях (рис.3).

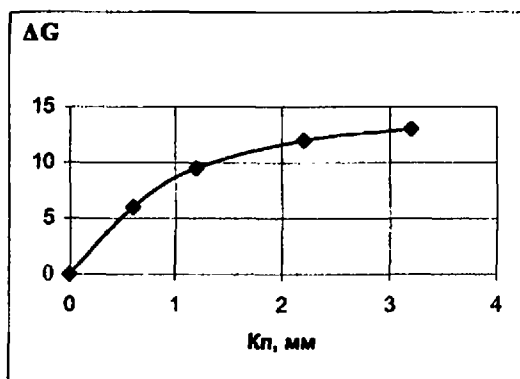


Рис. 3. Зависимость $\Delta G = f(k_p)$

Как видно на рисунке 3, обнаруживается довольно четкая зависимость $\Delta G = f(k_p)$. Причем точке с координатами [0; 0] соответствует величина ΔG для изолированного русла. Величина ΔG определялась, как разность расходов наносов полученных по кривым зависимостей $G = f(H)$ для взаимодействующих потоков и по соответствующей кривой для изолированного русла. На рис. 3 приведены данные полученные при глубине руслового потока равной 10 см. Здесь k_p – шероховатость поймы.

Следует отметить, что приведенные экспериментальные данные являются уникальными и практически нигде подобные эксперименты не выполнялись. В то же время они являются недостаточными, так как выполнялись только при параллельности динамических осей потоков. К тому же размеры лотка явно недостаточны. Режим потока был пространственным и значительно отличался от плоского.

Исходя из этого, в 2003 г. в РГГМУ была предпринята попытка проведения аналогичных экспериментов, но в расширенном диапазоне в большем по размеру лотке с переменным уклоном. Размеры последнего: длина 6,0 м и ширина 0,6 м. Поверхность поймы, шириной 0,35 м и дно русла, шириной 0,25 м, выполнены из стекла, толщиной 4 мм. При этом была применена такая же методика проведения экспериментов, как и в 60-е годы, т.е. эксперименты сначала выполнялись при изоляции руслового и пойменного потоков тонкостенной стеклянной перегородкой, а затем при взаимодействии потоков. Принципиально новым явилось проведение экспериментов

при слиянии руслового и пойменного потоков под различными углами α . Измерения скоростей и других параметров потоков осуществлялось в трех створах расположенных на расстоянии 1,5; 2,5 и 3,5 метра от входного створа.

Прежде, чем перейти к анализу экспериментальных данных необходимо отметить некоторые особенности проведения экспериментов. Так при расчетах гидравлических характеристик русловых потоков их движение обычно принимается – равномерным. Таким образом, уклоны водной поверхности должны быть равны уклонам дна. Однако при прохождении паводков по затопленным поймам, движение руслового потока существенно отличается от равномерного. Следовательно, и уклоны водной поверхности могут существенно отличаться от уклонов дна. При этом характер изменения уклонов водной поверхности находится в прямой зависимости от типа взаимодействия руслового и пойменных потоков.

Это положение имеет большое практическое значение для изучения влияния этого эффекта на пропускную и транспортирующую способности русел при взаимодействии потоков в них с пойменными в лабораторных условиях на различных гидравлических моделях. Обычно при таком моделировании на установках ограниченных размеров исследователи пытаются выполнять измерения при равномерном движении потоков, тем самым резко снижая возможности выявления этого эффекта.

Рассмотрим влияние эффекта взаимодействия потоков при различных его типах на уклоны водной поверхности. Примем за основу типизацию этих эффектов, предложенную Н.Б.Барышниковым и включающую пять таких типов (рис.1).

Первый тип взаимодействия, как уже отмечалось выше, характеризуется движением параллельных разноскоростных потоков. На границе их раздела возникает расположенная вертикально волновая поверхность. При увеличении градиента скоростей волны опрокидываются, от них отделяются вихревые структуры, которые втягиваются в более быстро движущийся русловой поток, тем самым, осуществляя торможение его движения и уменьшая пропускную способность русла. Как известно, торможение руслового потока, в частности, за счет поперечного перемещения вихрей, создает подпор, а, следовательно, и уменьшение уклонов водной поверхности. При дальнейшем увеличении уровней воды за счет уменьшения

градиента скоростей взаимодействующих потоков, влияние эффекта их взаимодействия уменьшается, что сопровождается уменьшением величины подпора руслового потока.

Более четко влияние эффекта взаимодействия потоков отражается при втором и третьем типах взаимодействия потоков. Так при втором типе особенно при больших углах растекания масс руслового потока по пойме в нем наблюдается существенное увеличение скоростей и уклонов водной поверхности. Как показывает анализ натурной информации, при больших углах растекания масс руслового потока по пойме наблюдается резкое и весьма существенное увеличение уклонов водной поверхности. В качестве примера на рисунке 4 приведены кривые зависимости $I = f(H)$ для рек Десны и Пьяны.

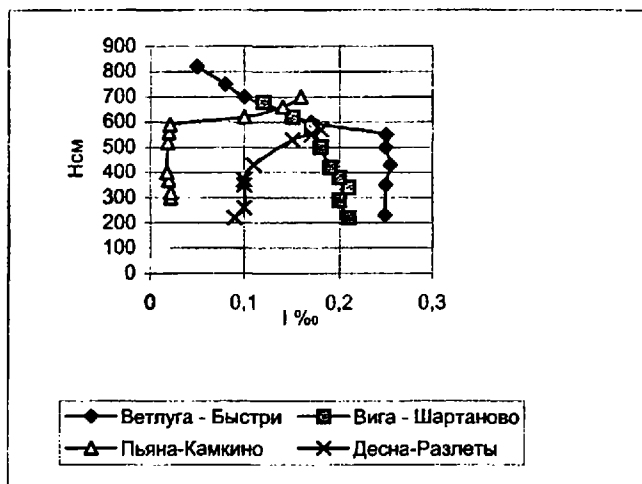


Рис.4. Зависимости $I = f(H)$ для разных типов взаимодействия потоков

Как видно на рисунке, после выхода воды на пойму на р.Пьяне ($H_{\text{вых}} = 590\text{см}$) уклон водной поверхности увеличивается от 0,02 до 0,115 ‰, т.е. примерно в пять раз при увеличении уровней всего на 60–70 см, а затем стабилизируется. На р.Десне после выхода воды на пойму ($H_{\text{вых}} = 340\text{ см}$) уклон водной поверхности увеличивается незначительно и только после затопления бровки прируслового вала ($H = 450\text{см}$) наблюдается его интенсивное увеличение от 0,08 до

0,18 ‰, т.е. на 0,1‰ при увеличении уровня примерно на 140см. Такой характер изменения уклонов водной поверхности является типичным для участков рек, на которых наблюдается второй тип взаимодействия потоков. Интенсивность изменения уклонов водной поверхности при увеличении уровней воды определяется величиной угла α между динамическими осями потоков. Эта закономерность была вскрыта Н.Б.Барышниковым [4], установившим на основе натурных данных зависимость вида $I_p/I_{p,6}=f(h_p/h_{p,6}, \alpha)$.

Как видно на рисунке 5, зависимость довольно четкая. Разброс

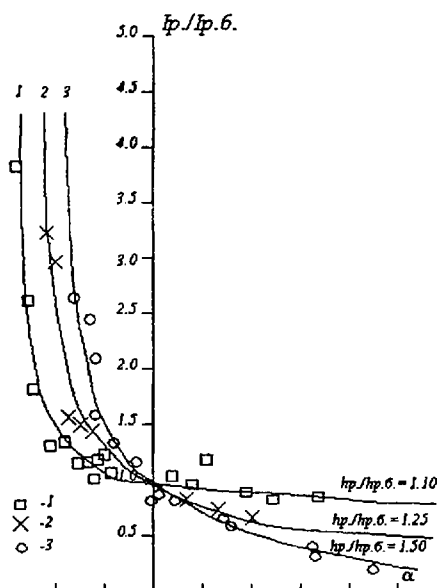


Рис.5 Кривые $I_p/I_{p,6}=f(h_p/h_{p,6}, \alpha)$.

исходной информации в поле координат $[I_p/I_{p,6}, \alpha]$ при постоянных значениях относительных глубин вполне может быть объяснен низкой точностью исходной информации, а также несовершенством рабочей гипотезы, недоучитывающей различные дополнительные факторы. Например, угол α лишь частично отражает особенности морфологического строения поймы. К тому же шероховатость поймы, а точнее ее соотношение с шероховатостью русла в этой зависимости никак не учитывается.

Еще большее значение имеет уклон водной поверхности при третьем типе взаи-

модействия потоков, когда пойменные воды, вторгаясь в русловой поток, тормозят его движение, создавая значительное повышение уровня, т.е. подпор. Как следствие, это приводит к существенному уменьшению средних и местных, и особенно поверхностных скоростей руслового потока.

В конечном итоге величина такого торможения руслового потока находится в прямой зависимости от угла α , под которым пой-

менные воды вторгаются в русло и, как следствие, снижают его пропускную способность. Подпор уровней приводит к существенному уменьшению уклонов водной поверхности. В качестве примера, рассмотрим характер изменения уклонов водной поверхности на реках Вига и Ветлуга, относящихся к Верхневолжскому УГМС, за 1962 и 1966 г.г. Как видно на рисунке 4, где представлены кривые зависимости $I=f(H)$ по этим рекам, в которых процесс взаимодействия руслового и пойменного потоков происходит по третьему типу, после затопления поймы обе кривые существенно отклоняются влево, т.е. в сторону меньших значений уклонов водной поверхности.

На р.Виге уменьшение уклона водной поверхности после выхода воды на пойму ($H=450\text{см}$) продолжается до $H=600\text{см}$ примерно с той же интенсивностью, что и до ее выхода на пойму. Затем, после затопления бровки прируслового вала, интенсивность изменения уклонов водной поверхности значительно возрастает. Так при увеличении уровня на 100см уклон водной поверхности уменьшается примерно на $0,05\text{‰}$, т.е. более чем на 30% , хотя до затопления бровки прируслового вала, уменьшение уклона на 1м увеличения уровня воды составляло $2\text{--}3\%$.

Еще более интенсивное уменьшение уклона водной поверхности наблюдалось на р.Ветлуге. Однако у д.Быстри, где расположен гидроствор, прирусловой вал выражен недостаточно четко и его высота мала. Поэтому существенное уменьшение уклонов водной поверхности наблюдалось сразу же после выхода воды на пойму и составило $0,2\text{‰}$ при увеличении уровней примерно на 260см .

Наиболее четко эта тенденция представлена на графической зависимости $I_r/I_{p,6}=f(h_r/h_{p,6},\alpha)$. Как видно на рисунке 5, наблюдается закономерное уменьшение уклонов водной поверхности при увеличении угла α . На этом графике так же довольно четко прослеживается расхождение кривых зависимостей $I_r/I_{p,6}=f(\alpha)$ при различных значениях относительных глубин. Это свидетельствует о более интенсивном уменьшении уклонов при увеличении глубин или уровней воды.

Анализ более сложных (IV и V) типов взаимодействия руслового и пойменного потоков здесь не выполняется, так как четвертый тип Н.Б.Барышников рекомендует рассматривать как второй или третий в зависимости от характера изменения ширины поймы ниже расчетного створа.

Пятый же тип, является наиболее сложным, недостаточно изученным, тем более, что еще не разработана методика учета инерционности потока.

Таким образом, проведенный анализ, выполненный на основе натурной информации, убедительно доказал, что характер изменения уклонов полностью соответствует типу взаимодействия потоков и может быть использован в качестве дополнительного фактора для определения последнего.

В данной статье приводятся только предварительные результаты экспериментов. На рисунке 6 приведены зависимости $G = f(H)$ как для условий изолированного русла, так и для условий взаимодействия руслового и пойменного потоков при параллельности их динамических осей и их схождении под углом $\alpha = 20^\circ$.

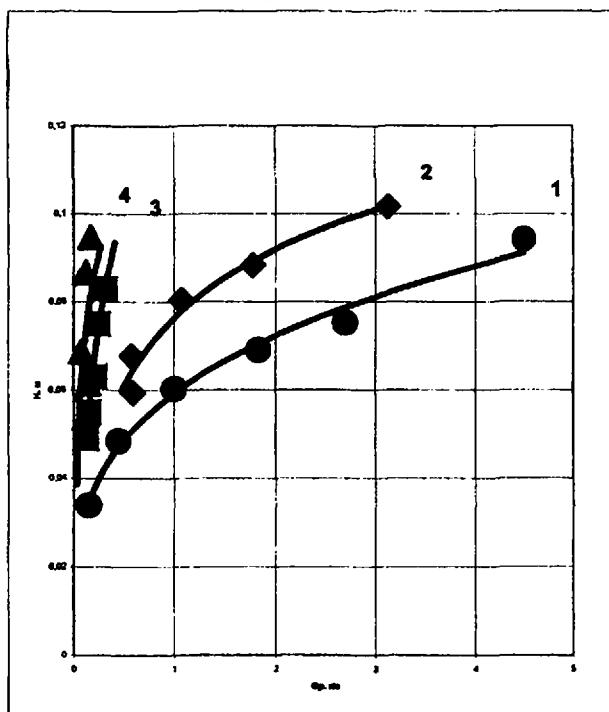


Рис. 6. Зависимость $G = f(H)$

- 1 – изолированное русло; 2 – русло с поймой при параллельности их осей;
3–4 – русло с поймой при сходящихся осях под углом $\alpha = 20^\circ$; 3 – гладкая пойма;
4 – шероховатая пойма.

Как видно на рисунке 6, данные соответствующие взаимодействующим параллельным потокам располагаются левее аналогичных, но для изолированного русла. При этом кривая $G = f(H)$, также как и кривая $G = f(Q)$, располагаются значительно левее кривой для условий изолированного русла. Это, в конечном итоге, подтверждает результаты экспериментов проведенных в 60-е годы на установке меньших размеров. На этом же рисунке приведены данные, полученные при взаимодействии руслового и пойменного потоков по третьему типу (рис.1), когда пойменный поток вторгался в русловой под углом $\alpha = 20^\circ$. Как видно на рис.6, транспортирующая способность потока уменьшается еще более значительно и соответственно кривые $G=f(H)$ и $G=f(Q)$ располагаются значительно левее, аналогичных кривых, соответствующих взаимодействующим потокам, но при параллельности их динамических осей. Аналогичный вид эти зависимости имеют и для других створов, в которых измерялись параметры потоков.

Обращает на себя внимание то, что величина $\Delta G = G_{из} - G_{вз}$ возрастает при увеличении глубин и расходов воды. Здесь $G_{из}$ и $G_{вз}$ – расходы донных наносов руслового потока при его изоляции $G_{из}$ и взаимодействии с пойменным $G_{вз}$ (под углом $\alpha = 20^\circ$).

Полученные результаты, как уже указывалось, являются предварительными, но они в целом подтверждают концепцию о том, что транспортирующая способность руслового потока при его взаимодействии с пойменным находится в прямой зависимости от скорости руслового потока, хотя показатели степени будут различными. В то же время результаты экспериментов 2003г. имеют и существенные отличия от аналогичных, но проведенных в 60-е годы. Это особенно наглядно иллюстрируется зависимостями $G = f(V)$ (рис.7).

Так эксперименты раннего периода позволили сделать вывод о том, что данные, полученные при взаимодействии потоков при параллельности их осей, подтверждают зависимость $G = f(V)$, полученную для изолированного русла. В то же время данные 2003г. образуют отдельную кривую, расположенную значительно левее аналогичной кривой $G = f(V)$ для изолированного русла. При этом наибольшие уменьшения транспортирующей способности потока наблюдаются при их взаимодействии под углом $\alpha = 20^\circ$.

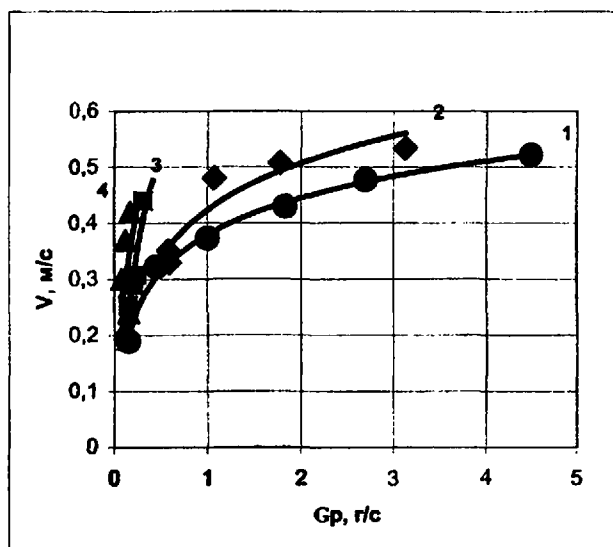


Рис. 7. Зависимость $G = f(V)$.
Условные обозначения приведены на рисунке 6.

Как вытекает из анализа экспериментальных данных и проведенных расчетов, формулы (1) – (4) приводят к завышенным значениям расходов донных наносов в русловом потоке при его взаимодействии с пойменным. Поэтому при расчетах стока наносов, в частности, в период спада половодья, необходимо вводить коэффициенты, уменьшающие величину расхода наносов. Величина этого коэффициента зависит от крупности наносов, глубины, уклона водной поверхности и угла схождения динамических осей потоков.

Литература

1. Алексеевский Н.И., Чалов Р.С. Движение наносов и русловые процессы – М.: изд. МГУ, 1999
2. Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов – М.: изд. МГУ, 1998
3. Барышников Н.Б. Транспорт русловых наносов в прямолинейных потоках с поймой – Тр. ЛГМИ, 1967, вып.25
4. Барышников Н.Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм – Л.: Гидрометеониздат, 1984
5. Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков в русловые процессы – Л.: Гидрометеониздат, 1988

6. Барышников Н.Б., Самусева Е.А. Антропогенное воздействие на саморегулирующуюся систему бассейна – речной поток – русло – СПб.: изд. РГГМУ, 1999
7. Беркович К.М. Географический анализ антропогенных изменений русловых процессов – М.: ГЕОС, 2001
8. Великанова З.М., Ярных Н.А. Натурные исследования пойменного массива в высокое половодье. – Труды ГТИ, 1970, вып.183
9. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков – Л.: Гидрометеониздат, 1962
10. Железняков Г.В. Пропускная способность русел каналов и рек – Л.: Гидрометеониздат, 1981
11. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Сущенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса – Л.: Гидрометеониздат, 1982

УДК [556.3.01:504.1] (470.23–25)

Бродская Н.А. доц., к.г.-м.н.

ЭКОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

В 1976 г. кафедра гидрогеологии и геодезии ЛГМИ впервые начала работы по исследованию влияния крупных промышленных объектов на режим подземных вод. Исследования проводились на ряде водоемких горнодобывающих и химических предприятий.

К этому времени уже сложилось представление о негативном воздействии технологий этих предприятий на гидрохимический состав природных вод, наблюдаемое подтопление инженерных сетей и сооружений и истощение ресурсов подземных и природных вод. В связи с этим назрела необходимость комплексных исследований режимов этих вод и выявление их связи с естественными и техногенными факторами влияния.

Необходимость и своевременность постановки таких исследований были вызваны также необходимостью разработки методологических основ эколого-гидрогеологических исследований на техногенно нарушенных территориях. Ранее выполненные исследования подобного рода [1] имели локальный характер, относились к отдельным гидротехническим сооружениям и в силу своей специфики не могли претендовать на решение поставленной задачи.

В качестве основного базового предприятия было выбрано Кингисеппское ПО «Фосфорит», уникальное по геологическим и гидрогеологическим условиям. Это единственное предприятие в мировой практике, возведенное на нарушенных и перемещенных

грунтах, представленных крупнообломочными вскрышными породами отработанных фосфоритных карьеров.

Одновременно исследовательские работы по единым методикам проводились и на ряде других предприятий горной и основной химии, включая Маардусский, Кедайнский химические заводы, Сумское ПО «Химпром» и др. Полученные результаты и разработанные на их основе рекомендации были использованы при проектировании отдельных производственных объектов Винницкого химзавода, Воскресенского ПО «Химпром», Череповецкого ПО «Аммофос» и др. В дальнейшем методологические разработки были распространены на предприятия целлюлозно-бумажной промышленности АО «Кондопогабумпром» и Сясьский ЦБК, и водные объекты урбанизированной территории Санкт-Петербурга.

К основным режимообразующим факторам подземных вод относятся [2] климатические, геологические, физико-химические, биологические, с наложенными на них техногенными факторами. По каждой генетической группе факторов было выполнено районирование территории промышленной площадки с количественной оценкой и дифференциацией по всем характерным признакам. На этой основе построена гидродинамическая модель, адекватно отражающая реальную обстановку. Модель позволила прогнозировать режим подземных вод и рационально перераспределить сток с территории промпредприятия, что значительно снизило подтопление.

Наиболее сложной задачей оказалась количественная прогнозная оценка техногенных факторов, связанных с непостоянными во времени и непрогнозируемыми аварийными отклонениями в технологических режимах.

Физико-химические и биологические процессы, протекающие в почво-грунтах зоны аэрации и в подземных водах на промышленной площадке, тоже отличаются от естественных процессов.

Воздействие же техногенных факторов значительно превосходит влияние естественных факторов, что вызвано высокой химической активностью и реакционной способностью загрязненных вод, способствующих изменению видового состава микробиоценозов в зоне влияния. Последнее обстоятельство непосредственно связано с направлением и интенсивностью процессов массопереноса специфических для предприятия веществ. Качественные и количественные характеристики воздействия этих факторов для различных тех-

ногенно нагруженных территорий различны. Их максимальное комплексное воздействие проявилось на территории «Фосфорита». Это позволило выполнить весь комплекс исследований в полном объеме и разработать конкретные рекомендации по снижению подтопления территории; сбору, отведению и очистке загрязненных подземных вод; разработке и созданию сети эколого-гидрогеологического мониторинга; рекультивации обработанных земель; предотвращению загрязнения подземных вод.

Основные этапы методики эколого-гидрогеологических исследований техногенно нагруженных территорий представлены на рис. 1.

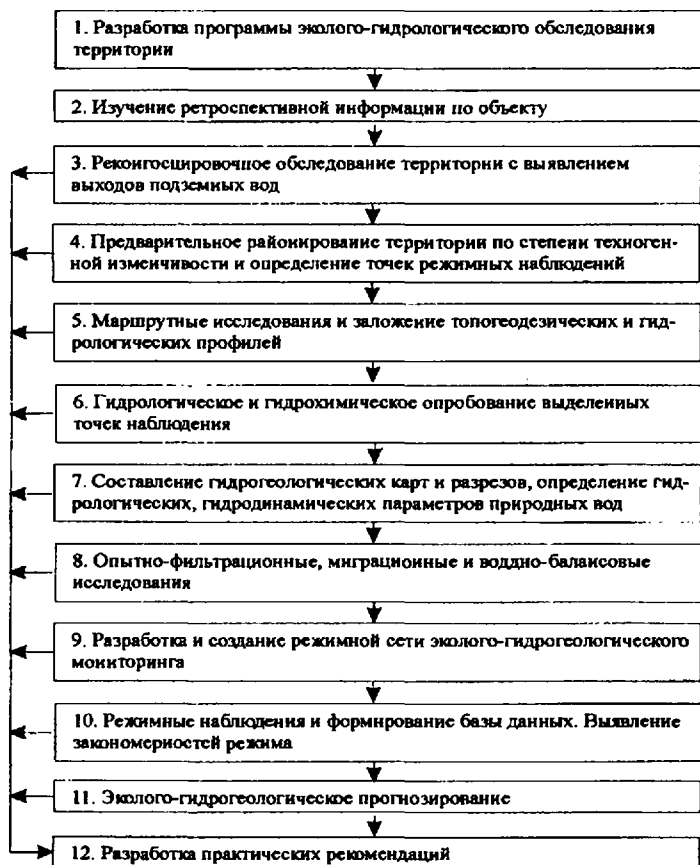


Рис. 1. Основные этапы исследований.

Апробация методики на целом ряде предприятий отражена в научных публикациях [3–5]. В конечном итоге, применение методики позволило в достаточно короткие сроки (в течение 2 лет) произвести оценку эколого-гидрогеологического состояния исследуемых объектов. Так, для АО «Кондопогабумпром» исследования проводились малыми силами, в основном студентами старших курсов. Уже после завершения этапа 7 предприятию была выдана эколого-гидрогеологическая информация о формировании, движении и разгрузке загрязненного подземного стока в акваторию Кондопожского залива Онежского озера. Впервые, за два года исследований были получены количественные характеристики вклада предприятия в загрязнение подземного стока.

Была разработана и создана сеть гидрогеологического мониторинга и передана предприятию. Некоторые результаты исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1

Токсичность вод АО «Кондопогабумпром» ($I_n = \sum I_{oi} C_i$, г/м³)

Поверхностный сток	Грунтовый сток	Очищенные технологические стоки
4.31 – 8.53	2210 – 8487	577.91 – 731.36

Для успешных исследований по разработанной методике большое значение имеет наличие ретроспективной информации, как например для АО Кондопогабумпром», позволившие начать полевые исследования сразу с 5 этапа. Для Ишимбайского нефтеперерабатывающего предприятия эти данные носили разрозненный, кратковременный характер, однако, опыт исследований позволил произвести расчеты величины подземного сока и оценить загрязнение р.Белой за счет его разгрузки. Сопоставление расчетных данных с материалами натурных опробований, выполненных региональной СЭС, подтвердило корректность наших выводов.

Особый интерес представляет апробация разработанной методики на урбанизированной территории с развитой гидрографической сетью. Так, экологическое состояние поверхностных водотоков бассейна р. Невы фактически определяется не только вкладом контролируемых организованных выпусков сточных вод, но и целым рядом неорганизованных источников. К таким источникам относится подземный сток, формирующийся на техногенно нарушенных территориях. Основной вклад в ионный подземный сток вносят

захороненные отходы производства и потребления. Эти объекты следует отнести к зонам повышенного экологического риска, как не исследованные в достаточной мере и не обеспеченные системой мониторинга.

Как показали наши исследования, выполненные по заказу Муниципального образования №57 Невского района, грунтовый сток, формирующийся на территории Яблоновской свалки, вносит значительный вклад в ионный сок реки Оккервиль, являющейся малым водотоком бассейна р. Невы [6,7]. Этот вклад значительно превышает поступление загрязняющих веществ из организованных выпусков, контролируемых СЭС. Причем, воздействие подземной составляющей ионного стока является длительным, постоянно действующим и концентрированным.

Исследования на этом объекте базировались на недостаточной ретроспективной информации о гидрологических и гидрогеологических условиях, относящихся к 70- м годам. Причем, гидрохимические исследования ограничивались опробованием СЭС Невского района по двум створам вне связи с гидрологическим режимом реки.

По гидрографу были определены среднегодовые характеристики реки и подсчитаны объемы водного и грунтового стока. Выявлено, что годовой объем речного стока $W_p = 0,0135 \text{ км}^3$; из них 16,8% или $W_r = 0,0023 \text{ км}^3$ – грунтовый сток; 52,% – $W_{\text{сн}} = 0,0070 \text{ км}^3$ – снеговое питание; 30,9% – $W_{\text{ос}} = 0,0042 \text{ км}^3$ – дождевые осадки. Река Оккервиль относится к реке смешанного питания, преимущественно снегового. Кроме этих составляющих, в реку сбрасываются промышленные стоки различного состава и температуры, и 60–65 тыс.куб. м. промывных сточных вод Северной водопроводной станции. Качество сбрасываемых стоков не соответствует санитарным нормам по химическим и бактериологическим показателям.

Гидрохимический состав представлен наличием Zn, Ni, Mn, Fe, NH_4 , NO_2 , нефтепродуктов, Cu в высоких концентрациях тесно связан с расходом воды в реке, определяющим концентрирование и разбавление веществ.

Оценка загрязнения воды р.Оккервиль производилась двумя методами.

1. Оценкой величины относительной токсичной массы [8],

$$m = \sum_2^N I_{0i} C_i V, \text{ кг.т.м.},$$

где I_{0i} – индекс относительной токсичности i – го компонента ($I_{0i} = 1/\text{пдк}_i$); C_i , г/м³ концентрация i –го компонента в потоке; V , м³ – объем воды в потоке.

Результаты расчета токсичной массы по двум створам реки приведены в табл.2.

Таблица 2

Токсичная масса стока р.Оккервиль
(в створе у ж/д моста – 1 и в устье –2 за 1996 – 2001 гг.)

Год	Относительная токсичность потока, I_p (г/м ³) 1 створ 2 створ	Токсичная масса вод, мгр.в. 10 ³ (кг.т.м./год) 1 створ 2 створ
1996	12.35 12.57	24.21 24.64
1997	45.50 46.66	89.18 91.45
1998	31.27 29.67	61.29 58.15
1999	44.06 28.02	86.36 54.92
2000	24.97 30.49	48.94 59.76
2001	25.57 16.95	51.12 33.22

По данным таблицы выявлено, что основной источник загрязнения реки расположен выше организованных выпусков промышленных сточных вод. По данным опробования гидрогеологических скважин в районе Яблоновской свалки можно утверждать, что им является грунтовой сток формирующийся в зоне захоронения отходов.

Расчет токсичной массы разгружающихся в р.Оккервиль грунтовых вод в створе Яблоновской свалки представлен в таблице 3.

Таблица 3

Расчет токсичной массы грунтового стока в створе свалки, за 2000г.

Величина	Вещество			
	БПК-5	Ni	Mn	NH ₄ ⁺
ПДК	3	0.001	0.010	0.50
Ср., г/м ³	94	0.087	2.983	26
I_{0i}	0.33	100	100	2
I_i , г/м ³	31.02	8.7	298.3	58
I_p , г/м ³	396.02			
m , кг/год	$396.02 \cdot 0.0020 \cdot 10^9 = 792.0 \cdot 10^3$			

Из таблицы 3 видно, что вклад грунтового стока в загрязнение реки, даже при минимальном объеме многократно превышает вклад организованных выпусков.

2. Оценка вклада грунтового стока с помощью метода электроконвективно-диффузионной аналогии (ЭГДА), основанного на математической модели конвективной диффузии [6]. Расчеты выполнены по специально разработанной программе, в основе которой лежит уравнение двухмерной модели с учетом самоочищения и разбавления по методу Банзала [6]:

$$\lg (Dy/VxH) = -3.547 + 1.378 \lg (B/H),$$

где H – средняя глубина расчетного участка потока, м.

Результаты моделирования соответствуют данным, полученным первым методом, что подтверждает возможность использовать эти методы в равной степени. Концентрация загрязняющих веществ в 1 и 2 створах с учетом разбавления грунтового стока речным соответствовали данным натурных наблюдений.

Определение гидрохимического состава и режима рек, которые относятся к бассейну р.Невы, представляет собой важную задачу, т.к. они все протекают по урбанизированным территориям и каждая вносит свой вклад в загрязнение главной водной артерии Санкт-Петербурга.

Наряду с непосредственными наблюдениями за гидрохимическим режимом рек можно применять прогнозные методы его определения, среди которых модель рассеивания загрязняющих веществ в поверхностных водотоках, построенная по методу диффузионно-конвективного перемешивания, использованная нами, доказала ее работоспособность и эффективность. Поэтому данная модель рекомендуется нами для практического применения при определении гидрохимического режима рек бассейна р.Невы.

Из выше изложенного вытекает главный вывод о правильности методики исследований, о последовательности алгоритма, учитывающего все необходимые этапы при различной ретроспективной информации, о важном значении исследования подземного стока, позволяющего выявить закономерности формирования и распределения подземных вод, оценить их естественные и искусственные ресурсы, темпы водообмена, выявить роль подземного стока в питании рек и в общем водном балансе, рассмотреть процессы взаи-

моделирования поверхностных и подземных вод и изучить ионный подземный сток.

Литература

1. Бочеввер Ф.М., Орадовская А.Е. Гидрогеологическое обоснование защиты подземных вод и водозаборов от загрязнения. М.: Недра, 1979, –254с.
2. Чечкин С.А., Бродская Н.А. Режимы и статистическая структура антропогенно измененных уровней грунтовых вод // Сборник трудов ЛПТМИ, 1990, с.103–108.
3. Бродская Н.А., Чечкин С.А. Воздействие промышленных комплексов на формирование стока в крупные озера Карелии // Крупные озера Европы– Ладжское и Онежское. Тез. докл. Междунар. конф. Петрозаводск, 1996, с.47–49.
4. Бродская Н.А., Воробьев О.Г. Некоторые особенности формирования ГТС // Вестник МАНЭБ, 2002, т.7, №1(49), с.72–74.
5. Бродская Н.А., Воробьев О.Г., Азбукина С.В., Соколова М.С., Чекина М.Н. Эколого-гидрогеологические исследования малых водотоков бассейна р. Невы.// Межд. научн. конф. «Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон. СПб.: РГГМУ, с.42–43.
6. Бродская Н.А., Соколова М.С. Эколого-гидрогеологическая оценка природных вод // Международн. Научн. чтения «Белые ночи», СПб.,2003, с.36–37.
7. Воробьев О.Г., Реваян Р.Г. О миграции химических элементов в обнаженных почво-грунтах оз.Севан //ДАН Армянской ССР, т. XXXIV, 1987, №2, с.877–881.
8. Шишкин А.И. Поверхностные воды //Практикум по инженерной защите окружающей среды. Северодвинск: Севмашвуз, 1999, с.181–203.

УДК 556.167:338(470.23/25)

*Викторова Н.В. зав. лаб., к.т.н.,
Громова М. Н. асп.*

ВЛИЯНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА НА ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ СЕВЕРО-ЗАПАДА ЕТР

При использовании рек для орошения, судоходства, водоснабжения промышленных предприятий и населенных мест необходимо иметь надежные данные об их гидрометеорологическом режиме, в частности о минимальных расходах воды в реке. Величина минимального расхода является лимитирующей при решении вопроса об использовании стока в его естественном состоянии или путем регулирования водохранилищами. Минимальный расход воды в реке без устройства регулирующих его сооружений может лимитировать производственную мощность промышленных предприятий. Также

величину минимального стока необходимо знать при решении вопросов о смешении и разбавлении сточных вод в реках, при изучении самоочищения речных вод. Количество природных вод, пригодных к употреблению, определяет экономическое развитие целых регионов.

При планировании использования водных ресурсов на перспективу, необходимо обладать достаточно надежными сведениями о том, какие изменения могут произойти в характеристиках минимального стока в будущем под воздействием целого ряда факторов, среди которых основная роль принадлежит антропогенной деятельности на водосборах и происходящему и ожидаемому изменению климата на Земле. Причем при составлении схем комплексного использования речных вод необходимо иметь данные о характеристиках минимального стока не только применительно к отдельным пунктам водозабора, но и в отношении его распределения по территории.

Обычная практика строительного проектирования предусматривает использование статистически обеспеченных значений расчетных гидрометеорологических характеристик, в частности минимального стока. Дать прогноз статистических характеристик минимального стока определенной обеспеченности можно только по стохастической модели формирования стока, которая объединяет в себе необходимые и случайные факторы его формирования и допускает решение в виде кривой обеспеченности. Именно поэтому она была использована для прогнозов статистических характеристик минимального 30-дневного зимнего и летне-осеннего стока на территории Северо-Запада.

Основой для такой модели является дифференциальное уравнение, в которое вводятся белые шумы, связанные с внешним климатическим воздействием и вариациями свойств подстилающей поверхности. Затем по известной процедуре производится стохастическое обобщение, в результате которого приходим к уравнения Фоккера – Планка – Колмогорова (ФПК):

$$\frac{\partial p(Q,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Q} [A(Q,t)p(Q,t)] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial Q^2} [B(Q,t)p(Q,t)] \quad (1)$$

где $p(Q,t)$ – плотность вероятности расхода воды;

Q – расход воды в замыкающем створе;

t – время;

$A(Q,t)$ и $B(Q,t)$ – соответственно коэффициенты сноса и диффузии.

Данное уравнение описывает эволюцию плотности вероятности расходов воды или модуля стока. Физический смысл коэффициентов сноса и диффузии заключается в том, что они определяют локальную скорость изменения математического ожидания и второго начального момента. Конкретный вид этих коэффициентов определяет стохастическую схему, формирующую расход воды и зависит от параметров исходной динамической модели и характера действующих в системе шумов.

В установившемся режиме (а все климатические сценарии являются равновесными) уравнение ФПК переходит в уравнение Пирсона:

$$\frac{dp}{dQ} = \frac{Q - a}{b_0 + b_1 Q + b_2 Q^2} p, \quad (2)$$

где a , b_0 , b_1 и b_2 – параметры, характеризующие физико-статистические свойства водосбора.

Учитывая, что на практике используются только первые три момента распределения, модель можно свести к уравнению для первых начальных моментов α_n ($n = 0, 1, 2, 3$):

$$nb_0\alpha_{n-1} - [(n+1)b_1 - a]\alpha_n + [(n+2)b_2 + 1]\alpha_{n+1} = 0. \quad (3)$$

Методика использования этого уравнения состоит из двух этапов. На первом этапе использования производится параметризация модели 3, то есть по существующим гидрологическим картам находят коэффициенты уравнения, на втором этапе численные значения коэффициентов изменяются в зависимости от значений внешних воздействий и вариаций свойств подстилающей поверхности и решается прямая задача, то есть находятся прогнозные значения основных характеристик.

Для обоснования применимости стохастической модели ФПК для долгосрочных прогнозов минимального стока были проведены поверочные прогнозы на репрезентативном материале и произведена оценка полученных результатов. Исходными данными для поверочных прогнозов служили значения минимальных 30-суточных расходов воды в период зимней и летне-осенней межени, информа-

ция по которым была собрана по 105-ти гидрологическим постам на территории Северо-Запада. Уравнение ФПК предлагается использовать для прогноза изменения гидрологического режима, вызванного воздействием различных естественных и искусственных факторов. В этих случаях наблюдается внутрирядная неоднородность величин стока. При выполнении поверочных прогнозов моделировалась именно такая ситуация. Выбранные исходные гидрологические ряды проверялись на однородность по критерию Стьюдента. Выявленные неоднородные ряды представлялись как аналоги рядов, подвергшихся антропогенному воздействию. Суть поверочных прогнозов минимального 30-дневного стока сводилась к тому, что по одной половине ряда проводилась параметризация, а по другой решалась прямая задача, то есть вычислялись статистические характеристики. Прогнозы давались как в прямом, так и в обратном направлениях при фиксированном соотношении $C_s = 2C_s$ и при постоянных значениях коэффициента стока. Оправдываемость прогнозов оценивалась по критериям согласия Колмогорова и Пирсона. На 10 %-ном уровне значимости, наиболее употребляемом в гидрологии, средняя оправдываемость поверочных прогнозов минимального зимнего стока по критериям Колмогорова и Пирсона составила соответственно 85 % и 66 %. Оправдываемость же прогнозов минимального летне-осеннего стока на этом же уровне значимости по критерию Колмогорова составила 55 %, а по критерию Пирсона – 27 %. Отсюда можно сделать вывод, что зимний сток прогнозируется более эффективно, чем летне-осенний. По всей видимости это связано с тем, что в качестве внешнего воздействия в стохастической модели использовались осадки, осредненные за год, что не в полной мере отражает процесс формирования этого вида стока. То, что оправдываемость прогнозов минимального стока по критерию Колмогорова выше, чем по критерию Пирсона, связано с тем, что при оценке прогнозов по критерию Колмогорова мы оперируем со средней частью кривой обеспеченности, так как именно здесь наблюдается наибольшая разность функций распределения, а при оценке по критерию χ^2 эмпирическая и прогнозная кривые обеспеченности сравниваются в крайних частях. К тому же, использование критерия Пирсона предполагает наличие более продолжительных рядов наблюдений, чем при использовании критерия Колмогорова. Чтобы в дальнейшем улучшить оправдываемость прогнозов, необ-

ходимо «разморозить» коэффициенты модели, которые оставались постоянными, и связать их с климатическими факторами, а также с факторами подстилающей поверхности.

В целом, оправдываемость поверочных прогнозов минимального стока удовлетворительная (особенно если учесть, что нас больше всего интересует изменение характеристик нормы стока), что говорит о том что, уравнение ФПК правомерно использовать для долгосрочных прогнозов статистических характеристик минимального 30-суточного стока на территории Северо-Запада.

Параметризация стохастической модели формирования стока на Северо-Западе проводилась по фактическому гидрометеорологическому режиму по сетке с дискретностью $0,5^\circ$ по широте и долготе. Затем по одному из наиболее вероятных сценариев производился расчет годового количества осадков на территории Северо-Запада в XXI в. и с учетом этого климатического сценария были выполнены прогнозы вероятностных характеристик минимального зимнего и летне-осеннего стока.

Для удобства использования полученной информации результаты прогнозов минимального стока представлены в виде комплекта карт, построенных с помощью программы Surfer.

Анализ полученных карт изолиний минимального стока показывает, что в целом на Северо-Западе ЕТР будет наблюдаться повышение стока. Наибольшее его увеличение ожидается на западе рассматриваемой территории в бассейне реки Мста. Наличие большого числа замкнутых контуров изолиний модуля стока объясняется большой неравномерностью распределения его по площади. При увеличении количества осадков происходит расширение этих контуров, а также их слияние.

Полученные карты могут быть использованы при оценке чувствительности производственных функций отраслей экономики. Северо-Западный регион имеет хорошо развитую инфраструктуру как в промышленности, так и в сельском хозяйстве. Он расположен в зоне достаточного увлажнения, богат поверхностными водами. Большинство водных объектов – это источники для нужд промышленности, сельского хозяйства, коммунально-бытовых служб, развитие которых тесным образом связано с изъятием воды из естественных объектов. Наиболее водоемкими отраслями промышленности в данном регионе являются энергетика, машиностроение, цел-

люлозно-бумажная, топливная, химическая и нефтехимическая, пищевая промышленность, черная (передельная) и цветная металлургия. Потребление воды на единицу продукции является важнейшим показателем прогрессивности производственных процессов. В России потребляется следующее количество воды на производство 1 тонны продукции: сталь – 250 м³, медь – 500 м³, пластмассы – 500 – 1000 м³, целлюлоза – 1500 м³. На бытовые нужды населения городов расходуется 300 – 600 м³/сут. на человека.

В результате естественных многолетних колебаний минимального стока его значения существенно меняются для каждой реки. Эти изменения учитываются введением базисного (или реперного) минимального расхода воды определенной обеспеченности [3]. В [2] говорится, что за базовый при оценке экологического стока рек в маловодную фазу целесообразно принять минимальный 30-суточный расход воды 80 %-ной обеспеченности. Этот расход должен оставаться в реке при осуществлении из нее водозаборов, особенно в меженный период. При этом качество воды должно соответствовать минимально потребным условиям существования гидробионтов. Следствием этого является необходимость введения поправки в оценку водных ресурсов. Определение количества водных ресурсов по годовому стоку рек не может быть взято за основу при осуществлении каких-либо проектных работ по водоснабжению и водоотведению.

С достаточной степенью надежности можно полагать, что на речных водосборах, особенно малых и средних, глобальное потепление климата приведет к более значительному изменению значений минимального стока высокой обеспеченности, нежели его нормы. Это неизбежно приведет к изменению качества воды водотоков и повлияет на возможность разбавления загрязняющих веществ и процессов самоочищения.

Вообще расчеты экстремальных характеристик речного стока в условиях антропогенных изменений климата – одна из главных проблем современной инженерной гидрологии, поскольку до настоящего времени во всем мире при проектировании водохозяйственных сооружений исходят из концепции стационарности гидрометеорологических рядов [4]. Предстоящие изменения климата, без сомнения будут оказывать значительное влияние на характеристики минимального стока, в связи с чем кардинальным образом должна меняться об-

шая стратегия инженерных гидрологических расчетов при строительном проектировании. Еще большие проблемы могут возникнуть с уже построенными водохозяйственными сооружениями.

В практике водохозяйственного проектирования основными расчетными величинами минимального стока являются расходы воды, средние за сутки и 30 суток с наименьшим стоком в данном сезоне [5]. В зависимости от требований к бесперебойности в подаче воды и от климатической зоны в расчетах используется величина указанного минимального расхода воды, имеющая вероятность ежегодного превышения (обеспеченность) в диапазоне 75 – 97 %.

Для того, чтобы оценить возможное влияние изменений характеристик минимального стока на экономическое развитие Северо-Западного региона, были построены не только карты изолиний нормы минимального 30-суточного стока и их изменений, но и карты минимального стока обеспеченностью 80, 90 и 95 %. На рисунке 1 в качестве примера приведена карта прогнозных значений минимального зимнего стока 80 %-ой обеспеченности на 2100 год.

На большей части территории Северо-Запада к 2100 году произойдет увеличение минимального стока 80 %-ной обеспеченности на 24 – 26 %, а он является расчетным для тех отраслей хозяйства, где допускается кратковременный перерыв и уменьшение подачи воды. Если минимальный 30-суточный сток 80 %-ой обеспеченности брать в качестве базового при оценке экологического стока, то его характерный рост на территории Северо-Запада приведет к увеличению минимального допустимого объема воды в реках. С другой стороны, увеличение минимального стока 80 %-ной обеспеченности позволит в маловодный период года увеличить заборы воды из рек в целях использования ее водоемкими отраслями промышленности.

Увеличение минимального зимнего и летне-осеннего стока 90 % обеспеченности к 2100 году на большей части территории Северо-Запада произойдет соответственно на 28 – 30 % и 26 – 28 %. Это положительно отразится на развитии тепло- и гидроэлектростанций, а также основной части предприятий, расположенных в бассейне Балтийского моря, в основном, оборонной промышленности, а также предприятий машиностроения и металлообработки. Увеличение минимального стока 90 % обеспеченности положительно повлияет на экономическое развитие таких отраслей про-

мышленности, как нефтеперерабатывающая, химическая, а также целлюлозно-бумажная и деревообрабатывающая, сосредоточенные в основном в бассейне Ладожского озера.

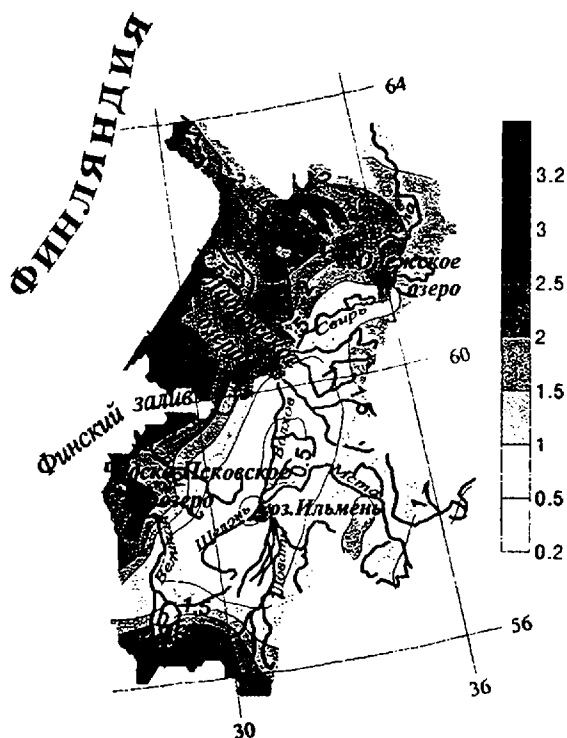


Рис. 1. Карта прогнозных изолиний минимального 30-суточного зимнего модуля стока обеспеченностью 80 % на 2100 год

Наибольшие изменения к 2100 году претерпевает минимальный сток обеспеченностью 95 %, который является расчетным для тех отраслей хозяйства, где не допускается перерыв или уменьшение подачи воды или все-таки допускается кратковременное снижение подачи воды во время зимнего периода. Минимальный зимний сток этой обеспеченности на большей части территории увеличится по сравнению с существующим на 30 – 38 %, минимальный летне-осенний – на 28 – 32 %.

Западная часть рассматриваемой территории, где к 2100 году произойдет наибольшее увеличение минимального стока, менее

всего насыщена промышленными предприятиями. Это, в основном, сельскохозяйственный район.

Так как на всей рассматриваемой территории к 2100 году происходит увеличение значений модуля минимального зимнего и летне-осеннего стока, особенно значительное при обеспеченности 95 %, то это положительно должно отразиться на экономическом развитии региона. С одной стороны увеличение минимального стока на реках неизбежно приведет к изменению качества воды водотоков и лучшим образом повлияет на возможность разбавления загрязняющих веществ и процессов самоочищения. С другой стороны, появится возможность большего забора воды из рек водосемкими отраслями промышленности в маловодный период года, а также в целях сельского хозяйства и водоснабжения.

Естественно, это оценка приближенная и зависит не только от выбранного климатического сценария, но и от степени развития водопотребляющих отраслей экономики. В целом же, в условиях интенсивного глобального потепления и большой неопределенности локальных климатических изменений водохозяйственные системы речных бассейнов должны быть комплексными и максимально гибкими, способными эффективно управлять водными ресурсами при различной метеорологической ситуации.

Литература

1. Коваленко В.В. Моделирование гидрологических процессов. – Л.: Гидрометеиздат, 1993. – 216 с.
2. Водные ресурсы Северо-Западного региона России. Сборник научных трудов, вып. 121. – СПб: Изд. РГГМУ, 1999. – 102 с.
3. Владимиров А.М., Орлов В.Г., Сакович В.М. Экологические аспекты использования и охраны водных ресурсов (вод суши). – СПб.: Изд. РГГМИ, 1997. – 126 с.
4. Шикломанов И.И., Линз Г. Влияние изменений климата на гидрологию и водное хозяйство// Метеорология и гидрология. –1991. – № 4 – с.51 – 66.
5. Владимиров А.М. Расчеты минимального стока // Международный симпозиум по специфическим аспектам гидрологических расчетов для водохозяйственного проектирования. – М.: Гидрометеиздат, 1979.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ ОПОРУ ОТ РАЗДРОБЛЕННОГО ЛЕДЯНОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Гидротехническое сооружение, находящееся на берегу водного объекта, в них самих и в зонах возможного действия этих объектов, должно рассчитываться на воздействие движущихся полей льда как ненарушенного (сплошного), так и раздробленного. В работе [1] нами была рассмотрена нагрузка на вертикальную цилиндрическую опору с помощью модельных исследований от ненарушенного льда. Ниже, рассмотрим эту же задачу, но в случае воздействия на опору поля раздробленного льда.

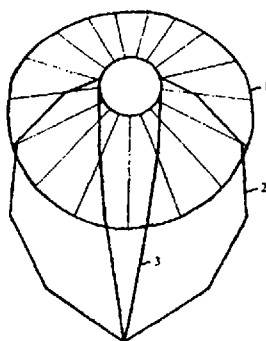
Действующий в настоящее время СНиП [2] дает рекомендацию по определению нагрузки на сооружение от движущейся раздробленной массы льда, но она носит слишком обобщенный характер. Например, не учитывается то, что толщина поля раздробленного льда переменная по его длине, а эпюра напряжения при прорезании опорой поля не прямоугольная, как это предполагается в формуле, а имеет форму близкую к косинусоиде; толщина раздробленного поля льда задается косвенно через глубину потока и др. В связи с этим возникает необходимость проведения экспериментальных исследований на модели по определению нагрузки на опору и ее распределения по диаметру.

В настоящее время теория физического моделирования процессов, протекающих при воздействии движущихся и наваливающихся масс раздробленного льда в реке на гидротехнические сооружения разработана еще не окончательно, но уже имеются достаточно убедительные предложения по применению для этой цели теории моделирования процессов, протекающих в сыпучих средах (Панфилов Д.Ф., Афанасьев В.П., Паризе Э., Проскуряков Б.В., Берденников В.П. и др.). То есть, предполагается, что физическая картина происходящего явления в раздробленной массе льда при встрече, например, с опорой имеет качественное сходство с деформацией сыпучей среды. Учитывая это, нами в эксперименте был применен материал-заменитель раздробленного льда – гранулированный полистирол.

Экспериментальная установка представляет собой прямоугольный лоток размером 1 х 3 м, в котором на плаву находится слой гранулированного полистирола, плотность которого 920 кг/м^3 . Диаметр зерен этой сыпучей массы равен 3 – 4 мм. В центре поля расположен цилиндр (опора), разрезанный по образующей на полоски, консольно закрепленные сверху. На полоски наклеены тензодатчики. С помощью этих тензодатчиков определяется усилие, воспринимаемое полоской как балочкой при сжатии сыпучей массы от нагрузки приложенной к передней кромке поля. Зная ширину полосок и измерив толщину массы у них, можно рассчитать и распределение напряжения по окружности опоры.

По кратко изложенной выше методике исследования были проведены эксперименты при трех диаметрах опоры: 0,06, 0,09 и 0,12 м и начальной толщине «раздробленного льда» в первых двух случаях 0,03 м, а в третьем – 0,037 м. В каждом опыте нагрузка на кромке поля составляла $P = 0,5 \text{ кг}$. Создавалась она с помощью деревянного плотика с вертикальной стенкой. Все измерения выполнялись в момент равновесного состояния «затора» на модели, то есть, сразу же после остановки плотика, который до этого двигался от приложенной к нему нагрузки P . Нагрузка к нему прикладывалась посредством нити, переброшенной через блок и подвешенного к ней груза P .

Полученные в эксперименте данные условно можно разделить на плановые и силовые характеристики. К плановым характеристикам отнесены толщины «раздробленного льда» и плановые его деформации, а к силовым – усилия в полосках образующей цилиндра, измеренные с помощью тензодатчиков. Как уже отметили выше названные характеристики измерялись в момент равновесного состояния затора. По данным этих измерений построены эпюры и изолинии распределения толщины «льда», измеренных у самой опоры (рис. 1) и по всему полю (рис. 2). При построении эпюры, толщины откладывались по нормали к окружности опоры с началом отсчета, расположенным на этой окружности. Получены также карты линий плановых деформаций, построенные по черным меткам, расположенным предварительно на поверхности поля с шагом 0,1 х 0,1 м (рис. 3).



Распределение у цилиндрической опоры:

1 – толщины «раздробленного льда»; 2 – напряжение σ_R , возникающего от усилия, направленного нормально к образующей; 3 – напряжение σ_x – проекции напряжения σ_R на ось, совпадающую с направлением действия силы P .

Рис. 1 – Опыт № 3 (диаметр опоры $d = 0,12$ м, начальная толщина раздробленного поля $h_{нач} = 0,037$ м, начальная длина поля до опоры $L = 1,21$ м, нагрузка, приложенная к полю $P = 500$ г)

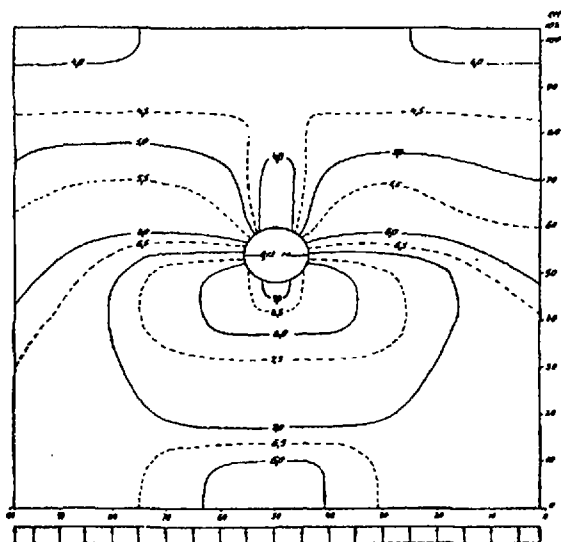


Рис. 2. Изолинии равных толщин в см в поле «раздробленного льда» при воздействии на цилиндрическую опору $d = 0,12$ м. Начальная толщина поля $h = 0,037$ м, начальная длина до цилиндра $L = 1,21$ м

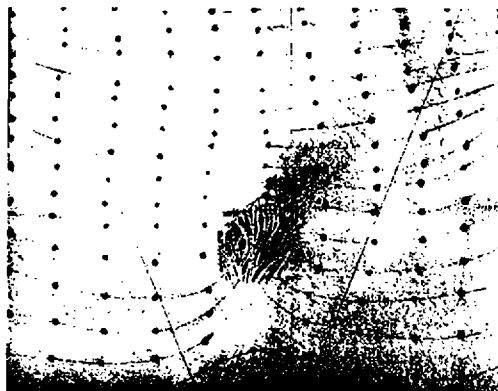


Рис. 3. Линии плановых деформаций в опыте № 3 ($d = 0,12$ м)

Усилие, передаваемое раздробленной массой отдельным участкам опоры и измеренное с помощью тензодатчиков, пересчитано в напряжение σ_R , по величинам которого построены эпюры 2 (рис. 1). Сила, обуславливающая напряжение σ_R , является равнодействующей – направленной нормально к каждой точке опоры. Нас же интересует напряжение σ_x , возникающее от действия силы, направленной вдоль продольной оси затора. Эти напряжения получены графически – путем проектирования величины напряжения σ_R на ось x . По полученным значениям проекций построена эпюра 3 (рис. 1).

Распределение напряжения вдоль окружности в безразмерных координатах по данным всех опытов приведено на рис. 4. Из рисунка видно, что среднее значение напряжения равно 46 % от его максимального значения, приходящегося на лобовую точку ($\alpha = 0^\circ$).

Пересчет результатов эксперимента на натуру выполняли с помощью индикатора подобия [3]

$$\frac{m_\sigma m_h}{m_l^2 m_\gamma} = 1,$$

где m_σ , m_h , m_l , m_γ – масштабные коэффициенты соответственно напряжения, толщины льда, характерного линейного размера, удельного веса среды (воды), подстилающей поле раздробленного льда. При этом, пересчет можно свести к определению нагрузки на

Расчет нагрузки на цилиндрическую опо

№ опы- та	Диаметр опоры		Исходная толщина льда		Толщина льда у опоры после при- ложения нагрузки		Ма
	в на- туре d_n , м	на моде- ли d_m , м	в на- туре h_n , м	на моде- ли h_m , м	на моде- ли h_m , м	в нату- ре h_n , м	m_l
1	6	0,06	2	0,052	0,069	2,66	100
2	6	0,09	2	0,055	0,073	2,66	66,7
3	6	0,12	2	0,065	0,085	2,58	50

опору от затора, либо к определению диаметра опоры. В практике часто приходится решать первую задачу, поэтому ее мы и рассмотрим. Так, например, в мае 2000 года во время подвижки льда затора была срезана опора моста диаметром 2 м, виздвигнутая в створе строящейся Бурейской ГЭС.

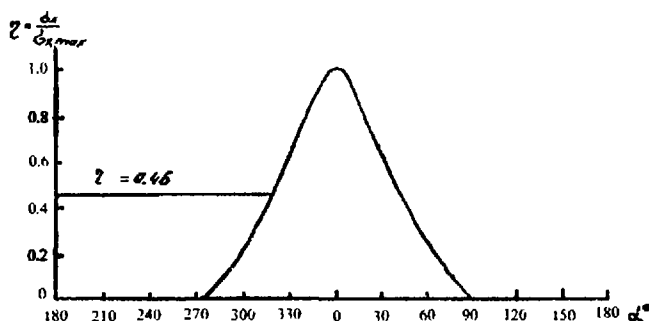


Рис. 4. Распределение напряжений σ_x вдоль окружности опоры в безразмерных координатах

В качестве примера, определим нагрузку на опору диаметром $d = 6$ м от воздействия поля раздробленного льда с исходной средней толщиной $h = 2$ м. Так как в натуре и на модели подстилающей средой является одна и та же среда – вода, то следовательно $m_\gamma = 1$. За характерный размер примем диаметр опоры, а среднее значение напряжения на модели найдем через коэффициент $\eta = 0,46$: $\sigma_{x_{ср.м}} = \eta \sigma_{x_{max.м}}$ (рис. 4).

Результаты пересчета данных, полученных в эксперименте на натуру, представлены в таблице.

Литература

1. Винников С.Д. Определение статической нагрузки на вертикальную цилиндрическую опору от ледяного покрова с помощью модельных исследований. Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. – Л.: Энергия, 1979. – С. 69 – 73.
2. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНиП 2.06.84–82, раздел 5, – М., 1995.
3. Проскураков Б.В., Берденников В.П. Метод модельного исследования разрушения ледяного покрова // Труды ГИ. – 1972. – Вып. 192. – С. 7 – 23.

ОПАСНЫЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Природные явления в области гидрометеорологии весьма разнообразны как по виду, так и по характеру (силе) проявления. Существенная часть из них по силе проявления относится к категории опасных для человека.

По природному происхождению опасные гидрометеорологические явления можно разделить на три группы: метеорологические, гидрологические и морские. Применительно к климатическим сезонам опасные явления (ОЯ) целесообразно рассматривать отдельно для теплого и холодного периодов года, поскольку формирование ОЯ генетически различно в эти периоды.

В группе гидрологических ОЯ в теплый период происходят наводнения в периоды половодья или паводков, засухи, случаются селевые потоки, оползни, размывы, подвижки ледников. В холодный период – наводнения при оттепелях или от зажоров льда, промерзание (перемерзание) рек и озер, наледи, лавины.

Поскольку «реки – суть продукт климата» (А.И. Воейков, 1884 г.), то, наряду с гидрологическими, необходимо рассмотреть и метеорологические ОЯ. В группе метеорологических ОЯ в теплый период наблюдаются ливневые дожди (создающие наводнения), ураганы, тайфуны и смерчи, выходящие с моря (океана) на сушу и приводящие к наводнениям, очень высокие температуры воздуха и почвы создают условия для возникновения засух. Помимо названных, имеются еще шквалы, туманы, сильные грозы, град. Но эти явления представляют уже самостоятельный интерес.

В холодный период из метеорологических ОЯ непосредственное значение для формирования гидрологических ОЯ имеют оттепели, очень низкая температура воздуха и особенно почвы, а также снегопады и метели. Влияние указанных метеорологических явлений сказывается зимой и весной. Очень низкие температуры воздуха при небольших снегозапасах обуславливают промерзание почвогрунтов на водосборе реки, формирование мощного ледяного покрова на реках и озерах и их промерзание или формирование зимних наводнений в результате зажоров льда в руслах рек. При зимних оттепелях могут формироваться зимние половодья в результате

снеготаяния и выпадения дождей, как это происходит в последние годы в Западной Европе. Большие снегопады приводят к большому половодью. Метели перераспределяют снегозапасы на водосборах рек, особенно в степной и лесостепной зонах. Такие ОЯ как гололед, обледенение, туманы не имеют существенного значения для создания гидрологических ОЯ.

В группе морских ОЯ – цунами, штормовое волнение, нагон морских вод. Последнее явление может быть весьма опасным для устьевых участков рек.

Большое количество гидрологических ОЯ и связанных с ними метеорологических и океанологических ОЯ обуславливают необходимость их научной классификации, учитывающей генезис явления, характер его проявления, время и частоту появления, территорию охвата, а также характер и степень воздействия на общество и природу. С помощью классификации можно внести упорядоченность в разнообразие явлений, произведя их систематизацию и вскрывая закономерные связи и определенные свойства происходящих событий. Классификация является важнейшим шагом к гидрологическому районированию ОЯ, которое в свою очередь необходимо при их расчетах, особенно с использованием методов гидрологической аналогии или при разработке региональных формул. Классификация содействует переходу от эмпирических исследований к теоретическому синтезу полученных знаний, к системному подходу в их анализе и является качественным скачком в развитии гидрологии опасных явлений и процессов.

Гидрологические явления и соответствующие происходящие процессы становятся опасными лишь при определенных условиях. Вызывающие их причины разнообразны, но при этом одна и та же причина может создать несколько опасных явлений. Поэтому весьма важно знать генезис гидрологического явления или происходящих процессов.

Степень опасности гидрологического явления варьирует в большом диапазоне и зависит от вида и силы его проявления, от места появления и широты охвата территории, а также от длительности воздействия. При этом, чем реже появление гидрологического ОЯ, тем опаснее может быть его проявление.

Необходимо отметить, что наблюдающиеся в последние десятилетия стихийные бедствия не являются каким-то исключитель-

ным природным явлением. Анализ русских летописей и исторических документов, сделанный в работе [1], это подтверждает:

Век	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	Всего
Наводнения	4	2	4	8	9	7	11	13	43	36	137
Засухи	18	25	34	35	38	26	27	46	42	70	360

В 1966 г. по Северному полушарию прошла волна выдающихся наводнений, когда уровень на реках поднимался от 6 до 12 м (Северо-Запад СССР, Украина, Кубань, Забайкалье, Средняя Азия, Монголия, Япония, Индия, Пакистан, Болгария, Чехословакия, Италия, США). В 1972–1974 гг. сильные засухи в Восточной Африке. В 1974 г. небывалое наводнение в пустыне Калахари (Южная Африка).

Вместе с тем, анализ частоты появления выдающихся гидрометеорологических событий XX века показывает, что во второй его половине они стали случаться все чаще, особенно последние 20 лет.

Рассматривая в целом понятие «Опасные гидрометеорологические явления (события)» целесообразно выделить три вида этих событий:

- неблагоприятные гидрометеорологические явления;
- опасные гидрометеорологические явления;
- катастрофические гидрометеорологические явления.

Характеристики неблагоприятных ГМЯ существенно отличаются от нормы (среднегодовое значение), однако не создают опасной ситуации, хотя могут являться предтечей опасных ГМЯ и перерасти в них.

К опасным ГМЯ можно относить события, которые могут угрожать безопасности людей и сооружений, причинить существенный экономический и экологический ущерб. Они могут перерасти в катастрофические ГМЯ.

К катастрофическим ГМЯ целесообразно относить такие события, которые приводят (если не принять должных мер) к человеческим жертвам, разрушениям и наносят большой экономический и экологический ущерб. При невозможности защиты от него такое явление называется «стихийным бедствием».

Опасные и катастрофические ГМЯ создают чрезвычайные ситуации (ЧС), требующие принятия необходимых защитных мер. Источником ЧС могут являться любые из вышеперечисленных гидрометеоро-

рологических явлений. Причем их опасность может быть обусловлена природными и антропогенными (техногенными) причинами.

Опасные гидрологические явления имеют очень различную площадь распространения. Наибольшую площадь чаще имеют засухи, охватывающие большие районы и даже страны, когда высыхают реки и водоемы и проблема пресной воды становится острее проблемы пропитания. Но и наводнения, особенно катастрофические, иногда охватывают территории в сотни и тысячи кв. км. Например, в 1973 г. р.Миссисипи (США) затопила площадь в полтора раза больше, чем площадь Швейцарии.

Наиболее локальными являются селевые потоки, оползни, размывы, лавины, которые обычно приурочены ко вполне определенным местам.

По времени проявления опасные гидрологические явления могут быть кратковременными и длительными. Большинство ОГЯ относятся к первой категории, поскольку могут длиться от нескольких минут или часов до нескольких суток (лавины, сели, оползни, размывы, паводки, подвижки ледников). Но имеются и весьма продолжительные (недели, месяцы и даже годы) – засухи, промерзания рек и водоемов, наледи, половодье.

Некоторые ОГЯ возникают регулярно на конкретных территориях, но далеко не всегда становятся катастрофическими. К числу гидрологических явлений, способных стать очень опасными, т. е. катастрофическими, относятся наводнения и их антипод – высыхание водных объектов. Эти явления и связанные с ними процессы часто провоцируют другие опасные и даже катастрофические явления – такие как обвалы, оползни, размывы, подтопления.

Ярко выраженную опасность довольно часто имеют наводнения. Опасность наводнений обусловлена быстрым подъемом уровней и увеличением скоростей течения воды, а также большими размерами затопленных территорий. Природными причинами, вызывающими наводнение, являются интенсивное снеготаяние и/или ливневые дожди. При обычных условиях – длительное снеготаяние или дожди небольшой интенсивности (хотя и длительные) обычно не образуются наводнений, поскольку существенная (или даже большая) часть образующейся на поверхности водосбора воды уходит на инфильтрацию, аккумуляцию, испарение. При интенсивном снеготаянии больших снеготопливных запасов на водосборе реки и хорошей

увлажненности почво-грунтов или их глубокой промерзаемости коэффициент стока может резко возрасти до 70–80% и более, против обычных 30–40%. При дружной весне на водосборе сформируются большие объемы воды за короткий период времени. Выпадение дождей в этот период приведет к увеличению интенсивности формирования половодья. Еще более его усилит появление ледовых заторов. Так произошло, например, формирование катастрофического половодья в бассейне Верхней Лены в 2001 г., когда уровень у г.Ленска поднялся на 18,5 м и ширина разлива составила 15 км.

Основными факторами формирования наводнения при прохождении дождевых паводков являются интенсивность и длительность дождей. При продолжительных и интенсивных дождях резко увеличивается коэффициент стока, а потери на инфильтрацию, аккумуляцию и испарение становятся незначительными относительно общего объема воды, образовавшейся на водосборе. При больших уклонах местности время добегания сокращается, вода быстро концентрируется в пойме и долине реки, превращая их во временные водохранилища, особенно при наличии сужений в долине. Например, в бассейне р.По (Италия) за двое суток в середине октября 2000г. выпала двухмесячная сумма осадков и уровень воды в реке за трое суток поднялся на 10,5 м.

Катастрофическое наводнение нередко формируется в результате слияния двух рек, на которых проходит обычный паводок.

Расходы воды, создающие катастрофические наводнения, имеют обычно, редкую повторяемость, т. е. малую обеспеченность (1% и меньше). Особенно это характерно для половодий. Однако, катастрофический паводок может проходить при расходах воды большой обеспеченности (15–25% и даже более). Подобное наблюдается, например, при прохождении смерчей и тайфунов после их выхода с моря (океана) на сушу. При этом, на ограниченной площади выпадают очень интенсивные осадки, создающие большой объем воды, который, при значительных уклонах местности, быстро переполняет русло в зоне выпадения дождя. А большие скорости течения воды придают потоку большую разрушительную силу. При этом, потери на инфильтрацию и испарение становятся незначительными. Такой паводок возникает очень быстро и неожиданно.

В горных районах с большими уклонами в местах скопления рыхлых пород при выпадении интенсивных дождей или бурном

снеготаянии формируются селевые паводки, обладающие большой разрушительной силой.

Таким образом, при формировании опасных и катастрофических наводнений основная (глобальная) роль принадлежит метеофакторам – осадки и температура воздуха, а остальные факторы (испарение, почво-грунты, растительность и пр.) не имеют существенного значения.

В приморских районах на устьевых участках рек наводнения могут возникать под влиянием других метеофакторов – ветер и низкое атмосферное давление. Усиливать наводнение может прилив. Так, ветер и низкое давление вызывают нагон воды в устье р.Невы, ветер и прилив делают тоже самое в устье р.Янцзы.

Противоположным наводнению явлением будет пересыхание или промерзание рек и озер. Длительное отсутствие воды приводит к катастрофическим последствиям для людей и, особенно, для животного и растительного мира. Истории известны войны за воду в засушливых районах Земли и переселение народов. Имеются сведения о том, что две трети войн XIX в. были вызваны борьбой за источники воды. Нехватка воды обуславливает переброску стока на большие расстояния в сотни и даже в тысячу километров (Китай, Египет, США).

Прекращение стока происходит в результате истощения питающих реки водоносных горизонтов. Последнее наблюдается в периоды длительного отсутствия осадков при высоких или низких температурах воздуха и почвы, т.е. тех же метеофакторах.

Таким образом, при расчетах и прогнозах опасных и катастрофических наводнений и засух решающее значение имеют данные об осадках и температуре воздуха по водосбору реки или озера.

Литература

1. *Борисенков Е.П., Пасецкий В.М.* Тысячелетняя летопись необычных явлений природы.–М., Мысль, 1988.
2. *Владимиров А.М.* Классификация опасных гидрометеорологических явлений.–СПб, Материалы итог. сессии Уч. Сов. РГГМУ, ч.1, 2003.
3. *Владимиров А.М.* Особенности формирования опасных гидрологических явлений.–СПб, Материалы итог. сессии Уч. Сов. РГГМУ, ч.1, 2004
4. ГОСТ Р 22.0.03.–95, Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения. М., 1996.
5. Порядок действий организаций и учреждений Росгидромета при возникновении опасных природных явлений.– СПб. Гидрометеонздат, 2000.
6. СНИП 22-01-095. Геофизика опасных природных воздействий, М., 1996.

ВОДНЫЙ БАЛАНС ОЗЕР ЗОНЫ НЕДОСТАТОЧНОГО УВЛАЖНЕНИЯ

Озера Кулундинское и Кучук, на примере которых рассмотрен водный баланс соленых озер, расположены в обширной Кучук-Кулундинской депрессии в центре Кулундинской степи на юге Западной Сибири. Эти водоемы имеют большое хозяйственное значение, прежде всего в галургии. Поэтому изучение водного баланса, на базе которого формируется водно – солевой режим этих озер представляется важной в научном и практическом значении задачей. Настоящая работа посвящена расчету и анализу водного баланса названных водоемов. При этом рассмотрены годовые и месячные балансы за многолетний период и показано их различие.

Озеро Кучук соленый ($250^{0/100}$) бессточный водоем. Площадь озера составляет 175 км^2 , при средней отметке поверхности $98,2 \text{ м абс.}$ Средняя глубина озера $1,7 \text{ м}$, а объем воды $0,29 \text{ км}^3$. Площадь бассейна равна 3240 км^2 , в том числе 800 км^2 приходится на бессточные понижения. Удельный водосбор – $1,9$. В $1,5 \text{ км}$ к северу от озера Кучук расположено Кулундинское озеро, которое также является мелководным водоемом. При площади зеркала около 700 км^2 (отметка $99,7 \text{ м абс.}$), средняя глубина составляет $2,6 \text{ м}$, объем воды $2,1 \text{ км}^3$, площадь бассейна 24100 км^2 в т. ч. бессточных площадей 9020 км^2 . Минерализация воды несколько меньше, чем на Кучуке и составляет в среднем $50\text{--}80^{0/100}$. Химический состав воды в обоих озерах относится к числу сульфатно-хлоридных рап.

В отличие от озера Кучук озеро Кулундинское периодически сточное из-за большего удельного водосбора ($34,4$). Поэтому запасы рапы озера Кучук периодически пополняются из озера Кулундинского.

Уравнение водного баланса озера можно записать

$$W_{\text{пр}} + W_{\text{б.пр}} + W_{\text{гр}} + W_{\text{ос}} - W_{\text{исп}} - W_{\text{п}} = \pm \Delta W \pm \sigma \quad (1)$$

где $W_{\text{пр}}$ – приток воды по рекам; $W_{\text{б.пр}}$ – приток воды с площади непосредственно прилегающей к озеру; $W_{\text{гр.пр}}$ – приток подземных вод; $W_{\text{ос}}$ – атмосферные осадки на поверхность озера; $W_{\text{исп}}$ – испа-

рение с озера; $W_{\text{п}}$ – приток воды по протоке (для оз. Кучук), сток (для оз. Кулундинское); ΔW – изменение объемов; σ – невязка.

Приток в озеро Кулундинское осуществляется по р.Кулунде и р.Суетке, в озеро Кучук – по р. Кучук. Величина берегового притока зависит от размеров площади, непосредственно прилегающей к озеру и коэффициента стока (α). Для определения $W_{\text{б-пр}}$ определялись максимальные снегозапасы по данным метеостанций, находящихся в непосредственной близости от озер.

Объемы воды заключенные в снеге затем умножались на величину α , определенных по данным стока рек Суетки и Кучук.

Осадки определялись по данным метеостанций Славгород, Хабаровы, Родино путем осреднения с учетом площадей поверхности озер, тяготеющих к станциям.

Испарение рассчитано по формуле ГГИ для пресной воды

$$E = 0,14 \text{ п } (e_0 - e_2) (1 + 0,72 V_2), \quad (2)$$

для испарения с рассола вводится переменный редукционный коэффициент $г$

$$E_p = г E \quad (3)$$

Для определения $г$ по озеру Кучук построена зависимость $г = f(H)$, где H – уровень озера. При этом чем больше глубина, тем выше распределение рапы и тем больше $г$.

Величина подземного стока определена по материалам Института Галургии. Сток по протоке (Q) рассчитан по имеющемуся графику зависимости $Q = f(H_{\text{кл}})$, где $H_{\text{кл}}$ – уровень озера Кулуидинское.

В таблицах 1, 2 приведены результаты расчетов годовых составляющих водного баланса озер Кулундинское и Кучук за несколько внутривековых циклов колебания водности, которые определены по графикам хода их уровней за многолетний период. В качестве расчетных были выбраны многолетние периоды, в начале и в конце которых уровень озера характеризуется близкими значениями. Каждый расчетный период включает от одного до четырех полных циклов колебания наполнения водоема. Для оз. Кулундинского приведен также водный баланс, рассчитанный для 1977 г., когда было зафиксировано самое низкое положение уровня озера за весь период наблюдений.

В водном балансе оз. Кулундинского среди приходных элементов главную роль играют атмосферные осадки (~ 50 %) и поверхно-

стный приток (32 – 39 %). Подземный приток составляет в среднем всего 10 % от суммы приходных составляющих. Роль перечисленных составляющих в формировании водного баланса оз. Кучук несколько иная. Если атмосферные осадки составляют примерно те же 50 %, то питание озера поверхностными и подземными водами осуществляется практически в одинаковых пропорциях. Объясняются эти различия тем, что уровень оз. Кулундинского находится в среднем на 1,4 м выше, чем уровень оз. Кучук, что является причиной затрудненной разгрузки напорных вод, которая составляет для оз. Кучук примерно 110 мм в год, тогда как для оз. Кулундинского всего 50 мм.

Основная расходная составляющая водного баланса испарение (E_p). Кроме того сток из озера Кулундинского в Кучук осуществляется по протоке эпизодически при уровне более 99,5 м и за все годы не превышал 3% всей расходной составляющей озера Кулундинского.

Таблица 1

Среднегодовой водный баланс оз. Кулундинского при различии наполнении водоема (числитель – мм; знаменатель – %)

Расчетный период	Средний уровень, м абс.	Площадь озера, км ²	Приходные составляющие			Расходные	Изменение уровня	Невязка
			Поверхностный приток	Осадки	Подземный приток	Испарение		
1937 – – 1977	99,62	692	$\frac{272}{38}$	$\frac{373}{52}$	$\frac{76}{10}$	$\frac{721}{100}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{5}{1}$
1937 – – 1955	99,57	685	$\frac{284}{38}$	$\frac{358}{48}$	$\frac{77}{11}$	$\frac{739}{100}$	$\frac{-20}{3}$	$\frac{25}{3,4}$
1957 – – 1968	99,93	723	$\frac{271}{39}$	$\frac{372}{53}$	$\frac{71}{10}$	$\frac{704}{100}$	$\frac{10}{2}$	$\frac{25}{3,6}$
1969 – – 1976	99,35	660	$\frac{240}{32}$	$\frac{396}{53}$	$\frac{81}{11}$	$\frac{747}{100}$	$\frac{-30}{4}$	$\frac{17}{2,3}$
1977	99,09	631	$\frac{247}{32}$	$\frac{361}{47}$	$\frac{95}{13}$	$\frac{763}{100}$	$\frac{-60}{8}$	$\frac{16}{2,1}$

Таблица 2

Среднегодовой водный баланс оз. Кучук при различном наполнении водоема (числитель – мм; знаменатель – %)

Рас- чет- ный пе- ри- од	Сред- ний у- ро- вень, м	Пло- щадь озе- ра, км ²	Приходные составляющие				Рас- хо- дные	Изме- нение уров- ня	Не- вяз- ка
			По- верх- ност- ный при- ток	Осад- ки	Под- зе- мный при- ток	При- ток по про- токе	Испарение		
1956 – 1977	98,19	170	$\frac{141}{21}$	$\frac{331}{49}$	$\frac{138}{21}$	$\frac{62}{9}$	$\frac{672}{100}$	0	0
1956 –1967	98,29	171	$\frac{134}{18}$	$\frac{340}{47}$	$\frac{135}{19}$	$\frac{114}{16}$	$\frac{693}{96}$	$\frac{30}{4}$	0
1968 – 1977	98,07	168	$\frac{149}{23}$	$\frac{321}{50}$	$\frac{143}{22}$	0	$\frac{643}{100}$	$\frac{-30}{5}$	0
1978 – 1985	97,90	165	$\frac{105}{18}$	$\frac{314}{55}$	$\frac{152}{27}$	0	$\frac{528}{93}$	$\frac{40}{7}$	$\frac{-3}{1}$
1986 – 1991	98,18	170	$\frac{143}{24}$	$\frac{266}{46}$	$\frac{142}{24}$	0	$\frac{592}{100}$	$\frac{36}{-6}$	$\frac{-5}{1}$
1956 – 1985	98,11	168	$\frac{131}{20}$	$\frac{327}{51}$	$\frac{141}{22}$	$\frac{44}{7}$	$\frac{638}{100}$	0	$\frac{5}{1}$
1956 – 1991	98,12	168	$\frac{133}{21}$	$\frac{317}{50}$	$\frac{141}{22}$	$\frac{40}{6}$	$\frac{630}{100}$	0	$\frac{1}{0,2}$

Величина (E_p) в многолетнем разрезе для исследуемых озер меняется по-разному. Во-первых, изменчивость годовых значений E_p заметно больше для озера Кучук в сравнении с Кулундинским. Во-вторых, максимумы испарения для Кулундинского озера, как и для пресных озер, наблюдаются обычно в относительно более жаркие годы при низком стоянии уровня и, следовательно, лучшем прогреве рапы, тогда как на озере Кучук в подобных условиях испарение минимально. Объясняется это различиями в солевом режиме озер. Рапа оз. Кулундинского содержит в несколько раз меньше солей, чем рапа оз. Кучук, за счет существования периодического ее

оттока по протоке. При этом для обоих озер существует устойчивая обратная связь между уровнем рапы (Н) и ее концентрацией (С). За многолетний период диапазон изменения "С" для оз. Кулундинского составил (4 – 7) мас. %; для оз. Кучук – (21 – 27) мас. %. При такой высокой концентрации солей, как в оз. Кучук, изменение величины испарения с его поверхности определяется не столько метеорологическими условиями, сколько величиной "С". Коэффициент редукции (г), который характеризует соотношение между испарением с пресной воды (Е) и с рапы (E_p), при изменении концентрации солей в отмеченных пределах варьирует для оз. Кучук от 0.8 при нижнем пределе "С" до 0.55 – при верхнем. Для Кулундинского озера от 0,98 до 0,9, т. е. соли, содержащиеся в рапе, не оказывают заметного влияния на процесс испарения.

Водный баланс Кулундинского озера формируется, в основном, под влиянием природных факторов, за исключением поверхностного притока, который с конца 60-х годов снизился на 20% из-за строительства плотин на реках Кулунде и Суетке.

В водном балансе оз. Кучук, в приходной составляющей также произошло сокращение притока по р. Кучук примерно на 30% и по тем же причинам, что и на озере Кулундинском. При рассмотрении годовых балансов, необходимо учитывать влияние некоторых видов хозяйственной деятельности, осуществляемых непосредственно на озере или на его водосборной площади. Один раз в три года проводится забор рапы из оз. Кучук для нужд ОАО "Кучуксульфат" в объеме (25 – 30) млн. м³. Обессульфаченная рапа возвращается в озеро обычно в течение нескольких месяцев следующего года. В 1987 г. начала функционировать 1-ая очередь Новотроицкого массива орошения и с 1990 г. в озеро стали поступать дренажные воды. При этом прогнозы объема и состава дренажного стока были сделаны сотрудниками кафедры гидрогеологии и геодезии ЛГМИ и оказались весьма близки к наблюдающимся в настоящее время. С учетом уменьшения фактических объемов за счет применения в водосберегательных оросительных технологий и почти трехкратного сокращения площади орошения. Эпизодически производится сброс избытков воды из Кулундинского магистрального канала, по которому подается вода из р. Иртыша на орошение земель Кулундинской степи. Такой сброс объемом примерно 15 млн. м³ и 45 млн. м³ был осуществлен в 1986 и 1987 гг., соответственно. В результате были компенсированы сокращение объема есте-

ственного стока р. Кучук и аномально низкая сумма атмосферных осадков в период 1986 – 1991 гг. Результаты расчета составляющих водного баланса озера, приведенные в табл. 2, показывают, что в этот период уровень водоема поднялся до среднего значения, характерного для естественных условий формирования водного баланса, тогда как в предшествующий период (1978 – 1985 гг.) наполнение озера было аномально низким.

Для исследования внутригодовых составляющих водного баланса расчеты проведены за отдельные месяцы с 1936 по 1980 гг., а для анализа результатов, помимо описания особенностей баланса, привлечены методы математической статистики.

Отрезки реализации среднемесячных значений составляющих водного баланса исследуемых озер за произвольно выбранное десятилетие приведены на рис. 1 и 2. Для реализации среднемесячных сумм осадков на зеркало озер характерна чрезвычайная изменчивость. Кривая внутригодового хода многовершинна. В зависимости от степени водности количество максимумов от года к году может меняться от двух до пяти. Чаще всего основной максимум осадков приходится на лето. В силу большой случайности данного процесса он может появиться как в июне, так и в июле и августе. От года к году меняется не только время наступления максимальных величин осадков, но и их интенсивность. Межгодовая изменчивость процесса, таким образом, происходит в виде амплитудной и фазово-частотной модуляции характерных элементов внутригодового хода.

Значительно более устойчивая форма свойственна для кривой годового хода испарения с зеркала озер. Так для этого процесса присуще ежегодное повторение основного максимума летом, в июле. Происхождение этого максимума испарения связано, по-видимому, с наблюдающимися в данный месяц максимальными температурами воды и воздуха. Минимумы испарения наблюдаются со снега в зимние месяцы. В основном они близки к нулю, но в отдельные годы достигают своих абсолютных величин, отражая определенную цикличность в чередовании теплых и холодных зим. От года к году меняется амплитуда основного максимума испарения, значения процесса в период наступления минимумов изменяются незначительно. Межгодовая изменчивость, таким образом, также как и для осадков, проявляется преимущественно в виде амплитудной модуляции основного всплеска значений.

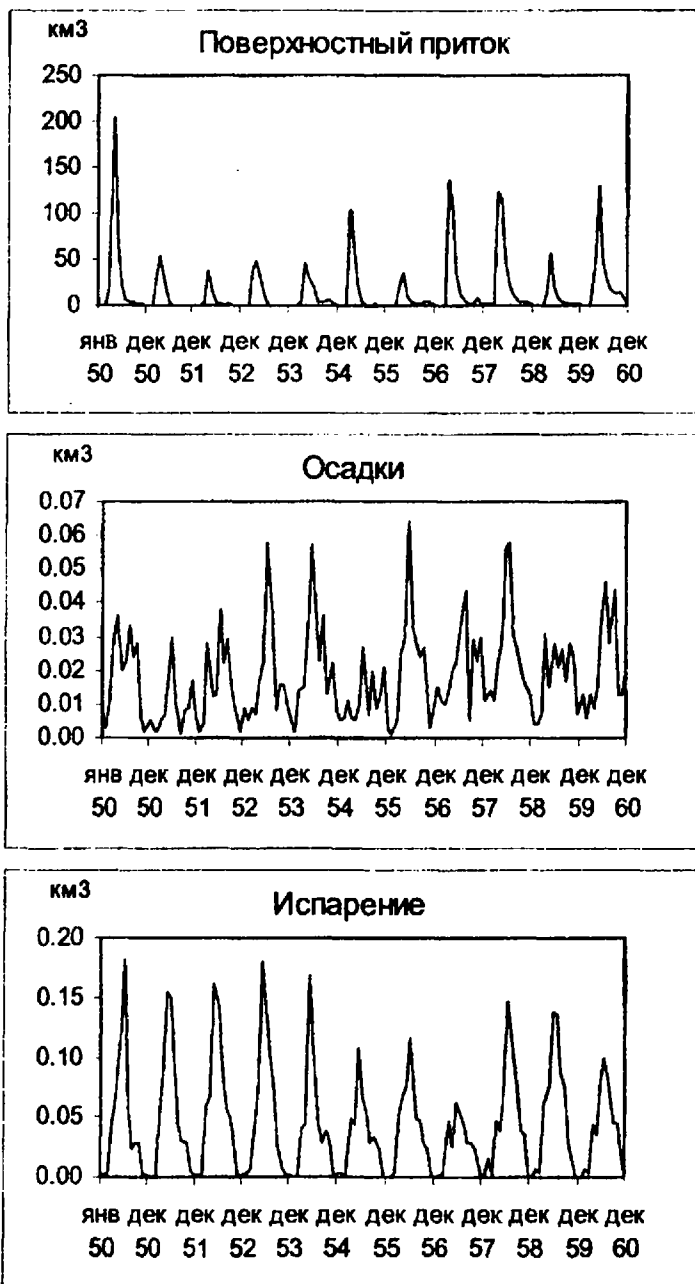


Рис. 1. Составляющие водного баланса оз. Кулундинское

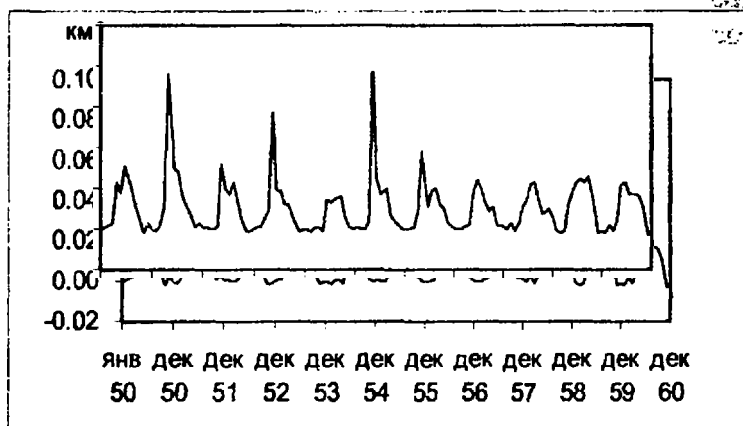
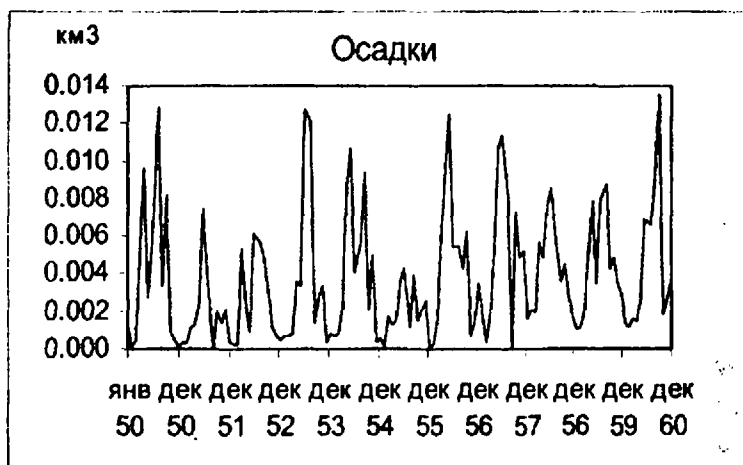
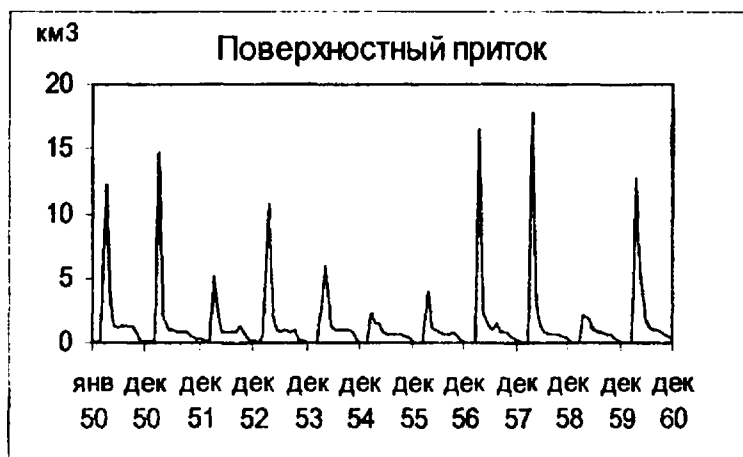


Рис. 2. Составляющие водного баланса оз.Кучук

На реализации суммарного среднемесячного притока в озера четко прослеживаются все особенности режима рек их бассейнов. Так, ежегодно проявляются весенние половодье, летняя и зимняя межень, а в отдельные годы – осенний дождевой паводок.

От года к году меняется амплитуда характерных элементов внутригодового хода. Межгодовая изменчивость суммарного притока проявляется, таким образом, в виде модуляции типичных элементов внутригодового хода.

Поскольку для каждой составляющей водного баланса озер характерна своя ритмика годовой цикличности, будем анализировать ее методами теории периодически коррелированных случайных процессов (ПКСР).

Основными вероятностными оценками ПКСР, адекватно отражающими особенности ритмики годовой цикличности многих гидрометеорологических процессов, являются математическое ожидание $m(t)$, дисперсия $D(t)$, матрица корреляционных зависимостей внутригодовой изменчивости. Математическое ожидание ПКСР характеризует регулярную компоненту внутригодовых изменений процесса и позволяет оценить средний многолетний повторяющийся образ годового колебания: дисперсия отклонения процесса – отклонения процесса от средней многолетней нормы. Вид функции $K(t, \tau)$ при $\tau = 1$ мес. Отражает закономерности внутригодовых изменений процесса в заданные моменты времени. При месячном интервале осреднения исходной информации оценки $m(t)$, $D(t)$ и $K(t, \tau)$ вычисляются для каждого месяца по ежегодным последовательностям значений в предположении об их стационарности и стационарной связанности. Матрица корреляционных зависимостей внутригодовой изменчивости имеет две ветви связей – «вперед» и «назад». Ветвь связи «вперед» показывает коррелированность значений процесса в каждый j -тый месяц года с величинами в последующие месяцы, ветвь связи «назад» – зависимость отсчетов процесса в каждый j -тый месяц от значений в предыдущие ему месяцы.

Ход кривых оценок математического ожидания месячных сумм осадков имеют четко выраженный сезонный характер – максимум приходится на июль, минимум на февраль. Дополнительные экстремумы, отмеченные при анализе реализаций, сглаживаются при многолетнем осреднении. На кривой дисперсии наблюдается один максимум в июле. Он показывает, что всплеск значений приходится на июль.

Кривые оценок математического ожидания испарения с поверхности озер имеют максимум в июле (Кулундинское) и в мае (Кучук) и минимум зимой. На кривых оценок дисперсии максимум приходится на июль для оз. Кулундинского и на май для оз. Кучук.

Графикам оценок $m(t)$ и $D(t)$ суммарного притока соответствующих кривые с основным максимумом значений в период весеннего половодья (апрель – май). Минимумы на кривых математического ожидания и дисперсии совпадают с меженью (сентябрь – март).

Сопоставление кривых $m(t)$ для осадков и испарения показывает, что в среднем многолетнем аспекте за анализируемый период (с 1936 по 1980 гг.) с мая по октябрь включительно количество влаги, испарившейся с поверхности озер было больше суммы осадков, выпавших на поверхность озер. В остальные месяцы года объем осадков преобладал над суммой испарения.

Анализ оценок $K(t, \tau)$ показывает, что для процесса выпадения осадков на поверхность озер характерно отсутствие коррелированности отсчетов внутри года. Так, для всех месяцев связи как «вперед», так и «назад» достаточно быстро затухают на начальных участках коррелограмм и продолжают флуктуировать с незначительными отклонениями от нулевого уровня в дальнейшем.

Для испарения с поверхности озер свойственна несколько большая, чем для осадков, коррелированность значений внутри года. Она проявляется в увеличении коэффициентов корреляции для отдельных месяцев. Это свидетельствует о существовании влияния испарения в отдельные месяцы года на процесс в последующие за ним месяцы. Радиус затухания корреляционных связей внутри года для испарения превышает соответствующую величину для осадков и составляет 2 – 4 месяца.

Большой коррелированностью характеризуется процесс суммарного притока в озера. Так, $K(t, \tau)$ как «вперед» так и «назад» не затухают в большинстве месяцев года. Однако временные сдвиги τ , соответствующие значимым коэффициентам корреляции, различны для разных сезонов. В период межени временно сдвиг «вперед» и «назад», соответствующий значимым коэффициентам корреляции, составляет 2 – 3 месяца. В мае (для оз. Кучук) и апреле (для оз. Кулундинского) значимы только коэффициенты корреляции для связей «назад» ($\tau = 4$).

На основании проделанной работы получены интересные результаты.

Составлены и рассчитаны годовые и месячные водные балансы озера Кулундинское и Кучук за многолетний период.

Полученные результаты позволяют выявить «вклад» различных составляющих в формирование уровня и, следовательно, солевого режима озера. Анализируя полученные результаты, можно утверждать, что наибольший «вклад» в формирование режима озера вносит поверхностный приток и испарение. И это касается как годовых, так и месячных балансов. Однако в отдельном годе или месяце роль других составляющих, особенно в приходной части может заметно увеличиваться.

Литература

1. *Догановский А.М.* Водный баланс озера Кучук и его возможные изменения в связи с развитием орошаемого земледелия в бассейне озера. М., Тр. ЗСРГИ-ИГМИ, вып. 37, 1978, с. 111–120.
2. *Догановский А.М.* Водный баланс озера Кулундинского и его возможные изменения в связи с предполагаемым хозяйственным использованием водоема. Л., Межведомственный сборник, вып. 69, 1985, с. 66–80
3. *Прокофьева Т.И.* Исследование водного баланса озера Кучук и Кулундинского в связи с развитием орошения в Центральной Кулунде. В сб. Гидрогеолого-мелноративные работы в Сибири. Красноярск, 1980.
4. Производство сульфата натрия из рассолов озера Кучук. Под ред. Флоринского Е.Е.. Изд.СпбГУ, 2001, 441 с.

УДК 556.555.3.06 (861)

Домингес Э.А. асп.

СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ПРИТОКА ВОДЫ К ВОДОХРАНИЛИЩУ ГЭС БЭТАНИЯ (РЕСПУБЛИКА КОЛУМБИЯ)

В Колумбии более 70 % производимой электроэнергии генерируется на гидроэлектростанциях [1]. В связи с этим энергетическая система страны очень чувствительна к изменчивости гидрологического режима. При этом в управлении разными водохранилищами ГЭС, в Колумбии используются стохастические процедуры принятия решений (СППР). Эти процедуры требуют вероятностного описания ограничительных факторов [2], среди которых находятся гидрологические характеристики притока воды, поэтому для выхода на

оптимальную выработку электроэнергии без ущерба для принципа бесперебойного электроснабжения энергетический сектор Колумбии нуждается в прогнозе байесовских (апостериорных) вероятностей характеристик притока. В то же время, в оперативном режиме эксплуатации ГЭС подключенных к Общей объединенной системе передачи электроэнергии (ООСПЭ) Колумбии, не внедрены, и до сих пор не разработаны, полные цепочки технологии прогнозирования выработки электроэнергии с использованием апостериорных кривых вероятностей притока к водохранилищу. Таким образом, имеет место противоречие между необходимостью применения апостериорных кривых вероятностей в СППР и отсутствием методики их оперативного прогнозирования. Для разрешения этого противоречия можно применить стохастическую модель формирования стока, разработанную на кафедре гидрофизики и гидропрогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) В.В. Коваленко [3]. Эта модель успешно применялась в квазистационарном варианте для оценки долгосрочных изменений гидрологического режима [4], также в различных вариантах нестационарного режима речного стока для территории России, Узбекистана, Монголии и Китая (см. например [5]).

Стохастическая модель формирования стока выводится на основе динамической модели формирования стока первого порядка с сосредоточенными параметрами следующего вида:

$$\tau \frac{dQ(t)}{dt} + \frac{1}{k} Q(t) = \dot{X}(t), \quad (1)$$

где Q – расход воды, L^3/T ; X – объем осадков, L^3/T ; k – коэффициент стока; τ – время релаксации, T . Введем обозначения: $-1/k\tau \equiv c(t)$, $X/\tau \equiv N(t)$, и учитывая, что функции $c(t)$, и $N(t)$ являются случайными будем считать $c(t) = \bar{c}(t) + \varepsilon(t)$ и $N(t) = \bar{N}(t) + \tilde{N}(t)$, где $\varepsilon(t)$ и $\tilde{N}(t)$ – случайные процессы с независимыми ординатами (дельта коррелированные) с интенсивностями G_ε , $G_{\tilde{N}}$, и $G_{\varepsilon\tilde{N}}$. Тогда динамическую модель формирования стока (1) можно привести к виду уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК):

$$\frac{\partial p(t, Q)}{\partial t} + \frac{\partial [A(t, Q)p(t, Q)]}{\partial Q} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 [B(t, Q)p(t, Q)]}{\partial Q^2} = 0, \quad (2)$$

где функции $A(t, Q)$ и $B(t, Q)$ – неслучайные функции времени и «ординат», определяющих особенности изучаемого марковского процесса (коэффициенты сноса и диффузии), а $p(t, Q)$ – плотность вероятности исследуемой случайной характеристики.

Для решения уравнения (2) используются явная и неявная схемы конечно-разностной аппроксимации. Обобщенно эти схемы можно представить уравнением

$$\begin{aligned} \frac{p_j^{i+1} - p_j^i}{\Delta t} = & - \left\{ \sigma \left(\frac{\varphi_R (A_{j+1}^{i+1} p_{j+1}^{i+1} - A_j^{i+1} p_j^{i+1})}{\Delta Q} + \frac{\varphi_L (A_j^{i+1} p_j^{i+1} - A_{j-1}^{i+1} p_{j-1}^{i+1})}{\Delta Q} \right) + \right. \\ & \left. + (1 - \sigma) \left(\frac{\varphi_R (A_{j+1}^i p_{j+1}^i - A_j^i p_j^i)}{\Delta Q} + \frac{\varphi_L (A_j^i p_j^i - A_{j-1}^i p_{j-1}^i)}{\Delta Q} \right) \right\} + \\ & + \left\{ \sigma \frac{B_{j+1}^{i+1} p_{j+1}^{i+1} - 2B_j^{i+1} p_j^{i+1} + B_{j-1}^{i+1} p_{j-1}^{i+1}}{2\Delta Q^2} + (1 - \sigma) \frac{B_{j+1}^i p_{j+1}^i - 2B_j^i p_j^i + B_{j-1}^i p_{j-1}^i}{2\Delta Q^2} \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где φ_R, φ_L – коэффициенты направленных разностей, а σ – весовой коэффициент временных слоев. При значении $\sigma = 1$ уравнение (3) вырождается в неявную схему, а когда $\sigma = 0$ – в явную. Для применения явной схемы необходимо выполнять условие Куранта–Фридрихса–Леви в виде:

$$\max(|B(\tau, Q)|) \frac{\Delta t}{\Delta Q^2} < \frac{1}{2}. \quad (4)$$

Для долгосрочного прогноза (сценарных оценок) вероятностных характеристик притока при условии, что $\partial Q(\tau, Q) / \partial t = 0$ из уравнения (2), для коэффициентов вариации (C_V) и асимметрии (C_S), выведены следующие прогнозные соотношения [4]:

$$a_{np} = (G_{\varepsilon N} + 2\bar{N}_{np}) / (2\bar{c}_{np}), \quad b_{0np} = -G_N / (2\bar{c}_{np}), \quad (5)$$

$$b_1 = 2G_{\varepsilon N} / (2\bar{c}_{np}), \quad (5)$$

$$\alpha_{1np} = q_{np} = a_{np} - b_{1np}, \quad (6)$$

$$\alpha_{2np} = \alpha_{1np} a_{np} - b_{0np} - 2\alpha_{1np} b_{1np}, \quad (7)$$

$$\alpha_{3np} = \alpha_{2np} a_{np} - 2\alpha_{1np} b_{0np} - 3\alpha_{2np} b_{1np}, \quad (8)$$

$$C_{Vnp} = \sqrt{(\alpha_{2np}^2 - q_{np}^2) / q_{np}^2}, \quad (9)$$

$$C_{snp} = \frac{\alpha_{3np} - 3\alpha_{2np}\alpha_{1np} + \alpha_{1np}^3}{C_{vnp}^3 q_{np}^3}, \quad (10)$$

где α_i – статистический момент порядка i .

Представленные выражения (6 – 10) позволяют прогнозировать гидрологические характеристики притока без учета переходного режима. Таким образом можно, например, вычислить возможный гидроэнергетический потенциал для заданных сценариях изменения климата при увеличении содержания CO_2 в атмосфере. Квазистационарное решение является обязательным элементом для идентификации параметров уравнения (2).

Применение уравнения ФПК в нестационарном варианте требует задания граничных и начальных условий. Эти условия должны быть согласованными между собой, а их вид определяется сущностью решаемых задач [3, 6]. Для прогнозирования ежемесячного притока воды к водохранилищу ГЭС Бэтания использовались поглощающие граничные условия, а начальные распределения задавались в двух вариантах. В первом варианте среднемесячный фактический приток задавался в качестве нормы, и по погрешности его определения вычислялась дисперсия. По этим данным строилось нормальное распределение, которое использовалось в качестве начального распределения. Во втором варианте, начальное распределение определялось по ежедневным значениям притока каждого месяца. По характерному гидрографу стока выбирались те месяцы года, для которых не опровергается гипотеза о независимости ежесуточных значений притока. Проверка гипотезы проводилась по критерию числа повышений и понижений. Затем, по суточным значениям для каждого месяца, строилась кривая обеспеченности. Для всех эмпирических кривых обеспеченности подбиралась теоретическая кривая в виде гамма – распределения.

Водохранилище Бэтания производит 15 % электроэнергии страны. На водосборной площади этого водохранилища находятся 200 метеорологических и 40 гидрологических станций. Все они находятся под управлением Колумбийского института гидрологии,

метеорологии и исследований по окружающей среде (ИГМИОС). Площадь водосбора водохранилища Бэтания – 13600 км², средний приток воды – 400 м³/с. Контрольными створами выбраны гидрологические станции 2104701 – Пуэнте Балсеадеро и 2105706 – Паикол, находящиеся в руслах рек Магдалены и Пазэз и контролирующие 93 % притока к водохранилищу Бэтания (рисунок 1).

К водосборной площади водохранилища плотно прилегают восточные равнины страны, от которых по ущельям восточного Кордельера передается воздействие однопикового режима выпадения осадков восточного района. Поэтому на водосборной площади Бэтании на одних осадкомерных станциях фиксируется двухпиковый режим выпадения осадков, характерный для горного андийского района, на других – однопиковый режим юга-востока Колумбии. В итоге суммарный приток к водохранилищу обладает размытым многопиковым режимом. Самый главный пик гидрографа суммарного притока приходится на июль, а менее значительные максимумы могут появляться в апреле и сентябре (рисунок 2).

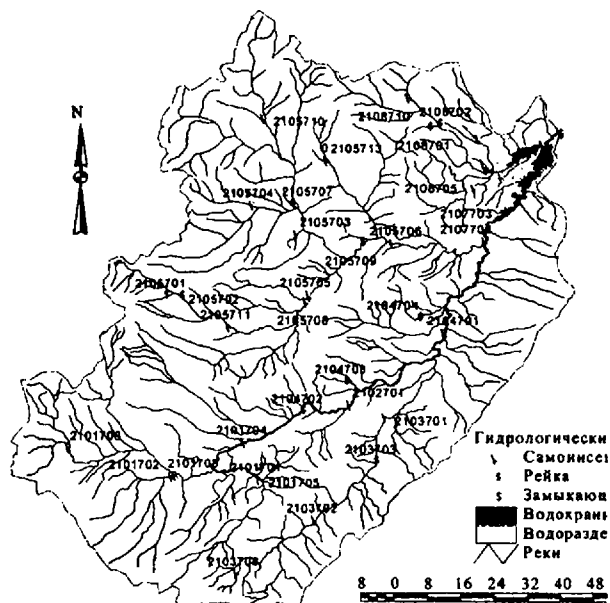


Рис. 1. Гидрологическая сеть постов на водосборе Бэтании

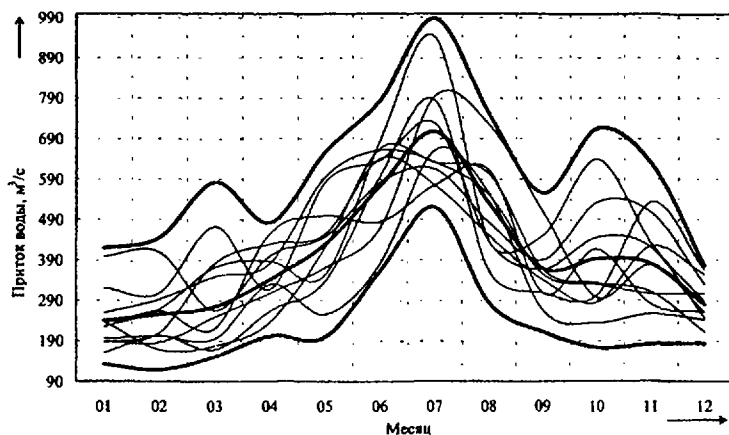


Рис. 2. Гидрографы суммарного притока воды к водохранилищу

На основе наблюдений за притоком воды к водохранилищу Бз-тания с 1984 по 1994 гг. осуществлялись поверочные прогнозы. Эффективность поверочных прогнозов проверялась с помощью критериев Смирнова, Колмогорова и Пирсона [6].

Как показано в таблицах 1 и 2, для первого варианта постановки начальных условий применялось 10 способов задания прогнозных осадков и параметров модели ФПК, а для второго варианта только два способа. Оценка критериев Смирнова, Колмогорова и Пирсона проводилась на трех уровнях значимости ($\alpha = [1, 5, 10]$) и при трех разных степенях свободы ($\nu = [15, 30, 40]$). Параметризация модели ФПК проводилась на основе решения обратной задачи для квазистационарного режима. При этом для второго варианта задания начальных условий, начальные моменты вычислялись по фактическим данным, по уравнениям связи центральных и начальных моментов и непосредственно по подобранной кривой распределения. Из рассмотренных способов параметризации только последний оказался успешным. Согласно критериям оценки прогнозов при первом и втором случаях задания начальных условий стохастический прогноз притока стока обладает удовлетворительной эффективностью.

Таблица 1

Оценка оправдываемости прогнозов кривых плотности вероятности по первому варианту задания начальных условий (при степени свободы $V = 15$)

Способ задания осадков и параметров уравнения ФПК	Оценка критерия оправдываемости, %								
	Смирнова ω^2			Колмогорова λ			Пирсона χ^2		
	Уровень значимости α								
	1	5	10	1	5	10	1	5	10
По фактическим X, k, G_N	99	99	99	99	99	99	99	99	99
По предыдущим X, k, G_N	56	42	38	15	14	14	65	64	64
По фактическим X , прогнозным k и G_N	93	84	81	40	36	36	90	90	90
$X_{\text{прог}} = 0.5X_{j-1} + 0.5X_{\text{ср}}$	72	57	48	19	19	19	71	70	69
$X_{\text{прог}} = 0.25X_{j-1} + 0.25X_{\text{ср}} + 0.5X_{\text{ср}}$	65	52	43	21	21	21	72	67	67
$X_{\text{ср}}$, прогнозным k и G_N	73	60	48	20	20	20	72	70	69
$X_{\text{прог}} = f(X_{\text{ср}}, X_{j-1}, X_{j+2})$	74	61	50	23	20	20	72	69	69
$X_{\text{прог}} = f(X_{T, \text{сред}}, \dot{X}_{T, \text{сред}}, \ddot{X}_{T, \text{сред}})$	72	59	56	19	19	19	74	73	69
По фактическим X, k и G_N прогнозный	85	69	60	27	26	26	75	74	73
$X_{\text{ср}}, k$ и G_N прогнозный	65	56	49	19	17	17	75	70	68

Детальный анализ поверочных прогнозов показал, что при втором способе задания начальных условий результаты прогнозирования улучшаются на 10 %. Это связано с тем, что при прогнозировании островершинных кривых небольшая погрешность при сnose начального распределения порождает большее расхождение ординат фактической и прогнозной кривых плотности вероятности, чем при прогнозировании пологих. Наглядный пример такого факта представлен на рисунке 4, где для водохранилища Бэтания представлен прогноз кривой плотности вероятности притока при первом и втором варианте задания начального условия для октября 1984 года.

Таблица 2

Оценка оправдываемости прогнозов кривых плотности вероятности по второму варианту задания начальных условий и разным степеням свободы □

v	Способ задания осадков и параметров уравнения ФПК									
		Смирнова ω^2			Колмогорова λ			Пирсона χ^2		
		Уровень значимости []								
		1	5	10	1	5	10	1	5	10
15	По фактическим X, k, G_N и G_{cN}	99	99	99	99	99	99	99	99	99
	По многолетним среднесечным значениям X, k, G_N и G_{cN}	93	71	68	39	36	36	99	99	96
30	По фактическим X, k, G_N и G_{cN}	99	99	99	96	93	93	96	96	96
	По многолетним среднесечным значениям X, k, G_N и G_{cN}	68	61	50	21	21	21	93	82	61
40	По фактическим X, k, G_N и G_{cN}	99	99	99	93	93	93	96	96	96
	По многолетним среднесечным значениям X, k, G_N и G_{cN}	64	50	39	21	18	18	71	64	46

Анализ чувствительности показал, что для того чтобы добиться удовлетворительной эффективности, при первом способе задания начальных условий, необходимо держать расхождение между прогнозными и фактическими осадками в среднем на уровне 15 % со среднеквадратическим отклонением, не превышающим 10 %. Для сравнения укажем, что при динамическом прогнозировании притока воды по формуле (1) эффективность прогнозов (оцененная по критерию S/σ_Δ) остается удовлетворительной даже при погрешности в прогнозе осадков на уровне 25 %. Из этого сравнения вытекает, что стохастическая модель формирования стока более требовательна к способам задания внешних воздействий и параметров модели и что необходимо усовершенствовать методику их получения.

Вышеизложенный анализ применения стохастической модели формирования стока для прогноза притока к водохранилищу ГЭС Бэтаня позволяет считать полученные результаты обнадеживающими. Достигнутая эффективность прогнозирования априорных

вероятностей позволяет внедрять эту методику в СППР. Тем самым разработанная для ИГМИОС методика прогнозирования вероятностных характеристик притока выводит его на передовой уровень в сфере обеспечения отраслей народного хозяйства гидрологической информацией. Последовательное применение представленной методики прогнозирования ко всем водохранилищам ГЭС Колумбии позволит ИГМИОС стать первой гидрометеорологической службой, предоставляющей энергетическому сектору прогноз апостериорных вероятностей притока в оперативном режиме.

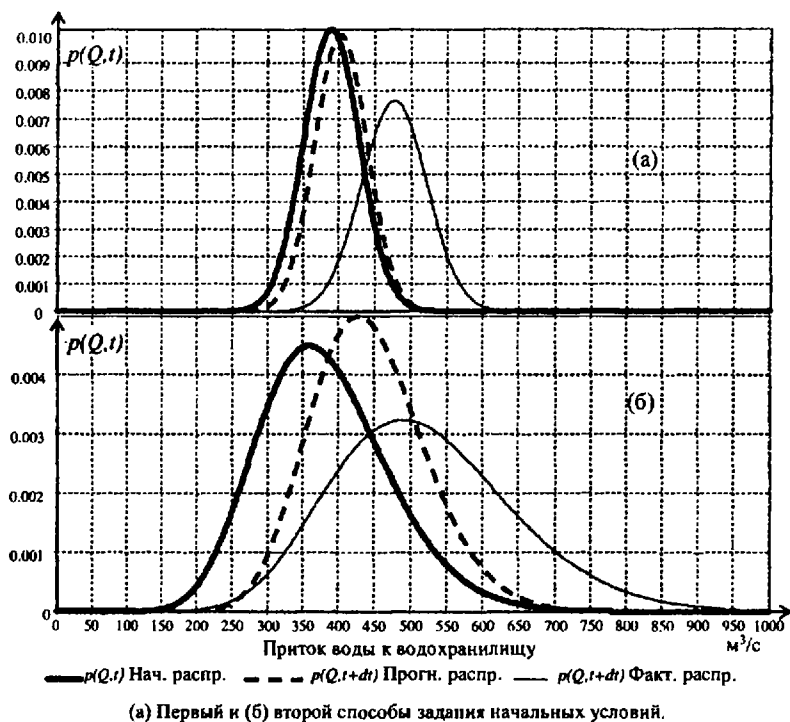


Рис. 4. Прогноз кривой плотности вероятности притока к водохранилищу ГЭС Бэтания (октябрь 1984 г.)

Со временем возможно применение представленной в данной статье технологии прогнозирования для таких водохозяйственных отраслей как: водоснабжение, судоходство и агрокультура. Не маловажно и то, что при учащении таких экстремальных явлений как

Эль Ниньо, Ла Нинья и перед фактом возможного потепления климата описанная методика может оказаться полезной

Литература

1. CREG [Электронный ресурс] / Комиссия по регулированию электроэнергий и газа. – Колумбия. – Режим доступа [http:// www.creg.gov.co](http://www.creg.gov.co).
2. *Bierman H., Bonini C., Hausman W.* Quantitative Analysis for Business Decisions. – London.: Irwin, 1996. – 756 p.
3. *Коваленко В.В.* Моделирование гидрологических процессов. – СПб.: Гидрометеониздат, 1993. – 256 с.
4. *Хаустов В.А.* Устойчивость вероятностных характеристик годового стока к антропогенным воздействиям: Дис. ...канд. техн. наук: 11.00.07. – Защищена 17.06.99; утверждена 08.10.99: КТ007948. – СПб., 1999. – 155 с.
5. *Шевнина Е.В.* Применение динамических и стохастических моделей для прогноза месячного притока в водохранилища гидроэлектростанций (на примере Волховской ГЭС): Дис. ...канд. техн. наук: 25.00.27. – Защищена 13.12.01; утверждена 12.04.02: КТ068853. – СПб., 2001. – 291 с.
6. *Gardiner C.W.* Handbook of stochastic methods. – Berlin: Springer Verlag, 1985. – 442 p.
7. *Рождественский А.В., Чеботарёв А.И.* Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеониздат, 1974. – 424 с.

УДК 556.072+556.16

Илларионов А.В. зав. лаб., к.т.н

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕСТ РАЗМЫВОВ ТРУБОПРОВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ

Магистральные трубопроводы на территории России пересекают более 1500 водотоков и других водных объектов. От надежности трубопроводных переходов зависит экологическая безопасность водных объектов и сопряженных с ними территорий.

Ввиду того, что нормативные сроки действия таких трубопроводов не превышают 30 – 50 лет, а расчеты их заглубления по дну водотока проводились по старым нормативам, довольно часто наблюдаются подмывы трубы, способные в некоторых случаях привести к ее повреждению, а в экстремальных случаях даже к разрыву.

Поскольку подобная авария приводит к огромному экологическому ущербу, Водный Кодекс РФ обязывает водопользователя проводить систематические наблюдения (мониторинг) за состоянием водных объектов и их водоохранной зоны, а также бесплатно

предоставлять эту информацию уполномоченным государственным органам.

В настоящее время методы идентификации зон размыва, позволяющие предотвращать аварии, сводятся к систематическому полевому обследованию мест трубопроводных переходов с помощью панорамных эхолотов, водолазных работ и механического зондирования. Несмотря на высокую эффективность, эти методы достаточно дороги, трудоемки и не позволяют осуществлять дистанционный контроль за состоянием переходов.

Предлагаемый подход к решению проблемы идентификации (выявления) аварийных участков переходов заключается в следующем. Труба, проложенная под дном реки, рассматривается как цилиндрический осциллятор, экранированный слоем грунта, возбуждение которого осуществляется либо естественным шумом компрессорных станций ("эксплуатационное возбуждение"), либо принудительно.

Колебания, возникающие в трубе, формируют в водном потоке акустическое поле, параметры которого зависят от состояния трубопровода, проложенного по дну водотока. Труба в данном случае является сложным акустическим излучателем, работающим в среде с переменными параметрами.

Основным параметром, влияющим на характеристики акустического поля, являются степень экранирования трубы слоем грунта. Естественно, что в месте размыва экранирование ослаблено и возникает акустическая аномалия, выражающаяся в повышении акустического давления.

Этот эффект позволяет использовать для определения технического состояния трубопроводного перехода известный в гидроакустике метод визуализации звукового поля. Визуализация звуковых полей широко применяется для изучения полей сложной формы, для целей дефектоскопии и медицинской диагностики, а также для визуализации акустических изображений предметов, получаемых либо с помощью акустических, фокусирующих систем, либо методами акустической голографии.

С целью апробации метода звуковой визуализации применительно к задаче определения места размыва трубопроводного перехода в лаборатории водных исследований РГГМУ был поставлен следующий эксперимент. На русловой площадке под слой грунта

толщиной 5 – 7 см была помещена труба, один конец которой загнут и выступает над поверхностью воды. На выступающей части трубы размещено устройство, обеспечивающее механическое ударное возбуждение стенки трубы (рисунок 1). Возникающие при этом акустические волны распространяются по всей трубе и формируют в потоке поле акустического давления, характеристики которого отражают состояние исследуемого объекта. Для получения картины распределения звукового давления использован метод сканирования поля миниатюрным приемником акустического излучения (гидрофоном) с последующей компьютерной обработкой результатов измерений, обеспечивающей визуализацию объекта исследования.

На первом этапе было получено звуковое изображение места прокладки трубы (белая аномалия на рисунке 2).

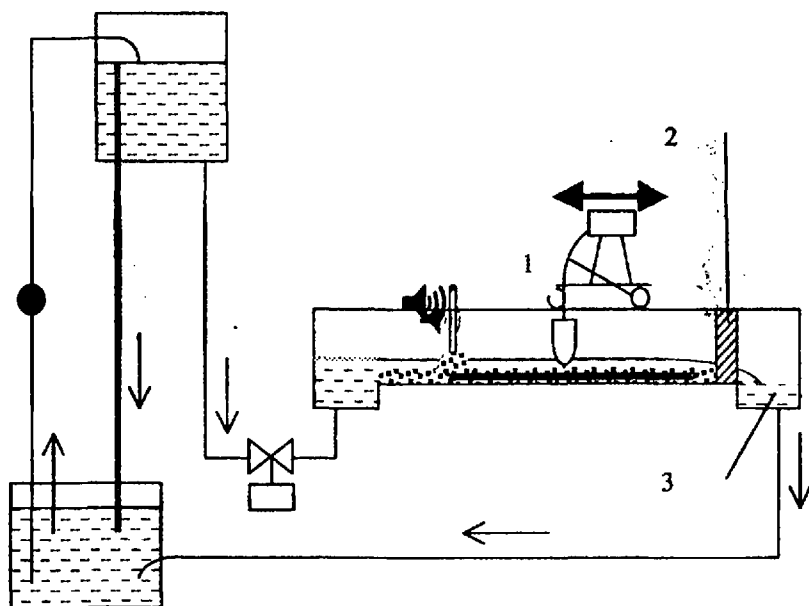


Рис.1. Схема экспериментальной установки
1 – генератор ударного возбуждения; 2 – гидрофон; 3 – труба

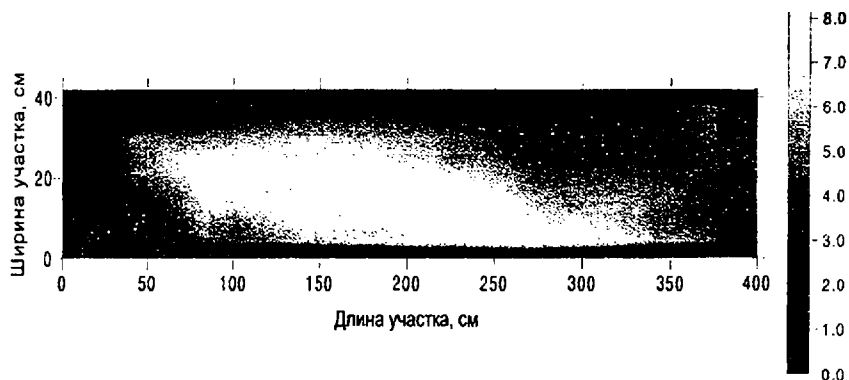


Рис. 2. Акустический “образ” места прокладки трубы (полутонна отражают величину интенсивности акустического поля в относительных единицах)

Далее был смоделирован искусственный разрыв трубы и повторно проведено сканирование акустического поля. Место разрыва обозначено яркой белой аномалией на рисунке 3.

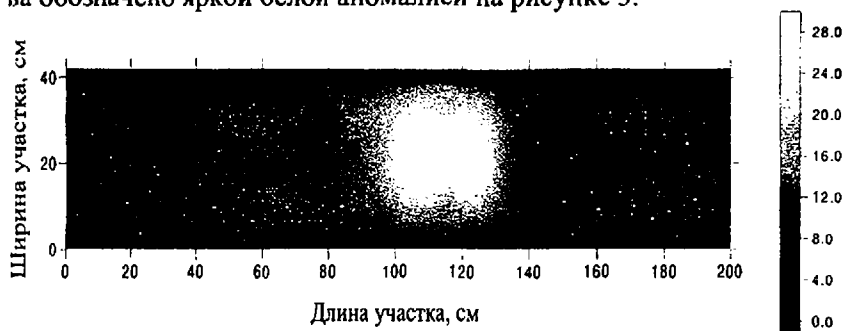


Рис. 3. Акустический “образ” места разрыва трубы

Причем необходимо отметить, что в случае оголения трубы интенсивность звукового поля в потоке возросла более чем в четыре раза.

На последнем этапе эксперимента проведено исследование ослабления акустического излучения в мокром песке (рис. 4).

Характер зависимости изменения интенсивности акустических колебаний от толщины экранирующего трубу слоя песка позволяет сделать предположение о возможности применения предлагаемого метода для оценки толщины находящегося над трубой слоя грунта,

величина которого характеризует надежность трубопроводного перехода.

Проведенные лабораторные эксперименты, на наш взгляд, показали работоспособность предлагаемого метода и подготовили базу для проведения подобных исследований в натурных условиях.

В заключение необходимо отметить, что изложенный выше подход далеко не исчерпан, так, например, в статье не затрагивается вопрос о спектральных характеристиках возбуждаемых в трубе колебаний, их реверберации и т. д., которые являются мощными носителями информации. Некоторая модификация метода позволяет реализовать задачу определения координат места разрыва трубопровода (пассивная акустическая локация с корреляционной обработкой сигналов), а так же дистанционный мониторинг состояния перехода.

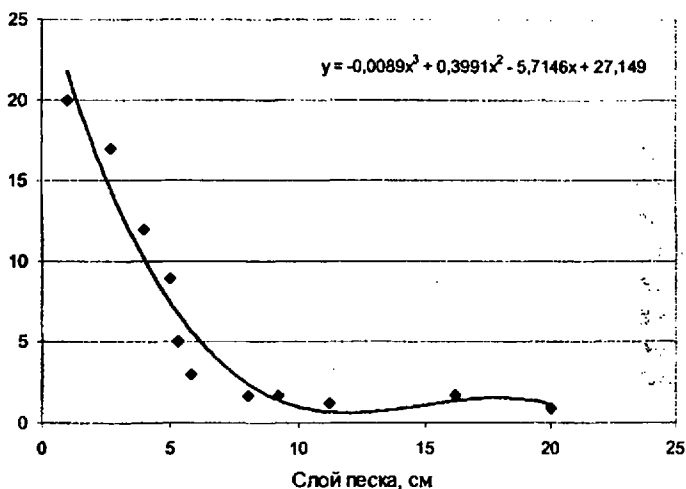


Рис. 4. Функция изменения интенсивности акустических колебаний от толщины слоя песка

Литература

1. Илларионов А.В. Техническая диагностика трубопроводных переходов через реки// Материалы итоговой сессии ученого совета РГГМУ. – СПб.: Изд РГГМУ, 2004. – С. 84.
2. Ультразвук. Маленькая энциклопедия/Под ред. И.П. Галямина. – М.: "Советская энциклопедия", 1979. – 400 с.
3. Камп Л. Подводная акустика. – М.: Мир, 1972. – 328 с.

ОСОБЕННОСТИ СОРТИРОВКИ ДОННЫХ НАНОСОВ

Смена фаз гидрологического режима, поступление твердого материала с притоков, аккумуляция наносов в застойных зонах – все это приводит к весьма пестрому гранулометрическому составу донных отложений в русле реки. В процессе движения русловых микро и мезоформ такое разнообразие крупностей наносов начинает приобретать определенные закономерности.

Принято выделять стрежневую, прибрежную, русловую, пойменную и др. фации аллювия. Наблюдается различие также и в составе наносов в различных частях русловых мезоформ. Критерии такого выделения весьма условны и субъективны. Представляется целесообразным разработать более универсальный критерий, позволяющий четко выделять долю донных наносов, непосредственно участвующих в движении при данных гидрологических условиях, а также судить о направлении русловых процессов на участке реки.

Это позволит уточнить расчеты расходов донных наносов. В настоящее время, как правило, используют осредненные характеристики для створа измерений – средний и характерный диаметр частиц различной обеспеченности. Вместе с тем разброс этих характеристик по сечению, как показывает анализ натурного материала, может достигать 100 и более процентов. В результате чего в расчете используются характеристики донных наносов, весьма далекие от тех, что реально формируются в активном слое, т.е. слое наносов, непосредственно участвующем в движении.

В качестве такого критерия предлагается использовать некоторые закономерности строения кривых распределения гранулометрического состава.

В период с 1994 по 2003 год нами было произведено изучение состава донных отложений на участке р. Оредеж (ограниченное меандрирование), ручье Иленка (побочный тип руслового процесса), на баровой отмели р. Луга в Лужской губе, пляже парка имени 300-летия Санкт-Петербурга, а также исследованы гряды, полученные в лабораторных лотках ЛВИ РГГМУ. При проведении натурных работ отбор проб выполнялся пробоотборником ГР-92, по площадям, с учетом характера размещения русловых мезоформ. Работы выполнялись в различные фазы водного режима.

При проведении лабораторных экспериментов процессы перемещения донных наносов и образования русловых микроформ фиксировались на цифровую видеокамеру, отбор проб на гранулометрический анализ производился вручную, послойно из тела гряды. Пробы обрабатывались как принятыми в гидрологии стандартными методами, так и с помощью разработанного на кафедре гидрометрии РГГМУ прибора ШГ-1м для анализа проб донных отложений. Для более детального анализа проб донных отложений на кафедре гидрометрии был разработан прибор для определения гидравлической крупности наносов. Принцип действия прибора основан на взвешивании частиц пробы в восходящем водном потоке. Принципиальная схема прибора приведена на рис 1.

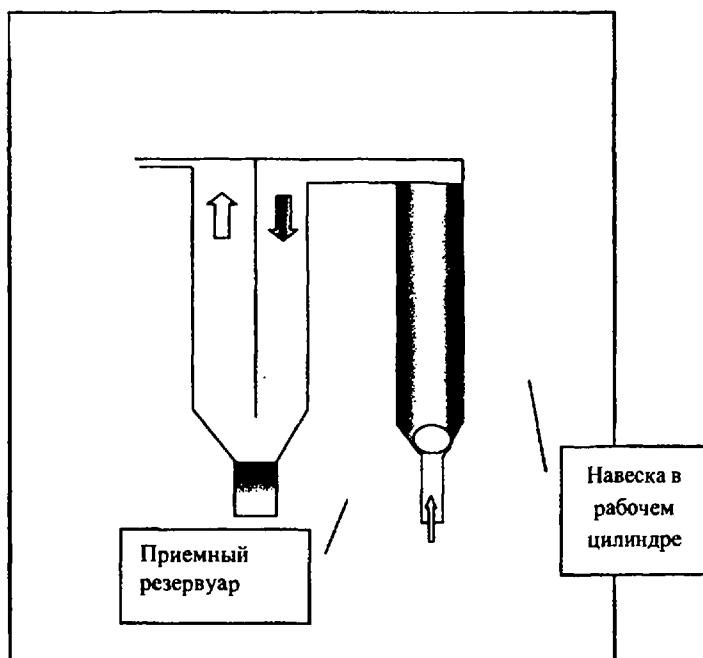


Рис. 1. Принципиальная схема прибора для измерения гидравлической крупности донных отложений

Под действием текущей воды частицы навески взвешиваются в рабочем цилиндре. При этом часть частиц, гидравлическая круп-

ность которых менее скорости потока в рабочем цилиндре выносятся за его пределы и осаждаются в приемном резервуаре. Процентное содержание каждой фракции определяется по высоте столба отложений этой фракции в приемном резервуаре. Диапазон измеряемых частиц по данным испытаний составил 0.02 – 5 мм, а точность измерения (в пересчете на диаметр) $\Delta d = 0.02 \text{ мм}$. Преимущество использования прибора заключается также в возможности непосредственного определения величины гидравлической крупности наносов, что избавляет от необходимости учета различной плотности и формы наносов.

Как показали лабораторные и натурные эксперименты, при упорядоченном движении наносов в активном слое формируется одномодальная кривая гранулометрического состава (см.рис.2), причем наблюдается смещение моды в сторону русловой фации аллювия. При процессах осаждения частиц (застойные зоны, зоны аккумуляции) высок коэффициент сортировки частиц, а на кривой гранулометрического состава наиболее полно представлена пойменная фация.

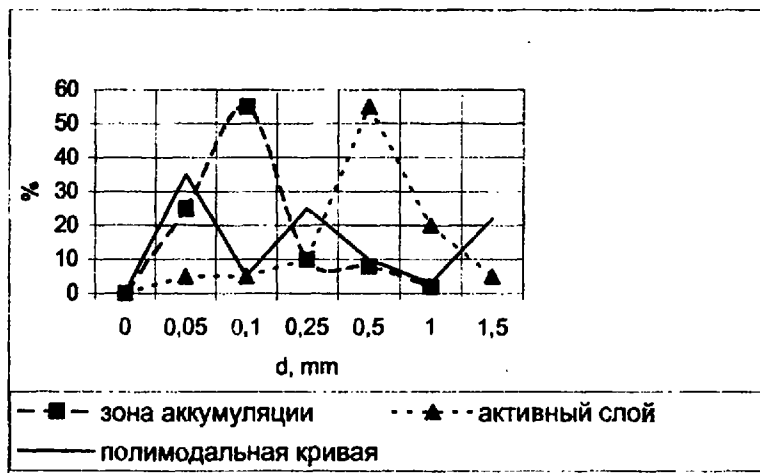


Рис. 2 – Характерные кривые гранулометрического состава.

Полимодальная кривая характерна для неактивного (не участвующего в движении) слоя наносов, либо для пробы, в процессе отбора которой был нарушен активный слой.

Сопоставление кривых гранулометрического состава речного аллювия и морских донных отложений в прибойных зонах Финского залива показали общность процессов сортировки речных и морских наносов. Так, для восточной части баровой отмели р. Луга характерно наличие хорошо сортированных алевритовых песков, что свидетельствует о преобладании процессов аккумуляции на морской акватории речных отложений. Анализ гранулометрического состава донных отложений насыпного пляжа парка имени 300-летия Санкт-Петербурга показал наличие глубже 2х метровой изобаты сортированных среднезернистых песков. Это позволило сделать вывод о том, что процессы переформирования береговой черты и бенча достаточно активны. К такому же выводу приводит и сопоставление разновременных съемок участка акватории

Серия лабораторных экспериментов была направлена на изучение механизма сортировки наносов при грядовом режиме перемещения. Эксперименты проводились в гидравлических лотках ЛВИ РГГМУ. Лотки наполнялись смесью белого кварцевого песка крупностью 0,03 мм и просеянного карьерного песка крупностью 1,5 мм. Процесс образования гряд фиксировался на цифровую видеокамеру. Одновременно проводились измерения скоростей течения микровертушкой. Приборы позволяли измерять и записывать скорость течения 1 раз в секунду.

В результате анализа результатов экспериментов были сделаны следующие выводы:

- ♦ крупные частицы диаметром 1,5 мм перемещаются по напорному склону гряды скальпацией и скапливались в нижней части ее подвалья.

- ♦ Мелкие частицы двигаются по гряде значительно медленнее, образуя микросообщества (в наших опытах – размерами 3–4 мм). Такое поведение мелких частиц объясняется тем, что их диаметр сопоставим с толщиной придонного ламинарного подслоя, и для них значимыми являются межмолекулярные силы.

- ♦ Сброс мелких частиц в подвалье гряды происходит дискретно, по мере накопления масс этих частиц на гребне. В результате этого образуется характерное слоистое строение гряд. Введение красителя (KMnO_4) в тело гряды позволило наблюдать распределение давления и течения внутри гряды (см. рис 3). Полученная нами

схема движения воды внутри гряды полностью совпадает с кривыми давления, полученными Раудкиви.

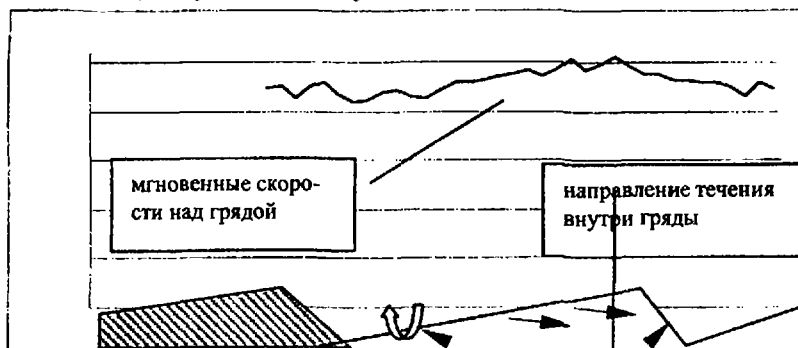


Рис. 3. Схема течений внутри гряды

Предварительный анализ полученных результатов позволяет говорить о подобии кривых распределения турбулентных характеристик потока и кривых гранулометрического состава активного слоя.

УДК 574.5

*Костко В.В. начальник водопользования,
водного хозяйства и надзора за безопасностью
гидротехнических сооружений,
Бам Р.А., Георгиевская А.В. (Главное управление
природных ресурсов по Санкт-Петербургу
и Ленинградской области)*

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТАНОВЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНЫХ ГРАНИЦ И РАЗМЕРОВ ВОДООХРАННЫХ ЗОН И ПРИБРЕЖНЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОЛОС ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

В соответствии с «Положением о водоохраных зонах водных объектов и их прибрежных защитных полосах» [1] в водоохраных зонах устанавливается специальный режим хозяйственной деятельности, а в пределах прибрежно-защитных полос вводятся дополнительные ограничения природопользования.

На основании ст.7 Земельного Кодекса Российской Федерации [2] в составе земель РФ выделяются земли водного фонда, к которым

в соответствии со ст.102 указанного Кодекса «относятся земли занятые водными объектами, а также земли выделяемые для установления полос отвода и зон охраны водозаборов, гидротехнических сооружений и иных водохозяйственных сооружений, объектов».

Границы водоохраных зон и прибрежных защитных полос должны уточняться в проектах водоохраных зон.

Определение границ земель водного фонда является весьма актуальным, т.к. в соответствии с Федеральным законом РФ от 21.12.2001г № 178-ФЗ (Статья 28. п.8) [3] «отчуждению не подлежат земельные участки в составе земель сельскохозяйственного назначения, лесного и водного фондов, особо охраняемых природных территорий и объектов...».

Соблюдение специального режима на территории водоохраных зон является составной частью комплекса природоохранных мер по улучшению гидрологического, гидрохимического, гидробиологического, санитарного и экологического состояния водных объектов и благоустройству их прибрежных территорий. В пределах водоохраных зон устанавливаются прибрежно-защитные полосы, на территориях которых вводятся дополнительные ограничения природопользования. Например, в пределах водоохраных зон, запрещается размещение стоянок транспортных средств. В пределах прибрежных защитных полос запрещается выделение участков под индивидуальное строительство. Как правило, прибрежно-защитные полосы должны быть заняты древесно-кустарниковой растительностью или залужены.

Так как в настоящее время отсутствуют утвержденные методические указания по проектированию водоохраных зон, то руководствуясь П.5 Положения о водоохраных зонах, органами исполнительной власти субъектов Федерации, в частности, Санкт-Петербурга и Ленинградской области, установлены минимальные размеры водоохраных зон и прибрежных защитных полос соответствующими Распоряжением и Постановлением Губернаторов города и области [3, 4].

Ширина водоохраных зон и прибрежных защитных полос, в т.ч. минимальная, для рек, стариц и озер устанавливается от среднесуточного уреза воды в летний период. Минимальная ширина водоохраных зон рек устанавливается в зависимости от их протяженности с плавным увеличением ширины зоны от истока к устью.

Несмотря на кажущуюся очевидность указанного положения, открытым остается, в первую очередь, вопрос об установлении расчетного уреза воды для определения минимальных границ водоохранных зон, особенно для водных объектов с крутизной склонов прилегающих территорий, имеющих обратный и нулевой уклон. В этих случаях незначительное изменение расчетного уровня приводит к существенному изменению границ водоохранных зон и соответственно площадей земель водного фонда.

Указанный вопрос приобретает юридическую актуальность в рамках Земельного Кодекса РФ, особенно при решении вопросов землепользования хозяйствующими субъектами и гражданами.

Обоснование установления расчетного уровня и соответственно размеров и границ водоохранных зон, на наш взгляд, должно осуществляться специализированными организациями, имеющими соответствующие лицензии.

Указанное обоснование определения расчетного уровня должно являться неотъемлемой частью при согласовании размеров и границ водоохранных зон и иметь юридическую силу при решении вопросов кадастра земель водного фонда.

Вторым актуальным вопросом при определении минимальных границ водоохранных зон являются учет протяженности рек от их истока. Если для зоны недостаточного увлажнения указанный порядок не вызывает вопросов, то для зоны избыточного увлажнения, в частности для Северо-Запада, с большим количеством озер, вопрос определения длины реки, как правило затруднен. Классический пример р.Нева. При ее длине от истока из Ладожского озера до Финского Залива всего около 78 км, Нева является крупнейшим водотоком Северо-Запада, формально же установленная минимальная ширина ее водоохранной зоны в соответствии с [1] составит не более 200 м.

По видимому, в этих случаях, необходимо дополнительно использовать такую характеристику как площадь водосбора.

По данным [5] выявлены связи между собой различных гидрографических характеристик, в частности длины реки (L) с площадью ее водосбора (F):

для рек с площадью водосбора более 250 км²

$$L = 2,90F^{0,50} \quad (1),$$

для малых рек

$$F = \alpha L^n \quad (2),$$

где $\alpha \approx 0,5$; $n = 1,5 \div 1,8$.

Указанные выше связи морфометрических характеристик, на наш взгляд, могут быть использованы при установлении минимальных границ водоохранных зон при известной площади водосбора, в частности для рек Северо-Западного региона.

Литература

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 23.11.1996 № 1404 «Об утверждении Положения о водоохранных зонах водных объектов и их прибрежных защитных полосах».
2. Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 № 136-ФЗ.
3. Федеральный закон Российской Федерации «О приватизации государственного и муниципального имущества» от 21.12.2001 № 178-ФЗ.
4. Распоряжение Губернатора Санкт-Петербурга «О водоохранных зонах и прибрежных защитных полосах водных объектов Санкт-Петербурга» от 15.10.1999 № 1101-р.
5. Постановление Губернатора Ленинградской области «Об установлении минимальных размеров водоохранных зон водных объектов Ленинградской области и их прибрежных защитных полос» от 26.01.1999 № 19-пг.
6. Б.П. Панов – Лекции по гидрографии СССР, часть I. Физическая гидрография, – Ленинградский гидрометеорологический институт, Л., 1971.

УДК 574.5

*Костко В.В. начальник водопользования,
водного хозяйства и надзора за безопасностью
гидротехнических сооружений
(Главное управление природных ресурсов
по Санкт-Петербургу и Ленинградской области),
Костко Ю. В. (Санкт-Петербургский
государственный аграрный университет)*

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТАНОВЛЕНИЯ ВОДООХРАННЫХ ЗОН ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

В условиях становления рыночной экономики в России взаимоотношения природопользователей и государства, регулирующих условия использования природных ресурсов, приобретают первостепенный характер. Ограничения, накладываемые государством, в частности, на хозяйственную деятельность в водоохранных зонах

водных объектов, выливаются (для хозяйствующих субъектов) в конечном итоге в весьма существенные финансовые затраты.

В соответствии с «Положением о водоохраных зонах водных объектов и их прибрежных защитных полосах» «водоохранной зоной является территория, примыкающая к акваториям рек, озер, водохранилищ и других поверхностных водных объектов, на которой устанавливается специальный режим хозяйственной и иных видов деятельности с целью предотвращения загрязнения, засорения, заиления и истощения водных объектов, а также сохранения среды обитания объектов животного и растительного мира», кроме того, «в пределах водоохраных зон устанавливаются прибрежные защитные полосы, на территориях которых вводятся дополнительные ограничения природопользования» [1].

Таким образом, установление размеров и границ водоохраных зон и прибрежных защитных полос для хозяйствующих субъектов является весьма актуальным.

В соответствии с [1] указанные выше характеристики «устанавливаются исходя из физико-географических, почвенных, гидрологических и других условий с учетом прогноза изменения береговой линии водных объектов».

Ширина водоохраных зон и прибрежных защитных полос сливается: для рек, стариц и озер – от среднемноголетнего уреза воды в летний период; для водохранилищ – от уреза воды при нормальном подпорном уровне (НПУ); для морей – от максимального уровня прилива; для болот – от их границы (нулевой глубины торфяной залежи). Остановимся более подробно на определении ширины водоохранной зоны для рассматриваемых водных объектов.

Установление водоохраных зон для водохранилищ, как правило, реально осуществимо на практике, т.к. в большинстве случаев известна отметка уреза воды в верхнем бьефе при НПУ.

Совершенно другая картина наблюдается при установлении водоохранных зон для рек, стариц и озер.

Основное понятие «среднемноголетний урез воды в летний период» является неопределенной характеристикой. В рассматриваемом случае речь может идти о величине этой характеристики за различные периоды года (период открытого русла, меженный период, календарно зафиксированный период). К сожалению, расшифровку этого основополагающего понятия не давали и разработанные

«Методические указания по проектированию водоохранных зон водных объектов и их прибрежных защитных полос» (отменены приказом МПР РФ № 174 от 12.07.00г.).

В то же время в соответствии со СНиП 2.01.14–83 [2] применительно к расходам воды (уровни воды, как известно, являются производной характеристикой от расходов) для летне-осеннего периода выделяются, в частности, следующие характеристики стока: минимальный среднесуточный расход, минимальный среднемесячный расход за календарный месяц или за 30 дней с наименьшим стоком 80% обеспеченности.

Таким образом, понятие «среднегодовое урез воды в летний период» должно иметь четкое определение, с учетом существующей и закрепленной нормативными документами терминологии. Необходимо отметить, что, например, в соответствии с Сан-ПиН 2.1.4.027-95[3] установление зоны санитарной охраны (ЗСО) для поверхностных источников водозабора производится от линии уреза воды летне-осенней межени.

Однако, даже при закреплённом понятии термина «среднегодовое урез воды в летний период» встает вопрос об определении его значений на практике. Указанный вопрос разбивается на два момента:

- определение среднегодового уровня при наличии наблюдений за стоком;
- определение среднегодового уровня при отсутствии наблюдений за стоком.

Как известно, на гидрометрических постах ведутся наблюдения за расходами воды и уровнем, либо только за уровнем воды. Безусловно, что наиболее объективную информацию мы имеем при наблюдениях за расходами воды и уровнем, связанных между собой функциональной зависимостью ($Q=f(H)$), что позволяет исключить (скорректировать) при статистической обработке ряда уровней их неоднородные значения (в частности при выходе воды на пойму).

В то же время в соответствии с [2] ряд гидрологических характеристик является репрезентативным при периоде наблюдений более 50 лет, т.е. при более коротких рядах наблюдений необходима оценка их репрезентативности по рекам-аналогам с периодом наблюдения более 50 лет.

Рассчитанный уровень воды, с учетом изложенного выше (для рек при наличии наблюдений за стоком), и нанесенный на поперечный профиль русла в районе конкретного гидрометрического поста дает возможность достаточно точно определить отметку уреза воды для нанесения границ водоохранной зоны и прибрежно-защитной полосы.

Проектирование водоохранной зоны выше и ниже гидрометрического поста в данном случае может производиться на основании значений уклона водной поверхности (менее точно уклона дна русла) при использовании топографического материала соответствующего масштаба.

При недостаточности ряда гидрометрических наблюдений может быть использован метод реки-аналога с приведением гидрологических характеристик рассматриваемой реки (расхода воды и уровня) к многолетнему периоду с применением парной и множественной регрессии [2].

Значительно более сложной является задача по определению указанного выше уровня (уреза воды) при отсутствии наблюдений за стоком (особенно для малых рек). К сожалению, в этом случае использование рек-аналогов, как правило, затруднено либо практически невозможно.

Отправной характеристикой здесь могут служить значения среднеиголетнего стока рек либо значения минимального 30 дневного модуля стока летне-осенней межени 80% обеспеченности, закартированного и широко используемого в практике гидрологических расчетов.

Определение значения расчетного уровня воды и, следовательно, соответствующей отметки уреза в данном случае может быть произведено с использованием карт модулей стока и топографического материала (поперечных профилей русла и уклонов дна) по широко известной формуле Шези[4]:

$$V = C(Ri)^{1/2}, \text{ м/с} \quad (1)$$

и соответственно

$$Q = WV, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2),$$

где V – средняя скорость течения водотока, м/с;

R – гидравлический радиус (на практике средняя глубина потока), м;

i – уклон поверхности потока (на практике уклон дна русла);

W – площадь поперечного сечения русла, м^2 ;

C – параметр Шези, определяемый по формулам Маннинга, Павловского и др.

Суммируя изложенное выше, необходимо отметить, что определение величины расчетного уровня (отметки уреза воды) для проектирования водоохранных зон с учетом того факта, что уровень производная величина расхода воды, целесообразно увязать с расчетным значением расхода воды заданной обеспеченности (вероятности превышения).

Такая привязка осуществлена, в частности, в СанПиН 2.1.4.027-95 [3] при определении границ поясов ЗСО поверхностных источников. Так, в частности, граница второго пояса ЗСО на водотоке увязана со временем пробега по основному водотоку и его притокам расхода воды 95% обеспеченности.

Определение расчетного уровня (уреза) воды для естественных озер при наличии наблюдений за уровнем помимо проблем, изложенных выше для рек, в частности репрезентативности периода наблюдений и величины относительной средней квадратической ошибки расчетного значения уровня (не более 10%) [2], включает специфические моменты. Это, в первую очередь, влияние ветрового нагона, а для крупных озер – наличие сейшевых колебаний.

Наиболее сложным вопросом является определение расчетного уровня (уреза) воды для средних и малых водоемов, исчисляемых сотнями тысяч на территории РФ. В подавляющем большинстве случаев на таких водоемах вообще отсутствуют какие-либо наблюдения. Специфика указанных водоемов (озер) заключается как в географическом положении (проточные и бессточные водоемы), так и их геологических особенностях (карстовые районы, разгрузка подземным путем и т.п.) [5].

Использование характеристик расчетных уровней рек в истоках или устьевых областях проточных озер для связи их с уровнем режимом озер не всегда корректно, т.к. озера обладая значительной инерционностью, аккумулируют сток, и их уровень не всегда коррелируется с уровнем впадающих или вытекающих водотоков (несовпадение обеспеченностей уровней водоемов и водотоков).

По видимому, задача установления расчетного значения уреза воды в данном случае должна решаться «волевым» путем (в ближайшее время решение указанной задачи на строго обоснованной

научной основе нереально). Это может быть привязка к уровню втекающих, вытекающих водотоков (для проточных озер), либо привязка к отметкам уреза воды, зафиксированного на картографическом материале соответствующего масштаба на дату выполнения (последнего уточнения) соответствующих топографических съемок (для бессточных озер).

Определение водоохранных зон морей имеет также свою специфику. Максимальный уровень прилива во многих случаях связан не с естественными приливно-отливными процессами, а с нагонными явлениями (в частности, на Балтийском море). Указанная проблема также должна быть решена в новых методических указаниях по проектированию водоохранных зон.

Проблема установления водоохранных зон для болот имеет свой специфический характер, рассмотрение которой требует специального подхода, не затрагиваемого в настоящей статье.

В заключении сформулируем основные принципиальные проблемы, которые нужно решить при разработке новых методических указаний по проектированию водоохранных зон водных объектов и их прибрежных защитных полос.

1. Увязать длину реки с площадью водосбора, являющуюся более объективной характеристикой водности. Категории рек (большие, средние, малые) в зависимости от площади водосбора закреплены в ГОСТ 19179-73.

2. Дать четкое определение понятия термина «среднегодовой урез воды в летний период» в рамках СНИП 2.01.14-83.

3. Производить расчет уровней на водотоках, при отсутствии наблюдений, с использованием карт модулей стока заданной обеспеченности и картографического материала.

4. Дать определение понятия расчетного значения уреза воды для проточных и бессточных озер при установлении границ водоохранных зон.

5. Уточнить термин «максимальный уровень прилива» при установлении границ водоохранных зон (при наличии нагонных явлений).

6. Считать целесообразным разработать указания по проектированию водоохранных зон водных объектов для одного(группы) региона РФ, например для Северо-Запада.

Литература

1. Положение о водоохранных зонах водных объектов и их прибрежных защитных полос. Постановление Правительства РФ №1404 от 23.11.96 г.
2. СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик (Гострой СССР) М. Стройиздат, 1985–36 с.
3. СанПиН 2.1.4.027-95. Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно питьевого назначения. Постановление Госкомсанэпиднадзора России № 7 от 10.04.95г.
4. Гидрометрия. В.Д.Быков, А.В.Васильев. Гидрометеиздат, Ленинград, 1972 г. 448 с.
5. Общая гидрология А.И.Чеботарев, Гидрометеиздат, Ленинград, 1975 г. 544 с.

УДК [378.013.2:550.3]

Ю.А. Кузьмин, доц.

О ПРИНЦИПАХ ПРЕПОДАВАНИЯ ДИСЦИПЛИН ГЕОФИЗИЧЕСКОГО НАПРАВЛЕНИЯ В РГГМУ

Учебные дисциплины геолого-геофизического направления преподаются на всех базовых факультетах РГГМУ уже более 40 лет. Они всегда носили общеобразовательный характер и призваны были формировать у слушателей то географическое мировоззрение, без которого невозможно получить полноценное специальное гидрометеорологическое, а сегодня и экологическое образование (имеется в виду факультет экологии и физики природной среды).

В структурно-организационном плане этот блок дисциплин постоянно трансформировался. В начале он представлял собой отдельные курсы на кафедре гидрологии суши, затем на их основе была создана самостоятельная кафедра гидрогеологии и геологии. В 1975 году произошло её слияние с кафедрой геодезии. Этому было много причин, как внутренних, так и внешних. Опыт последних 28-и лет показал, что новая структура вполне жизнеспособна. В современных метастабильных условиях на рынке инженерных услуг она достаточно устойчива к балансу «спрос–предложение».

Эта устойчивость определяется тем, что в рамках новой кафедры из учебных дисциплин сформировалась *система* со своими внутренними связями и отношениями. Особенность этих связей и отношений состоит в том, что близкие по содержанию дисциплины читаются на разных факультетах, для специальностей существенно отличающихся по своему профилю: метеорологам, гидрологам,

океанологам и экологам. И проблема сводится к тому, чтобы системе, сложившейся стихийно в результате практического преподавания, укрепить теоретически.

Для этого автором предлагается несколько базовых аксиом:

1. Все курсы геолого-геофизического блока, которые преподаются метеорологам, гидрологам, океанологам и экологам, должны быть направлены на понимание и раскрытие процессов взаимодействия внешних геосфер Земли, включая техносферу.

2. Геосферы разделены границами, которые выполняют запретительные и разрешительные функции. Устройство границ является одной из важнейших тем всех дисциплин блока.

3. Функционирование границ определяет взаимодействие геосфер и формирует их целостность как геологической системы.

4. Учебная структура геолого-геофизического блока должна быть адекватна представлениям о геосферах как целостной геологической структуре.

При этом следует иметь в виду два обязательных ограничения:

- Программы учебных дисциплин должны соответствовать стандартам министерства образования РФ.

- Обязательными доминантами в них должны быть темы, которые у будущих специалистов формируют общее гидрометеорологическое мировоззрение.

По существу, речь идет о создании в рамках названного блока дисциплин *модели учебного процесса*, которая бы адекватно отражала реальную геолого-геофизическую систему, являющуюся объектом инженерной и научной деятельности метеорологов, гидрологов, океанологов и экологов.

Автор утверждает, что такой природной системой для перечисленных специальностей являются верхние геосферы, целостность которых формируется процессами их взаимодействия.

Таким образом, вся работа по созданию теоретических основ геолого-геофизического блока дисциплин, читаемых в РГГМУ делится на четыре этапа:

1. Построение концептуальной модели внешних геосфер Земли как целостной геологической структуры.

2. Определение дедуктики этой модели.

3. Построение модели учебной структуры, которая бы отвечала дедуктике концептуальной модели внешних геосфер в системном представлении.

4. Разработка дедуктики для модели учебной структуры.

В начале рассмотрим вопрос о смене парадигм в геологии, поскольку концептуальная модель внешних геосфер Земли должна строиться на основе современной аксиоматики этой науки.

Геология пережила две парадигмы.

Первая парадигма сформировалась в эпоху Возрождения. Она опиралась на библейские представления и носила откровенно аксиоматический характер:

- Божественный разум создал мир по строгим математическим законам.
- Людям дана часть этого разума.
- Поэтому они могут открыть эти законы и понять устройство мира.

Если бы удалось построить непротиворечивую теорию формирования Земли, она явилась бы дедуктикой над геологией. Это дало бы возможность вывести все законы геологии математически (логически).

Вторая парадигма формировалась как индуктивный подход. Земля живет и развивается по обычным физическим законам и все геологические явления можно объяснить через те природные агенты, которые геолог имеет возможность наблюдать. Это направление чрезвычайно плодотворно повлияло на развитие геологии и определяющая ее описательная идея опиралась на идеологию гелиоцентризма. Поэтому дедуктика второй парадигмы была более или менее инвариантна по отношению к космогоническим теориям, которые менялись от гипотезы П. Лапласа до «холодной» гипотезы О. Шмидта и современной концепции горячего начала Земли.

Логический аппарат дедуктики для описательной парадигмы весьма сложен, однако, он опирается на классическую логику, классическую физику и термодинамику. Большинство геологов в качестве аксиом этой парадигмы использует следующие три утверждения:

1. Геологическое развитие Земли представляет собой процесс скачкообразно эволюционный.

2. Этот процесс генерируется за счет внутренних и внешних энергетических источников – теплового, гравитационного и др.
3. Внешним энергетическим источником является лишь Солнце, контролирующее экзогенные процессы на Земле.

В последние годы в обиход геологии вводится новая *квантовая парадигма*, разрабатываемая А.Н. Павловым и А.А. Баренбаумом (1985–2003 гг.). Ее аксиоматику можно сформулировать следующим образом:

1. Геологическое развитие Земли обусловлено получением энергии извне.
2. Эту энергию Земля получает порциями.
3. Энергетические кванты возникают при прохождении Солнечной системой струйных потоков Галактики.
4. Периодичность получения квантов энергии соответствует периодичности прохождения Солнечной системой струйных галактических потоков.

Эти постулаты выводят геологию из геоцентристских энергетических представлений о геологическом развитии Земли на *галактицентристскую* идеологию, опирающуюся на понятие открытых систем.

На примере смены парадигм в геологии решаются две задачи:

- Раскрытие смысла дедуктивных построений в геологии.
- Определение содержания контрольной функции в дедуктивной тройке, в которую должна укладываться модель взаимодействия внешних геосфер.

Первыми документами, на которые следует опираться при анализе учебного процесса, являются программы преподаваемых дисциплин. В нашем случае их три:

- Курс «Геофизика» рекомендуемый министерством образования РФ для направления «Гидрометеорология». Он читается на первых курсах специальностей «Метеорология», «Гидрология» и «Океанология».

- Курс «Геология» по направлению – «Экология и природопользование» для специальности «Геоэкология» (первый курс).

- Курс «Гидрогеология» по направлениям «Гидрометеорология» и «Экология и природопользование» для специальностей «Гидрология» (второй курс) и «Геоэкология» (пятый курс). Курс

читается также на заочном отделении для четвертого курса гидрологов и пятого курса экологов.

Первые два курса по своему содержанию достаточно близки. Однако их учебные планы даже для гидрометеорологических специальностей предполагают существенные различия в изложении материала.

Так для метеорологов больше внимание уделяется общим сведениям о Земле как планете Солнечной системы, геофизическим полям и взаимодействию процессов в верхних геосферах. При этом в основном речь идет о функционировании границ океан – атмосфера и суша – атмосфера. Для знакомства с вопросами палеоклиматологии приходится обращаться к разделам истории развития Земли в четвертичный период.

Для гидрологов значительная часть курса посвящается экзогенным процессам в целом и влиянию на них современного техногенеза. Важными разделами являются также темы, связанные с палеогеографией. Можно сказать, что материал курса подается так, чтобы обеспечить понимание слушателями особенностей функционирования границы суша – атмосфера, включая в нее все виды поверхностных вод.

Для океанологов акценты смещаются в сторону вопросов функционирования границы океан – литосфера. Будущие океанологи должны понимать, что океан имеет две границы: с атмосферой наверху и литосферой внизу. И та и другая влияют на его формирование, состояние и жизнь. В прикладном отношении наиболее важными частями этой границы являются шельф и прибрежная зона, особенно в свете строительства и работы портов, прокладки трубопроводов, кабелей связи, морских каналов, дамб и других инженерных коммуникаций, а также разработки крупных россыпных месторождений (олово, титан, алмазы и др.), разведки и эксплуатации нефтяных и газовых залежей.

Курс «Гидрогеология» можно рассматривать как продолжение геологического направления для гидрологов и экологов. В нем речь идет о всем комплексе вопросов, касающихся подземных вод, и, в первую очередь, их взаимосвязи с поверхностными водами суши и океаном. Учитывая небольшой объем часов, конкретным вопросам этого взаимодействия не может быть уделено достаточного внимания. Рассматривается только несколько принципиальных примеров,

таких как подземное питание рек, подземный сток в озера и водохранилища, подтопление крупных территорий и т.п. Главная же задача, которая ставится в этом курсе, сводится к анализу законов взаимодействия подземных и поверхностных вод на уровне различных форм круговоротов. И здесь снова приходится обращаться к проблеме границ – внутренних границ гидросферы.

Курс «Геология», читаемый на специальности «Геоэкология» для направления «Экология и природопользование» в существенной мере согласуется с курсами «Геофизика». Но в нем больше времени уделяется взаимодействию верхних геосфер с техносферой. Кроме того, в качестве принципиально важного раздела обсуждается тема «Ноосфера». Здесь, как и в других курсах, основным объектом изучения являются верхние геосферы.

Отметим, что сделанный краткий обзор не противоречит существующим стандартам министерства образования РФ по преподаванию дисциплин «Геофизика», «Геология» и «Гидрогеология» для направлений «Гидрометеорология» и «Экология и природопользование».

Таким образом, простой анализ программ и учебных планов показывает, что во всех направлениях существующих в РГГМУ базовой тематикой для геолого-геофизического блока учебных дисциплин является *изучение взаимодействия внешних геосфер Земли*. И здесь можно выделить три фундаментальных темы:

1. Понятие границ и возможности их представления.
2. Устройство внешних и внутренних границ геосфер.
3. Функционирование этих границ и их моделирование.

Именно они и должны послужить основой для разработки дедуктивной модели учебного процесса по геолого-геофизическому блоку дисциплин. Но начать следует с модели реального устройства внешних геосфер.

Внешние геосферы в своей совокупности представляет открытую систему. Их границы обладают двумя качествами:

- способностью разделять и
- одновременно обеспечивать взаимодействие тех сред, которые они разделяют.

Границы функционируют по клапанному принципу. Он работает не только в недрах Земли и на ее поверхности, но и атмосфере – в слоях облачности, тропопаузе, страто- и мезопаузах.

Универсальность этого принципа состоит в том, что именно границы позволяют сосуществовать и проявлять себя двум взаимоисключающим основам мироздания: *устойчивости и изменчивости*.

Главное назначение границ состоит в их запретительной функции – отделять геосферы и их внутренние структуры друг от друга, обеспечивать их автономию и суверенитет, гарантировать индивидуальность. Вторая функция – разрешительная. Она обеспечивает существование и саморазвитие систем.

Наиболее общим механизмом взаимодействия внешних геосфер можно считать круговорот природных вод, поскольку в него вовлечены не только воды, но и газы, горные породы, органические вещества, животный и растительный мир, а также человек. По временным и пространственным масштабам этого взаимодействия, по физике процессов в настоящее время в геологии принято выделять два типа круговоротов воды: климатический и геологический (см. работы А Павлова и др.). Первый происходит в основном в области между поверхностью Земли и тропопаузой. Он обусловлен главным образом метеорологическими факторами и оформлен в виде различных циркуляционных ячеек. Второй пространственно приурочен в основном к литосфере (в терминах тектоники плит) и обусловлен преимущественно геохимическими и петрологическими процессами.

Для рассматриваемой задачи принципиальным является климатический круговорот.

На основании модели общего круговорота и ее дедуктики, опирающейся на представление о внешних геосферах как геологической системе, появляется возможность разработать структуру **универсальной программы обучения** по всему блоку геолого-геофизических дисциплин. При этом следует соблюдать два требования:

- Учебная структура должна быть адекватна представлениям о геосферах как целостной геологической структуре.
- Новая программа должна соответствовать существующим стандартам министерства образования РФ.

Логика построения программы:

1. Геосферы.
2. Модели круговоротов.
3. Их структура и происхождение.
4. Функционирование.
5. Квазицикличность как фундаментальная программа Жизни и развития.
6. Техногенез и возможности разрушение природных программ цикличности.

Контрольная функция:

1. Аксиоматика квантовой парадигмы геологии.
 2. Представления о горячем начале Земли.
 3. Представления о происхождении внешних геосфер.
- Последние две гипотезы связаны с квантовой аксиоматикой.

Материал всех курсов излагается в соответствии с дедуктивной схемой блока по логической схеме.

Предлагаемые принципы построения единой учебной программы для геолого-геофизического блока дисциплин, читаемых в РГГМУ, не противоречат существующим стандартам министерства образования РФ.

Заключение.

1. Впервые все геолого-геофизические дисциплины, которые преподаются в РГГМУ, предлагается рассматривать как целостную учебную структуру.
2. Эта структура должна строиться в качестве аналога реальной системы внешних геосфер Земли.
3. Предлагается построить модель взаимодействия внешних геосфер и разработать ее дедуктиву.
4. Показана возможность создания единой учебной программы для геолого-геофизического блока дисциплин по направлениям «Гидрометеорология» и «Экология и природопользование».

МОРФОЛОГИЯ, МЕХАНИЗМ РАЗВИТИЯ РЕЧНОГО РУСЛА, ПОЙМЫ, ЛЕДОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА УЧАСТКЕ Р.ОРЕДЕЖ В РАЙОНЕ УЧЕБНОЙ БАЗЫ РГГМУ

Полевые исследования являются чрезвычайно важными в изучении гидравлики русел, морфологии, механизма развития речного русла, поймы, ледовых образований. Полевые исследования пойменных массивов и русла р.Оредеж были проведены в течение примерно 30 лет. При этом пойменный и русловой процесс рассматривались как единый взаимосвязанный процесс развития реки. Поймы представляют собой чрезвычайно сложные, уникальные природные геоконплексы. Они во внешнем облике, внутреннем строении тела несут явные следы деятельности потока, представленные слоистостью, мощностью всех типов и фаций аллювиальных отложений, их сортировкой, направлениями транспорта наносов.

Большую часть года (летняя и зимняя межени) поймы не покрываются водой за исключением пойменных протоков, которые можно рассматривать, как отдельные взаимосвязанные русла. В это время русловой поток оказывает влияние на пойменные массивы, размывы в основном вогнутых берегов и намывом пляжей, и ухватей морфологических образований.

Для изучения этих взаимосвязанных процессов авторами использованы материалы многолетних натурных исследований участка р.Оредеж, содержащего искусственно спрямленную излучину и два смежных с ней пойменных массива (рис.).

Их исследование показало, что все три пойменных массива находятся на разных стадиях развития, имеют разные размеры по длине 85, 60, 115 м.

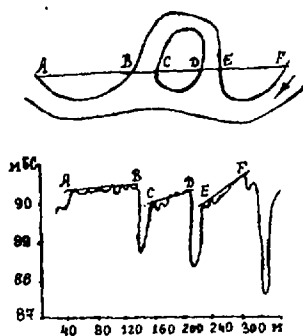


Рис. Схема продольных профилей
пойменных массивов р.Оредеж.

Продольные уклоны поверхности пойменных массивов также разные и колеблются в пределах от 4,5 до 6 ‰, в несколько раз превышая уклоны водной поверхности в русле в межень (0,2 ‰).

Поверхности продольных поперечных профилей пойменных массивов не прямолинейны. Они имеют волнистый гребистый рельеф с высотой выпуклостей от 0,2 до 0,3 м, длиной 10–20 м с числом волн по длине от 4 до 5.

Растительность, закрепляющая пойму, представлена (в направлении от уреза воды к подошве склона долины) травой (осока) – 25 м, ивой – 15 м, смешанной (ивой, березой) – 25 м, ольхой – 20 м и елью – 20 м. Эти границы резко не ограничены.

В низовых частях пойменных массивов веерами расположены пойменные травянистые кочки с густотой до 1,25 кочки на 1 м². Высота их 0,75 м, диаметр у основания – 0,4 м и 0,45 м на вершине. Внутреннее строение кочек схоже по внешнему виду со спрессованным торфом коричневого цвета и представляет спрессованные стебельки травы. Верх кочки подобен пучку волос, «представленных» осокой.

Слой пойменных отложений толщиной около 2,5 м имеет слоистое строение. Верхний илистый составляет около 0,8 м. Ниже его пятнами (прерывно) встречаются заторфованные илы с примесями мелкозернистого песка толщиной до 1,2 м. Эти заторфованные илы не доходят до современного уреза на ¼ ширины поймы. Следует отметить также, что по глубине пойменного слоя обнаруживаются отчетливо выраженные песчаные прослойки, толщиной до 0,04 м. Их образование связывается с возможными высокими затоплениями поймы в прошлом, когда донные песчаные фракции выносились на пойменные массивы.

Общий уклон поверхности грунтовых вод, определенных в поперечном профиле правобережного пойменного массива по уровням воды в шурфах в направлении, нормальном урезу воды в реке, в первой декаде февраля за ряд лет составил в среднем около 9 ‰, достигая в отдельные годы 11 ‰.

В русле растительность представлена семейством кувшинковых (нимфея), местами элодей (водяная зараза, водяная чума) и разновидностями многолетних осоковых растений.

Этот своеобразный гравистый, волнистый, ступенчатый рельеф с различными видами и густотой растительности оказывает сложное сопротивление потокам половодий и паводков.

По макроформам реку Оредеж на исследуемом участке можно отнести к ограниченному меандрированию, характеризующемуся сползанием пойменных массивов в виде слабо выраженных излучин с повышенной береговой частью приверхов пойменных массивов.

Ограничивающий фактор представлен трудно размываемыми высокими склонами долины, сложенными мореной и местами выходами спрессованных слоистых красных песчаников (Красная Горка правого берега у деревни Даймище).

Пойма затопляется и полностью перерабатывается в веках путем перемещения пойменных массивов (размыв в верховых частях, намыв в вершинах и в низовьях излучин). Пойменные массивы смещаются как вниз по течению, так и поперек русла в пределах трудно размываемых склонов долины, медленно врезааясь в них вершинами. Смещение вниз преобладает над поперечным.

Меженное русло в бровках со средней шириной около 20 м, имеющее коэффициент формы $B/h_{cp} > 10$, относится к широким руслам. Перемещение песчано-илистых, местами с примесью песчано-гравелистых, наносов происходит в виде микроформ (чередованием грядоподобных неровностей дна) с высотой от 0,05 до 0,2–0,3 м. Толщина рыхлого перемываемого слоя по ширине волнистого дна в створе русла, расположенного в 50 м ниже схождения потоков из отчлененной меандры и спрямления составляет около 0,2–0,3 м. Такой же высотой представлены неровности дна в продольном профиле этого участка. Длина волн неровностей колеблется в пределах 10 м. В заиляющейся в настоящее время излучине слой илов достигает в среднем 0,6–0,7 м. Таким образом потоком осуществляются обратимые вертикальные деформации русла.

Рельеф дна в поперечном профиле на отдельных участках волнистый, то есть имеет место сползание по ширине полос микроформ разного порядка. Особенно это выражено в зимних условиях при низких стояниях уровня воды. На формирование рельефа дна в этот период оказывает существенное влияние формы нижней поверхности льда. Последнее представляет интерес с точки зрения развития руслового процесса на реке в зимних условиях.

Морфология русла и кинематика потока в узлах схождения потоков из

спрямленной, но еще действующей излучины и из спрямления.

Исследование этого узла представляется как проведение многолетнего натурного эксперимента в природных условиях. Спрявление искусственно выполнено более 30 лет назад. В настоящее время излучина в зимние периоды в отдельные годы находится в стадии отмирания. В отдельные годы в ней течения отсутствуют, расходы равны нулю. В периоды половодий, попусков из водохранилища обе протоки действуют и потоки в них формируют свои русла (дно и берега).

Особый интерес представляет узел, место схождения потоков. Потоки здесь взаимодействуют друг с другом, отражаются друг от друга, что сопровождается появлением нисходящих струй, вихреобразованием и размывом дна. Глубина в этом узле в 1,7 раза больше полусуммы глубин, наблюдаемых в сходящихся руслах. Такой же эффект наблюдается при образовании приустьевых ям, когда текущие воды из рек встречаются с относительно стоячими или малоподвижными водами водоприемников. Приустьевые ямы такого же механизма образования были выявлены авторами в устьях рек: Волги, Надыма, Невы, Великой и др.

На поверхности воды на таких участках схождения потоков наблюдается зарождение и движение вниз по течению многочисленных вихревых образований. Этот натурный эксперимент убедительно подтверждает тот факт, что в узлах схождения (при отсутствии ограничивающего фактора по вертикали) должны образовываться углубления русла. Их глубины будут зависеть от угла схождения потоков, ограничивающих факторов и др.

Крупность донных отложений по ширине русла спрямляющей протоки изменяется в широких пределах. Средний диаметр частиц (50%) $K=0,3-5,0$ мм; $K_{95\%} = 2-47$ мм, то есть от мелкозернистого песка до гравия и мелкой гальки.

В излучине преобладают отложения из илов и мелкозернистого песка. В нижележащем от узла схождения потоке отложения представлены у берегов илами с примесью песка.

В середине русла песок среднезернистый, крупнозернистый с примесью гравия.

Реки России и некоторых других стран протекают в условиях зим, поэтому важной проблемой для народного хозяйства является знание структуры водных потоков в зимних условиях, параметров ледяных гряд и других факторов ледяного покрова.

Влияние ледовых явлений на пропускную способность русла можно оценить с помощью ледового члена $(\Delta h_s / \Delta l_s)^{\Delta h_s / \Delta l_s}$ в разработанной авторами морфологической формуле для коэффициента пропускной способности русла (коэффициента Шези С):

$$C = (g)^{1/2} (h_{cp} / h_z) (h_{cp} / B)^{h/B} (h_z / l_z)^{h_z / l_z} (\Delta h_s / \Delta l_s)^{\Delta h_s / \Delta l_s},$$

где $g = 9,81 \text{ м / с}^2$, h_{cp} – средняя глубина сечения, м, h_z – высота гряд или неровностей дна, определяемая как разность средних глубин в сечениях, отстоящих друг от друга на расстояниях двух – четырех средних глубин, м, l_z – длина гряд или расстояние между неровностями, определяемые по фарватеру русла, м. Коэффициенты

h / B , h_z / l_z , учитывающие влияние берегов и крутизны гряд соответственно, приведены с переменным показателем степени, где B – ширина русла, Δh_s , Δl_s – соответственно высота и длина неровностей (волн) на нижней поверхности льда в пределах длины, равной 2 – 3 средним глубинам в измеряемом сечении. Сравнительные расчеты коэффициента С, выполненные по формуле Шези, показали довольно близкие результаты (расхождение на 4 %).

На проточных участках с небольшими глубинами первоначальная значительная шероховатость нижней поверхности льда сглаживается со временем, а на ее месте создается волнистая «грядовая» поперечная и продольная шероховатость льда, при последней возможно предположить гипотезу о существовании продольно-винтового движения, состоящего из нескольких полос (струй). Оно подтверждается волнистой формой кристаллической нижней поверхности льда в поперечном разрезе, выполненном сплошным пропилом льда от берега до берега. В рельефе дна, в створе выполненного пропила, также заметны следы от воздействия продольно-винтового движения на дно. Они представлены отдельными желобами. Эти структуры льда и дна наблюдаются при низких уровнях воды в зимнюю межень. Таким образом, следы взаимодействия потока с нижней поверхностью льда, дном, с учетом отражения его от различных поверхностей и локальных масс воды друг от друга, сви-

детельствует об относительно устойчивой, сложно организованной структуре течений. Ее необходимо знать и учитывать при организации измерений расходов воды, оценки сопротивлений русла потоку и для понимания развития руслового процесса в зимних условиях.

Лунки, созданные во льду для измерения скоростей течения, быстро и сложно переформируются под воздействием потока и водоворотных зон, возникающих в лунках, что необходимо знать и учитывать при измерении скоростей течения на вертикалях.

Формы нижней поверхности льда на реках в зависимости от высоты стояния уровня (глубин), суровости зимы, высоты снежного покрова на льду, формы русла в плане, формы дна (грядовое, гладкое или др.), колебаний уровней в зимний период (попуски, падения и др.) отличаются большим разнообразием во времени и в пространстве.

Знания этого разн. образа позволяет понять существование в потоке различных дискретных форм и механизм взаимодействия потока с ледовыми образованиями и донными формами (грядами и другими образованиями), процессы отражения потока от различных поверхностей и сред и влияние ледовых явлений на развитие руслового процесса в зимних условиях. Кроме того, знание морфологии речного льда позволяют расширить знания о гидравлических сопротивлениях и характеристиках потока в руслах при ледоставе.

УДК [556.556:551.583](282.247.212)

Науменко М.А., д.г.н.

ФАКТОРЫ- ИНДИКАТОРЫ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА СОСТОЯНИЕ ЭКОСИСТЕМЫ БОЛЬШИХ ОЗЁР (НА ПРИМЕРЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА)

Климат оказывает ярковыраженное воздействие на гидродинамику больших озёр качество их вод и компоненты экосистем [16]. Температура окружающей среды является одним из важнейших параметров в экосистемах озёр. Приход тепла на поверхность озера и ветровое перемешивание влияет на сезонную термическую стратификацию, которая в свою очередь определяет вертикальную и горизонтальную циркуляцию вод. Параметры сезонной стратификации озера имеют центральное значение в описании и моделировании

гидродинамики озера. Наличие стратификации препятствует вертикальному перемещиванию и переносу кислорода и биогенов между слоями. Ветер играет доминирующую роль как волнообразующий фактор, а также при образовании апвеллингов и даунвеллингов в прибрежных районах. Климат оказывает воздействие на гидрологические процессы, такие как колебания уровня озёр, речного притока и стока из озера [3, 11]. С. Кондратьев и И. Бовыкин [4] смоделировали отклик гидрологической системы «водосбор–озеро» на изменения климатических параметров.

Для оценки потенциальных климатических изменений в настоящее время знание средних многолетних термодинамических характеристик Ладожского озера (или так называемой климатической нормы) необходимо для определения фонового физического воздействия на гидрохимические и биологические процессы в озерах. [7]. Климатические исследования главным образом связаны с изучением особенностей обмена теплом, массой и количеством движения между различными средами и в различных пространственно-временных масштабах. Расчёт сезонного климатического цикла температуры воды и ее дисперсии, параметров вертикальной устойчивости водной массы был проведён на основе базы данных Ладожского озера [8, 9]. Многоцелевая компьютерная база данных, включает в себя инструментальные измерения с 1898 г. по 2002 гг., её объём превышает 180000 значений температуры воды на различных горизонтах. Информационная плотность составляет 200 изм./км³. Для периода открытой воды (с 15 мая по 15 ноября) для каждого из лимнических районов были рассчитаны декадные значения указанных параметров с временным сдвигом 5 суток [9].

Климатические тренды могут быть обнаружены при исследовании временных рядов различных лимнических характеристик. Важным среди этих характеристик являются гидрофизические параметры: температура воды и приводного слоя воздуха, параметры, связанные с проникновением приходящего тепла, такие как ветровое воздействие, глубина слоя скачка, скорость достижения дна температуры наибольшей плотности (4° С), продолжительность периода устойчивой стратификации, даты наступления и продолжительность «биологического лета» на поверхности воды Ладожского озера. Для Ладожского озера «биологическое лето» определяется как период времени, когда температура воды превышает 10° С и на

поверхности воды озера активно развиваются летние формы планктона [9, 19].

Для зимнего периода в качестве климатического индикатора особое значение имеет степень покрытости поверхности озера льдом. Для Ладожского озера средние многолетние характеристики ледового режима приведены в Атласе [5].

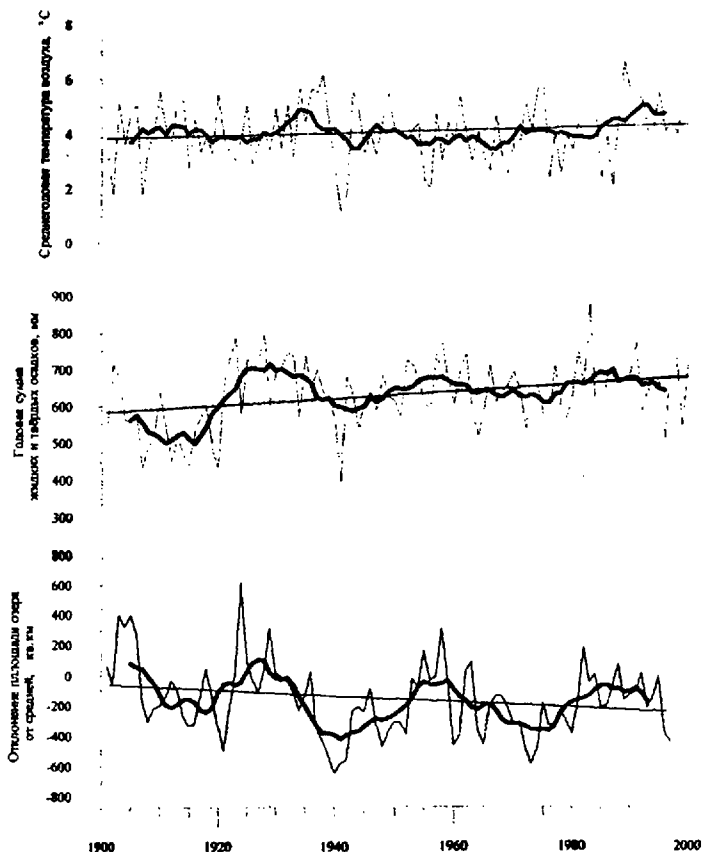


Рис. 1. Временной ход среднегодовой температуры воздуха, осадков и отклонения площади зеркала Ладожского озера от средней величины с 1901 г. по наст. время. Жирная кривая – 11-летнее скользящее среднее, прямые – линейный тренд

Глобальные изменения климата в районе оз. Байкал проявились в повышении годовых и сезонных температур воздуха, особенно зимой и весной, возрастании увлажнённости и суммарного притока в озеро, а также в увеличении продолжительности безлёдного периода [12]. Аналогичные результаты получены Н.Н. Филатовым [11] и финскими исследователями для озёр Фенноскандии [15]. В Великих Американских озёрах обнаружено увеличение среднегодовых температур поверхности воды в прибрежных районах в течение прошлого века с 1910 по 1990 гг. [17]. В качестве индикаторов изменения климата предложено использовать наибольшие температуры воды у дна в глубоководных районах озёр [14] как факторы, указывающие на проникновение тепла в течение года для мономиктических озёр. Для димиктических озёр, каким является Ладожское озеро, может быть использован факт, на который указал А. И. Тихомировым [10]. Он заметил, что наименьший теплозапас, так же как и придонные температуры воды в конце февраля – начале марта в глубоководной части Ладожского озера меняются год от года в зависимости от суровости зимы и определяют последующее тепловое состояние озера.

Несомненно, что в качестве интегрального физического показателя эвтрофирования и загрязнения озера может быть использована прозрачность поверхностного слоя воды, выраженная в глубине исчезновения диска Секки.

Межгодовые изменения уровня вызывают изменения объема Ладожского озера и изменения его площади, в том числе литоральной зонах [9]. Особенности межгодовой изменчивости климатообразующих факторов позволяют выделить в бассейне Ладожского озера за истекшее столетие четыре полных цикла, продолжительностью от 25 до 33 лет, первые три были выделены А. В. Шнитниковым [2, 13]. Эта продолжительность циклов для уровенного режима озёр Северо-Запада была подтверждена А. Догановским и Е. Анохиной [3]. На рис.1 показаны изменения среднегодовых температур воздуха, годовой суммы осадков для 10-минутного квадрата Ладожского озера с координатами левого нижнего угла $60^{\circ}20'$ с.ш. и 32° в.д. за сто лет. Данные любезно предоставлены доктором Т. Митчелом (Центр изучения климатических изменений, Норвич, Англия) [18]. На основе цифровой батиметрической модели Ладожского озера [6] проведено вычисление изменения площади зеркала озера по среднегодовым

значениям уровня относительно уровня 5.1 м. Нынешний уровень соответствует маловодной фазе водного режима озера. При понижении уровня Ладожского озера на 50 см объем его уменьшается на 8.8 км, площадь на 1.4%, расход р. Невы на 11.4%. Очевидно, что синхронная цикличность более выражена во временном ходе осадков и водности озера, чем в температурах воздуха.

А. И. Тихомиров [10], В. Н. Адаменко [1] указывали, что в озёрах одного и того же района, но с разными морфометрическими характеристиками или для крупного озера с различными глубинами гидрологические сезоны будут наступать в разное время и иметь отличающиеся друг от друга характеристики. Необходимо учитывать этот факт при выявлении возможных климатических изменений. Районирование глубин Ладожского озера способствовало выделению зон с характерными условиями теплонакопления и теплоотдачи в годовом температурном цикле [7, 8, 9]. Для каждой зоны в таблице приведены даты, когда на поверхности воды и на дне средние температуры достигают 4° С, продолжительность периодов времени, в течение которых эти температуры достигают дна, и квартальные амплитуды придонных температур воды. Средняя температура поверхности прибрежного района с глубинами менее 18 м становится выше 4° С ранее 15 мая, используемой информации было недостаточно для определения точной даты. Лимнические зоны отличаются друг от друга сезонными амплитудами придонных температур, они наибольшие в прибрежной зоне и уменьшаются с увеличением глубины зоны, становясь постоянными, начиная с зоны озёрного уступа [9].

Таблица

Характерные даты и величины температуры воды в период открытой воды

Район с глубинами, м	Даты достижения 4° С			Квартальные значения придонных температур		
	0 м	дно	дни	мин.	макс.	амплитуда
Мелководный, 0–18				3.0	14.5	11.5
Переходный, 18–50	20.V	4.VII	45	1.1	8.2	7.1
Озёрного уступа, 50–70	9.VI	15.VII	37	1.2	6.7	5.5
Склоновый, 70–100	19. VI	24.VII	36	1.5	6.3	4.8
Глубоководный, 100–140	23.VI	12.IX	80	1.5	6.3	4.8
Впадины, >140	29.VI	12.IX	74	1.4	6.3	4.9

Все районы озера имеют наибольшие дисперсии температуры воды и воздуха в период нагревания до наступления максимума средних температур. В этот период значения максимальных дисперсий температуры воздуха возрастают от прибрежных районов к глубоководным.

Дисперсии температуры воды закономерно изменяются от месяца к месяцу и по глубинам, что характеризует пространственно-временную неоднородность полей температуры на различных горизонтах в сезонном аспекте. Сезонная изменчивость дисперсий соответствует изменению средних температур воды и эволюции слоя температурного скачка. Величины дисперсии температуры воды и периоды их наибольших значений указывают на возможное климатическое (межгодовое) влияние изменения прихода тепла на поверхность озера и его проникновение вглубь водной массы. В зависимости от лимнической зоны наибольшая глубина, где ещё существует дисперсия, не менее 1, составляет 60 – 100 м. Для средних многолетних условий, ниже этих глубин практически не сказывается межгодовая изменчивость температуры. Следовательно, значимые отклонения от средних будут свидетельствовать о неслучайных изменениях.

На Ладожском озере наибольший диапазон горизонтальных изменений температуры поверхности воды существует с середины июня до середины июля и превышает 15° С, причём выявлена значимая связь между распределением глубин озера [8]. В начале сентября температуры поверхности воды и воздуха сравниваются практически одновременно по всему озеру и устанавливается нейтральная стратификация приповерхностного слоя воздуха. Наступает период максимального теплосодержания и начинается охлаждение поверхности озера. Пространственные температурные неоднородности уже практически не зависят от распределения глубин и их дисперсии не велики. Температуры воды в этот период также могут служить индикаторами изменения климата в регионе.

Полученные результаты имеют климатическое значение для изучения Ладожского озера, при экологическом моделировании крупных водоёмов. Статистически значимые отклонения от климатических норм будут свидетельствовать об изменении внешних воздействий на экосистему озера.

Литература

1. Адаменко В.Н. Климат и озера. – Л., Гидрометеониздат, 1985, 264 с.
2. Веселова М.В., Кириллова В.А. Климатические особенности Ладожского озера. В кн. Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. 1966. Изд. Лен. университета. С.81–103.
3. Догановский А.М., Анохина Е.А. Влияние климатических вариаций на уровень озера Северо-Запада России. Сб. научных трудов. Водные ресурсы Северо-Западного региона России. СПб, 1999, вып. 121. – Изд. РГГМУ. с.86–91.
4. Кондратьев С.А., Бовыкин И.В. Анализ отклика гидрологической системы «водосбор–озеро» на изменения климатических параметров. В кн. Изменения климата и их последствия. Материалы спец. сессии Учёного совета Центра международного сотрудн. С.–Петербург, «Наука», 2002, с. 195–204
5. Ладожское озеро. Атлас. ГУНИО. СПб. 2002.
6. Науменко М.А. Новое определение морфометрических характеристик Ладожского озера. Доклады Академии наук, 1995, том 345, N.4, с.514 – 517.
7. Науменко М.А., Каретников С. Г., Гузиватый В.В. Пространственно-временная термическая дифференциация вод Ладожского озера. Доклады Академии наук, 2000, т.373, №2, с.247–25.
8. Науменко М.А., Каретников С.Г. Сезонная эволюция пространственного распределения температуры поверхности воды Ладожского озера в связи с его морфометрией. Доклады Академии наук, 2002. т.386, № 2, с.250–253.
9. Науменко М.А., Каретников С.Г. Морфометрия и особенности гидрологического режима Ладожского озера. В кн. Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее. С.–Петербург, Наука, 2002. с. 16–49.
10. Тихомиров А.И. 1982. Термика крупных озёр. Наука, Ленинград, 232 стр.
11. Филатов Н.Н. Колебания уровня крупных озёр Европы и изменчивость климата. Доклады Академии наук, 1998. т.359, № 2, с.255–257.
12. Шимараев М.Н., Куимова Л.Н., Синюкович В.Н., Цехановский В.В. О проявлении на Байкале глобальных изменений климата в XX столетии. Доклады Академии наук, т.383, № 3, с.397–400.
13. Шнитников А.В. Внутривековая изменчивость общей увлажнённости бассейна Ладожского озера. В кн. Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. 1966. Изд. Лен. университета. С.5–57.
14. Ambrosetti W. Barbanti L. Deep water warming in lakes: an indicator of climatic change. J.Limnol., no.58(1), 1999, p.1–9.
15. Elo A.-R., Huttula T., Peltonen A., and Virta J. The effects of climate change on the temperature conditions of lakes. Boreal Environment Research, 1998, v.3, № 6, 137–150.
16. Lam D., Schertzer M.(Eds).1999. Potential climate change on Great Lakes hydrodynamics and water quality. ASCE Monograph, A.S.C.E., New York, N.Y..212 p.
17. McCormick M., Fahnenstiel G. Recent climatic trends in nearshore water temperatures in the St.Lawrence Great Lakes. Limnol. Oceanogr., no.44(3), 1999, p.530–540.
18. Mitchell T.D., Carter T.R., Jones P.D., Hulme M., New M., 2003: A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901–2000) and 16 scenarios (2001–2100). Journal of Climate: submitted.
19. Naumenko M., Karetnikov S., Guzivaty V. Mean daily spatial surface temperature at Lake Ladoga: a new approach from thermal information-diagnostic system Proc. 4

УДК 556.048

Орлов В.Г. к.г.н., проф.

РАСЧЕТ ГОДОВОГО СТОКА ПРИ ОТСУТСТВИИ ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ПО РЕКОМЕНДАЦИЯМ СНИП 2.01.14-83

При выполнении инженерных гидрологических расчетов на водных объектах мы часто сталкиваемся с отсутствием каких-либо гидрологических данных. В этом случае необходимые расчеты производятся на основе рекомендаций нормативных документов. К ним относятся СНиП 2.01.14-83 «По определению расчетных гидрологических характеристик», где подробно рассмотрены варианты расчета гидрологических величин при отсутствии данных наблюдений. Так, для расчета среднего многолетнего стока и его коэффициента вариации (M_0 и C_v) предлагается применить один из двух приемов:

- интерполяция между опорными пунктами с установленными для них значениями M_0 и C_v ;
- расчет по картам распределяемого по территории M_0 и C_v годового стока.

При расчете по первому варианту вблизи расчетного створа на карту наносятся значения M_0 и C_v нескольких опорных пунктов в центре тяжести водосборов, и для расчетного створа эти значения (M_0 и C_v) получаем путем простой интерполяции.

Для расчета по второму варианту рекомендуется использовать карту среднего годового стока (M_0 л/сек с 1 км²) в масштабе 1:5 000 000 (ГГИ) или 1: 10 000 000 (последняя карта дана в приложении к СНиПу 2.01.14–83). Кроме этого, возможно использование региональной карты. Точность расчета стока по карте ГГИ оценивается в зависимости от коэффициента C_v годового стока (см. табл.1).

Величина годового стока по карте определяется для центра тяжести водосбора путем интерполяции между изолиниями стока. Предельные значения площадей водосборов при использовании карт – 50 000 км².

Таблица 1

Оценка точности расчета среднего многолетнего стока по карте (ГГИ)

Коэффициент изменчивости годового стока по карте	Средняя ошибка $\pm BQ_0$ %	Коэффициент изменчивости годового стока по карте	Средняя ошибка $\pm BQ_0$ %
0.15 – 0.20	8	0.60 – 0.70	15
0.40 – 0.50	10	1.00 – 1.50	25

Значение C_v также снимается с карты СНИПа или может быть рассчитаны по региональной формуле или по формуле, рекомендованной СНИПом.

Соотношение C_s и C_v устанавливается по группе рек аналогов или по рекомендации.

Рассматриваемые общие положения дают возможность расчета M_0 и C_v годового стока на неизученных реках той или иной территории.

Несмотря на то, что последний СНИП был предложен в 1983 году и используется при инженерных гидрологических расчетах, каких-либо массовых сопоставлений расчетов не было. В то же время необходимо отметить, что использование карты ГГИ 1961 года для расчета M_0 и карты СНИП 1983 года вызывает определенные сложности. Так, карта ГГИ с изолиниями годового стока представляет физико-географическую карту с достаточно подробной гидрографической сетью, что является положительным моментом при ее использовании и более объективным установлением расчетной реки и расчетного створа, а, следовательно, и точности расчета, однако исходные данные этой карты уже устарели, ведь прошло более 40 лет.

Что касается второй карты – СНИПа, то при масштабе 1:10 000 000 рассчитывать на более или менее четкое установление местоположения расчетной реки и створа не представляется возможным. Ведь гидрография здесь не представлена русловой сетью только главных рек, да и отсутствие населенных пунктов и городов не даст возможность четкой привязки на местности. В этом случае использование карты СНИПа дает ошибку значительно большую, чем по нормативным документам.

Что касается карты ГГИ, то сорокалетний период ее использования и малый тираж делает ее антикварной, и вряд ли ее можно найти в проектных организациях.

Выполненные расчеты годового стока на неизученных реках по рекомендациям СНиПа сопоставлялись со значениями M_0 и C_v по рядам наблюдений. В качестве объектов использования были взяты район Кольского полуострова, бассейны рек Вычегды и Сухоны, которые расположены в различных географических условиях, и по их территориям проходит разное количество изолиний M_0 и C_v , что влияет на точность расчета.

Во всех случаях при работе с картами СНиП для определения M_0 и C_v был применен единый методический подход. Фрагмент карты СНиПа по каждому району был увеличен для распределения M_0 и C_v , и их изолинии были перенесены на гидрографическую схему с постами из ОТХ. Это было сделано для того, чтобы выполнить более точно привязку на карте СНиПа к расчетным рекам и их расчетным створам, т.к. используемые карты СНиПа не давали возможности этого сделать из-за отсутствия гидрографической сети и опорных пунктов.

Выполненные таким образом расчеты M_0' и C_v' для выбранных рек при условии отсутствия наблюдений были сопоставлены со значениями M_0 и C_v , полученными по рядам наблюдений.

Анализ выполненных расчетов показал, что ошибка в определениях нормы стока находится в пределах 20–25% (бас. Сухоны), 20–30% (бас. Вычегды) и 20–25% (реки Кольского полуострова). Ошибки C_v для всех рассмотренных районов не выходят за 15–20%.

Наибольшая ошибка характерна для малых рек, и здесь надо отметить, что малые реки в этих районах – это реки с площадью в 30 км^2 . По нашим исследованиям, эта величина площади занижена и может быть принята равной 100 км^2 . В то же время использование региональной зависимости $C_v = f(F)$ позволяет с меньшей ошибкой определить C_v , чем использование карты СНиПа.

Примененный прием – увеличение фрагмента карты СНиПа для M_0 и C_v с переносом изолиний на карту-схему ОТХ позволяет более точно определить местоположение расчетной реки и створа для расчета M_0 и C_v по центру тяжести бассейна.

Общий итог работы – использование для массовых расчетов карт СНиПа (M_0 и C_v) в М 1:10 000 000 нецелесообразно, т.к. вносит существенную ошибку в расчетный метод из-за невозможности установления на карте местоположения расчетной реки и ее створа.

ОЦЕНКА ДОПУСТИМЫХ ИЗЪЯТИЙ ОБЪЕМОВ ВОДЫ ИЗ РУСЛОВОЙ СЕТИ БЕЗ НАРУШЕНИЯ ЭКОЛОГИИ РЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

В настоящее время все водные объекты суши, будь то речные или озерные экосистемы, практически являются источниками водопотребления, а это промышленность, сельское, коммунально-бытовое хозяйство и др., которые не могут нормально функционировать без определенных объемов воды в своих циклах деятельности.

К сожалению, наши водные объекты являются не только источниками водоснабжения, но и местом сброса отработанных сточных вод, которые имеют место после использования воды в различных отраслях хозяйства. Где-то их мало, но где-то очень много. Нельзя забывать, что сброс в водные экосистемы даже небольшого количества сточных вод может привести к негативным последствиям для их естественного режима. При этом можно отметить два направления влияния антропогенной деятельности на водные объекты.

Первое – это загрязнение водных источников, а второе – их истощение.

Вспомним, что понимается под этими терминами, которые достаточно широко вошли в практику оценки водных ресурсов и естественного режима водных экосистем.

Под “загрязнением” понимается внесение в среду и появление в ней новых, обычно не характерных для нее физических, химических или биологических компонентов.

“Истощение вод” характеризуется уменьшением минимально допустимого стока поверхностных вод или сокращением запасов подземных вод. Минимально допустимым стоком в данном случае является сток, при котором обеспечивается экологическое благополучие водного объекта и условия водопользования.

И то и другое, в первую очередь, связано с изъятием воды из водного источника. Отношение специалистов к учету этих факторов антропогенной деятельности различно. Так, оценивая “загрязнение”, были разработаны для контроля за ним предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ, которые сбрасываются в водные экосистемы (ПДК), а также вводится понятие допустимого

сброса (ПДС), которое является порогом для возможного загрязнения. И то и другое (ПДК, ПДС) закреплено в специальной нормативной документации – СНИПы, “Правила...” и т.д. Это официальные нормативные документы по оценке загрязнения.

Что же касается “истощения”, то до настоящего времени каких-либо нормативных документов в этом отношении нет. Ряд организаций ведет в этом направлении работу, но конечные результаты не являются нормативными. Говоря об истощении водных ресурсов, необходимо отметить, что оно может возникнуть или быть обусловлено как естественными природными процессами (колебаниями климата), так и антропогенным (искусственным) воздействием на водный объект.

Понятно, что естественные природные процессы носят стихийный характер – их учесть сложно, а искусственное воздействие может быть учтено и даже спрогнозировано на какой-то период. Ведь под антропогенным воздействием на водные ресурсы, которые вызывают истощение или уменьшение стока в результате его зарегулирования или изъятия воды на хозяйственные нужды, понимается конкретная величина стока, необходимая для работы предприятий и комплексов, которые могут быть обоснованы нормативными актами. В то же время каких-либо нормативных документов по расходу и обоснованию возможной величины изъятия воды нет. А ведь с изъятием воды из русловой сети могут возникать самые неожиданные процессы и явления в реках. К этим изменениям может быть отнесено:

- ♦ уменьшение скорости движения воды в руслах рек и, как следствие этого, их заиливание и зарастание;
- ♦ понижение уровня грунтовых вод, что вызывает уменьшение дебита естественных источников;
- ♦ изменение влагообеспечения почвы;
- ♦ нарушение естественного биологического и гидрохимического режима водного объекта, что сказывается на условиях жизнедеятельности флоры и фауны в экосистеме.

Последнее является наиболее серьезным фактором при оценке экологического состояния водного объекта, поскольку именно уменьшение объема воды в русловой сети ниже предельного его значения с точки зрения экологии и вызывает нарушение в естественных жизненных процессах водного объекта. Поэтому нельзя

бездумно забирать воду. Нарушая экологию водного объекта, необходимо знать тот предел, ниже которого будет иметь место экологическое неравновесие.

Согласно проведенным исследованиям, расход воды в русле не должен быть ниже минимально допустимого расхода. Этот расход может быть назван экологическим стоком. Это то количество воды, которое должно находиться в водном объекте для обеспечения условий нормального существования гидробионтов при антропогенном воздействии на него и с сохранением необходимого качества воды. [2,3,4,8]. Другими словами, экологическое состояние реки будет неудовлетворительным, если расход воды в ней за период нарушенного стока (период изъятия воды) будет меньше экологического стока этой реки при ее естественном режиме. Можно считать, что минимальный экологический расход в реке – это природный барьер на пути антропогенного вмешательства в естественный режим в одной экосистеме. Этот предел не может быть ниже минимального стока за период наблюдений.

Некоторые авторы за этот предел рекомендуют принимать минимальный расход 95%-ной обеспеченности, но не ниже минимального наблюдаемого. [4,8].

Последние исследования рекомендуют за базисный расход принимать минимальный месячный сток 80%-ной обеспеченности, поскольку именно эта величина может быть получена по картам атласа СнИПа 2.01.14-83, а это немаловажно для рек, где наблюдений нет.

Таким образом, основным источником анализа и оценки минимально-допустимого расхода (МДР) является минимальный сток речной системы, который дает возможность оценить объем воды в русловой сети по минимальному 80%-ному расходу и определить возможную величину ее изъятия, не переходя границу предельного объема, определенного по минимальному 80%-ному стоку.

Нельзя забывать, что величина экологического стока в течение года не остается постоянной, и в этом случае ее целесообразно определить для каждого месяца или сезона. В то же время при стабильном изъятии воды в течение года достаточно точно можно определить объем изъятия воды, оценивая его в %% от годового объема за многолетний период или за годы любой обеспеченности. Возможный

забор воды из речной системы в этом случае может быть определен как разность естественного и экологического стоков.

Из учебника Г.С.Арсеньева и А.Г.Иваненко “Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты” 1993 года можно использовать цифры, характеризующие степень изъятия воды из наших рек на хозяйственные нужды. Так, общий водозабор из рек России составил в 1984 году 104 км куб./год, а если сравнить это с общими запасами в речных системах (4270 км куб./год), то это составляет порядка 3% от многолетнего объема.

В то же время отмечается, что одной из причин экологической катастрофы Арала является чрезмерное изъятие воды в течение года из русловой сети впадающих в него рек. Изъятие 4-5% годового объема для этих рек не вызвало бы негативных последствий, а изымалось более 10% от общего объема. Результат мы видим. Но на наш взгляд, здесь нельзя забывать о местоположении региона. Ведь Арал – это зона засушливая, реки ледникового таяния, и, естественно, это надо было учесть при изъятии воды в различные сезоны года, чего не было сделано.

Учитывая все вышесказанное, была предпринята попытка оценить возможный объем изъятия воды из русловой сети в %% от многолетнего объема и по объему воды, рассчитанному по минимальному месячному 80% расходу. Такие расчеты были выполнены для различных речных систем европейской территории России. Были рассмотрены речные системы, расположенные в Псковской, Новгородской, Тамбовской областях, и реки бассейна р.Вятки. Для анализа были получены расчетные параметры годового и минимального месячного стока, рассчитаны многолетние объемы воды в русловой сети всех рассмотренных рек, вычислены годовые объемы воды в них с учетом среднемноголетних минимальных месячных расходов воды 80% обеспеченности. Все это позволило определить разницу ($\Delta W'$) между многолетним объемом воды в русловой сети (W_0) и объемом, полученным по $Q_{ср. мин.}$, мес. 80% расходу (W'_{80}).

В какой-то степени мы оцениваем водные ресурсы всех рассмотренных рек, т.е. те ресурсы, которые могут быть изъяты на различные нужды, не вызывая каких-либо экологических изменений в речной сети. Анализ показал, что величина $\Delta W'$ меняется на реках в

небольших пределах, и для рассмотренных территорий эти изменения составляют в среднем:

Новгородская область – от 70 до 95%;

Псковская область – от 60 до 95%;

Тамбовская область – от 75 до 92%;

Реки бассейна р.Вятка – от 70 до 90%.

Всего было использовано 62 речные системы с диапазоном площадей от 100 до 22500 км кв. Учитывая рассчитанные объемы по рассмотренным речным системам, построена связь $W_0 = f(W'_{80})$, которая оказалась единой для всех рек рассмотренных районов. Связь прямолинейна с разбросом в диапазоне малых рек. Аналитическое выражение связи – $W'_{80} = 0.20 W_0$, т.е. величина W'_{80} , как правило, в среднем составляет 20% от многолетнего объема.

В то же время связь разности этих объемов ($\Delta W' = W_0 - W'_{80}$) с площадью водосбора рек указала на единую зависимость для рек Псковской, Новгородской областей и рек бассейна Вятки. Что же касается рек Тамбовской области, то зависимость $\Delta W' = f(F)$ идет несколько ниже, что, вероятно, связано с режимом этих рек и особенностями питания. Связи имеют параболическую зависимость.

Полученная зависимость $\Delta W' = f(F)$ может быть использована для ориентировочной оценки возможной величины изъятия воды ($\Delta W'$) по площади водосбора без трудоемких расчетов годового и минимального 80% объемов воды в русловой сети, но только для рек, рассмотренных районов. Как это будет в других регионах и географических зонах, покажут дальнейшие исследования.

Выполненное исследование показало на возможный вариант оценки изъятия воды из русловой сети по многолетнему годовому объему и объему, полученному по минимальному 80%-ному месячному расходу, разность между которыми и будет характеризовать тот объем воды, который можно изъять из русловой сети без ущерба для экологии. При этом необходимо учитывать лимитирующие периоды в жизни реки и стабильность изъятия воды. Остаточный или экологический объем воды в русловой сети (при соответствующем изъятии ее) не должен быть менее 20% от многолетнего объема воды в русловой сети.

Для более объективной оценки объемов изъятия воды целесообразно выполнять помесечные оценки объемов воды, что связано с естественным гидрологическим режимом речной экосистемы.

Возвращаясь к вопросу о стабильности изъятия воды в течение года, нужно отметить, что в этом случае необходим дифференциальный подход на протяжении года. Исследования показали, что в не лимитированный период объемы изъятия воды ничем не ограничены. В период пониженного стока (зима, лето-осень) необходим особый подход, при котором надо иметь тот средний расход при изъятии, который формирует объем изъятия. Полученный расход сравнивается со среднемесячным расходом и оценивается возможная величина изъятия.

Так, наши исследования показали, что на реках Северо-Западного региона дополнительная оценка необходима для 2–4 месяцев в лимитированный период, а для рек Вятки это может быть и 8–9 месяцев. Это говорит о том, что для объективной величины изъятия воды необходим помесечный анализ объемов изъятия.

Литература

1. *Владимиров А.М.* Гидрологические аспекты экологии. Тр. ЛГМИ: 1990. – вып. 107. – С. 71–82.
2. *Владимиров А.М., Иманов Ф.А.* Принципы оценки экологического стока рек. Тр. РГГМИ: 1994. – вып. 116. – С. 4–7.
3. *Владимиров А.М., Орлов В.Г., Сакович В.Н.* Экологические аспекты использования и охраны водных ресурсов (вод суши). СПб.: РГГМИ. – 1997. – С.126.
4. *Овчаров Е.Е., Захаровская Н.Н., Ильинич В.В.* Допустимые минимальные расходы воды в малых реках. Тр. РГГМИ: 1994. – вып.116. – С.164–167.
5. *Орлов В.Г.* Вариант оценки возможного изъятия воды из русловой сети без нарушения экологии речной системы. Тр. РГГМИ, 1999.
6. *Орлов В.Г., Трушевский В.Л.* Экологические аспекты водопользования. СПб.: С.-Петербургский Государственный Университет. – 1999. – С.184.
7. *Указания по установлению минимальных допустимых расходов воды в реках для охраны природы (временные).* Минск: ЦНИИКИВР, 1977.
8. *Фашевский Б.В.* Основы экологической гидрологии. Минск, 1996. – С.240.
9. *Фашевский Б.В.* Оценка допустимых изъятий поверхностного стока для ИППВ с учетом природоохранных мер. Рекомендации по проектированию орошения и подземных водах с искусственным регулированием их запасов и учетом природоохранных мер. М.: Союзводопроект, 1986. – С.136–137.
10. *Черняев А.М.* Управление водными ресурсами в агропромышленном регионе (Урал и Приуралье). Л.: Гидрометиздат. – 1987. – С.246.

О ПОНЯТИИ ФОНОВОГО СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМ В СВЯЗИ С БУРЕНИЕМ ГАЗОВЫХ СКВАЖИН В РАЙОНАХ ОБСКОЙ И ТАЗОВСКОЙ ГУБ КАРСКОГО МОРЯ

Основные программы развития газодобывающей отрасли России в XXI веке ориентированы в основном на Ямало-Ненецкий регион. Уже сегодня здесь добывается 90 % российского газа и именно в этом регионе сосредоточены наиболее крупные его запасы.

На 25 месторождениях Ямала сегодня подготовлены к эксплуатации запасы газа с общим объёмом в 13 трлн. м³. Специалистам известно, что для газодобычи это исключительно сложные месторождения и их освоение невозможно без введения новых, передовых и современных технологий. Потребуется создание сложнейшей инфраструктуры для всех участвующих в этой программе предприятий. И наиболее сложной её частью, безусловно, будет строительство газо- и нефтедобывающих комплексов на акватории Карского моря и Обско-Тазовской губ.

Вся инфраструктура освоения месторождений углеводородного сырья является потенциально опасной для экологического состояния региона. Именно поэтому уже в самом начале этого грандиозного строительства необходимо оценить как бы *нулевой экологический уровень*.

Понятие экосистемы.

Известно, что слово экология было введено в науку более 100 лет назад немецким биологом Эрнстом Геккелем (1869 г). В соответствии с представлениями Э. Геккеля об экологии, как науке о взаимодействии живого и косного вещества, под экологической системой – **экосистемой** – можно понимать природное образование следующего вида:

$$\text{БИОЦЕНОЗ} + \text{БИОТОП} = \text{ЭКОСИСТЕМА}$$

Знак плюс в записанном тождестве не несет в себе обычного алгебраического смысла. Он говорит лишь о том, что в рамках экосистемы можно выделить два крупных структурных элемента. Но

это чисто аналитический приём, техническая процедура, условное деление того, что на самом деле неразделимо и цельно.

В термодинамическом отношении любая экосистема является открытой. Она обменивается веществом и энергией с другими природными структурами, оставаясь при этом относительно стабильной и сбалансированной по статьям прихода и расхода.

Экосистемы участвуют в процессе общего круговорота вещества Земли.

В основе этого глобального и многомерного явления лежит так называемый гидрологический цикл, или круговорот воды, схема которого хорошо известна. Круговороты отдельных веществ имеют свою специфику и требуют самостоятельных исследований.

В русской научной литературе наряду с термином экосистема довольно широко используется его аналог – термин **биогеоценоз** и почти всегда подчёркивается **однородность** всех его косных и биотических компонентов. **Однородность** рассматривается как одно из фундаментальных свойств экосистем. При этом имеется в виду, что на некотором участке земной поверхности биоценоз и соответствующие ему части атмосферы, гидросферы, литосферы и педосферы (почвенной оболочки) однородны не только по составляющим экосистему элементам, но и по взаимодействию этих элементов. Такая однородность сохраняется как по пространству биогеоценоза, так и во времени.

Экосистема – это единый, внутренне взаимообусловленный однородный природный комплекс.

По-существу, экосистема (биогеоценоз) это элементарная структурная единица биосферы, это её классификационный «кирпичик». В тоже время и сама биосфера является ничем иным как планетарной экосистемой. Таким образом, целостность и автономность каждого биогеоценоза проявляется через не аддитивные параметры, а сами экосистемы обладают не аддитивными свойствами:

Важно отметить, что взаимодействие живого и косного состоит не только в том, что среда определяет тип биоценозов, т.е. состав животного-растительных сообществ, но и сами эти сообщества изменяют среду, оптимизируя её для своего существования и развития.

По существу, *геккелевская, или биологическая*, экосистема и есть для человека окружающая среда в том понимании, которое в этот термин вкладывается:

экосистема $\equiv$ окружающая среда.

Но как только мы начинаем говорить о взаимодействии человека с окружающей средой, о прямых и обратных связях в этом «тан-деме», мы переходим к обсуждению **новой системы**, включающей ранее не учитываемые элементы, такие как **разум** и **дух** со всеми их многочисленными атрибутами культуры, политики, религии, социологии и т.д. Все это взаимодействует с геккелевскими экосистемами. Здесь нужен новый термин, поскольку существующий (экосистема), вообще говоря, вполне подходящий, уже занят, также как и его синонимы: биогеоценоз и окружающая среда.

Понятие фонового состояния экологических систем.

В учение об экологических системах понятие фона пришло из геохимии и, в частности, из геохимических методов поисков полезных ископаемых. В них перспективные на оруденение участки выделялись как некие аномальные зоны, в которых содержания поисковых элементов превышало их среднее значение для района поисков.

Основой же такого подхода явились работы американского учёного Ф.У. Кларка, который впервые на основе собранных им 6000 химических анализов горных пород вычислил средние содержания в них (в весовых процентах) вначале немногих, а затем 50 химических элементов. Позже уточнением этих цифр и расширением списка элементов занимались многие крупные исследователи, среди которых наибольший вклад, пожалуй, внесли В.М. Гольдшмидт, В.И. Вернадский, А.Е. Ферсман и А.П. Виноградов. По предложению А.Е. Ферсмана средние цифры содержаний отдельных элементов в земной коре стали называть «числами Кларка» или просто кларками. Термин оказался настолько удачным, что позже многие исследователи стали говорить о региональных кларках, местных кларках, кларках различных типов горных пород, вод и т.д. Позже, во избежании путаницы, понятие кларк сохранили только в его первоначальном значении, а все остальные оценки стали называть просто средними содержаниями. Результаты таких оценок сравнивались с величинами кларков для земной коры, что по величине отклонений позволяло судить о степени аномальности кон-

кретных территорий, выделять геохимические провинции и т.д. Появились различные коэффициенты, такие, например, как кларки концентраций.

Благодаря этим работам постепенно сложилось представление о геохимическом фоне как совокупности средних содержаний элементов. Такой **фон выражался числом**. И это число рассматривалось как константа.

Однако статистический принцип выделения фона и аномалии обладает рядом недостатков, обусловленных принципами на которых он основан. Устранение недостатков статистического способа и увеличение эффективности геохимических методов поисков сегодня достигается **введением новых понятий фона** и, соответственно, аномалии.

Один из подходов связывается с заменой **фона-числа** на **фон-функцию**. При этом чаще всего в качестве фона-функции используют полиномиальный тренд. Но оказалось, что можно пойти ещё дальше и от фона-функции перейти к **фону из множества чисел, оформленных в виде матрицы**. Впервые такой подход был реализован при гидрогеохимических поисках (А. Павлов, 1984)/

Изложенные представления о геохимическом фоне и аномалиях в полной мере могут быть отнесены и к экологическим системам. Только в случае экологических систем потенциальное рудное тело (геохимические поиски) следует заменять потенциальными источником техногенного загрязнения.

Пример геохимического фона (район Бованенковского газозового месторождения. Ямал).

Полуостров Ямал представляет собой северо-западную оконечность Западно-Сибирской низменности, примыкающая с запада к Обской губе. Это огромная заболоченная равнина с многочисленными крупными и мелкими озёрами. В них впадает большая часть рек полуострова.

Практически весь полуостров находится в зоне многолетне-мёрзлых пород, растительность – типично тундровая, преобладают мхи и лишайники.

Экологическое состояние Ямала во многом определяется его «центральный» положением по отношению к мощным и давно существующим источникам техногенного загрязнения, воздействующим

щим практически на всю Арктику. В первую очередь, это Новоземельский ядерный полигон и Норильский комбинат, часто называемый арктической душегубкой. Поступающие оттуда массы воздуха приносят с одной стороны радионуклиды, с другой сернистый ангидрид и тяжёлые металлы, в том числе и никель который современной экологией уже признан канцерогеном. Кроме того, можно говорить и о поступлении разнообразных гелей неизвестного состава. Количественные оценки этих потоков пока ещё никем не проводились, но с уверенностью можно ожидать, что они будут выражаться очень большими числами. Известно, например, что в СССР только Норильский комбинат выбрасывал в атмосферу количество серы приблизительно равное годовой её добычи в стране. Мощным источником техногенного загрязнения может быть и весь промышленный Урал.

Даже самый общий взгляд на экологическое состояние современного Ямала позволяет понять, что он находится под мощным техногенным прессингом регионального масштаба и его первозданная чистота уже заметно нарушена.

Это обстоятельство даёт основания с уверенностью говорить, что в мощный техногенный прессинг включены и Обская и Тазовская губы, а также примыкающий к ним с востока Гыданский полуостров.

Фоновое состояние экосистем.

Понятие «*фоновое состояние экосистем*» в научном обиходе появилось совсем недавно. Во всяком случае, поиск его в Интернете привёл только к нескольким источникам, где оно упоминается. И лишь в одном из них автор объясняет своё видение этого понятия (А. Степанов, 1999). Его полезно привести, поскольку, во-первых, автор представляет такую официальную структуру, как Госкомэкология России, во вторых, речь идёт о континентальном шельфе, что в достаточно полной мере соответствует нашей теме и, наконец, в третьих, потому что изложенные представления требуют обсуждения.

«Для получения конкретных данных по фоновому состоянию природной среды континентального шельфа необходимо на территории распределить сеть станций в виде сетки отбора образцов и экологических исследований в местах потенциально максимальной

нагрузки на окружающую среду и в зонах высокой экологической чувствительности.

При фоновых исследованиях должны быть получены количественные показатели гидрохимических параметров морской воды (рН, растворённый кислород, солёность, концентрация углеводов, фенолы, соединения азота, фосфаты, металлы – мышьяк, железо, ртуть, цинк, свинец, никель, кадмий, хром, медь, барий, ванадий), её гидрохимических параметров (морские течения и их скорость, температура по глубине, мутность, волнения моря в баллах, ледовые исследования), геохимические показатели донных отложений, окислительно-восстановительный потенциал, гранулометрический состав. Содержание органики. Углеводов, фенолов; комплекс металлов, аналогичный приведённому выше для морской воды.» (с.91).

Нетрудно увидеть, что в этом довольно длинном перечне параметров нет упоминания о средних значениях. Таким образом, говоря о **фоновом состоянии** среды (биотопа), автор имеет в виду некий **параметрический обзор по региону** исследований, который можно рассматривать в качестве своего рода **начального состояния** по отношению к будущим состояниям. При этом предполагается, что новые состояния будут заметно или существенно отличаться от начального.

Фоновое состояние биотопа дополняется таким же параметрическим обзором по биоценозам – второй составляющей экосистемы. В первую очередь, это ихтиологические исследования с целью характеристики уровней загрязнённости рыб. При этом имеются в виду анализы мышечных тканей, тканей печени, а также икры на тот же круг параметров, что был приведён для морской воды и донных отложений. Кроме того, изучаются патоморфологические отклонения органов рыб.

В характеристику биоценозов включаются и результаты исследований макро- и микробентоса, фито- и зоопланктона, водной растительности.

Надо сказать, что всю эту подробнейшую характеристику фонового состояния Госкомэкология предполагает получать с помощью довольно сложной структуры экологического мониторинга.

В нашем случае, на территории Обской и Тазовской губ, экологического мониторинга нет. Поэтому для решения поставленной

задачи мы вынуждены были идти по пути компиляционного анализа тех материалов (фондовых и опубликованных в научной печати), которые оказались доступными для нас. В основном это были данные «ВНИИОкеангеология».

Они охватывали очень широкий круг вопросов, охватывающих детальные работы по условиям осадконакопления в Обской и Тазовской губах, характеристику донных осадков, придонных вод, бентоса и техногенных факторов.

В результате удалось получить весьма общее представление о фоновом состоянии экологических систем Обской и Тазовской губ. Для детализации экологической картины необходимо иметь существенно больший объём информации, который может быть получен только при организации экологического мониторинга. Чтобы понять механизм формирования экологического фона, необходимо привязать его к экологическому состоянию прилегающей к Обской и Тазовской губам суши и дать экологическую оценку такого огромного водосборного бассейна, который называется Западно-Сибирской низменностью.

В перспективе необходимо создать *модель формирования фоновое состояние экологических систем* Обской и Тазовской губ, поскольку только она позволит прогнозировать и хотя бы в какой-то степени контролировать те изменения экологического фона, которые, безусловно, будут происходить при освоении газовых и нефтяных месторождений региона.

УДК 556.167.025(470.1/2)

Пивоварова И.И. ст. преп., к.т.н.

Гайдукова Е.В. асп.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОСТИ РЕЖИМНОЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА

Сеть гидрологических постов предназначена для изучения вод суши и сбора информации о процессах, происходящих на водных объектах. В частности, информация с постов должна отображать зональные характеристики стока, гарантировать получение надежных данных о пространственных и временных изменениях нормы

стока. Кроме того, результаты наблюдений на соседних водных объектах должны быть взаимосвязаны с целью применения при необходимости для описания поля стока метода гидрологической аналогии. Критерии оптимизации режимной гидрологической сети (репрезентативный, градиентный и корреляционный), позволяют определить рациональное число станций наблюдения необходимое для получения достоверных и репрезентативных гидрологических характеристик с минимальными материальными затратами.

Исследуется чувствительность критериев к смене фаз водности, которая может произойти вследствие изменения климата, на ретроспективном материале. Возникает вопрос: смогут ли станции предоставлять достаточное количество данных для составления гидрологических прогнозов, обслуживания потребителей, предсказания стихийных гидрологических явлений?

Более тридцати лет для определения оптимальной плотности размещения пунктов наблюдения применялся метод И. Ф. Карасева [1]. Развитие этого метода приводится в работе В. В. Коваленко и И. И. Пивоваровой [3]. В их работе впервые теоретически получены критерии оптимальной сети из пространственной стохастической модели формирования речного стока, из которых как частный случай следуют критерии Карасева. Это позволяет конкретизировать условия формирования стока, при которых они справедливы. Вывод выполнен на основе модели Фоккера – Планка – Колмогорова (ФПК) и привел, к формулам:

$$L_{\text{гр}} \geq \frac{n G_{\bar{\epsilon}}}{2 \text{grad } m_n} m_n, \quad (1)$$

$$L_{\text{кор}} \leq \sigma_0^2 / (C_{\nu}^2 a), \quad (2)$$

где $L_{\text{гр}}$ и $L_{\text{кор}}$ – нижний и верхний пределы оптимального расстояния между центрами водосборов, контролируемых режимными гидрологическими постами; m – моменты распределения плотности вероятности; n – порядок момента ($n = 1, 2, 3$); $\text{grad } m_n$ – градиент начального момента n -ого порядка; $G_{\bar{\epsilon}}$ – интенсивность белого шума; $a = \bar{\epsilon} - 0.5G_{\bar{\epsilon}}$ $\bar{\epsilon} = 1/k$ (k – коэффициент стока). Формула (1) служит для нахождения градиентного критерия, формула (2) – корреляционного критерия.

Репрезентативный критерий в работе [3] рассматривается как параметр релаксации в модели речного стока, определяющий зону неоднородности, связанную с влиянием азональных факторов.

Регион исследования – бассейн верхнего и среднего течения Оби – был выбран, на основании возможности проследить повсеместно на данной территории многоводную и маловодную фазы водности.

В ходе выполнения исследования восстановлены ряды летнего и зимнего минимального стока по 130 станциям продолжительностью не менее 40 лет за период до 1980 г. По данным всех станций построены интегральные разностные кривые и выявлены фазы водности. По ним выполнено районирование территории, разделяющее регион исследования на различные области со сменой маловодного и многоводного периодов на реках. Линии, отделяющие одну область от другой, для лета и зимы не совпадают (рис. 1). Расхождения между расходами воды многоводного и маловодного периодов водности с вероятностью превышения 80 % установленной по сглаженным эмпирическим кривым распределения в среднем равны 12 %.

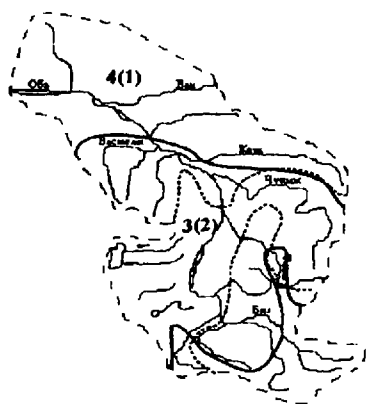


Рис. 1. Схема бассейна верхнего и среднего течения Оби с областями водности различными фазами водности для летне-осеннего и зимнего 30-суточного минимального стока.

— — — — — Лето (области 1 и 2)
 - - - - - Зима (области 3 и 4)

Репрезентативная площадь определялась по специально разработанной методике, в основу которой вошел критерий оценки однородности Стьюдента. Соответствующие значения ряда (площадь водосбора F и модуль стока q) были ранжированы по возрастанию площади, и значения q представлены в «хронологическом» порядке; таким образом стало возможным применение критерия однородности Стьюдента.

Градиентный критерий рассчитывался для первых трех моментов, которым соответствуют расчетные гидрологические характеристики

– норма стока, коэффициент вариации и асимметрии.

Для нахождения $\text{grad } m_n$ и m_n были построены карты моментов отдельно для летне-осеннего и зимнего стока.

Параметр G_ε (интенсивность белого шума), необходимый для вычисления градиентного и корреляционного критериев, рассчитывался по формуле [2]:

$$G_\varepsilon = 2 \ln r_{\Delta l} / \Delta l + 2 / k L_{\text{репр}}, \quad (3)$$

где k – коэффициент стока; $r_{\Delta l}$ – пространственный коэффициент автокорреляции; Δl – максимальное расстояние между соседними центрами водосборов, при котором сохраняется значимый коэффициент корреляции между этими бассейнами; $L_{\text{репр}}$ – расстояние релаксации ($L_{\text{репр}} = \sqrt{F_{\text{репр}}}$).

Коэффициент стока определялся как соотношение слоя минимального стока к годовым осадкам [4]. Средние значения коэффициентов стока найдены по построенным картам.

Пространственные коэффициенты автокорреляции находились по корреляционным функциям каждой области (по оси X – расстояние между центрами водосборов рек, по оси Y – коэффициент корреляции между рядами наблюдений за минимальным 30-суточным стоком тех же рек) путем откладывания по оси X значения Δl и снятия $r_{\Delta l}$ по оси Y соответствующей точки аппроксимирующей экспоненциальной кривой.

Переход от линейных размеров $L_{\text{тр}}$ и $L_{\text{юр}}$ к площадным выполнен по эмпирическим соотношениям:

$$L = 2\sqrt{F}, \quad l = 0,5 L, \quad (4)$$

где L – длина реки; F – площадь бассейна; l – расстояние между центрами смежных бассейнов [3].

В результате исследования получено следующие.

1) Критерий репрезентативности, найденный с использованием критерия оценки однородности Стьюдента, не зависит от изменения климата, в результате которых минимальный сток меняется до 12%.

2) Значения градиентного критерия для любого из трех моментов при изменении фазы водности зависят от характеристик исследуемой области; для первого момента (нормы минимального стока)

можно проследить тенденцию увеличения градиентного критерия в маловодную фазу.

3) Корреляционный критерий зависит от стока. В многоводную фазу он выше, в маловодную ниже.

Таблица

Значения критериев оптимальной режимной гидрологической сети

Области	Фазы водности	Значения критериев				
		$F_{\text{регр}},$ км ²	$F_{\nabla 1},$ км ²	$F_{\nabla 2},$ км ²	$F_{\nabla 3},$ км ²	$F_{\text{кор}},$ км ²
Минимальный летне-осенний сток						
Область 1	Маловодный период (1935–1963 гг.)	20700	54	72	101	2186
	Многоводный период (1964–1980 гг.)	20700	37	49	51	959
Область 2	Маловодный период (1958–1980 гг.)	5580	140	91	41	540
	Многоводный период (1935–1957 гг.)	5580	131	107	124	861
Минимальный зимний сток						
Область 3	Маловодный период (1965–1980 гг.)	1800	7211	6682	6459	49
	Многоводный период (1948–1964 гг.)	1800	6623	7646	8484	153
Область 4	Маловодный период (1936–1956 гг.)	3170	2073	1117	764	354
	Многоводный период (1957–1980 гг.)	3170	1594	556	434	426

Литература

1. Карасев И.Ф. О принципах размещения и перспективах развития гидрологической сети // Труды ГТИ. – 1968. – Вып. 164. – С. 3 – 36.
2. Коваленко В.В. Нелинейные аспекты частично и бесконечного моделирования в эволюционной гидрометеорологии. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2002. – 157 с.
3. Коваленко В.В., Пивоварова И.И. Оптимизация режимной гидрологической сети на основе стохастической модели формирования речного стока. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2000. – 43 с.
4. Плиткин Г.А. Водный баланс Западной Сибири // Труды ГТИ. – 1976. – Вып. 228. – 246 с.

ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА СРЕДНЕГО ГОДОВОГО ИСПАРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ СУШИ И РАДИАЦИОННОГО БАЛАНСА УВЛАЖНЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для расчета среднееголетних значений (норм) годового испарения с поверхности суши было предложено несколько уравнений вида

$$E = f(x, E_0), \quad (1)$$

где E , x , E_0 – нормы годовых значений соответственно испарения, осадков и испаряемости¹, мм/год. Известны, например, уравнения Э. М. Ольдекопа [7], Р. Шрейбера [2], М. И. Будыко [2], Л. Тюрка [11], В. И. Бабкина [1], В. Н. Малинина [6], А. Н. Постникова [8, 9].

Испаряемость определяется как максимально возможное испарение для данных климатических условий при предположении, что испаряющая поверхность имеет избыточное увлажнение. Отсюда, испаряемость не зависит от увлажнения территории и определяется только ее тепловыми ресурсами. Таким образом, уравнения (1) объединяют (связывают) тепловые и водные характеристики данной территории. И это вполне закономерно, так как испарение входит в уравнение водного баланса, а испарение, умноженное на константу (LE), входит в уравнение теплового баланса. Здесь L удельная теплота испарения, равная $25 \cdot 10^5$ Дж/кг. Отсюда уравнения вида (1) называют уравнениями связи. Если известен способ вычисления значений E_0 , то уравнения связи позволяют оценить не только испарение с той или иной территории, но и сток с нее, так как для среднееголетних условий уравнение водного баланса имеет наиболее простое выражение

$$y = x - E, \quad (2)$$

где y – сток, мм/год.

¹ Так как в данной работе речь идет только о нормах годовых значений гидрометеорологических элементов, то далее для краткости, слово «норма» опускается. Будем писать например не «норма осадков» или «норма испарения», а просто «осадки» или «испарение».

Кроме того, задаваясь значениями осадков и переменных, определяющих E_0 , можно получить значения стока и испарения в новых гидрометеорологических условиях.

В работе автора [9] были предложены уравнения для расчета испарения

$$E = \frac{E_0(e^z - 1)}{e^z}, \quad (3)$$

и испаряемости

$$E_0 = (350 + 5.5\tau)e^{0.07\tau}, \quad (4)$$

где $z = x/E_0 + x^2/(2E_0^2)$; τ – норма средней годовой температуры воздуха; e – основание натуральных логарифмов. В работе [9] приводится подробный вывод этих уравнений.

Уравнения (3) и (4) позволяют рассчитывать испарение с равнинных территорий Европейской части бывшего Советского Союза с удовлетворительной точностью [9]. Однако применение (4) для расчета испаряемости и последующей оценки испарения по формуле (3) для других территорий, например, Западной Сибири, уже приводит к значительным погрешностям. Поэтому в данной работе предпринимается попытка получить более универсальное выражение для расчета испаряемости, пригодное по крайней мере для всей территории бывшего СССР.

Было решено вместо нормы годовой температуры использовать характеристику нормы температуры воздуха за теплый период года. Очевидно, что основная доля испарения с поверхности суши на территории России приходится на теплый период года. Поэтому, если испаряемость зависит от температуры воздуха, то более тесная зависимость у нее должна быть с температурой именно за теплый период, а не с температурой за год. В качестве характеристики температуры воздуха за теплый период (t) использовалась сумма среднемесячных положительных значений температуры воздуха за месяцы теплого периода года, деленная на 12, то есть на число месяцев в году. Деление на 12, а не на число месяцев с положительной температурой, делает характеристику температуры теплого периода в разных пунктах более сравнимой. Заметим, что для зон, где температура воздуха положительна во все месяцы года, величина t совпадает с нормой годовой температуры воздуха. В пользу замены

температурной характеристики говорит следующий пример. Средние годовые температуры воздуха в Таллине, Москве и Тобольске соответственно равны 5.0, 3.6 и 0.0 °С, а значения t составляют соответственно 6.2, 6.5 и 5.8 °С. Понятно, что подстановка в одно и то же уравнение норм годовой температуры приведет к существенным различиям в значениях испаряемости в названных пунктах, а при использовании значений t , значения испаряемости в этих пунктах будут весьма схожими.

Запишем уравнение годового теплового баланса увлажненной территории для средних многолетних условий

$$R = LE_0 + P, \quad (5)$$

где R – радиационный баланс увлажненной поверхности, кДж/м²год или Вт/м²;

P – турбулентный поток тепла.

Напомним известные формулы

$$E = -0.623 \cdot 10^{-3} \rho k_e \partial e / \partial z, \quad (6)$$

$$P = -C_p \rho k_T \partial t / \partial z, \quad (7)$$

где ρ – плотность воздуха, равная 1.29 кг /м³; C_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, равная 1000 Дж/кг°К; e – парциальное давление водяного пара в воздухе, гПа; z – высота в приземном слое воздуха, отсчитанная от испаряющей поверхности, м; k_e и k_T – коэффициенты переноса влаги и тепла, м²/с. Составим отношение, обратное соотношению Боуэна

$$\phi = \frac{LE_0}{P} = \frac{0.623 \cdot 10^{-3} L}{C_p} \frac{k_e}{k_T} \frac{\partial e_0}{\partial t}, \quad (8)$$

но не будем считать, что $k_e = k_T$, как это полагал Боуэн. Последнее отношение записано для увлажненной поверхности, где испарение равно испаряемости. Поэтому будем считать, что $e = e_0$, где e_0 – парциальное давление насыщенного водяного пара при данной температуре воздуха, которое может быть вычислено по формуле Магнуса

$$e_0 = 6.1 e^n,$$

где e – основание натуральных логарифмов; $n = 17.14t/(235 + t)$.

Вычисляя производную $\partial e / \partial z$, получаем

$$\varphi = 38300 \frac{k_e}{k_T} \frac{e^n}{(235 + t)^2} \quad (9)$$

Подставляя (9) в уравнение теплового баланса (5), получим

$$E_0 = \frac{\varphi R}{L(1 + \varphi)} \quad (10)$$

С целью определения значения k_e/k_T рассмотрим соотношение

$$f = \frac{\varphi}{1 + \varphi} = \frac{LE_0}{R}, \quad (11)$$

По данным работы [3] затраты тепла на испарение с поверхности океанов составляют около 90 % от радиационного баланса. Поскольку мы рассматриваем избыточно увлажненную поверхность, то эта величина, по-видимому, может служить нам в качестве ориентира. Предполагалось, что для избыточно увлажненной поверхности суши при $t = 0^\circ\text{C}$ затраты тепла на испарение составляют 80 % от радиационного баланса. Подставляя эту величину, выраженную в долях от единицы, в правую часть уравнения (11), можно получить значение φ при $t = 0^\circ\text{C}$, а затем с помощью (9) определить величину k_e/k_T . Определенное таким образом значение k_e/k_T оказалось равным 5.5. Теперь стало возможным рассчитывать φ и f как функции от t . Был построен график $f(t)$ в диапазоне реальных для территории бывшего Советского Союза значений t . Кривая на графике очень мало отличалась от прямой и была аппроксимирована в виде

$$f = LE_0/R = 0.8 + 0.011t. \quad (12)$$

Было установлено, что между R и t существует очень тесная нелинейная зависимость. По виду этой зависимости можно было предположить, что производная dR/dt пропорциональна разности $(R_{\Pi} - R)$:

$$dR/dt = m(R_{\Pi} - R), \quad (13)$$

где m – коэффициент пропорциональности; R_{Π} – предельно большое значение R , для рассматриваемой территории, характерное для республик Средней Азии [5, 10, 12].

Интегрирование (13) приводит к уравнению

$$-\ln(R_{\Pi} - R) = mt + C, \quad (14)$$

где C – постоянная интегрирования.

Для определения величин m и C были использованы уравнения (13) и (14) и значения R и t для городов Кострома ($R_1 = 38$ ккал/см² год; $t = 6.0^{\circ}\text{C}$) и Киева ($R_2 = 50$ ккал/см² год; $t = 8.3^{\circ}\text{C}$). Значения R [ккал/см² год] были сняты с карты [5]. Напомним, что 1 ккал/см² год = 1.33 Вт/м². В качестве R в правую часть уравнения (13) подставлялась величина $0.5(R_1 + R_2)$. Значение $R_{\Pi} = 90$ ккал/см² год было также определено по карте (юг Узбекистана). В результате для расчета радиационного баланса увлажненной поверхности было получено уравнение

$$R = 90 - 52e^{0.11(6-t)} \text{ ккал/см}^2 \text{ год} = 1.33(90 - 52e^{0.11(6-t)}) \text{ Вт/м}^2, \quad (15)$$

а для расчета испаряемости, после объединения (12) и (15), уравнение

$$E_0 = 16.8(0.8 + 0.011t)(90 - 52e^{0.11(6-t)}) \text{ мм/год} \quad (16)$$

Уравнения (3) и (16) использовались далее для расчета испарения, а уравнение (15) – для расчета радиационного баланса увлажненной поверхности для различных административных единиц России, расположенных в разных природных зонах, и отдельных стран СНГ, на территории которых преобладают равнинные формы рельефа. При этом большие и заметно неоднородные по температуре воздуха и осадкам территории делились на части, а сравнительно небольшие территории рассматривались как единые. Осадки, как правило заметно изменчивая по территории характеристика, осреднялись для каждой территории по 10 – 15 метеостанциям, а температура теплого периода, как правило мало изменчивая по территории характеристика, определялась и осреднялась по 2 – 3 метеостанциям. В работе использовались осадки со всеми поправками.

Результаты расчета испарения сравнивались с данными двух карт среднего годового испарения, приводимых в работах [12] и [10]. Обе карты были построены в Государственном гидрологическом институте на основе уравнения водного баланса речного бас-

сейна (2), которое решалось относительно E^2 . Испарение, согласно этому уравнению, определяется осадками и стоком с бассейна. Если данные по стоку для большинства регионов бывшего Советского Союза можно считать более или менее достоверными, то к данным по осадкам в горных районах можно относиться лишь как к величинам ориентировочным. Причиной этого является своеобразие горного рельефа, обуславливающего большую изменчивость осадков по территориям и недостаточная густота осадкомерной сети в труднодоступных высокогорных районах [13]. Результаты расчета радиационного баланса сравнивались с данными карты, составленной Н. А. Ефимовой [5]. При этом картированию подвергались значения R [ккал/см² год], рассчитанные по методике, изложенной в работе [5]. Согласно этой методике R является функцией многих переменных. В расчетную формулу входят суммарная радиация и эффективное излучение при безоблачном небе, температура и парциальное давление водяного пара в воздухе, средняя облачность и др. Расчеты значений R в работе [5] были проведены для станций с высотами не более 1500 м над уровнем моря. Значения радиационного баланса увлажненной поверхности необходимы для расчета испаряемости, испарения, а также радиационного индекса сухости, введенного М. И. Будыко.

Анализ данных таблицы 1 показывает, что предлагаемые формулы дают весьма удовлетворительные результаты на всей равнинной территории Европейской части бывшего Советского Союза при расчете испарения. Средняя относительная погрешность (с.о.п.) по сравнению с данными первой и второй карт составляет соответственно 4 и 5 %. Погрешность расчета радиационного баланса здесь также не превышает 5 %.

В Западной Сибири предлагаемая методика расчета испарения, за исключением районов Крайнего Севера, где с.о.п. достигает 30%, дает также удовлетворительные результаты (с.о.п.=5%), если за эталон принимать вторую карту. Если сравнение производить с данными первой карты, то результаты оказываются значительно хуже и с.о.п. составляет примерно 13%. Результаты расчета R , за исключе-

² Далее опубликованная в [12] называется «первой картой», а опубликованная позже в [10] - «второй картой».

нием районов Крайнего Севера, где с.о.п. имеет недопустимо большие значения, следует признать удовлетворительными для остальной части Западной Сибири.

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчета испарения и радиационного баланса

Территория, республика, область	t , °C	x , мм	E_p , мм	E_1 , мм	E_2 , мм	Δ_1 , %	Δ_2 , %	R_p , Вт/м ²	R , Вт/м ²	Δ_3 , %
Латвия	6.8	730	527	500	500	5	5	56	53	5
Белоруссия	7.5	740	554	550	575	0	4	61	60	2
Украина										
Север	8.3	610	510	500	575	2	11	66	68	2
Юг	10.4	475	440	425	475	4	7	77	77	0
Российская Федерация										
Европейская часть										
Области										
Архангельская										
Север	3.3	640	274	300	300	9	9	27	33	20
Юг	5.3	680	440	450	425	2	4	44	44	0
Кировская	6.0	680	475	500	500	5	5	50	48	5
Ленинградская	5.9	740	495	475	450	4	10	49	48	3
Новгородская	6.3	730	495	500	475	1	4	53	50	5
Вологодская	5.8	710	475	475	450	0	5	49	46	6
Тверская	6.3	745	508	500	525	8	3	53	49	8
Костромская	6.0	730	490	500	475	2	4	50	50	0
Московская	6.5	720	510	500	525	2	3	54	53	2
Рязанская	7.1	650	505	500	525	1	4	58	56	5
Смоленская	6.3	790	520	500	550	4	6	53	50	5
Брянская	7.4	725	543	500	575	9	5	60	58	2
Воронежская	8.3	660	535	500	550	7	3	66	64	4
Белгородская	7.5	625	502	500	550	0	9	61	62	2
Пермская	5.7	740	480	475	450	1	7	48	46	3
Саратовская	8.1	545	467	475	475	2	2	65	57	14
Волгоградская	9.2	478	430	400	475	8	9	70	69	2
Ростовская	9.6	550	485	450	475	8	2	73	73	0
Республики										
Карелия	4.5	670	385	425	400	9	4	38	44	12
Коми	4.0	700	343	375	325	8	6	35	35	0
Удмуртская	6.2	630	467	475	500	2	7	52	49	5
Татарстан	6.8	610	477	475	475	0	0	56	50	10

Территория, республика, область	t , °C	x , мм	E_p , мм	E_1 , мм	E_2 , мм	Δ_1 , %	Δ_2 , %	R_p , Вт/ м ²	R , Вт/ м ²	Δ_3 , %
Башкортостан	6.7	610	487	475	450	2	8	56	53	5
Калмыцкая	10.0	395	360	400	375	10	4	76	73	4
Азиатская часть										
Западная Сибирь										
Ямало-Ненецкий авт. округ										
Север	2.0	400	130	100	100	30	30	15	27	45
Юг	3.7	600	305	350	300	13	4	30	33	8
Ханты-Мансийский авт. округ	5.4	520	400	450	375	11	7	46	46	0
Омская обл.	6.2	445	380	450	400	15	5	49	49	0
Восточная Сибирь										
Таймырский авт. округ										
Север	2.2	355	150	150	150	0	0	15	16	8
Юг	2.8	560	220	250	250	12	12	21	27	20
Эвенкийский авт. округ										
Север	3.3	410	255	300	300	15	15	27	29	9
Юг	4.2	460	318	400	350	20	9	36	42	16
Южная часть Красноярского края	5.5	490	390	410	350	5	10	46	46	0
Иркутская обл.	4.9	400	330	300	300	10	10	41	46	11
Республика Саха (Якутия)										
Север	2.2	435	160	150	150	7	7	15	20	27
Центр	3.6	270	220	225	250	2	12	29	33	12
Юг	4.7	340	285	300	275	5	4	40	40	0
Читинская обл.	5.0	460	350	300	225	17	55	42	46	8
Дальний Восток										
Амурская обл.	6.0	600	450	450	350	0	28	50	49	3
Хабаровский край										

Территория, республика, область	t , °C	x , мм	E_p , мм	E_1 , мм	E_2 , мм	Δ_1 %	Δ_2 %	R_p , Вт/ м ²	R , Вт/ м ²	Δ_3 %
Север	3.6	580	300	275	250	9	20	29	33	12
Юг	7.1	730	535	475	350	13	53	58	53	10
Приморский край	7.9	850	600	475	450	26	25	64	66	4
Магаданская обл.	3.3	510	265	250	225	6	18	27	29	9
Чукотский авт. округ	2.6	510	220	175	175	26	26	19	20	7
Сахалин										
Север	5.2	800	450	450	350	0	28	44	46	6
Юг	6.6	910	558	500	300	12	76	54	—	—
Казахстан										
Север	7.4	365	335	355	345	6	3	60	56	7
Юг	10. 3	300	280	260	225	8	24	77	80	3
Узбекистан										
Север	9.1	160	152	150	150	0	0	70	100	29
Юг	13. 7	340	305	300	220	2	39	89	100	11

Примечание. E_p – испарение, рассчитанное по предлагаемой методике; E_1 и E_2 – испарение, определенное по картам соответственно из работ [12] и [10]; $\Delta_1 = |E_p - E_1| / E_1$ и $\Delta_2 = |E_p - E_2| / E_2$ – относительные погрешности (%) расчета испарения по предлагаемой методике по сравнению с данными соответствующей карты; R_p и R – соответственно радиационный баланс, рассчитанный по предлагаемой методике и определенный по карте; $\Delta_3 = |R_p - R| / R$ – относительная погрешность (%) расчета радиационного баланса.

Для большей части Восточной Сибири, на территории которой преобладают горные системы, результаты расчета следует признать также удовлетворительными. При этом сравнение с данными обеих карт дает примерно одинаковые значения с.о.п. (8–9%). Сказанное не относится к югу этого региона, занятого мощными горными системами (Алтайский край, юг Красноярского края, Бурятия, Читинская область и др.), где с.о.п. довольно велика и составляет десятки процентов. Можно сказать, что величины R для всей территории Восточной Сибири рассчитываются с удовлетворительной точностью (с.о.п. = 10 %).

На территории Дальнего Востока обнаруживается лучшая сходимость рассчитанных величин E с данными первой карты (с.о.п.=12%). Сравнение результатов расчета E с данными второй карты дает недопустимо большие значения с.о.п. Результаты расчета радиационного баланса на всей территории этого региона следует признать удовлетворительными (с.о.п. = 7 %).

На территории Казахстана и Узбекистана сравнение E_p с данными первой карты дает хороший результат (с.о.п. = 5 %), а сравнение с данными второй карты обнаруживает недопустимо большие погрешности расчета E_p в южных частях этих республик.

Подводя итоги, можно констатировать следующее. Методика расчета норм годового испарения, основанная на применении формул (3) и (16), дает удовлетворительные результаты для территорий России и стран СНГ, на которых преобладают формы равнинного рельефа. Пригодна или нет эта методика для расчета испарения в регионах, занятых по преимуществу высокогорными системами, сказать затруднительно, так как данные карт, с которыми осуществлялось сравнение, сами, в силу объективных причин, не вызывают особого доверия.

Методика расчета норм радиационного баланса увлажненной поверхности дает удовлетворительные результаты повсюду на рассматриваемой территории за исключением республик Средней Азии, где расчетные величины R оказываются заметно приуменьшенными по сравнению с величинами, полученными в работе [5].

Литература

1. Бабкин В.И. Испарение с водной поверхности. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 80 с.
2. Будыко М.И. Испарение в естественных условиях. – Л.: Гидрометеиздат, 1948. – 136 с.
3. Будыко М.И. Изменения климата. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 280 с.
4. Багров Н.А. О расчете испарения с поверхности суши // Метеорология и гидрология. – 1954. – № 2. – с. 12 – 18.
5. Ефимова Н.А. Карты радиационного баланса увлажненной поверхности // Труды ГГО. – 1967. – Вып. 209. – С. 78 – 93.
6. Малинин В.Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. – СПб.: Изд. РГГМИ. 1994. – 160 с.
7. Ольдекоп Э.М. Испарение с поверхности речных бассейнов. – Юрьев, 1911. – 209 с.
8. Постников А.Н. Одина из форм уравнения связи элементов водного баланса // Труды ГГИ. – 1990. – Вып. 338. – С. 48 – 54.

9. Постников А.Н. К оценке среднемноголетних значений суммарного испарения с поверхности суши на основе уравнений связи // Труды РГГМУ. – 1999. – Вып. 123. – С. 141 – 152.
10. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 96 с.
11. Тюрк Л. Баланс почвенной влаги. – Л.: Гидрометеоиздат, 1958. – 228 с.
12. Указания по расчету испарения с поверхности суши. – Фотоофсетная лаборатория ВНИГЛГГИ. 1970. – 135 с.
13. Швер Ц.А. Атмосферные осадки на территории СССР. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 302 с.

УДК 556.32

Прокофьева Т.И. к.г.н., доц.

ПРОГНОЗ ПОДЗЕМНОГО СТОКА СЕВЕРО-ЗАПАДА РФ В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Наиболее полное и обоснованное решение прогнозных задач, связанных с функционированием подземной гидросферы, возможно лишь на основе моделей фильтрации и массопереноса в двух- трех- фазной пористой среде. Возможность применения довольно большого числа уже разработанных к настоящему времени моделей существенно ограничивается из-за недостатка необходимой информации, особенно, если речь идет о задачах регионального масштаба.

В данной работе изложен другой подход к решению проблемы, основанный на применении только общедоступной информации и материалов полевых исследований кафедры гидрогеологии и геодезии. В состав этой информации вошли: данные режимных наблюдений за уровнем грунтовых вод (УГВ) по Ленинградской, Псковской и Новгородской областям, метеорологические данные (среднегодовая температура воздуха и осадки), а также минимальные среднемесячные расходы воды рек за теплый период. Кроме того, с целью сравнительной оценки условий питания подземных вод в разных гидрогеологических условиях рассчитаны составляющие водного баланса деятельного слоя почвы (суммарное испарение, инфильтрация, изменения запасов влаги в зоне аэрации и уровня грунтовых вод) по разработанной модели водного баланса. Для применения данной модели необходима только метеорологическая информация и сведения о водно-физических свойствах почвогрунтов. Все перечисленные материалы анализировались с целью установления эм-

пирических связей между характеристиками режима подземных вод, составляющими водного баланса и среднегодовой температурой воздуха, чтобы на их основе определить тенденции изменения подземного стока при антропогенном потеплении климата.

Территория Ленинградской, Псковской и Новгородской областей входит в Ленинградский артезианский бассейн (ЛАБ) второго порядка, который является частью Русского артезианского бассейна. В гидрогеологическом разрезе верхней зоны свободного водообмена, за нижнюю границу которой принимают уровень Финского залива (региональный базис эрозии), водоносные горизонты и комплексы приурочены к породам кайнозойской и палеозойской групп. Породы четвертичной, кембрийской, ордовикской и девонской систем содержат порово-пластовые и трещинно-пластовые безнапорные и напорные воды, залегающие выше регионального водупора – мощной толщи кембрийских глин [1]. Глубина залегания грунтовых вод изменяется в широких пределах в зависимости от абсолютных отметок местности и положения относительно местного и регионального базисов эрозии.

Общее движение подземных вод ЛАБ происходит в северо-западном направлении. Местные отклонения наблюдаются в сторону приозерных депрессий и глубоких долин крупных рек. Под влиянием дренирования крупными реками в мощном верхнем ярусе подземных вод создается единый общекбассейновый гидродинамический потенциал для всех подземных вод верхней зоны, так как местные водупоры отличаются невыдержанным характером. Следствием этого является закономерное уменьшение гидравлического уклона подземных вод вдоль главных речных артерий вплоть до основного базиса дренирования. Важной предпосылкой существования единой гидродинамики в верхнем ярусе подземных вод является совпадение подземных водоразделов с границами поверхностных водоразделов речных бассейнов.

Результаты региональной оценки естественных ресурсов подземных вод по методу Б.И. Куделина [1] показывают, что модуль среднего годового подземного стока на исследуемой территории изменяется от 1 до 5 л/с·км². Наибольший модуль подземного стока – 5,4 л/с·км² характерен для закарстованного Силурийского плато (Ижорская возвышенность); на Валдайской и других возвышенностях – (3,0 – 3,5) л/с·км²; пониженные значения – до (1,0 – 1,5)

л/с·км² – отмечаются в Приильменской впадине, к которой примыкают долины рек Ловать, Шелонь, Мста, Волхов и др.

Формирование подземного стока происходит под влиянием значительного числа различных факторов, соотношение между которыми определяет пространственные и временные закономерности его динамики. Действие метеорологических факторов определяет тип естественного режима грунтовых вод (ГВ). Для Северо-Запада РФ в ходе УГВ четко выражены максимумы в период весеннего снеготаяния и осенью, когда в результате снижения суммарного испарения выпадающие атмосферные осадки практически полностью идут на восполнение запасов ГВ. Периоды спада уровней отмечаются зимой за счет оттока ГВ и летом, когда величина испарения превышает инфильтрационное питание.

На общие черты режима ГВ накладываются специфические, связанные, среди прочих, с влиянием таких факторов как состав и мощность зоны аэрации. Для выявления указанных особенностей режима были проанализированы зависимости годовой амплитуды (A) изменения УГВ от среднегодовой его величины (H_{cp}) по данным шести пунктов режимных наблюдений в Псковской области. Установлено, что при суглинистом и глинистом разрезе зоны аэрации заметные колебания УГВ в течение года (1 – 2 м) прослеживаются для грунтовых вод, находящихся на глубине (2 – 3,5) м. Максимальная амплитуда отмечается для УГВ, равного 2 м. При меньших глубинах залегания ГВ годовая амплитуда УГВ не превышает (0,5 – 1) м, при больших – быстро уменьшается до 0,5 м. В условиях более легкого состава пород зоны аэрации (супеси) A_{max} отмечается для $H_{cp} = 1,5$ м. При больших и меньших глубинах ГВ амплитуда уменьшается. Выявленные зависимости $A = f(H_{cp})$ позволяют в первом приближении определить, при каком значении H_{cp} изменение условий питания ГВ, например, при потеплении климата, не приведет к подъему их уровня, а, следовательно, к увеличению подземного стока. Для зоны аэрации, сложенной тяжелыми грунтами, "срезка" максимумов УГВ поверхностью земли происходит при $H_{cp} = (2 - 3)$ м; при более легком составе пород зоны аэрации – при $H_{cp} \sim 1,5$ м.

Для выявления относительной роли метеорологических факторов в формировании режима УГВ были проанализированы зависимости H_{cp} (по тем же шести пунктам режимных гидрогеологических наблюдений) от среднегодовой температуры воздуха (T_{cp} по дан-

ным метеостанции Псков за 1945 – 1975 гг.). Установлено, что при повышении $T_{\text{ср}}$ от минимального ($3,5^{\circ}\text{C}$) до среднесуточного ($4,8^{\circ}\text{C}$) значения величина $H_{\text{ср}}$ или уменьшается или не зависит от $T_{\text{ср}}$. При росте $T_{\text{ср}}$ до зафиксированного максимального значения – $6,8^{\circ}\text{C}$ – наблюдается явно выраженная тенденция подъема УГВ на $(0,5 - 1)$ м. Такой характер зависимости $H_{\text{ср}} = f(T_{\text{ср}})$ объясняется существенными различиями в условиях питания ГВ в относительно холодные и теплые годы. Для районов Северо-Запада РФ самые низкие значения $T_{\text{ср}}$ связаны обычно с холодными зимами, когда оттепели наблюдаются редко, а породы зоны аэрации промерзают на большую глубину. В таких условиях ГВ зимой практически не получают питания. Весной талые воды, в основном стекают по поверхности промерзших пород, и инфильтрационное питание грунтовых вод также невелико. В результате максимальный УГВ весной достигает меньших значений, чем в более теплые годы. Сработка уровня в летний период, который в холодные годы также отличается пониженным температурным фоном, происходит медленно и ГВ в течение всего года залегают сравнительно высоко. При переходе от самых холодных лет к средним весенний максимум ГВ формируется на несколько более высоком уровне, а летом за счет испарения происходит интенсивное понижение УГВ, вследствие чего значения $H_{\text{ср}}$ становятся минимальными. В годы со среднегодовой температурой воздуха выше нормы теплыми обычно являются и лето и, что важно, зима. Зимой наблюдаются частые оттепели, в зоне аэрации накапливаются большие запасы влаги, весной происходит значительный подъем УГВ, а летом тепло расходуется не только на испарение ГВ, но и влаги, накопившейся в зоне аэрации. В результате в теплый период года наблюдается медленный спад уровня, который в течение года колеблется на более высоких отметках, чем в холодные годы, что сказывается на величине $H_{\text{ср}}$, а, следовательно, на величине подземного стока.

Проанализированные материалы позволили выявить еще одну особенность взаимосвязи режима УГВ с климатическими факторами: более "сильным" режимобразующим фактором для УГВ является температура воздуха, а не сумма атмосферных осадков. За период наблюдений минимальные значения $H_{\text{ср}}$ отмечены в 1973 г., когда сумма осадков была близка к норме. Максимальные значения $H_{\text{ср}}$

повсеместно наблюдались в 1975 г., когда осадки были ниже нормы на 20 %, а температура на 40 % выше.

Полученные результаты и сделанные на их основе выводы о характере взаимосвязи режимобразующих факторов и показателей режима подземных вод показали, что положительный результат может быть получен и на пути поиска связей между температурой воздуха и величиной подземного стока.

Основным методом оценки региональной величины подземного стока до сих пор является гидролого-гидрогеологический метод генетического расчленения гидрографа поверхностного стока. Среди различных характеристик подземного стока, получаемых этим методом, наименее объективны, по мнению В.С. Ковалевского [2] его среднегодовые значения, так как они фактически не измеряются, а рассчитываются с не очень высокой достоверностью. Более обоснованы минимальные среднемесячные значения, которые отождествляются с минимальными среднемесячными расходами воды (Q_{min}) рек в периоды зимней или летней межени, которые определяются по результатам непосредственных измерений. Обоснование выбора расчетного периода было осуществлено на основе анализа минимальных среднемесячных расходов воды р. Лути за период 1945 – 1989 гг. (п. Кингисепп). Оказалось, что в относительно холодные годы Q_{min} отмечаются в зимний период, а в более теплые, т.е. в годы с температурой воздуха выше нормы – летом. Анализ данных о расходах воды других рек региона (рр. Ловать, Шелонь, Мста, Великая, Плюсса и др.) дал тот же результат: в годы, когда значения T_{φ} больше нормы, минимальные среднемесячные значения стока обычно отмечаются в августе-сентябре. Поскольку в Северо-Западном регионе РФ антропогенное изменение климата прогнозируется в сторону повышения T_{φ} , то был сделан вывод о том, что ряды подземного стока следует формировать по данным о среднемесячных минимальных расходах воды за теплый период. Отметим, что из рассмотрения исключались годы, когда сумма осадков за летние месяцы была аномально большой.

Вопрос, который также требовал решения, это выбор таких расчетных створов, для которых модуль минимального подземного стока (M_{min}) за средний по условиям теплообеспеченности год соответствовал бы значениям M_{min} , приведенным в [1] для исследуемого региона. Установлено, что в пределах Русской платформы по мере

увеличения площади речного бассейна (F) примерно до 1000 км^2 величина модуля подземного стока увеличивается, затем стабилизируется и не зависит от F вплоть до 50 тыс. км^2 [3]. Проверка этого положения для рек с площадью водосбора от 500 км^2 до 700 км^2 показала, что значения $M_{\min}$, как правило, заметно ниже, приведенных в [1], что объясняется неполнотой дренированности подземных вод.

В итоге для оценки минимального подземного стока были проанализированы гидрографы семи рек региона и выбраны от 6 до 12 лет наблюдений, характеристика тепло-влагообеспеченности которых соответствовала обоснованным выше условиям, основное из которых это T_{cp} больше нормы. По данным о расходах воды рек рассчитаны модули минимального подземного стока, а по материалам наблюдений ближайших метеостанций – значения среднегодовой температуры воздуха. Зависимости вида $M_{\min} = f(T_{cp})$ для пяти расчетных створов из семи оказались значимыми, характеризующимися коэффициентами корреляции $r > 0,8$. По полученным зависимостям рассчитаны прогнозные значения $M_{\min}$, соответствующие повышению среднегодовой температуры воздуха от средне-многолетних значений для данной метеостанции до наибольших, отмеченных за ретроспективный ряд лет. Оценка среднегодовых значений модулей подземного стока (M_{cp}) осуществлена на основе выводов, приведенных в [2], в соответствии с которыми между значениями $M_{\min}$ и M_{cp} отмечается тесная связь, которая хорошо аппроксимируется уравнениями вида $M_{cp} = aM_{\min}^{1/2}$. Для определения значений "а" использованы карты модулей минимального и среднего годового подземного стока из [1]. Оказалось, что в пределах исследуемого региона "а" меняется от 1,8 до 2,5, причем выявляется явно выраженная тенденция уменьшения значений "а" при переходе от более теплых районов к более холодным. Полученные результаты приведены в таблице.

Значения $M_{\min}$ приведенные в таблице, показывают, что при повышении среднегодовой температуры воздуха относительно нормы на $(2,2-2,5) ^\circ\text{C}$ минимальный подземный сток увеличивается на 70 % на востоке региона и на $(120 - 130) \%$ в южной и юго-восточной его частях. Величина среднегодового подземного стока при этом увеличивается на $(30 - 50) \%$.

Таблица

**Результаты прогноза минимальных и среднегодовых значений модулей
подземного стока при повышении температуры воздуха**

Расчетный створ	Площадь водосбора, км ²	$T_{ср}$, °C	Модуль подземного стока, л/с·км ²	
			M_{min}	$M_{ср}$
Р. Луга, г. Кингисепп	12 200	4,4	1,48	2,43
		5,0	1,85	2,72
		6,0	2,46	3,14
		7,0	3,07	3,50
Р. Мста, д. Бор	16 900	3,7	1,28	2,82
		4,0	1,40	2,95
		5,0	1,79	3,34
		6,0	2,18	3,69
Р. Ловать, г. Холм	14 700	4,5	0,49	1,37
		5,0	0,61	1,52
		6,0	0,84	1,79
		7,0	1,07	2,02
Р. Великая, г. Опочка	3 500	4,85	1,37	2,15
		5,0	1,49	2,20
		6,0	2,31	2,74
		7,0	3,14	3,20
Р. Великая, д. Пятоново	20 000	4,85	0,83	1,64
		5,0	0,89	1,69
		6,0	1,19	1,96
		7,0	1,50	2,20

Зависимости, полученные для прогнозных оценок минимальных и среднегодовых модулей подземного стока нельзя экстраполировать за пределы наблюдавшихся в прошлом значений $T_{ср}$ без дополнительного анализа

Литература

1. Гидрогеология СССР. Т. III. Ленинградская, Псковская и Новгородская области. – М.: Недра, 1967. – 328 с.
2. Ковалевский В.С. Многолетняя изменчивость ресурсов подземных вод. – М.: Наука, 1983. – 206 с.
3. Зекцер И.С., Джамалов Р.Г. Подземные воды в водном балансе крупных регионов. – М.: Наука, 1989. – 126 с.

*Потапов А.А. (Межфакультетский
научно-исследовательский центр гидрогеоэкологии
Санкт-Петербургского государственного университета
(МНИ гидрогеоэкологии СПбГУ)*

**ОПЫТ КАЛИБРАЦИИ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ
ФИЛЬТРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД
(РАЙОН МЕСТОРОЖДЕНИЯ АЛМАЗОВ
ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА, АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

Общая характеристика района исследований

Месторождение алмазов им. М.В.Ломоносова, расположено в 100 км к северу от города Архангельска, вблизи восточного побережья Белого моря (Зимний Берег) на северо-западе Русской плиты.

В рассматриваемом районе выделяются два типа рельефа – структурно-денудационный и аккумулятивный. Структурно-денудационный тип объединяет водораздельные участки и небольшие по площади плато с отметками $+120 \div +160$ м и относительными превышениями над долинами в 20–40 метров. С поверхности они перекрываются маломощными четвертичными образованиями. В их пределах отмечается наличие зоны аэрации мощностью до 15 и более метров, при средних значениях – порядка 5–8 м. Аккумулятивный тип рельефа приурочен к долинам рек и представляет собой обычно плоскую поверхность с отметками $+90 \div +110$ метров. Значительная часть аккумулятивной равнины занята болотами с мощностью торфа до 6 м. Питание болот осуществляется преимущественно за счет атмосферных осадков.

В среднем в рассматриваемом районе выпадает до 600 мм осадков в год, большая часть которых приурочена к теплomu периоду. Период максимальных осадков на месторождении продолжается в течение пяти месяцев, с мая по сентябрь.

Месторождение пересекают несколько поверхностных водотоков, главным из которых является река Золотица (рис. 1). Все водотоки являются равнинными, что подтверждается меандрированием их русел. Средний коэффициент извилистости – 1,55; густота речной сети – $0,58 \text{ км/км}^2$; средний уклон – $0,76 \text{ м/км}$. Водосборная площадь располагается в зоне северной тайги, в районе, где залесенность территории достигает 70 %, а заболоченность – 30 процен-

тов. Ширина русел не превышает 15–16 метров; максимальные глубины в верховьях в меженных условиях изменяются в интервале 0.1–0.7 метров, а ниже по течению для наиболее крупных рек возрастают до 1.5–2.0 метров.

Питание водотоков смешанное – за счет снеговых, дождевых и подземных вод. Водность рек отличается хорошо выраженной сезонной изменчивостью. Характерно преобладание снегового питания, которое формирует высокий весенний сток. Его доля достигает 30–40 % годового стока в годы с маловодной весной и 60–70 % в годы с многоводной весной. В другие сезоны питание рек осуществляется за счет жидких атмосферных осадков (в том числе опосредованно через болотный сток) и грунтовых вод. Последние играют основную роль в зимний период. Летняя межень, чаще всего, начинается в середине июля и обычно бывает неустойчивой за счет влияния дождей. При этом минимальные расходы летней межени отмечаются обычно в августе. На долю стока в летне-осенний период с учетом прохождения дождевых (преимущественно осенних) паводков в среднем приходится 30–40 % годовой нормы. Зимняя межень имеет продолжительный период и устойчивый характер с постепенным уменьшением расходов по мере истощения запасов грунтовых вод. В период декабрь – март, когда атмосферные осадки практически не влияют на колебания расходов, сток реки обычно составляет 2–9 % от его годового объема. Минимальные зимние расходы обычно фиксируются в марте или в начале апреля.

Рудные тела месторождения им. М.В.Ломоносова представлены кимберлитовыми трубками (iD_3-C_2), прорывающими терригенные (песчаники, алевролиты, аргиллиты) отложения венда и перекрывающиеся терригенными и карбонатными отложениями среднего карбона мощностью в несколько десятков метров. Несмотря на стратиграфические несогласия, вендские и карбоновые породы залегают субгоризонтально. При этом карбоновые отложения, особенно их карбонатные разности (доломиты и известняки), приуроченные к верхней части разреза, имеют локальное распространение, тяготеющее к повышенным водораздельным площадям. На большей части территории до глубины 200 – 250 м прослеживаются в целом водоносные породы без регионально выдержанных водупорных слоев: неравномерное чередование алевролитов и песчаников с явным преобладанием последних. Ниже вскрываются отно-

сительно водоупорные отложения так называемой мезенской свиты V_2mz мощностью в сотни метров, представленные преимущественно аргиллитами.

Характеристика численной модели фильтрации подземных вод.

Рассматриваемая ниже численная модель фильтрации подземных вод для района месторождения разрабатывалась для прогнозных расчетов водопритоков к системе осушения проектировавшегося карьера, предназначенного для отработки двух южных трубок в пределах месторождения. Модель создавалась на базе имеющей всемирное распространение программы MODFLOW в составе программного комплекса РМ последней версии (РМ-5). Разработка модели и ее калибровка осуществлялись на компьютере Pentium III (1000 МГц) с объемом оперативной памяти 256 Мб.

Размеры моделируемой области в плане составили 35 км в широтном направлении и 37 км в меридиональном направлении. Размеры численной модели выбирались с таким расчетом, чтобы гидродинамическое возмущение (депресссионная воронка) от работы системы осушения будущего карьера заведомо не достигло границ модели. В разрезе нижняя граница модели проходила на абсолютной отметке -470 м, по подошве мезенской свиты, что при конечных отметках забоя карьера порядка -300 м абс. (в пределах данной относительно водоупорной свиты) не могло существенно исказить прогнозные оценки притоков к дренажной системе даже на последних этапах прогнозного моделирования.

Программа MODFLOW, использующая в качестве расчетного алгоритма метод конечных разностей, предполагает разбивку моделируемой трехмерной области на сопряженные по вертикали слои и прямоугольные блоки в пределах каждого слоя.

Общее количество блоков в плане с севера на юг составило 223; с запада на восток – 200. В пределах центральной зоны (вблизи проектировавшегося карьера) размеры расчетных блоков составляли $50\text{ м} \times 50\text{ м}$. По мере удаления от этой зоны к периферийным областям модели размеры блоков последовательно увеличивались до $500 - 1000$ м. По вертикали было выделено 10 слоев с постоянными в плане отметками кровли и подошвы, что в итоге обусловило суммарный объем расчетных блоков по модели в целом в 446 000 штук.

Такое, достаточно большое, количество слоев определялось необходимостью максимально корректно смоделировать вертикальные перетоки в областях питания и разгрузки и учесть изменчивость фильтрационных свойств горных пород в разрезе.

Для задания граничных условий использовались топографические, геологические и гидрогеологические карты района различных масштабов.

На внешнем в плане прямоугольном контуре модельной области в программе MODFLOW предусмотрено задание непроницаемой границы. В представленной модели данный контур в большинстве случаев приблизительно совпадает с осями водоразделов или линиями тока, направленными перпендикулярно речным долинам. В связи с этим нами не вводилось дополнительных непроницаемых границ, оконтуривающих балансово-замкнутую модельную область.

Границы четвертого рода (границы изменения фильтрационных параметров) в плане и в разрезе задавались автоматически введением значений параметров в каждый блок в каждом слое. Для задания фильтрационных параметров модели использовались результаты опытно-фильтрационных работ и наблюдений, проведенных для разных водоносных комплексов на стадиях поисков и разведки месторождения.

Задание граничных условий на реках, производилось при помощи опции River, которая соответствует граничному условию третьего рода – прямая пропорциональность расхода воды и перепада напоров между рекой и блоком, в котором эта река задается: $Q_p = \text{Cond} \times (H_p - H_{\text{вл}})$. При этом реализуются обе возможности оттока воды: как в реку, так и из реки в зависимости от знака перепада напоров. Коэффициент пропорциональности (Conductance), являющийся величиной, обратной фильтрационному сопротивлению, и измеряемый в $\text{м}^2/\text{сут}$, подбирался отдельно для разных участков водотоков в ходе калибровки модели. При этом для одного и того же участка реки значение Conductance в разных блоках задавалось разным – прямо пропорциональным размеру блока в том направлении, в котором течет река. Такой подход обеспечивал одинаковость фильтрационных свойств русловых отложений на всем протяжении калибруемого участка водотока вне зависимости от размеров блоков.

Инфильтрационное питание подавалось на первый от поверхности слой модели. Инфильтрационное питание задавалось при помощи опции Recharge, которая в MODFLOW обеспечивает задание дополнительного питания в каждый (в плане) блок: $Q_{\text{инф}} \text{ (м}^3\text{/сут)} = \text{Rech (м/сут)} \times S_{\text{бл}} \text{ (м}^2\text{)}$, где $S_{\text{бл}}$ – площадь блока в плане.

Методика и результаты калибровки численной модели.

Калибровка численной фильтрационной модели производилась в стационарной постановке по двум основным критериям соответствия реальных и модельных значений 1) расходов рек и 2) распределения напоров в разных водоносных горизонтах.

В качестве первого критерия использовались реально определенные расходы рек по 12 гидрометрическим постам (рис. 1, табл. 1). В настоящей работе для калибровки нами были выбраны среднемесячные (за период 1983 – 2000 г.г.) среднемеженные (зимняя межень) расходы, рассчитанные для ГП1 ÷ ГП5, и приведенные к такому по водотокам-аналогам рассматриваемого региона (р.Кепина в нижнем течении, р.Мудьюга, р.Сояна, р.Ижма, р.Котуга с 30–50-летним циклом наблюдений) разово измеренные расходы на ГП6 ÷ ГП12. Все гидрологические расчеты производились сотрудниками СевУГМС и гидрологической службы ОАО «Севералмаз».

Выбор в качестве критерия именно среднемеженных зимних расходов определялся, исходя из следующих соображений. Обычно при калибровке численных фильтрационных моделей используются расходы 95%-ой обеспеченности. Большинство таких моделей предназначено для оценки запасов месторождений пресных подземных вод, и для них сознательное занижение ресурсов, связанных с разгрузкой подземных вод в поверхностные водотоки, является оправданным, создает некоторый «коэффициент запаса». В нашей же ситуации ориентация на расходы 95%-ой обеспеченности приводила бы к недоучету части ресурсов подземных вод, которые в будущем могли оказаться привлеченными к системе осушения проектировавшегося карьера. Среднемеженные зимние расходы, на наш взгляд, в наибольшей мере соответствуют среднегодовой разгрузке подземных вод в реки. В начале зимней межени существенную часть речного стока еще составляют болотные воды, не вовлеченные в рассматриваемом регионе в общий баланс подземных вод,

а в конце зимней межени сработанной оказывается часть запасов подземных вод, и разгрузка их в поверхностные водотоки находится на более низком уровне, чем в среднем за год.

Таблица 1

**Средне многолетние среднемеженные (зимняя межень)
и модельные расходы рек**

Гидрометрический пост	Средне многолетний среднемеженный расход, м ³ /сут	Модельный расход, м ³ /сут	Ошибка, %
Р. Золотица ГП1 *	41925	39430	-6,0
Р. Золотица ГП2 **	18150	19770	+8,9
Р. Золотица ГП3 **	95000	93900	-1,2
Руч. Светлый ГП4 *	49650	44320	-10,7
Р. Светлая ГП5*	34550	37980	+9,9
Руч. Тучкин ГП6 *	2800	2650	-5,4
Р. Белая ГП7*	18100	20030	+10,7
Р. Кепина ГП8 **	32000	27410	-14,3
Р. Кепина ГП9 **	50680	44600	-12,0
Р. Кепина ГП10 **	5200	4900	-5,8
приток р. Кепина ГП11*	8400	9250	+10,1
Р. Шоча 0,5 км ГП12*	13700	13030	-4,9

* – значения стока от верховьев до указанного гидрометрического поста.

** – значения стока от предыдущего (верхнего) гидрометрического поста до указанного.

Для калибровки по напорам использовались, во-первых, собственно значения напоров на разных глубинах, реально замеренные в ходе разведочных работ, в меженные периоды, в 39 скважинах, и, во-вторых, карта гидроизогипс рассматриваемого района (рис. 1), построенная с учетом реальной плановой конфигурации грунтовых водоносных горизонтов.

При калибровке в первую очередь подбирались такие параметры фильтрационной модели, которые являются наименее обоснованными с точки зрения полевых опробований и наблюдений. К таковым относятся величина инфильтрационного питания (Recharge) и фильтрационные свойства подрусловых отложений рек (Conductance).

Порядок калибровки модели имел следующий вид. На первом этапе были подобраны средние по всей модели величина Recharge и значение Conductance в реках с таким расчетом, чтобы отклонения в разных зонах модели от реальных напоров и расходов имели как

положительный, так и отрицательный знак. Далее, отталкиваясь от полученных средних значений, производился подбор параметров Recharge и Conductance в пределах отдельных зон моделируемой площади. При этом одновременно контролировались оба критерияльных параметра: и расход на данном участке водотока, и положение гидроизогипс вблизи него с учетом значений напоров в глубоких горизонтах. В тех ситуациях, когда подбором величины Recharge и Conductance не удавалось достичь нужного результата, мы были вынуждены менять значения фильтрационных параметров водоносных пластов. Здесь, опять следуя принципу, по возможности, не менять наиболее надежно определенные в ходе опытно-фильтрационных работ коэффициенты, в первую очередь изменялись вертикальные коэффициенты фильтрации. И уж если этот подбор не мог привести в соответствие реальные и модельные напоры и расходы, то в последнюю очередь проводилось изменение горизонтальных коэффициентов фильтрации водоносных горизонтов.

В итоге калибровки было достигнуто некоторое минимальное отклонение модельных и измеренных расходов рек (не более $\pm 12\%$ – табл. 1) и напоров в водоносных горизонтах (не более $\pm 2,0$ м, т.е. не более $\pm 2,5\%$ от максимального перепада напоров в пределах всей моделируемой области).

Средняя подобранная величина инфильтрации (Recharge), характеризующая большую часть моделируемой площади, составила при этом $0,0002$ м/сут (70 мм/год). Подбор параметра Recharge в отдельных зонах велся в соответствии с геолого-геоморфологическими особенностями этих зон. Увеличение инфильтрационного питания в районах, где это было необходимо, производилось на повышенных участках, в пределах которых развиты хорошо проницаемые карбонатные отложения карбона или преимущественно пески четвертичного возраста. Другими словами, зоны с повышенными значениями Recharge чаще всего совпадали с фильтрационно-активными областями в первом и втором модельных слоях. Пониженные значения Recharge в случае необходимости вводились на площадях массового развития болот, отложения которых в пределах рассматриваемой территории характеризуются весьма низкими вертикальными коэффициентами фильтрации. Разброс значений Recharge по площади всей модели составил полтора порядка: от $0,00005$ м/сут в пределах болотных массивов до $0,001$ м/сут на от-

дельных проницаемых водоразделах.

Суммарная величина инфильтрационного питания по всей площади модели составила 519,4 тыс.м³/сут, в то время как суммарный расход речного стока, зафиксированный на гидрометрических постах, составляет 372,2 тыс.м³/сут. Дисбаланс в 147,2 тыс.м³/сут представляется вполне отвечающим реальности, так как гидрометрическими постами не учитывается подземный сток в р.Золотицу, в нижнем (на модели) ее течении; в верховья р.Олмути и р.Куи; в р.Отугу; в низовья р.Падуна и в Ернинские озера (рис. 1).

Средняя подобранная в ходе калибровки удельная величина Conductance модельных рек составила 0,3 м/сут на 1 м длины водотока, что может определяться коэффициентами фильтрации подрусовых отложений от 0,02 до 0,5 м/сут в зависимости от их мощности (1–5 м) и ширины водотока (3–15 м). При этом в пределах моделируемой площади выделились участки рек как с весьма высокой, так и с чрезвычайно низкой проницаемостью русловых отложений: удельный Conductance – от 0,02 до 3,0 м/сут на 1 м длины водотока.

В ходе калибровки модели было выделено также два дополнительных типа зон неоднородности по значениям коэффициентов фильтрации. Зоны первого типа охватывают как долинные, так и водораздельные области вблизи отдельных участков водотоков (обычно крупных), для которых невозможно было добиться требуемых высоких расходов даже заданием максимально высоких значений Conductance. Подбор вертикальных и горизонтальных коэффициентов фильтрации в данных зонах велся по способу последовательного их увеличения и последовательного же (сверху вниз) включения слоев в область повышенной проницаемости. В итоге задействованными оказались 5 верхних слоев, то есть в область повышенной проницаемости были включены в этих зонах даже верхние слои вендских водоносных пород. При этом горизонтальные коэффициенты фильтрации для всех разновидностей пород достигли значений 3 м/сут (в 2–3 раза выше обычных), а вертикальные – 1 м/сут (в 10–20 раз выше обычных).

Зоны второго типа связаны со всеми остальными речными долинами. При калибровке модели по значениям напоров в водоносных горизонтах, расположенных на разных глубинах, выяснилось, что исходно заданные вертикальные коэффициенты фильтрации обуславливают слишком большие вертикальные градиенты напо-

ров. Только увеличение этих коэффициентов в пределах речных долин во всех слоях и во всех разновидностях пород до 0,1 м/сут (в 2–100 раз выше обычных) позволило добиться удовлетворительного соотношения между реальными и модельными напорами.

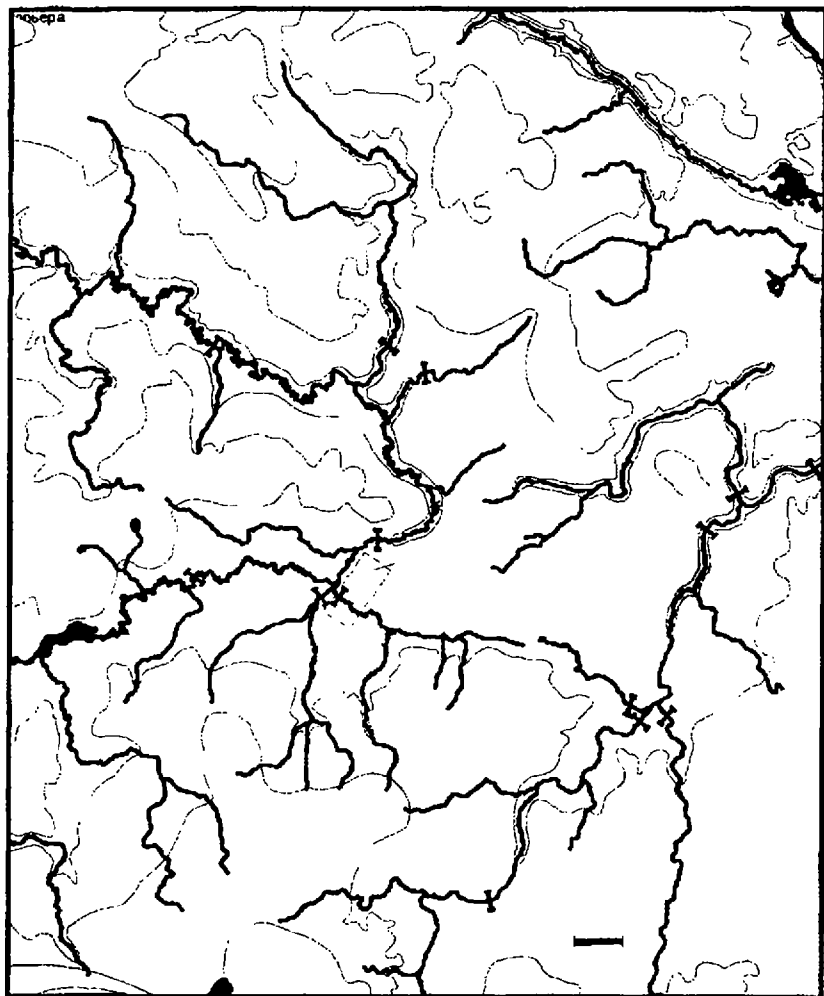


Рис. 1 – Схема расположения гидрометрических постов и карта гидроизогипс в пределах моделируемой области

Таким образом, в ходе калибровки были выявлены 1) поле распределения инфильтрационного питания по моделируемой площади; 2) параметры взаимосвязи рек с водоносными горизонтами на разных участках; 3) дополнительные плановые зоны неоднородности по значениям горизонтальных и вертикальных коэффициентов фильтрации.

В дальнейшем описанная выше численная фильтрационная модель района месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова была использована для разработки системы осушения проектировавшегося карьера (карьерного водоотлива и скважинного дренажного контура) и регламента ее эксплуатации, а также для прогнозных расчетов ущерба речному стоку и взаимного влияния данной системы осушения и объектов возможного подтопления: хвостохранилища и участков захоронения соленых дренажных вод.

УДК 556.167 (282.247.321)

*Сикан А.В. доц, к.г.н.
Малышева Н.Г. зав. лаб.*

РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА РЕК БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ

По заказу КИР по Брянской области на кафедре гидрологии суши РГГМУ была разработана методика расчета минимального стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений для рек Брянской области.

При разработке методики в качестве исходных данных использовались ряды минимальных 30-суточных и минимальных суточных зимних и летних расходов воды по 27 гидрологическим постам в пределах Брянской области и прилегающей к ней территории. Диапазон площадей выбранных водосборов – от 29,5 км² (р. Головесня – с. Покошичи) до 36 300 км² (р. Десна – с. Разлеты). В 18 случаях из 27 в расчетах использованы данные наблюдений по 2000 год, продолжительность рядов – от 20 до 99 лет.

В работе реализован методический подход предложенный А. М. Владимировым [1] и закреплённый в действующих нормативных документах. Статистическая обработка рядов минимального стока включала проверку рядов на однородность и случайность, оценку

числовых характеристик и их погрешностей, построение эмпирических, аналитических и сглаженных эмпирических кривых обеспеченностей [2, 3].

В результате выполненных исследований установлено, что для рассматриваемой территории в качестве критической площади водосбора, представляющей собой границу между средними и малыми реками можно принять $F_{кр} = 400 \text{ км}^2$, как для зимнего, так и для летне-осеннего сезонов. При $F > F_{кр}$ модуль минимального стока не зависит от площади водосбора и может картироваться. На рис.1 представлены карты минимального 30-суточного модуля стока 80 %-ной обеспеченности для зимнего и летне-осеннего периодов.

Для рек с площадью водосбора $F < 400 \text{ км}^2$ величину минимального 30-суточного расхода воды 80 %-ной обеспеченности можно определить по зависимостям $Q_{80\%} = f(F)$ координаты этих зависимостей представлены в табл.1.

Таблица 1

Координаты зависимостей минимальных 30-суточных расходов 80 %-ной обеспеченности от площади водосбора для малых рек Брянской области

$F, \text{ км}^2$	0	100	200	300	400
$Q_{\text{зимний}}$	0	0.015	0.095	0.250	0.550
$Q_{\text{летний}}$	0	0.020	0.115	0.280	0.570

Переход от расходов воды обеспеченностью 80 % к расходам других обеспеченностей производится по формуле

$$Q_p = Q_{80\%} \lambda_p, \quad (1)$$

Значения переходных коэффициентов λ_p для Брянской области представлены в табл.2.

Таблица 2

Значения коэффициентов λ_p для перехода от минимальных расходов 80 %-ной обеспеченности к расходам других расчетных обеспеченностей для рек Брянской области

$p \%$	75	80	90	95	97
λ_p	1.07	1.0	0.83	0.73	0.64

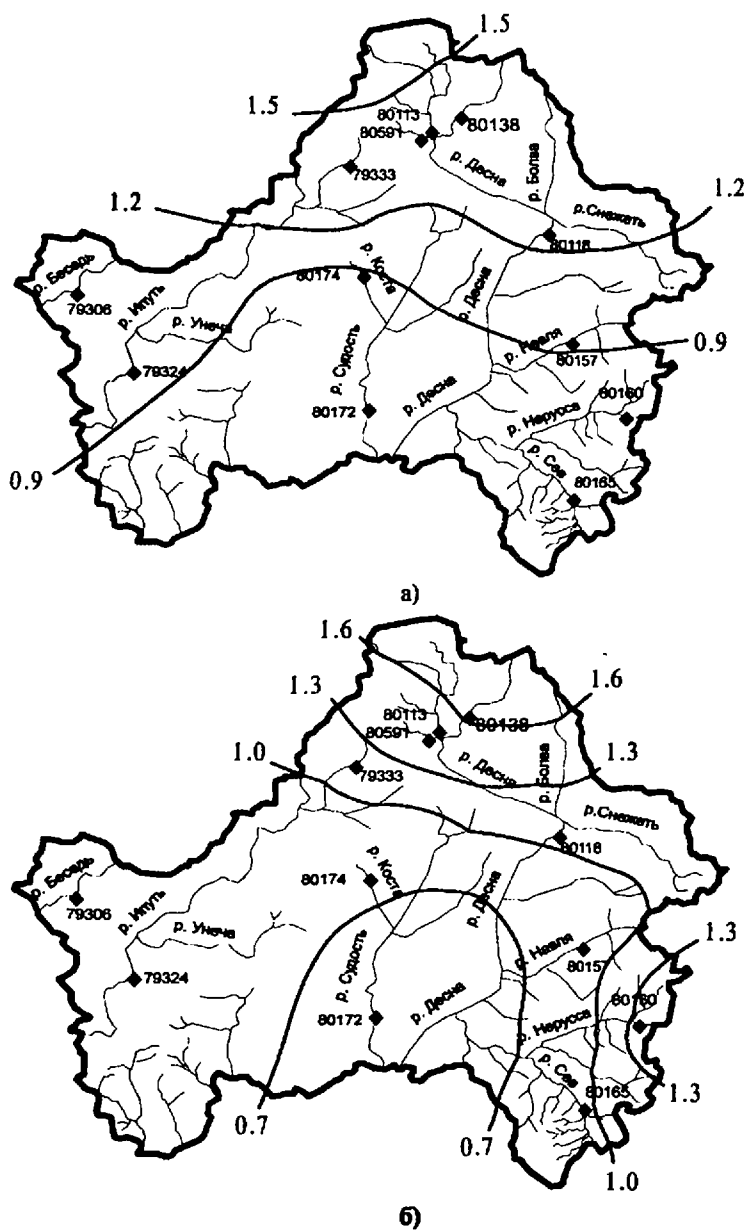


Рис.1. Карты минимальных 30-суточных модулей стока (л/с км²) 80 %-ной обеспеченности для территории Брянской области; а – зима, б – лето-осень.

Для перехода от минимальных 30-суточных расходов к минимальным суточным расходам были построены зависимости $Q_{сут} = f(Q_{30})$ (рис.2)

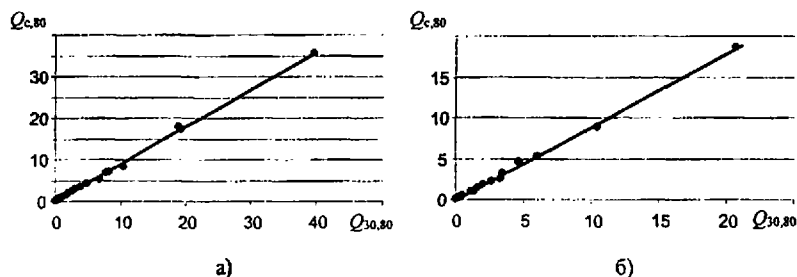


Рис.2. Зависимость минимальных суточных расходов 80 %-ной обеспеченности от минимальных 30-суточных расходов 80 %-ной обеспеченности для рек Брянской области; а – зима; б – лето-осень.

Как видно на рисунке зависимости имеют линейный характер и могут быть аппроксимированы выражениями

для зимы:
$$Q_{сут} = 0.90Q_{30} - 0.14, \quad (2)$$

для лета:
$$Q_{сут} = 0.91Q_{30} - 0.11. \quad (3)$$

Т.о. расчет минимального стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений для рек Брянской области производится в следующем порядке:

Значение минимального 30-суточного модуля стока 80-%-ной обеспеченности для рек с площадями $F > 400\text{ км}^2$ снимается с карт изолиний (рис.1). Для рек с $F < 400\text{ км}^2$ 30-суточные расходы воды 80-%-ной обеспеченности определяются при помощи табл.1.

Расчет минимальных 30-суточных расходов других обеспеченностей производится по формуле (1) с использованием переходных коэффициентов λ_p (табл.2).

Расчет минимальных суточных расходов производится по формулам (2,3). Переход к расходам других обеспеченностей осуществляется по формуле (1) с использованием переходных коэффициентов λ_p (табл.2).

Учитывая, то, что методика разрабатывалась для конкретной относительно небольшой территории, и то, что в работе использо-

ваны данные наблюдений за последние годы, точность расчета по сравнению с СНиП 2.01.83-14 удалось повысить на 15–20 %. Проведенные исследования подтверждают необходимость разработки для каждого региона Территориальных Строительных Норм (ТСН).

Литература

1. *Владимиров А. М.* Сток рек в маловодный период года. – Л.: Гидрометеондат, 1976. – 295 с.
2. *Дружинин В. С., Сикан А. В.* Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2001. – 168 с.
3. *Рождественский А. В., Чеботарев А. И.* Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеондат, 1974. – 422 с.
4. Определение расчётных гидрологических характеристик. СНиП 2.01.14-83. – М.: Стройиздат, 1985. – 35 с.
5. Пособие по определению расчётных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеондат, 1984. – 444 с.

УДК 556.16

Сикан А. В. доц., к. г. н., Пузикова Е. Е. студ.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОДНОРОДНОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РЯДОВ

Проверка однородности гидрологических рядов нередко носит формальный характер и выполняется только потому, что этого требуют нормативные документы [2,3]. В то же время использование критериев однородности является мощным инструментом анализа данных. Довольно часто опровержение гипотезы об однородности в условиях коротких выборок еще не говорит о том, что ряд действительно неоднородный, а является только поводом для дальнейших исследований. Можно назвать, по крайней мере, 10 причин приводящих к опровержению гипотезы об однородности:

1. Наличие в исходных данных ошибок или опечаток.
2. Ошибки в данных, являющиеся следствием неправильной обработки исходной информации, например ошибки при экстраполяции кривой $Q = f(H)$, недоучет воды на пойме, некорректное восстановление ряда и т. д. (рис.1).

3. Нерепрезентативность выборки вследствие ее небольшой продолжительности (только один цикл водности, группировка экстремумов в одной части ряда) (рис.2).
4. Выборочная асимметрия ряда существенно отличается от нуля.
5. Наличие в выборке значения очень редкой повторяемости.
6. Неправильный выбор математической модели для описания вероятностной структуры ряда (рис.3).
7. Некорректная оценка параметров автокорреляционной функции при использовании авторегрессионных моделей.
8. Наличие в ряду циклической составляющей (например, сезонная составляющая при работе с месячными интервалами времени).
9. Генетическая неоднородность ряда.
10. Неоднородность, как следствие изменения условий формирования стока.

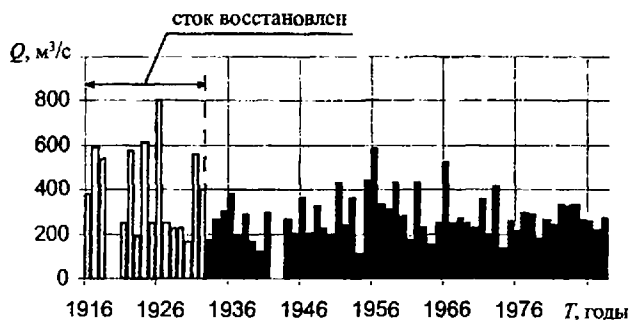


Рис. 1. Максимальные расходы весеннего половодья на реке Луга – Толмачево.

За 1916 – 1932 годы сток приближенно вычислен по кривой $Q = f(H)$, обоснованной данными измерений расходов воды в 1933 – 35 годах и при этом значительно экстраполированной (от расхода $367 \text{ м}^3/\text{с}$); гипотеза об однородности ряда опровергается по критерию Фишера при уровне значимости $2\alpha = 5\%$.

Ряд содержит только один полный цикл водности; гипотеза об однородности опровергается по критериям Стьюдента и Фишера при уровне значимости $2\alpha = 5\%$.

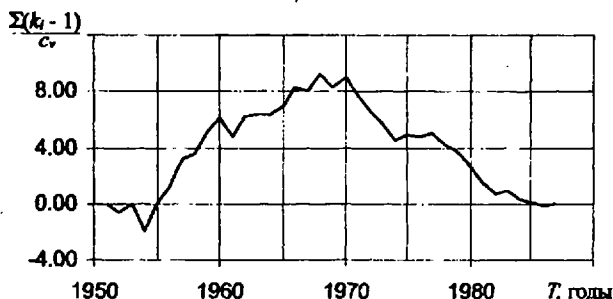


Рис. 2. Разностная интегральная кривая максимальных расходов весеннего половодья для реки Ока – Борок.

Река Вьюн зарегулирована Лемболовским озером, коэффициент автокорреляции 0,39. При использовании модели случайной величины гипотеза об однородности ряда опровергается по критериям Стьюдена и Фишера при уровне значимости $2\alpha = 5\%$; при использовании модели авторегрессии первого порядка гипотеза об однородности не опровергается.

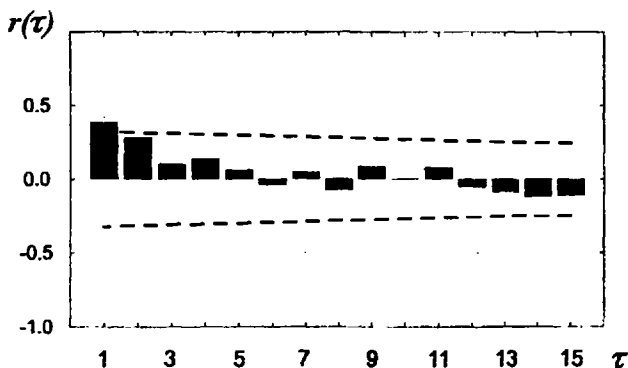


Рис. 3. Автокорреляционная функция ряда максимальных расходов весеннего половодья для реки Вьюн – Запорожское.

Приведенная классификация является достаточно условной. На практике многие из перечисленных случаев могут иметь место одновременно. Так, например наличие в ряду расхода редкой повторяемости (отклонение точки от аналитической кривой) приводит к увеличению выборочной асимметрии и т. д.

В то же время из всех перечисленных причин только две последние указывают на неоднородность ряда. В остальных случаях задача решается за счет устранения ошибок и опечаток, удлинения ряда с использованием рек-аналогов, корректировки параметров распределения с учетом реальной обеспеченности входящего в выборку исторического максимума, использования методов декомпозиции и корректного выбора математической модели для описания вероятностной структуры ряда.

В настоящее время для проверки однородности гидрологических рядов, как правило, используются параметрические критерии Фишера и Стьюдента. Не смотря на все достоинства этих критериев, они не являются универсальными. Наиболее существенным недостатком критериев Фишера и Стьюдента является то, что они предполагают нормальное распределение анализируемых выборок, в то время как гидрологические ряды, как правило, имеют умеренную положительную асимметрию, а выборочная асимметрия по отдельным рядам может быть весьма существенной. В этой ситуации на ряду с параметрическими критериями имеет смысл использовать и непараметрические критерии, которые позволяют анализировать выборки с распределением отличным от нормального (хотя они являются и менее мощными по сравнению с параметрическими).

Для проверки однородности гидрологических рядов можно рекомендовать непараметрические критерии Уилкоксона и Зигеля-Тьюки [1,5]. При этом первый из этих критериев является более чувствительным к характеристикам положения, а второй – к характеристикам рассеивания. Таким образом, критерий Уилкоксона следует использовать совместно с критерием Стьюдента, а критерий Зигеля-Тьюки совместно с критерием Фишера.

Достаточно характерной для гидрологической практики является и ситуация, когда в выборке содержится расход редкой повторяемости. В этом случае может иметь место опровержение гипотезы об однородности, как по критерию Стьюдента, так и по критерию Фишера. Для контроля точек отклоняющихся от кривых обеспеченностей в области малых и больших значений разработаны специальные критерии. В новых СНиП, которые будут введены в действие в ближайшее время, для этой цели используются критерии Диксона и Смирнова-Грэмса [4].

В качестве примера можно привести ряд максимальных расходов весеннего половодья по реке Шарья – Гремячево. Ряд содержит расход редкой повторяемости ($143 \text{ м}^3/\text{с}$ при среднем расходе $47.0 \text{ м}^3/\text{с}$). Этот расход значительно отклоняется от аналитической кривой обеспеченностей и приводит к увеличению выборочной асимметрии ($C_s = 1.91$). В результате – гипотеза об однородности ряда по критерию Фишера опровергается даже при уровне значимости $2\alpha = 1\%$, в то время как критерии Зигеля-Тьюки, Диксона и Смирнова-Граббса опровержения гипотезы не дают даже при уровне значимости $2\alpha = 10\%$ (табл.1).

Таблица 1

Результаты проверки гипотезы об однородности ряда максимальных расходов весеннего половодья для реки Шарья – Гремячево ("+" – гипотеза не опровергается; "-" – гипотеза опровергается)

Критерий	Уровень значимости		
	$2\alpha = 1 \%$	$2\alpha = 5 \%$	$2\alpha = 10 \%$
Стьюдента	+	–	–
Уилкоксона	+	–	–
Фишера	–	–	–
Зигеля-Тьюки	+	+	+
Смирнова-Граббса	+	+	+
Диксона	+	+	+

Как показал анализ, выполненный на примере 110 рядов максимального весеннего стока рек Северо-Запада РФ, комплексное использование нескольких статистических критериев позволяет объективно выявить неоднородные ряды и избежать грубых ошибок при определении расчетных величин стока.

Литература

1. Дружинин В.С., Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2001. – 168 с.
2. Определение расчётных гидрологических характеристик. СНиП 2.01.14–83. – М.: Стройиздат, 1985. – 35 с.
3. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеониздат, 1984. – 444 с.
4. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. – Л.: Гидрометеониздат, 1984. – 78 с.
5. Справочник по прикладной статистике. Т. 1, 2/Под ред. Э. Ллойда, У. Линдермана. – М.: Финансы и статистика, 1990.

РАСЧЕТ ИСПАРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ РАПЫ ОЗЕРА БАСКУНЧАК

При изучении водного баланса засоленных водоемов одной из сложных задач, которые приходится решать, является надежное определение величины испарения с поверхности рассола. Наиболее часто для расчёта этой составляющей водного баланса применяется метод, разработанный в Государственном гидрологическом институте [1]. В основе метода лежит следующая формула:

$$E_p = rE_0.$$

Здесь E_p – испарение с рассола за месяц; E_0 – испарение с пресной воды за тот же интервал времени; r – переходный коэффициент от испарения с

пресной воды к испарению с раствора, определяемый по эмпирической зависимости:

$$r = \frac{ke_0 - e_{200}}{e_0 - e_{200}}$$

В последней формуле k – коэффициент, учитывающий относительное уменьшение упругости водяного пара над раствором и зависящий от химического состава и концентрации растворённых веществ; e_0 – максимальная упругость водяного пара, вычисленная по температуре поверхности пресной воды; e_{200} – максимальная упругость водяного пара в воздухе на высоте 200 см над испаряющей поверхностью.

Для бинарных растворов величина k определяется в зависимости от природы растворённого вещества, его концентрации, выраженной в весовых процентах, и температуры.

Практика применения указанного метода для озёр, содержащих природные рассолы, показала, что при концентрации солей, превышающей 200 г/дм³, расчетные значения E_p могут отличаться от фактических на 100 и более процентов [2]. Ошибки, возникающие при расчете испарения, имеют, как правило, систематический характер: расчетные значения испарения меньше, чем наблюдаемые. Самые

большие ошибки возникают в условиях, когда коэффициент редукции r при определенных метеорологических условиях и минерализации рассола принимает отрицательные значения, хотя известно, что идет процесс испарения, а не конденсации. В такой ситуации важное значение приобретают любые, даже эпизодические, одно-временные наблюдения за испарением с поверхностей рапы и пресной воды, проведенные в одинаковых условиях. Подобные наблюдения позволяют получить эмпирические значения коэффициента редукции при вариации факторов, определяющих величину испарения. Связав полученный ряд значений r с какой-либо измеряемой характеристикой рапы, например, с уровнем (H) или концентрацией (C) солей (для соляных озер вторая характеристика обычно тесно связана с первой), можно в случае установления такой связи пользоваться ею для расчета величины r по известным значениям C или H . Испарение с пресной воды рассчитывается при этом, например, по формуле, рекомендованной в [1].

Изложенный подход был довольно успешно реализован, например, при исследовании водно-солевого баланса горько-соленого озера Кучук [2], которое находится в степной зоне Алтайского края. В последние годы необходимость в выполнении подобных исследований возникла для оз. Баскунчак в связи с разработкой мероприятий по рациональному использованию Баскунчакского месторождения каменной соли и сохранения экосистемы озера. Имеющиеся проблемы предполагается решать, основываясь на расчетах водно-солевого баланса озера.

Озеро Баскунчак расположено в северо-восточной части Прикаспийской низменности в 50 км к востоку от г. Ахтубинска, находящегося на левом берегу р. Ахтубы. Площадь озера примерно 100 км², наибольшая длина – 18 км, ширина – 9,5 км. Абсолютная отметка соляной поверхности около –21 м. По химическому составу рапа озера относится к хлоридному типу (по классификации М.Г. Валяшко). В отдельные годы рапа покрывает все озеро слоем несколько сантиметров. Чаще в летнее время площадь поверхностной рапы составляет (25 – 40) % от общей площади озерной котловины. Рапа находится в так называемых "выломах" – участках, где производилась добыча соли.

Климат Прикаспийской низменности засушливый степной и полупустынный, характеризующийся резкой континентальностью,

низкой влажностью, высокой испаряемостью, устойчивыми ветрами. Среднегодовая температура воздуха составляет (5 – 8) °С; минимальная среднемесячная температура января – порядка –20 °С, максимальная июля – 30 °С. Относительная влажность воздуха зимой находится в пределах (75 – 85) %, летом снижается до (40–50) %, иногда до 30 %. По данным метеостанции В. Баскунчак среднее многолетнее количество осадков составляет 270 мм. Вследствие циклических колебаний климата годовые осадки меняются от 140 до 400 мм. Подобные климатические условия обеспечивают значительные теплоэнергетические ресурсы испарения с поверхности водоемов: испаряемость, по разным данным, составляет от 900 до 1700 мм/год, что значительно превышает сумму осадков.

Приходная часть водного баланса озера Баскунчак формируется за счет атмосферных осадков, поверхностного притока, который, в основном, имеет место весной во время таяния снега, и в значительной степени – за счет подземного притока. Испарение – единственная расходная составляющая водного баланса озера. Степень изученности таких элементов водного баланса, как поверхностный и, в особенности, подземный приток, за счет которого озеро получает не только водное, но и преобладающую часть солевого питания, недостаточна для их точной количественной оценки. В таких условиях надежное определение величины испарения дает возможность контролировать, если не точность, то хотя бы достоверность определения других составляющих водного баланса.

В 1961 г. институтом ВНИИСоль при проведении детальной разведки Баскунчакского месторождения поваренной соли были осуществлены исследования процесса испарения с поверхности оз. Баскунчак. Полученные по результатам этих исследований материалы использовались исполнителями непосредственно для оценки испарения при расчете водного баланса озера за год проведения наблюдений и какому-либо детальному анализу не подвергались. Целью данной работы является попытка извлечь из кратковременных, уникальных в своем роде экспериментальных материалов, максимум информации, которую можно впоследствии использовать, как для расчета испарения с поверхности рапы оз. Баскунчак, так и для обоснования программы работ по изучению водного баланса озера.

Наблюдения проводились на трёх испарителях. Один из испарителей с рапой находился непосредственно в озере, а два других, один из которых был заполнен рапой, а другой – пресной водой, располагались на берегу. Измерения уровня воды в испарителях производились два раза в сутки – в 7 и 19 часов. В те же сроки измерялись температуры воздуха и рапы в озере, а также сумма атмосферных осадков. Полученные ряды экспериментальных данных анализировались с целью установления взаимосвязи между ними на основе расчета параметров уравнения регрессии и коэффициента парной корреляции (R).

Результаты расчета R для рядов среднесуточных значений испарения с пресной воды (E_0) и с рассола (E_p), полученных по испарителям, находящимся на берегу, и расчета R для того же ряда E_0 и ряда значений E'_p , полученных по испарителю с рапой, установленному в озере, показали, что между анализируемыми рядами имеется тесная линейная связь. Теснота связи характеризуется следующими значениями R : 0,92 – для первой пары анализируемых рядов и 0,91 – для второй. Уравнение линейной регрессии $E_p = f(E_0)$ имеет вид

$$E_p = 0.836E_0.$$

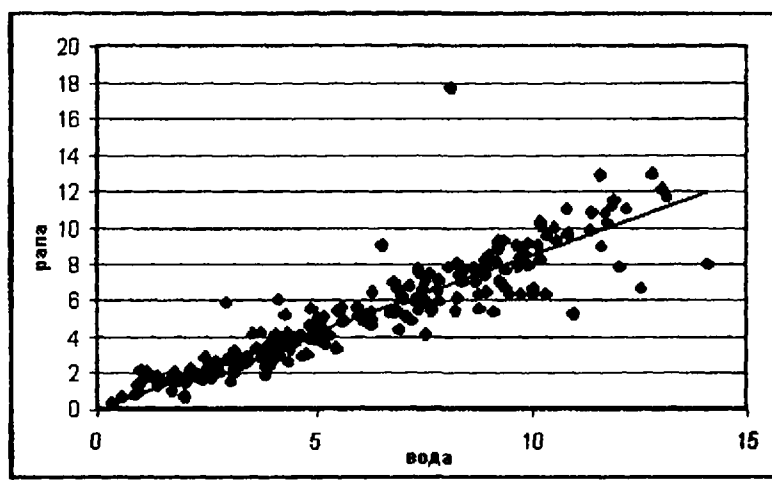


Рисунок 1. График связи испарения с поверхности пресной воды и с поверхности рапы при одинаковых условиях

Анализ графика этой функции, приведенного на рис. 1, показывает, что наибольшее рассеяние точек отмечается в правой части графика, т. е. в области наибольших значений испарения, измеренных в период со второй декады мая по вторую декаду августа. При выяснении причин отмеченных отклонений установлено, что значительно более высокие измеренные значения E_p , чем рассчитанные по уравнению регрессии, отмечаются после выпадения дождей, которые образуют на поверхности рассола (плотность 1.15 – 1.2 г/см³) слой пресной воды, который быстро испаряется, практически не смешиваясь с рапой. Именно по этой причине заметно отклоняются от линии регрессии только отдельные точки, а зависимость имеет линейный характер.

В приведенном линейном уравнении регрессии числовой коэффициент – это по сути искомый коэффициент редукции, характеризующий связь между испарением с пресной воды и рассола при той концентрации рассола, которую он имел в год производства наблюдений. Рапа оз. Баскунчак в многолетнем разрезе характеризуется состоянием, близким к насыщению. Лишь в отдельные сравнительно многоводные годы происходит некоторое снижение ее концентрации и, как следствие, увеличение испарения. Поэтому для периодов, характеризующихся средними условиями увлажнения или ниже средних, полученное значение коэффициента редукции может быть использовано для расчета испарения с рапы. Испарение с пресной воды при этом рассчитывается по метеорологическим данным ближайшей к озеру метеостанции. Для того, чтобы рассчитывать E_p в многоводные годы, когда наблюдается заметная сезонная динамика концентрации солей в рапе и, следовательно, коэффициент редукции нельзя принимать постоянным, требуется постановка дополнительных исследований, освещающих процесс испарения с рапы в наблюдающемся диапазоне изменения ее концентрации.

Литература

- 1 Указания по расчёту испарения с поверхности водоёмов. Гидрометеоиздат. Ленинград 1969г..
- 2 Пркофьева Т.И. «Исследования водного баланса озёр Кучук и Кулундинского в связи с развитием орошения в Центральной Кулунде» в кн.; «Гидрогеолого-мелиоративные исследования в Сибири»/ Красноярск, 1980, с. 52–60.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ УСТАНОВЛЕНИЯ НОРМАТИВОВ ДОПУСТИМОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ НА ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Количественная оценка факторов, определяющих экологическое состояние водных объектов, – первоочередной этап при разработке показателей допустимого воздействия (ДВ). Ландшафтные, геоморфологические, геологические, гидрогеологические и гидрометеорологические особенности водосбора оказываются тем фоном, на котором сильнее или слабее проявляется антропогенное воздействие. Известно, что вода, поступающая с таежных водосборов в умеренном климатическом поясе, содержит фенолы природного происхождения с концентрациями, превышающими ПДК: процессы гниения хвойной подстилки здесь напоминают технологию переработки целлюлозы. В зонах распространения карста содержание кальция в воде в ряде случаев превышает суммарную массу остальных поллютантов.

Особенно сложными для экологического нормирования являются случаи, когда в водные объекты сбрасывается вода, забранная из других рек или озер, резко отличающихся по составу поллютантов.

Пересечение реками геологических структур, типа Балтийско-Ладожского или Канадского глинта, до неузнаваемости меняет характер водотока, превращая обычную равнинную реку в полугорный поток, со всеми вытекающими отсюда последствиями в отношении фито-, бактерио- и зоопланктона, бентосных сообществ и, конечно, скачкообразно возросшей ассимилирующей способности.

Широко практикуемое регулирование стока резко увеличивает водность лимитирующего сезона, при этом возрастает кратность разбавления загрязняющих веществ. Однако, в создаваемых водохранилищах могут развиваться эвтрофикационные процессы.

Методология нормирования экологического состояния должна учитывать вышеперечисленные и многие другие факторы (температура воды, ледовые явления, дефицит или избыток растворенного кислорода, концентрация взвешенных частиц, прозрачность, перио-

дические или аperiодические возмущения водной массы, например, приливы – отливы, сгоны – нагоны).

Необозримая на первый взгляд гидрологическая, гидрохимическая, гидробиологическая и иная информация заставляет максимально формализовывать сведения об экологическом состоянии, сознательно ограничивать перечень учитываемых признаков благополучия или неблагополучия водных объектов. Разумеется, при этом оказываются вне поля зрения некоторые особенности конкретных явлений, но реалии водопользования требуют сопоставимых однозначно трактуемых оценок, выраженных количественно.

В качестве гидрологических признаков ассимилирующей способности водных объектов могут быть использованы: число Фруда, коэффициент турбулентной диффузии, а на водоемах – так называемое число Ричардсона (Ri). Эти интегральные показатели характеризуют интенсивность водообмена и газообмена в водной толще. При прочих равных условиях турбулизация потока, способствующая более активному водообмену и газообмену, приводит к обогащению водной массы кислородом, что в свою очередь ускоряет процессы окисления загрязняющих веществ и самоочищения водотоков и водоемов.

Подавляющее число загрязняющих веществ относятся к неконсервативным, т.е. с течением времени (или в процессе переноса водным потоком) их концентрация уменьшается. Разумеется, этот процесс очень сложен, но в самом первом приближении можно записать

$$C_x = C_0 \cdot \exp(-k\tau_x), \quad (1)$$

где C_0 , C_x – концентрации загрязняющего вещества, соответственно в подводящем трубопроводе выпуска и на расстоянии x ниже по течению потока, мг/л; τ_x – время добегания, сут; k – коэффициент неконсервативности, 1/сут. При этом самым сложным является обоснованное определение коэффициента неконсервативности (в ряде работ применяется термин «коэффициент скорости самоочищения»). В литературных источниках зачастую приведены взаимоисключающие сведения о значениях коэффициентов k . К примеру, у Р.А. Нежиховского [1] коэффициент неконсервативности нефтепродуктов в воде около 0.02, а в таблице Ростовского гидрохимического института [2] в среднем в 10 раз больше. Причин таких раз-

ночтений очень много и, конечно, единым коэффициентом оценить степень неконсервативности загрязняющего вещества – трудновыполнимая задача.

При научном обосновании методологии управления внешней средой исследователи встречаются с многочисленными сложными проблемами, решение которых требует мобилизации всех возможностей современного естествознания и техники. В частности, для нахождения путей управления процессом самоочищения природных вод необходимо выявить закономерности биологических процессов круговорота веществ в чистых и загрязненных водах.

Для понимания механизма самоочищения первостепенное значение приобретает изучение процессов биологической утилизации и трансформации веществ и энергии на всех трофических уровнях. Известно, что в загрязняемых водах значительную роль играет фотосинтетическая аэрация, которая, в отличие от атмосферной, сопровождается новообразованием эквивалентного количества органического вещества растительных клеток. От того, как пойдет утилизация этого вновь образованного вещества в последующих звеньях пищевой цепи, зависит, в частности, произойдет или нет «цветение» и вторичное загрязнение воды.

Во многих случаях интенсивность и эффективность процессов биологического самоочищения может быть сравнима с их очищением техническими средствами. Поэтому представляется очевидным, что мониторинг и оценка экологического состояния водных объектов должны включать оценку их самоочистительной способности.

Зообентос участвует в процессах самоочищения водоема прежде всего посредством питания. Животные потребляют мертвое органическое вещество и связанных с ним бактерий, что, с одной стороны, снижает их численность, а с другой – стимулирует их размножение и процессы бактериальной очистки. Энергетический эквивалент количества потребленной пищи называется рационом животного. Значительная часть органического вещества разлагается в процессе энергетического обмена веществ в организме животных. Количество энергии, выделенной в результате энергетического обмена животных, принято называть тратами на обмен. И, наконец, часть органического вещества, потребленного зообентосом и трансформировавшегося в процессе роста в ткани животных, называют величиной продукции.

Продукционные показатели сообществ зообентоса рассчитываются с использованием количественных показателей продукционного процесса в популяциях донных животных.

Расчет скорости продукции, например, личинок насекомых проводится по уравнениям, описывающим зависимость удельной продукции от температуры воды в водоеме и биомассы животных в определенный момент времени.

Продукция олигохет, моллюсков, пиявок и других групп донных животных рассчитывается по соответствующим уравнениям и величинам удельной продукции, рекомендованным рядом исследователей (Алимов, 1981; Заика, 1983; Алимов, Аракелова, Власова, 1986; Балущкина, 1987; Голубков, 2000; Finogenova, Lobasheva, 1987).

Траты на обмен разных групп животных определяются по уравнениям зависимости скорости потребления кислорода от массы тела животных.

Рационы животных рассчитываются по скорости продукции и тратам на энергетический обмен животных.

Донные животные, например, на рр. Славянке и Мге, потребляют за сутки около 3500–4200 кал/м² или около 1 г органического веществ на 1 м², из них около 1500 кал/м² или 0.4 г органического вещества разлагаются в процессе энергетического обмена веществ в организмах донных животных. Основная роль в деструкции органического вещества принадлежит личинкам водных насекомых: личинкам хирономид (мотыля) на р. Славянке и личинкам ручейников на р. Мге. Потребление органического вещества и его деструкция в организмах животных на участках с быстрым течением воды возрастают в 2–3 раза. Среди донных животных на р. Славянке преобладают олигохеты, а на р. Мге – моллюски.

В среднем, сообщества донных животных р. Славянки потребляют за сутки около 0.45, а р. Мги около 0.4 г органического вещества на 1 м². На участке р. Славянки шириной 10 м и длиной 1 км сообщества донных животных за сутки перерабатывают 4–4.5 кг органического вещества, что за год может составить более 1 т.

Стремясь разом разрешить проблему идентификации экологического состояния, гидробиологи нередко предлагают универсальные «индексы» [3]. В этом стремлении нет ничего предосудительного, но экосистемы столь сложны, а воздействие на них столь мно-

гообразно, что сегодняшний уровень гидробиологии, по-видимому, недостаточен для решения таких глобальных задач.

Обобщение сведений о состоянии зообентоса на исследованных участках рек по данным о видовом составе, численности, биомассе и трофической структуре позволило сделать вывод о большем разнообразии состава донных животных на р. Мге по сравнению с р. Славянкой. Особое внимание следует обратить на присутствие групп животных, приспособленных к чистоводным водоемам. К примеру, поденки и веснянки обычно служат индикаторами чистых вод.

Эмпирические результаты гидробиологической оценки экологического состояния рр. Славянки и Мги, указывающие на относительное благополучие последней, подтверждаются определением средних для всех биотопов значений индекса, характеризующего загрязнение водотоков органическими и биогенными веществами – индекса Гуднайта и Уитлея (No/Nc) [3]: на Славянке $No/Nc=28.17$; на Мге $No/Nc=10.47$.

Почти трехкратное сокращение доли олигохет в зообентосе р. Мги по сравнению с р. Славянкой количественно подтверждает, что по видовому составу донных животных исследованный участок р. Мги находится в лучшем состоянии. Известно, что олигохеты – обитатели загрязненных органикой вод.

На основе исследований, проведенных в США и в Шотландии, Баварская служба использования вод предложила довольно простой способ идентификации экологического состояния водотоков с последующей однозначной оценкой качества воды, т.е. была получена «сравнительная шкала» увязанных между собой интегральных гидробиологических и гидрохимических параметров [4].

Не следует подвергать строгой критике авторов этой методики, которая в качестве гидрохимического арсенала учитывает только содержание кислорода, БПК₅, биогены (без сульфатов), pH и электропроводность, а гидробиологическое состояние оценивает индексом сапробности.

В краткой статье не представляется необходимым описывать схему расчета интегральных индексов. Самое важное то, что баварский ученый Ландвер установил значимую связь между этими индексами. «Сравнительная шкала» Ландвера является пока еще редким (но тем более важным) достижением в этом непростом деле.

Пользуясь шкалой Ландвера, можно определить класс экологического состояния водного объекта в зависимости от загрязненности воды.

Учитывая особенности загрязнения и, соответственно, выбирая информативный гидробиологический индекс, можно с успехом решать прикладные задачи, в частности, устанавливать экологические нормативы допустимого воздействия (ДВ) загрязняющих веществ на водные экосистемы.

Литература

1. *Р.А. Нежиловский.* Гидролого-экологические основы водного хозяйства. Л.: Гидрометеиздат, 1990.
2. Гидрохимический институт, г. Ростов-на-Дону. Усовершенствованные методические рекомендации по оперативному прогнозированию распространения зоны опасного аварийного загрязнения в водоемах и водотоках, а также уровней содержания в воде основных загрязняющих веществ. СПб, Гидрометеиздат, 1992.
3. *Е.В. Балушкина.* Применение интегрального показателя для оценки качества вод по структурным характеристикам доинных сообществ. //Реакция озерных экосистем на изменение внешних условий. – СПб., 1997. С. 266–292.
4. Maps of water quality for waterways of German Federal Republic. – LAWA. – 1985.

УДК 556.535.5

Шаночкин С.В. доц., к.г.н.

ПРОГНОЗ ГИДРОГРАФА ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ НА р. ВЕТЛУГЕ

В силу чрезвычайной сложности задачи долгосрочного предсказания гидрографа весеннего половодья и отсутствия в настоящее время приемлемых методических подходов решения данной проблемы в учебной литературе, а также в «Руководстве по гидрологическим прогнозам» [2] этот вид прогнозов не рассматривается. Однако, острая необходимость в такого рода прогнозах в сфере гидроэнергетики и водного хозяйства, осуществляющих регулирование стока и эксплуатацию водохранилищ заставляет искать пути решения данной задачи.

В этой работе излагаются методические основы долгосрочного прогноза гидрографа весеннего половодья, базирующегося на некоторых принципах теории распознавания образов. Несколько ранее была разработана распознающая система предсказания ветви спада

гидрографа весеннего половодья на р. Оке [3]. В качестве объекта исследований выбрана р. Ветлуга (п. г. т. Ветлужский).

Апробация прогностической схемы на данном объекте объясняется с одной стороны необходимостью прогноза бокового притока к Чебоксарскому водохранилищу, с другой стороны – особенностями условий формирования весеннего стока р. Ветлуги:

- сохранением естественного режима стокообразования;
- поздним прохождением весенних паводков, накладывающихся, как правило, на нижнюю часть ветви спада гидрографа половодья;
- возможностью оценки формы гидрографа по размаху амплитуды измерения расходов.

Разработанный алгоритм, являющийся в некотором смысле эвристическим, можно считать лишь первым шагом на пути решения данной проблемы.

Под образом обычно подразумевают отображение общих и относительно устойчивых признаков, определенный набор значений которых характеризует данный класс объектов. Поэтому понятие образа можно определить так: объекты, для которых выполняется понятие эквивалентности или по крайней мере отношение толерантности, в своей совокупности составляют образ. Типы задач, решаемые с помощью методов распознавания выделяются по тем неизвестным, которые могут стать элементами математического описания классов.

Типичный представитель класса с усредненными значениями параметров называется эталоном. Таким образом, реализации данного класса, как некоторые отступления от своего эталона оказываются ближе к нему, нежели к эталону другого класса.

I тип задач. Дано: классы $S^{(1)}, S^{(2)}, \dots, S^{(k)}$; набор признаков $x_1, x_2, \dots, x_n$, которому соответствует n -мерное пространство признаков; набор представителей разных классов, описываемых численными значениями признаков.

Требуется: найти решающее правило, на основании которого объекты могут быть отнесены к одному из классов.

II тип задач. Дано: классы $S^{(1)}, S^{(2)}, \dots, S^{(k)}$, вид решающих правил и набор представителей классов с численными значениями признаков.

Требуется: найти систему признаков $x_1, x_2, \dots, x_n$, которая обеспечила бы извлечение необходимого количества информации о классах объектов.

III тип задач. Дано: набор параметров $x_1, x_2, \dots, x_n$; решающие функции; множество объектов, принадлежащих к неизвестным классам.

Требуется: разделить это множество объектов на классы.

В работе решались задачи первого и второго типов.

В подавляющем большинстве случаев проблема распознавания образов решается после некоторых этапов предварительной обработки исходных данных. К основным из них относятся такие как квантование и нормировка. В результате квантования (по выбранному пользователем типу) удастся разрядить избыточно длинную количественную шкалу до разумного числа компонент вектора признаков. Среди способов нормировки признаков основными являются следующие:

1. Нормировка стандартным отклонением и центрирование средним значением:

$$\begin{aligned} x_i^{(j)} &:= (x_i^{(j)} - \bar{x}^{(j)}) / \sigma_j \\ \forall j &\in \overline{1, n} \\ \forall i &\in \overline{1, m} \end{aligned} \quad (1)$$

2. Нормировка к единичному интервалу. В этом случае сначала определяются наименьшие $(x_{\min}^j)$ и наибольшие $(x_{\max}^j)$ значения признака $x^{(j)}$, затем выполняется преобразование:

$$x_i^{(j)} := \frac{x_i^{(j)} - x_{\min}^{(j)}}{\Delta x^{(j)}}, \quad (2)$$

где $\Delta x^{(j)}$ – разность между максимальным и минимальным значениями j -го признака.

Новые значения признака заключены в единичном интервале $0 \leq x_i^{(j)} \leq 1$.

3. Нормировка, задаваемая с помощью преобразования:

$$x_i^{(j)} := ax_i^{(j)} + b. \quad (3)$$

Нормирование позволяет избавиться от априорной неравнозначности признаков, обусловленной наличием у каждого признака своего интервала принимаемых им значений. Кроме того, представляется возможным задавать достаточно обширный набор метрик (расстояний между объектами) в пространстве исходных признаков.

В данной работе осуществлялась нормировка признаков к единичному интервалу.

Описанным процедурам преобразования подвергались исходные данные, которые условно подразделялись на две части. Первая состояла из 34 – х гидрографов весеннего половодья по п. г. т. Ветлужский. Информация о расходах квантовалась и затем осуществлялась нормировка. Вторая группа исходных данных включала наборы косвенных признаков, определяющих форму гидрографа. На первом этапе прогноза это были сведения о максимальных расходах, слоях стока за половодье, а также об интенсивности изменения расходов в начальный период формирования весеннего стока по пяти малым водосборам в бассейне р. Ветлуги. На втором этапе прогноза формирование вектора-признака осуществлялось с использованием аналогичных характеристик и данных о начальных расходах воды по п. г. т. Ветлужский. Каждый элемент векторов-признаков был отнормирован.

В итоге вся исходная информация была представлена в виде матриц, задающих отношение «объект – признак», представляющая собой таблицы размером $m \times l$

$$X = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & \dots & x_1^{(j)} & \dots & x_1^{(n)} \\ x_i^{(1)} & \dots & x_i^{(j)} & \dots & x_i^{(n)} \\ x_m^{(1)} & \dots & x_m^{(j)} & \dots & x_m^{(n)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

где $x_i^{(j)}$ – значение j -го признака, соответствующего i -ому объекту (году, номеру реализации).

Таким образом, строка является совокупностью значений l признаков, характеризующих j -тую реализацию многомерного признака. Столбец – совокупность m реализаций.

Важной особенностью функционирования распознающих систем является операция отождествления (идентификации). Метрический характер распознавания подразумевает необходимость форма-

лизации понятия о мере сходства между объектами внутри класса, а тем самым и меры различия между объектами разных классов. Выбор меры близости объектов зависит от количества априорных данных и применяемых методов классификации. Наиболее широко для этой цели используются «расстояния» между объектами в пространстве признаков. Объекты сходны, если «расстояние» между ними не более некоторой величины («порога»), определяющей принадлежность к данному классу.

Для оценки расстояний между объектами были апробированы следующие метрики:

1. Обычное евклидово расстояние

$$L_{ij}^2 = \sum_{l=1}^n (x_{il} - x_{jl})^2 \quad \forall i, j \in \bar{1}, \bar{m}. \quad (5)$$

2. Взвешенное евклидово расстояние

$$L_{ij}^2 = \sum_{l=1}^n \gamma_l (x_{il} - x_{jl})^2. \quad (6)$$

Веса γ_l задавались по степени важности признака с точки зрения решаемой задачи. Однако, применение этой метрики становится необязательным в случае выравнивания масштабов измерения неоднородных признаков с помощью их нормировки.

3. Расстояние Колмогорова

$$L_{ij} = \left(\sum_{l=1}^n |x_{il} - x_{jl}|^a \right)^{1/a}, \quad a > 0. \quad (7)$$

Наиболее приемлемым оказалось обычное евклидово расстояние, которое и было использовано во всех случаях оценки расстояний между объектами.

На первом этапе исследования (после преобразования исходных данных) была осуществлена типизация (классификация) гидрографов (п. г. т. Ветлужский) и получены типовые гидрографы.

Как известно, классификация имеет целью определение компактных подмножеств при выполнении условия минимизации критерия качества. Довольно обширный список алгоритмов классификации можно подразделить на две группы. К первой группе отно-

сятся алгоритмы, основанные на непосредственном анализе расстояний между объектами. Ко второй – алгоритмы, основанные на анализе структур, производных от исходной матрицы взаимных расстояний между классифицируемыми точками (реализациями, векторами-признаками).

В работе использован один из алгоритмов первой группы – частный случай метода динамических сгущений. Идея метода состоит в таком разбиении множества объектов на k классов, чтобы минимизировался функционал

$$W = \sum_{j=1}^k W_j, \quad W_j = \sum_{x_i \in S^{(j)}} L^2(x_i, C^{(j)}), \quad (8)$$

где $C^{(j)}$ – центр j -го класса.

Если центры $C^{(j)}$ являются центрами тяжести классов ($C^{(j)} = \bar{X}^{(j)}$), то этот метод сводится к методу центра тяжести или « k » средних. Более того, если расстояние L^2 определяется как евклидово (в нашем случае), то функционал W принимает вид

$$W = \sum_{j=1}^k W_j, \quad W_j = \sum_{x_i \in S^{(j)}} L^2(x_i, \bar{X}^{(j)}). \quad (9)$$

В этом случае критерии качества классификации (кластер-процедуры) есть некоторые функционалы, зависящие от объемов кластеров и расстояний между объектами, вошедшими в них.

Пусть совокупность объектов (реализаций) разбита на k классов $S^{(1)}, \dots, S^{(j)}, \dots, S^{(k)}$.

Введем следующие величины, характеризующие степень рассеивания объектов из X :

$$\text{общее рассеивание (разброс)} - Z = \sum_{j=1}^k L^2(x_i, \bar{X}); \quad (10)$$

$$\text{межклассовый разброс} - B = \sum_{j=1}^k m_j L^2(\bar{X}_i, \bar{X}^{(j)}); \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{внутриклассовый разброс} - w &= \sum_{j=1}^k w_j, \\ w_j &= \sum_{x_i \in S^{(j)}} L^2(x_i, \bar{X}^{(j)}), \end{aligned} \quad (12)$$

где $\bar{X} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_i$ – общий центр тяжести; $\bar{X}_j = \frac{1}{m_j} \sum_{X_i \in S^{(j)}} X_i$ – центр тяжести j -го класса; m_j – число объектов в классе $S^{(j)}$.

При использовании евклидова расстояния имеет место равенство $Z = W + B$.

Тогда статистика

$$T = 1 - \frac{W}{Z} \quad (13)$$

будет характеризовать качество разбиения. Так, чем больше T , тем большая доля общего разброса точек объясняется межклассовым разбросом, и значит тем лучше качество разбиения.

Вычислительная процедура метода динамических сгущений носит итерационный характер. Из m исходных объектов случайным образом выбираются k объектов, которые назначаются центрами классов. Остальные $m - k$ объектов разбиваются относительно этих k центров так, что любой из $m - k$ объектов считается принадлежащим к j -му классу, если этот объект ближе к j -ому центру, чем к остальным (в смысле введенной меры расстояния). Полученные k классов обозначаются $S_0^{(1)}, \dots, S_0^{(k)}$. Затем вычисляются центры $C_1^{(1)}, \dots, C_1^{(k)}$ соответствующих классов. После этого m объектов разбиваются на k классов относительно новых центров кластеров по принципу: объект относится к j -ому классу, если центр этого класса наиболее близок к данному объекту из всех имеющихся центров. В результате получаются классы $S_1^{(j)}$ ($j=1, k$). На следующем шаге процедура повторяется. Остановка алгоритма происходит, когда центры классов стабилизируются, т. е. когда $C_{i+1}^{(j)} \approx C_i^{(j)}$ ($j=1, k$).

Центр класса вычисляется как центр тяжести (арифметическое среднее) объектов класса (так были получены параметры типовых гидрографов):

$$\bar{q}_j = \frac{1}{m_j} \sum_{q_i \in S^{(j)}} q_i, \quad (14)$$

где $\bar{q}_j$ – ордината типового гидрографа j -ого класса; q_i – ордината

i -ого гидрографа, принадлежащего классу j .

Система предусматривает запоминание эталонов и типовых гидрографов.

В результате численных экспериментов вся совокупность гидрографов была разбита на 5 классов. При этом наименьшего значения статистика T достигла при пороговом значении расстояния 0.22 и составила 0.84.

В целом задача распознавания образов состоит из двух частей: обучения и распознавания. Обучение осуществляется путем предъявления отдельных объектов (реализаций), в результате распознающая система должна приобрести способность реагировать одинаковым образом на изображения схожих образов. Распознавание характеризует действия уже обученной системы. Автоматизация этих процедур и составляет проблему обучения распознавания образов. При выборе распознающих систем предпочтение было отдано трехслойному перцептрону с последовательными связями (прямыми и обратными) и с управлением по реакции. Отличительной особенностью таких систем можно считать их принципиальную возможность связывать целую группу эталонов с предъявляемыми реализациями и использовать их в процессе распознавания. Рассматриваемая система работает как в режиме обучения, так и в режиме прогнозирования, которые могут функционировать, в виде непрерывного цикла. Во время процесса обучения происходит отработка порогов (критериев принадлежности к одному из классов), которые запоминаются как и соответствующий список эталонов. В режиме прогнозирования система работает следующим образом: поступающая оперативная информация (косвенные признаки весеннего стока) сравнивается с эталонами (аналогичными признаками, хранящимися в банке данных) и вызывает из памяти соответствующие им фактические гидрографы, которые уже с соответствующими весами участвуют в выработке прогнозного гидрографа.

Основная задача, которая решается в режиме обучения – добиться минимальных ошибок распознавания. В качестве эталонов во время работы в этом режиме выступают совокупности признаков характера половодья (считаем, что принадлежность их к определенному образу известна), представленные в виде векторов, а в качестве входного изображения (предъявляемой реализации) берется один из них. Предварительно назначаются начальные значения «поро-

гов». Под понятием «порог» в данном случае подразумевается некоторое максимально возможное значение меры близости (евклидовой метрики) с эталоном, при котором происходит идентификация входного изображения с данным прототипом. Так как в данном случае результатом распознавания является типовой гидрограф, то целесообразно начальные пороговые значения (V_j^2) задавать в зависимости от величины внутриклассового разброса

$$V_j^2 = \frac{1}{m_j} \sum_{P_i \in S^{(j)}} L^2(P_i, \bar{P}^{(j)}), \quad (15)$$

где P_i — i -ый вектор косвенных признаков (предварительно отнормированных), m_j — число эталонов P_i в j -ом классе, $\bar{P}^{(j)}$ — центр тяжести j -ого класса (осредненный вектор признаков).

Далее вычисляются оценки меры схожести векторов-признаков входного изображения и эталона по формуле евклидова расстояния

$$L_{ij}^2 = \sum_{i=1}^n (P_{i1} - P_{j1})^2. \quad (16)$$

Если значение (16) меньше порогового, входное (предъявляемое) изображение относится к тому классу, к которому принадлежит данный эталон. Полученный, ответ сравнивается с правильным. Если класс распознан, то значение порога увеличивается по формуле:

$$V_j^2 := V_j^2 + 0,05 V_j^2, \quad (17)$$

т.е. на 5% от предыдущего значения. Если правильный ответ не совпадает с результатом сравнения, пороговое значение уменьшается на ту же величину.

В случае, если начальное значение порога мало и образ не идентифицирован, V_j^2 будет увеличиваться пока не произойдет распознавание, а затем, вступает в силу вышеизложенная схема, которая носит название системы «поощрения и наказания».

Как уже говорилось выше, прогноз гидрографа половодья дается в два этапа. На первом этапе предсказывается типовой гидрограф, на втором — высказывание конкретизируется за счет пропор-

ционального учета списка эталонов, принадлежащих предсказанному классу. Работа системы в прогнозном режиме весьма схожа с работой в режиме обучения. Предъявляется оперативная информация (вектор признаков характера половодья на малых водосборах) и вычисляются метрики расстояния со всеми эталонами. Решающее правило вырабатывается на основании максимального числа идентификаций входного изображения с этапами одного из элементов класса. Прогнозом (на этом этапе) являются ординаты соответствующего типового гидрографа.

На втором (уточняющем) этапе прогноза вычисляется мера сходства между вектором признаков характера половодья прогнозного года (состав косвенных признаков характеристик половодья на 2-ом этапе отличается от соответствующего состава на 1-ом) и эталонами класса, который определен системой на первом этапе прогноза (L_i^2). Далее определяются минимальные и максимальные значения метрики расстояния ($L_{\min}^2$ и $L_{\max}^2$). Пороговое значение определяется, по полученной, экспериментальным путем формуле:

$$V^2 = L_{\min}^2 + (L_{\max}^2 - L_{\min}^2) 0,1. \quad (18)$$

Отбираются эталоны для которых $L_i^2 < V^2$. Этой операцией определяется набор гидрографов, которые далее участвуют в конструировании прогнозного гидрографа.

Веса каждого, из них $\omega_{(i)}$ вычисляются следующим образом:

$$\omega_i = \omega_i' / \sum_{i=1}^{m_1} \omega_i', \quad (19)$$

где

$$\omega_i' = (1 / L_i^2) / (1 / \sum_{i=1}^{m_1} L_i^2), \quad (20)$$

где m_1 — количество отобранных эталонов данного класса. Ординаты прогнозного гидрографа получаются по формуле

$$\hat{q}_j = \sum_{i=1}^{m_1} \omega_i q_{j,i}, \quad (21)$$

где $q_{j,i}$ — j -ое значение ординаты i -ого гидрографа-эталона.

Качество прогнозов на экзаменационном материале (независимой выборке) оценивалось по стандартному критерию S/σ (табл.)

Таблица

Оценка прогнозов весеннего половодья яз независимой выборке

Год	1 этап прогноза	2 этап прогноза
	S/σ	S/σ
1979	0.57	0.51
1980	0.30	0.22
1981	0.35	0.22
1982	0.84	0.78
1983	0.27	0.21

В таблице приведены оценки качества прогнозов гидрографов по результатам первого и второго этапов за 5 лет. На рисунке представлены прогнозные и фактические гидрографы на 1981 г.

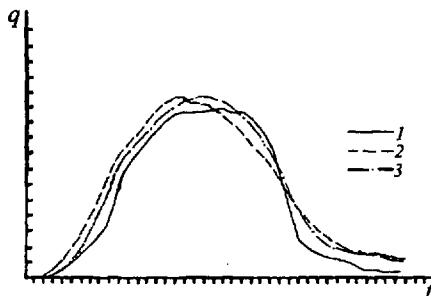


Рисунок – Гидрографы весеннего половодья (р. Ветлуга – Ветлужский, 1981 г):
1 – фактический; 2 – прогнозный (I этап);
3 – прогнозный (II этап).

Анализ результатов показал, что ошибка 2-х этапного прогноза меньше ошибки, когда прогноз дается в виде одного из типовых гидрографов. Это указывает на целесообразность разработки

распознающих систем перцептронного типа. Согласно критерию применимости методики прогноз гидрографа половодья 1982 года оказался неоправдавшимся. Это можно объяснить тем, что аналогов ему в архиве эталонов не оказалось. Весеннее половодье этого года отличалось аномально растянутой ветвью подъема, резким спадом и малым значением $Q_{\max}$. Качество распознавания, а следовательно и прогнозов, будет улучшаться по мере пополнения банка данных информацией о гидрографах редкой повторяемости. Многое зависит и от репрезентативности признакового пространства, оптимизация которого, является одной из ключевых задач исследователя.

Литература

1. *Вапник В. И., Червоненко А. Я.* Теория распознавания образов (статистические проблемы обучения). – М.: Наука, 1974. – 415 с.
2. *Руководство по гидрологическим прогнозам.* Вып. 1. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 358 с.
3. *Шаночкин С.В.* Применение распознающих систем в гидропрогнозах. Моделирование и прогнозы гидрологических процессов. Тр. РГТМУ 1999 г., вып. 120, с. 35–40.

Научное издание

ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ГИДРОЛОГИИ

Сборник научных трудов

Редактор И.Г. Максимова

ЛР № 020309 от 30.12.96.

Подписано в печать 00.07.04. Формат 60х90 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ.л. 12,7. Уч.-изд.л. 13,3. Тираж 100 экз. Заказ № 180
РГТМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.
ЗАО «Лека», 195112, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 68.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Арсеньев Г.С., Замащикова Н.И., Ускова А.В., Утешева К.А.</i> Оценка влияния Сибирских водохранилищ на гидрологический режим в нижних бьефах гидроузлов	10
<i>Арсеньев Г.С., Васильева Г.Н.</i> Социальные и технические проблемы пропуска половодий и паводков через Саяно-Шушенский гидроузел	15
<i>Арсеньев Г.С.</i> Разработка схемы пропуска расчетных половодий и паводков через каскад Енисейских ГЭС	18
<i>Барышников Н.Б., Немчинов К.В., Самсонов М.В.</i> Воздействие эффекта взаимодействия потоков на транспортирующую способность руслового потока	24
<i>Бродская Н.А.</i> Эколого-гидрогеологические исследования на урбанизированных территориях	38
<i>Викторова Н.В., Грамова М.Н.</i> Влияние возможных изменений минимального стока на экономическое развитие Северо-Запада ЕТР	45
<i>Винников С.Д.</i> Определение нагрузки на вертикальную цилиндрическую опору от раздробленного ледяного поля с помощью модельных исследований	54
<i>Владимиров А.М.</i> Опасные гидрологические явления	60
<i>Догановский А.М., Мякишева Н.В., Прокофьева Т.И.</i> Водный баланс озер зоны недостаточного увлажнения	66
<i>Домингес Э.А.</i> Стохастический прогноз притока воды к водохранилищу ГЭС Бэтания (республика Колумбия)	76
<i>Илларионов А.В.</i> Идентификация мест размывов трубопроводных переходов.	85
<i>Исаев Д.И.</i> Особенности сортировки наносов в аллювийном русле.	90
<i>Костко В.В., Бам Р.А., Георгиевская А.В.</i> Гидрологические проблемы установления минимальных границ и размеров водоохранных зон и прибрежных защитных полос водных объектов	94
<i>Костко В.В., Костко Ю.В.</i> Гидрологические проблемы установления водоохранных зон водных объектов	97
<i>Кузьмин Ю.А.</i> О принципах преподавания дисциплин геофизического направления в РГГМУ.	103
<i>Левашов А.А., Левашова И.А.</i> Морфология, механизм развития речного русла, поймы, ледовых образований на участке р. Оредеж в районе учебной базы РГГМУ.	111
<i>Науменко М.А.</i> Факторы-индикаторы климатических изменений, влияющих на состояние экосистемы больших озер (на примере Ладожского озера)	116
<i>Орлов В.Г.</i> Расчеты годового стока при отсутствии гидрометрических наблюдений по рекомендациям СНИП 2.01.14-83.	123
<i>Орлов В.Г.</i> Оценка допустимых изъятий объемов воды из русловой сети без нарушения экологии речной системы	126
<i>Павлов А.Н.</i> О понятии фоновое состояние экосистемы в связи с бурением газовых скважин в районах Обской и Тазовской губ Карского моря.	132
<i>Пивоварова И.И., Гайдукова Е.В.</i> Чувствительность критериев оптимальности режимной гидрологической сети к изменению климата	138

<i>Постников А.Н.</i> Формулы для расчета среднего годового испарения с поверхности суши и радиационного баланса увлажненной поверхности	143
<i>Прокофьева Т.И.</i> Прогноз подземного стока Северо-Запада РФ в условиях антропогенного изменения климата	153
<i>Потапов А.А.</i> Опыт калибровки численной модели фильтрации подземных вод (район месторождения алмазов им. М. В. Ломоносова, Архангельская обл.)	160
<i>Сикан А.В., Малышева Н.Г.</i> Расчет минимального стока рек Брянской области	169
<i>Сикан А.В., Пузикова Е.Е.</i> Особенности применения статистических критериев для оценки однородности гидрологических рядов	173
<i>Тенилов А.П.</i> Расчет испарения с поверхности рапы оз. Баскунчак.	178
<i>Угрюнов Г.Н., Вакс Ф.М.</i> Методологические принципы установления нормативов допустимого воздействия загрязняющих веществ на водные экосистемы	183
<i>Шаночкин С.В.</i> Прогноз гидрографа весеннего половодья на р. Ветлуге.	188