

Труды РГГМУ
Вып. 122

ЭКОЛОГИЯ И ОХРАНА ПРИРОДНЫХ ВОД

Сборник научных трудов

Под редакцией доц. Ю.А. Федорова,
проф. А.М. Владимирова



Санкт-Петербург
2000

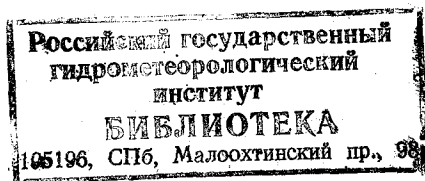
УДК 502.55(204)

Экология и охрана природных вод. Сборник научных трудов,
вып. 122. – СПб: Изд. РГГМУ, 2000. – 84с.

Редакционная коллегия: доц. Ю.А. Федоров, проф. А.М. Влади-
миров, ст. научн. сотр. В.Н. Ворбьев.

В сборнике рассматриваются экологические аспекты исследо-
вания поверхностных и подземных вод, с которыми тесно связаны
вопросы охраны природных вод. Состояние подземных вод, влияние
на них техногенной нагрузки исследуется в основном на примере
влияния промкомплексов в гг. Кингисеппе и Приозерске. Методика
изучения экологического состояния поверхностных вод излагается
на примере р. Преголи (г. Калининград). Ряд статей посвящен теоре-
тическим аспектам исследования водных объектов с позиций эколо-
гии и сбора необходимой для этого информации.

The book deals with the questions of surface and ground water
quality ecological investigation that actually affects to water resource
quality control. The results of human impact to ground water are mainly
shown at the example of Priosersc and Kingisepp economic regions. The
method of ecological estimation of surface water quality are shown for
river Pregoli (Kaliningrad). Numerous articles study theoretical aspects of
water resources quality from the point of view of data collection.



ISBN 5-86813-014-6

© Российский государственный гидрометеорологический
университет (РГГМУ), 2000

ПАМЯТИ
ЮРИЯ АНДРЕЕВИЧА
ФЕДОРОВА
ПОСВЯЩАЕТСЯ

Предисловие

В настоящий сборник включены научные статьи ученых, преподавателей, аспирантов и студентов Российского государственного гидрометеорологического университета, Санкт-Петербургского государственного университета и Государственного гидрологического института.

Общая направленность тематики сборника – экология и охрана водных объектов с учетом различных гидрологических и гидравлических характеристик рек и озер. Большинство работ посвящено рассмотрению антропогенных изменений режима уровней, минерализации и химического состава грунтовых вод в системе атмосфера–зона аэрации – грунтовые воды, экологической оценке водных ресурсов.

Положительным моментом настоящего сборника является участие в научных исследованиях и совместная публикация статей со своими научными руководителями студентов и аспирантов.

Широкий круг вопросов, рассмотренный в издаваемом сборнике, безусловно заинтересует не только специалистов-экологов, но и геологов, гидрогеологов, гидравликов, географов, так или иначе занимающихся проблемами охраны окружающей среды. И мы будем удовлетворенны, если не ошибемся в своих ожиданиях.

Ю.А. Федоров – первый проректор Российского государственного гидрометеорологического университета

Ю.А. Федоров

(биографическая справка)

Предлагаемый Вашему вниманию сборник должен был открываться предисловием Юрия Андреевича Федорова. Он подготовил этот сборник, был его редактором. Однако увидеть свой очередной труд Юрию Андреевичу было не суждено. Преждевременная смерть в расцвете сил, а ему еще не было и 60 лет, поставила точку в земных делах Юрия Андреевича. 26 января нынешнего года ему исполнилось бы 60 лет. В память о Юрии Андреевиче в год его юбилея коллеги решили завершить начатое Юрием Андреевичем, посвятить ему этот сборник научных трудов, авторами которых в основном являются сотрудники возглавлявшейся им кафедры. В памятном сборнике нам показалось уместным напомнить также основные этапы жизни Юрия Андреевича. Важную часть в деятельности Юрия Андреевича составляла его работа с гидрометеорологическими техникумами. Поэтому здесь мы приводим коллективную статью всех директоров гидрометеорологических техникумов с воспоминаниями об их совместной работе. Мы надеемся, что предлагаемый сборник внесет определенный вклад в сохранение памяти об ученом и руководителе, об очень хорошем человеке Юрии Андреевиче Федорове.

Юрий Андреевич Федоров родился 26 января 1940 г. в Ленинграде. Во время войны он вместе с матерью, братом и сестрой был в эвакуации в деревне Елизаветино Кингисеппского района Ленинградской области. На кладбище этой деревни согласно его воле и похоронен Юрий Андреевич. Отец Юрия Андреевича погиб при обороне Ленинграда. Всю жизнь Юрий Андреевич искал могилу отца. В последние годы ему удалось найти свидетельство о захоронении отца на Волховском кладбище в Санкт-Петербурге. С тех пор Юрий Андреевич регулярно ходил на это кладбище и возлагал цветы на братскую могилу, где покоится его отец.

В 1945 году семья возвратилась в Ленинград. В 1947–1954 гг. школа, 1954–1958 гг. – Ленинградский топографический техникум, 1958–1960 гг. – работа в Северо-Западном аэрогеодезическом предприятии. В 1960 г. Ю.А. Федоров поступил в Московский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии. В 1965 г. он закончил его с отличием. С 1966 по 1982 г. Юрий Андреевич работал на предприятии № 10 ГУГК при СМ СССР, а с 1982 по 1985 г.

начальником отдела в институте Гипроспецгаз. Здесь он защитил кандидатскую диссертацию.

С 1985 г. до самой кончины Юрий Андреевич работал в Ленинградском гидрометеорологическом институте (теперь РГГМУ). Он любил свою работу и отдавал ей все силы. По его собственным словам, в Университет он ходил с песнями и уходил тоже с ними.

Будучи известным специалистом в области геодезии, Ю.А. Федоров быстро освоил сопредельные дисциплины и стал уважаемым специалистом не только в гидрологии, но и в целом в гидрометеорологии. Поэтому в 1989 г. он был назначен первым проректором, направляющим и отвечающим за учебный процесс в институте. Вся перестройка учебных программ и планов, введение новых специальностей, введение бакалавриата и магистратуры легла практически на его плечи. Он руководил всей методической работой в институте.

Очень большую работу Ю.А. Федоров провел по созданию нового факультета экологии и физики природной среды, а также по организации института в Туапсе и Алексине. Это позволило осуществлять подготовку бакалавров в области гидрометеорологии, физики, экологии и природопользования, специалистов по метеорологии, гидрологии, океанологии, геоэкологии, экономике природопользования и менеджменту, а также магистров по гидрометеорологии.

Расширение сферы образования позволило преобразовать институт в единственный в стране и в мире гидрометеорологический университет, в котором студенты изучают физику основных природных процессов, происходящих в воздушной и водной среде Земли, в неразрывной связи с экологией на фоне экономических проблем природопользования. Наибольший вклад в это внес Ю.А. Федоров.

Им написаны десятки научных и учебно-методических работ, включая новейший учебник по геодезии для гидрометеорологов («Геодезия с основами инженерной графики», Гидрометеиздат, 1995 г., 447 с.). Наряду с его «Практикумом по аэрофотогодезическим исследованиям водных объектов суши» (1992 г.) эти учебники в очень доступной форме рассказывают о сложных вопросах геодезии и аэрофотосъемки в аспекте использования их результатов для нужд гидрометеорологии.

Несмотря на колоссальную занятость, Ю.А. Федоров активно осуществлял научные исследования, о чем свидетельствует его последняя работа, представленная в настоящем сборнике.

В Ю.А. Федорове прекрасно сочетались ученый и администратор. Его бурная энергия активно способствовала интенсивному развитию Российского государственного гидрометеорологического университета.

Юрий Андреевич Федоров за доблестный труд на благо нашей Родины неоднократно поощрялся правительственными наградами, в том числе медалью «За доблестный труд», нагрудными знаками «Почетный работник гидрометслужбы России» и «Отличник геодезии и картографии».

Коллеги по Университету

Ю.А. Федоров и гидрометеорологические техникумы России

С именем Юрия Андреевича Федорова у нас, директоров гидрометеорологических техникумов Росгидромета, связаны самые добрые воспоминания. Именно он является «крестным отцом» многих полезных начинаний, которые сейчас воплощены в жизнь в виде тесного обоюдопользовательного сотрудничества университета и техникумов; Юрию Андреевичу принадлежит мысль и её воплощение в организацию двух самостоятельных филиалов Университета — в городах Алексине и Туапсе.

Мы никогда не сможем позабыть той радости от общения с этим истинным питерским интеллигентом, которая всегда присутствовала не только при личных встречах, но и телефонных разговорах. Именно Федоров разработал ту принципиальную и важную систему интеграции техникумов и вуза, которая успешно продолжает существовать уже более шести лет. В текущем году из стен РГГМУ выйдут специалисты с высшим гидрометеорологическим образованием, которые пять лет назад сразу после окончания техникума в рамках договоров между техникумами и вузом поступили на первый курс тогда Российского государственного гидрометеорологического института.

Пять же лет назад при техникумах были созданы приемные комиссии, которые осуществляли прием вступительных экзаменов в институт у выпускников школ.

Юрий Андреевич всегда проявлял заботу и отеческое участие в судьбах студентов, особенно бывших выпускников техникумов. Требовательный, но всегда справедливый и уравновешенный, своим спокойным и несколько глуховатым голосом он не только наставлял на путь истинный, но больше советовал и подсказывал, направлял студента в нужное русло.

Много сил прилагал Юрий Андреевич к тому, чтобы и техникумы были ведущими в области гидрометеорологического образования. Не все знают, что он входил в состав Совета директоров средних специальных учебных заведений Росгидромета и являлся в нем тем генератором идей, который приводил в движение все намечавшиеся полезные изменения. Именно он «раскрутил» процесс организации производственной практики студентов-агрометеорологов института на базе Алексинского гидрометеорологического технику-

ма. Юрий Андреевич предложил нам, директорам техникумов, продумать вопрос о создании филиалов университета.

Умел он и отдыхать. Человек интеллигентный, Юрий Андреевич обладал превосходным чувством юмора, знал и умел рассказывать анекдоты, истории. В его компании мы все раскрепощались, иногда позволяя себе некоторые двусмысленности, а в ответ слышали неизменное Федоровское: «Тьфу на тебя!», когда чья-либо шутка была слишком откровенна. Вот фотография. На ней в нашей компании смеющийся или танцующий Федоров. А каким танцором он был! До сих пор в Алексинском техникуме, да и Туапсинском тоже, помнят исполненные Федоровым на юбилейных банкетах вальсы, бальные танцы! С удовольствием Юрий Андреевич рассказывал, как в молодости несколько лет учился в школе бального танца. Был он и радушным хозяином. По служебным делам приезжая в командировку в университет, неизменно попадали под «крыло» проректора. Он оставлял все неслужебные и домашние дела на те вечера, что мы были в Санкт-Петербурге, и лично сопровождал нас в организованной им экскурсии по городу или любимому пригороду (особенно Царское Село и Павловск), на вечерний спектакль в БДТ или Мариинский театр.

Всегда знал Федоров, кому нужны выпускники университета. Он лично побывал почти во всех Управлениях по гидрометеорологии, в результате чего появлялись договоры о тесном сотрудничестве. Поэтому сейчас Университет не испытывает трудностей с трудоустройством выпускников. Много сил приложил Юрий Андреевич к тому, чтобы университету был присвоен статус Регионального метеорологического учебного центра ВМО.

Жизнь отпустила Юрию Андреевичу слишком мало времени. Он умер скоропостижно в рассвете творческих сил, не дожив до своего шестидесятилетия. Уже после его смерти открыли двери филиалы Университета в Алексине и Туапсе, не смог он увидеть и другие плоды своей кипучей деятельности на благо развития гидрометеорологического образования, не смог порадоваться нашим успехам. Набирая номер служебного телефона проректора РГГМУ, непроизвольно ожидаешь, что раздастся такой знакомый и родной спокойный голос: «Федоров слушает»...

У каждого из нас до конца наших дней сохранится память и собственные воспоминания об ученом, исключительно порядочном,

принципиальном и, как он сам над собой иронизировал, «занудливом» Человеке – Юрии Андреевиче Федорове. И эта память ВЕЧНА !

Директор Алексинского ГМТ, заслуженный учитель РФ, Почетный работник гидрометслужбы, кандидат экономических наук В.М. Бортяков

Директор Владивостокского ГМТ, заслуженный учитель РФ А.М. Устюжанин

Директор Иркутского ГМТ В.Н. Антоновский

Директор Ростовского-на-Дону ГМТ, заслуженный учитель РФ, Почетный работник гидрометслужбы Н.П. Леонтьева

Директор Туапсинского ГМТ, кандидат географических наук Е.А. Яйли

Директор Московского ГМК, Почетный работник гидрометслужбы П.П. Щадрова

Космический мониторинг водных объектов суши

Достаточно надежным средством наблюдения за факторами, воздействующими на водную среду, оценки этого воздействия и прогноза состояния водной среды на перспективу являются аэрокосмические методы исследований состояния вод суши, включая экологические компоненты комплексного глобального и локального мониторинга водных объектов. Космический мониторинг взаимодействия водных объектов и окружающей среды является относительно новым, но интенсивно развивающимся направлением научных исследований.

Проводимые в указанных целях наземные наблюдения, как правило, носят локальный характер. Повсеместно их организовать довольно трудно, да и экономически невыгодно. Особенно это касается таких динамических объектов, как взвешенные речные наносы, быстро изменяющиеся в пространстве и во времени. Получаемая только на основе наземных наблюдений информация, как правило, очень скудна.

Изучение взаимодействия водных объектов и окружающей среды, воздействия крупных городов и промышленных объектов на качество природных вод требует комплексного подхода при исследованиях, одновременного изучения многих явлений природы, что весьма затруднительно, а порой просто невозможно выполнить традиционными наземными наблюдениями.

Вот почему для выполнения региональных и глобальных исследований взаимодействия водных объектов и окружающей среды требуется организация постоянного дистанционного мониторинга водных объектов: космического — для региональных и глобальных наблюдений и самолетного — для наблюдений за отдельными участками рек, озер, морей и водохранилищ.

Аэрокосмические съемки позволяют получить разнообразную информацию о водном объекте, его окружении и взаимодействии с окружающим ландшафтом. Они обладают такими преимуществами перед наземными наблюдениями, как однородность информации, единовременно полученной на больших территориях, возможность проведения глобальных и локальных измерений с высокой разрешающей способностью с достаточной регулярностью. Информация,

получаемая на основе аэро- и космических наблюдений, может собираться и храниться вместе с разного рода наземной информацией в специальном хранилище, образуя своего рода банк данных о водном объекте, прежде всего экологического и географического характера.

Особое место при организации космического мониторинга занимает многозональная космическая фотосъемка в видимом диапазоне спектра (0,4–0,8 мкм) с разрешением на местности порядка 10 м. Благодаря неодинаковой глубине проникновения солнечных лучей в воду для различных участков спектра многозональные космические фотоснимки позволяют изучать разноглубинные слои загрязнения вод. Причем наиболее контрастно изображаются взвешенные наносы на снимках в красной зоне спектра. Именно они и используются на практике для определения границ распространения взвешенных наносов в водоемах и прибрежной зоне акваторий. Что касается границ распространения мелкодисперсных взвесей, содержащихся в приповерхностных слоях водной толщи, то более четкое их выделение возможно на снимках, полученных в зеленой зоне спектра [3].

Концентрация взвешенных наносов определяется по результатам фотометрических измерений оптических плотностей космических изображений с помощью микрофотометров. Чем больше значение оптической плотности, тем выше степень концентрации взвесей. Максимальное значение оптической плотности изображения взвешенных наносов наблюдается в устьевой части рек и вблизи границы поля взвеси. Дешифрирование границ распространения взвешенных наносов на космических фотоснимках в разных зонах спектра позволяет исследовать распределение в плане и по глубине наносимого реками во внутренние водоемы и морские акватории взвешенного материала и различных загрязнений, закономерности и характерные особенности этих загрязнений, динамику водных масс в прибрежной части морских акваторий.

Телевизионная космическая съемка в видимом диапазоне спектра осуществляется с метеорологических искусственных спутников земли «Метеор», снабженных двумя многозональными сканирующими устройствами: малого (МСУ-М) и среднего (МСУ-С) разрешения. Многозональные телевизионные снимки на специальных проекторах можно синтезировать и получать псевдоцветное изображение водных объектов суши. Преимущество ТВ-снимков – оперативность получения информации и регулярность съемок, недостаток

— довольно низкая разрешающая способность изображений: для МСУ-С — 240 м, для МСУ-М — 1000 м.

Особенно остро стоит проблема охраны водных объектов, окружающих агломерации городов, а также расположенных в районах химических и целлюлозно-бумажных комбинатов, в связи с возрастающим загрязнением их сточными водами. Для обнаружения источников загрязнения и изучения процесса миграции и рассеяния сточных вод весьма эффективна тепловая аэросъемка (ТАС), выполненная с помощью тепловизоров с самолетов и вертолетов.

На тепловых аэроснимках довольно четко фиксируются устойчивые температурные контрасты теплых сточных вод и более холодных водных масс рек и водоемов, в которые сбрасываются сточные воды.

Устанавливаемые на искусственных спутниках Земли пятиканальные микроволновые радиометры позволяют при сетке с шагом 100 км получить точность определения температуры поверхности воды около $1,5^{\circ}\text{C}$ при обеспечении всепогодности измерений [2]. По тепловым снимкам из космоса установлены некоторые районы макрораспространения загрязнений акваторий от городов и получены данные об их широкой миграции (на десятки и сотни километров). К акваториям, окружающим агломерации городов, приурочены тепловые аномалии, достигающие региональных масштабов. Они связаны с тепловым воздействием на акватории городских сточных вод. Примером может служить полоса аномально нагретых вод, расположенная вдоль южного побережья Балтийского моря, на котором сконцентрированы десятки крупных городов разных стран на протяжении около 1500 км от Гента до Клайпеды при средней ширине 40-60 км [1]. Полученная информация заставляет пересмотреть ранее существовавшее представление о доле загрязнения акватории городами. По данным наблюдений из космоса, это явление имеет региональный, а порой и субглобальный характер, а размеры зон загрязнений с учетом их перемещений делают их реально опасными не только для локальных районов вблизи источников загрязнений, но и для крупных агломераций в целом.

Материалы тепловой (3-5 мкм) и ультрафиолетовой (0,1-0,3 мкм) спутниковых съемок в ряде случаев дают хорошие результаты при наблюдениях и контроле за разливами нефти в морях и океанах, включая экологические последствия таких разливов для окружающей среды. Однако следует учитывать поглощающее влияние

атмосферы на возможности тепловых и ультрафиолетовых съемок при организации космического мониторинга морских акваторий.

Наиболее перспективными методами дистанционного зондирования крупных водоемов представляются пассивные и активные микроволновые методы (SMARR, SAR, СКАТТЕРОМЕТР), так как они применимы в любую погоду и в различное время суток. К недостатку микроволновых методов следует отнести разреженность измерений, обусловленную характерной для микроволновых датчиков узкой полосой захвата территории [4]. Использование данных тепловых и микроволновых съемок особенно важно при исследованиях теплового баланса в приливных районах, где большие температурные контрасты между периодически обсыхающими приливными зонами и морской водой и их тепловое взаимодействие оказывает существенное влияние на водную экосистему.

Космический мониторинг водных объектов предусматривает создание ряда тематических космофотокарт и отдельных видов карт охраны водных объектов на основе материалов аэрофотосъемки и наземной информации. В данном случае природоохранное картографирование выступает в качестве одной из сторон комплексной картографической инвентаризации и планирования рационального использования природных ресурсов: водных, земельных, растительных и т.д.

Применительно к водным объектам суши представляется целесообразным составлять систему тематических карт, предназначенных для информационного обеспечения мероприятий по охране водной среды и включающих:

- серию карт, отражающих природный потенциал изучаемой территории;
- серию карт современного состояния водных объектов суши, отражающих характер их использования;
- серию карт динамики и антропогенного воздействия на водную среду;
- серию карт рекомендуемых природоохранных мероприятий, направленных на рациональное использование водных ресурсов и их защиту от загрязнений.

Роль и значение аэрокосмической информации при составлении карт природоохранной тематики неодинаковы для разных серий. Наиболее широко космические фотоснимки применяются при составлении карт природного потенциала, оперативных карт совре-

менного состояния водных ресурсов и антропогенного воздействия на геосистемы. Карты охраны природы и рационального использования водных ресурсов чаще составляются на основе использования аэрофотоснимков и карт предыдущих серий, выполненных по материалам космических фотосъемок.

Космический мониторинг водных объектов суши, базирующийся на системном картографировании природных ресурсов по материалам аэро- и космических фотосъемок, является важной государственной задачей, так как создает надежную основу для планирования рационального использования водных ресурсов страны и их охраны.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Григорьев А.А. Города и окружающая среда: состояние и проблемы космического мониторинга. – В кн.: Аэрокосмические методы в исследовании окружающей среды. – Л.: изд. ГО СССР, 1980. – С. 91-105.
2. Кондратьев К.Я. Роль космических средств наблюдений в исследованиях климата. – В кн.: Аэрокосмические методы в исследовании окружающей среды. – Л.: изд. ГО СССР, 1980. – С. 37-64.
3. Федоров Ю.А. Исследование взвешенных наносов и загрязнения водных объектов суши по материалам аэрокосмических съемок. – В кн.: Рациональное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды. – Л.: изд. ЛГМИ, 1987. – С. 34-36.
4. Федоров Ю.А. Возможности и проблемы дистанционных методов охраны окружающей среды. – В кн.: Проблемы развития морских геотехнологий, информатики и геоэкологии. Тезисы докладов. – СПб: Госкомэкология РСФСР, 1991. – С. 53-54.

УДК 628.54

С.А. ЧЕЧКИН (РГГМУ)

Индикационные признаки антропогенных изменений грунтовых вод

За последние 15–20 лет заметно расширилось изучение антропогенных изменений грунтовых вод (ГВ) с исследовательскими и прикладными целями. Наиболее видное место в них занимают вопросы изменения ГВ в зонах агропромышленных и особенно крупных промышленных комплексов. Выполнено большое число работ по учету антропогенных изменений геологических, гидрогеологических, гидрометеорологических, агрометеорологических и других природных условий при архитектурном, дорожном, водо-, нефте- и газокommunikационном, агротехническом проектировании и при

экологической оценке пригородных районов и зон отдыха населения. Имеются работы по уменьшению обводненности территорий промкомплексов, возникающей из-за антропогенных воздействий на природные ландшафты и особенно на ГВ.

Наиболее часто изучение антропогенеза ГВ сводится к вскрытию конкретных изменений их химического состава и режима уровней (УГВ). Эти работы обычно ведутся в полевых условиях с обязательным проведением крупномасштабных (1:2000 и 1:10000) геодезической, гидрогеохимической и гидрогеологической съемок. Объектами этих съемок являются хранилища сухих и жидких отходов производства, природные и антропогенные водоемы, водотоки, овражно-балочная и дренажная сеть и другие морфологические единицы. Одновременно ведутся экспедиционные исследования с целью сопоставления последствий антропогенных изменений ГВ с их природным (фоновым) состоянием.

Такая методика оценки антропогенных изменений ГВ позволяет составить по существу лишь статическую фактографию сложившейся обстановки в зоне промышленного (агропромышленного) комплекса без должного статистического ряда материалов первичных гидрометеорологических, гидрологических, геологических и других измерений и наблюдений. По этим данным очень сложно и практически невозможно разрабатывать динамическую фактографию территорий пром- и агропромышленных комплексов без предварительной разработки системы оценки антропогенных изменений ГВ или так называемой системы индикационных признаков антропогенных изменений ГВ. Такая система должна учитывать степень изученности различных зон пром- и агропромкомплексов и иерархию факторов формирования природной и антропогенно измененной фактографии этих зон, иметь многоцелевой характер, быть многоуровневой и способной решать задачи с различной степенью детальности. Иными словами, рассматриваемая система индикационных признаков призвана обеспечивать решение практических и научных задач пром- и агропромкомплексов в целом и их отдельных структурных элементов, использование ее для двух и более этих разнопрофильных комплексов одного физико-географического района с однотипной морфологией. Такая система индикационных признаков должна позволять планировать новые практические и иссле-

довательские задачи с целью комплексной оценки антропогенных изменений ГВ в нарушенной гидрогеотехнической системе.

1. Индикационные признаки изменений ГВ и методы их получения. Индикационные признаки ГВ (ИПГВ) – это признаки, отражающие изменения режима уровней, минерализации и химического состава грунтовых вод под влиянием производственной деятельности человека. Они представляются в форме, наиболее удобной для непосредственного восприятия менее доступных характеристик ГВ. На данном этапе исследований к числу ИПГВ следует отнести данные многолетних наблюдений сети метеорологических, гидрологических, агрометеорологических, воднобалансовых, гидрогеологических станций и постов, обработанные с применением соответствующего математического аппарата.

Состав и методы получения ИПГВ каждый раз определяются наличием исходной информации по зоне агро- и промкомплекса от геофизических станций, экспедиций и партий инженерно-геологических и гидрогеологических исследований и изысканий, специализированных лабораторий, а также опубликованными и фондовыми материалами.

Основные методы исследования ИПГВ при наличии достаточной информации условно можно разделить на три группы. К первой из них относятся методы стандартных статистических расчетов. Они позволяют объективно:

- определять природную систематическую и случайную изменчивости различных элементов режима ГВ, их минерализации и химического состава;

- выделять (оконтуривать) ареалы промкомплексов, в пределах которых стандартные статистические параметры химического состава, минерализации и режима уровней ГВ имеют значимые отличия от таких же параметров прилегающих к агро- и промкомплексам территорий (статистические параметры гидрометеорологического, гидрогеологического, гидрохимического, гидрогеохимического фона);

- проводить районирование промышленных и агропромышленных зон (территорий) по степени техногенного воздействия на ГВ в различные сезоны года с учетом статической и динамической фактографии комплекса антропогенных изменений всей экологической ситуации.

Другая группа методов исследования ИПГВ включает методы составления водно-тепловых и солевых балансов земельных участ-

ков, природных и антропогенных водных объектов промышленных и агропромышленных зон и на прилегающей к ним территории. Эти методы широко апробированы и за многолетнюю историю своего применения зарекомендовали себя как объективные методы составления статической и динамической фактографии состояния поверхностных и подземных водных ресурсов. Балансовые методы позволяют решать важные практические задачи:

- определять изменения составляющих баланса (стока, испарения, инфильтрации и др.) в ареалах антропогенно измененных ГВ, сравнивать эти данные с аналогичными характеристиками ненарушенных (природных) зон или территорий;

- оценивать воздействия загрязненных промстоков на природные воды с учетом многолетних колебаний приходных и расходных статей водного баланса, а также массу загрязняющих веществ, поступающих в отдельные ареалы агро- и промкомплексов;

- рассчитывать соотношения между природными (чистыми) и техногенно измененными (загрязненными) водами в их многолетней динамике.

Составляющие тепло-, водно-, солевых балансов рассчитываются для отдельных характерных для данной природной зоны (отдельных циклов производства) периодов и для отдельных ареалов. Различия между этими составляющими по ареалам и по периодам служат индикационными признаками антропогенных изменений поверхностных и грунтовых вод.

Третья группа методов исследования ИПГВ включает различные варианты имитационного моделирования. Такое моделирование обычно выполняется на математических моделях, воспроизводящих в формализованном виде природные условия промышленных (агропромышленных) комплексов и основные процессы энерго- и массопереноса в системе атмосфера-зона аэрации-грунтовые воды.

Все три группы методов апробированы применительно к Кингисеппскому производственному объединению «Фосфорит» и к Кондопожскому ЦБК с учетом основных действующих антропогенных факторов [2, 3] в широких пределах их варьирования [1, 4–8]. Эта апробация показала, что применение указанных трех групп методов, особенно имитационного моделирования, дает обширную объективную информацию об ИПГВ.

2. Состав индикационных признаков антропогенных изменений ГВ. Индикационные признаки антропогенных изменений ГВ разнообразны. Их состав определяется на стадии рекогносцировочных работ и зависит от степени нарушенности природного геологического и гидрогеологического разрезов, количества, вида и интенсивности загрязнения ГВ, химического состава жидких и твердых отходов производства. Структурно ИПГВ разделяются на две большие группы. Одна из них включает те индикаторы, которые определяются непосредственно по материалам первичных гидрометеорологических, гидрогеохимических, гидрологических и других наблюдений. Другая группа индикаторов объединяет те, которые выявляются в ходе сопоставления статистически однородных единиц в пределах выделенных ареалов антропогенных изменений ГВ.

В табл. 1 приведен состав индикаторов, методы их получения и сопоставления.

Приведенный в табл. 1 состав индикаторов может изменяться с учетом развития производства и динамики его воздействия на ГВ.

Таблица 1

Индикаторы антропогенных изменений грунтовых вод

Исходная информация и методы ее обработки	Индикаторы
Материалы многолетних режимных наблюдений за уровнем и составом ГВ, водотоков и водоемов, статистически обоснованные по УГВ, уровням воды водотоков и водоемов, годовая и сезонные амплитуды колебаний уровней поверхностных и грунтовых вод, сроки наступления экстремальных значений этих уровней, концентрация макро- и микрокомпонентов в природных водах за характерные периоды водности.	Значимые различия основных статистических параметров для выборок, составленных по различным участкам агро- и промзон и за различные периоды их освоения: среднее арифметическое, стандарт, коэффициент вариации, эмпирическая кривая обеспеченности по основным показателям загрязнения поверхностных и грунтовых вод.
Математическое моделирование водно-, соле- и теплового баланса с различной испаряющей поверхностью участков агро- и промзон по данным многолетних гидрометеорологических, гидрохимических и гидрогеологических наблюдений, по сведениям о водно-физических свойствах почво-грунтов.	Значимые различия изменчивости элементов водно-, соле- и теплового балансов, оцененных для природных и антропогенно измененных условий. Различия элементов водно-, соле- и теплового балансов антропогенно измененных участков, отличающихся глубиной залегания ГВ, видом подстилающей поверхности, расположением относительно областей питания ГВ, водотоков и водоемов агро- и промзон.

Исходная информация и методы ее обработки	Индикаторы
Имитационное моделирование на модели водно-теплового баланса реальных природных условий агро- и промзон при широкой вариации основных антропогенных факторов режима ГВ: дополнительная информация, параметры дренажа, изменение характера испаряющей поверхности.	Реакция гидротехнической системы на действия антропогенных факторов через изменения основных составляющих водно-теплового баланса.
Концентрация специфических химических компонентов за многолетний период по различным участкам агро- и промзон. Расчет общих и частных коэффициентов корреляции.	Значимые различия частных и общих коэффициентов загрязненности по различным участкам и за отдельно взятые интервалы времени.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Аверьянов В.Ф., Шерстюк Л.Н., Воробьев О.Г. Охрана вод от загрязнения поверхностными стоками. – Харьков, 1983.
2. Климов Г.И., Чечкин С.А., Воробьев О.Г. Подземные воды в системе «Химическое предприятие – окружающая среда». – М.: НИИТЭХИМ, 1985. – 26 с.
3. Плотноков Н.И. Техногенные изменения гидрогеологических условий. – М.: Недра, 1989. – 268 с.
4. Чечкин С.А. Основные особенности изменения качества природных вод отраслю фосфорных удобрений. – В кн.: Вопросы охраны и рационального использования вод суши. – Л.: ЛПИ (ЛГМИ), 1985 – С. 28-35.
5. Чечкин С.А., Климов Г.И. Методика предварительной оценки загрязнения грунтовых вод на территории промышленных предприятий. – В кн.: Вопросы повышения эффективности гидрометеорологических исследований в условиях интенсификации народного хозяйства. – Л., 1987, С. 46-53.
6. Чечкин С.А., Бродская Н.А. Режим уровней и состав грунтовых вод в зонах предприятий сложных фосфорных удобрений. – В кн.: Вопросы повышения эффективности гидрометеорологических исследований в условиях интенсификации народного хозяйства. Л., 1987 – С. 4Т-45.
7. Чечкин С.А., Бродская Н.А. Режим и статистическая структура антропогенно измененных уровней грунтовых вод. – В кн.: Гидрометеорология – научно-техническому прогрессу. – Л., 1990. – С.58-66.
8. Чечкин С.А. Вопросы экологии в гидрогеологии зон промышленных комплексов. – В кн.: Тезисы докладов конференции «Актуальные проблемы Формирования экологической культуры специалиста». Петрозаводск, 1991. – С. 18-20.

УДК 556.18+520.656

А.М. ВЛАДИМИРОВ (РГГМУ)

Экология и водные ресурсы

Укоренившееся в водохозяйственной практике понятие о водных ресурсах лишь как о количестве воды, которое может быть ис-

пользовано человеком, имеет явный утилитарный характер, поскольку учитывает только потребительское отношение человека к одному из основных элементов природной системы. На практике это выражается в диспропорции потребления воды и ее возврата, а также в изменении ее качества в сторону ухудшения.

При хозяйственном использовании рек (водозаборы, водосбросы) в них должно оставаться такое количество воды, которое обеспечивало бы минимальные условия сохранения жизнедеятельности гидробионтов и гидрофитов.

Это должен обеспечивать экологический сток, под которым понимается расход воды, обеспечивающий условия существования гидробионтов при антропогенном воздействии на водный объект с одновременным сохранением необходимого качества воды. В этом случае сохраняются экотопы пойм, а река остается элементом ландшафта. Следовательно, экологический сток обеспечивает количественное и качественное состояние водного объекта в самый мало-водный период года.

Методы оценки экологического стока должны учитывать климатическую зону, в которой находится река, ее гидрологический режим, класс реки, вид и степень ее хозяйственного использования с учетом требований к сохранению определенных санитарных, рыбоохранных и рекреационных норм, а также обеспечения биологического равновесия и условий самоочищения рек. Экологическое состояние реки будет считаться неудовлетворительным, если расход воды в ней за период нарушений стока будет меньше экологического стока этой реки при ее естественном режиме.

Экологический сток по своей величине меняется в течение года и определяется отдельно для каждой фазы стока. Оценка значений экологического стока связана с учетом многих требований и является весьма сложной задачей. Однако она может быть упрощена, если считать, что достаточные условия существования гидробионтов сохраняются в водотоках при значительных естественных снижениях объема стока, то есть в меженный период, который наблюдается на реках в зимний и летне-осенний сезоны.

Экологическое состояние реки будет считаться неудовлетворительным, если расход воды в реке за период нарушенного стока будет меньше экологического стока реки при ее естественном режиме.

Возможный водозабор из реки определяется по разности естественного и экологического стока.

Сопоставление данных наблюдений за стоком воды и рассчитанным экологическим стоком позволяет выявить на гидрографе стока периоды неблагополучия в речном русле, а также периоды экологического резерва, когда речной сток может быть использован для хозяйственных нужд. Результаты таких расчетов могут быть представлены в виде графика. Это позволяет осуществлять рациональное природопользование на конкретном речном водосборе. Одновременно необходимо производить экономическую и социальную оценку используемого водного объекта с учетом природоохранных требований.

Введение понятия экологического стока обуславливает необходимость изменения понятия водных ресурсов. С учетом требований экологии под водными ресурсами необходимо понимать то количество воды, которое используется или может быть использовано для хозяйственных нужд без ущерба для водного объекта, но при этом принимается во внимание экономическая целесообразность использования водного объекта.

Таким образом, в этом определении учитывается не только возможное для использования количество воды, но и та доля воды, которая должна оставаться в водотоке или водоеме для сохранения его экосистемы. Введение же экономического фактора позволяет оценить целесообразность допущения определенных количественных и качественных нарушений состояния водного объекта, поскольку требование о сохранении естественного состояния водного объекта в любом случае далеко не всегда возможно выполнить. Однако естественно, что необходимо стремиться к минимальному ущербу, который может быть нанесен реке или озеру, особенно если они имеют социальное значение. Для этого необходимо, чтобы было достаточно ясное представление об экосистеме водного объекта и влиянии на нее гидрологического режима.

В каждом естественном водном объекте существует, а в искусственном (водохранилище, пруд) формируется своя экосистема. В экосистеме происходит постоянный обмен веществами и энергией. Живые организмы поглощают вещества и энергию из окружающей среды и возвращают их обратно в измененном виде. На эти процессы в водных объектах определяющее влияние оказывают гидрологи-

ческий, гидрохимический и гидродинамический режимы водных объектов.

Гидрологический режим водного объекта характеризует изменение его состояния во времени, обусловленное изменением прежде всего метеорологических условий, а также вмешательством человека. На реках и озерах наблюдаются естественные суточные, сезонные и многолетние колебания уровней и расходов или объемов воды, ее температуры, появление и исчезновение ледовых образований, изменение расходов наносов, состава и концентрации растворенных веществ, меняются скорости течений и площади, затопленные и подтопленные водой.

Поэтому необходимо выделить в экологии новый раздел – гидроэкологию, понимая под этим научное направление, изучающие влияние гидрологического режима водотоков и водоемов на жизненные процессы, в них протекающее, и на живые организмы, с ними связанные. В этом случае водные объекты рассматриваются как часть единой экологической системы «водная система–производство–человек», а происходящие в них процессы являются звеном общего процесса тепло- и массопереноса в системе «атмосфера–гидросфера–литосфера».

При таком понимании водной экологии становится понятной разница в подходах к изучению гидроэкологии, охраны и качества вод. Хотя все они взаимосвязаны, но лишь гидроэкология наиболее полно отражает проблемы изучения водных объектов в естественном и нарушенном состоянии с целью сохранения в них необходимых жизненных условий. В то время как вопросы охраны связаны с предотвращением или устранением последствий загрязнения, засорения и истощения водных объектов, а вопросы качества вод связаны с анализом степени соответствия определенных показателей для водопользователей.

Новый подход к понятию «водные ресурсы» соответствует требованиям ст. 94 «Водного кодекса Российской Федерации», где сказано: «Использование водных объектов должно осуществляться с минимально возможными негативными последствиями для водных объектов», а также ст. 106 – «При эксплуатации хозяйственных и других объектов запрещается ... производить забор воды из водных объектов, существенно влияющих на их состояние».

Водный кодекс не запрещает использование водных объектов, а лишь ограничивает их эксплуатацию, поскольку требование о сохранении естественного состояния любого водного объекта далеко не всегда возможно, да и разумно выполнить. Оценить целесообразность допущения определенных количественных и качественных нарушений состояния водного объекта (в рамках Водного кодекса) можно через экономический фактор и социальное значение этого объекта.

При оценке экологического стока рек в маловодную фазу стока за базовый целесообразно принимать минимальный 30-суточный расход воды 80 %-ной обеспеченности, который уточняют в зависимости от местных физико-географических и социально-экономических условий.

Учет экологического стока обуславливает необходимость введения поправки в оценку водных ресурсов, уменьшая их на долю экологического стока. По отношению к ресурсам, определенным по годовому стоку, это приведет к их уменьшению в среднем на 10-15 %. При оценке водных ресурсов в маловодную фазу они уменьшаются в среднем до 30 %.

В многоводную фазу стока количественный критерий экологического стока может быть изменен в сторону увеличения объема воды, который следует оставлять в русловой сети, особенно при наличии водохранилища. При этом за основу при назначении расчетной обеспеченности экологического стока может быть принят расход воды 50 %-ной обеспеченности.

За базовый экологический расход воды для ежегодно пересыхающих рек целесообразно принимать средний многолетний или (50 %-ной обеспеченности) меженный расход воды (или бытовой сток).

В горных южных районах необходимо учитывать наличие зон формирования речного стока (верховья рек) и его естественного истощения (низовье рек), чтобы дать дифференцированную оценку значений экологического стока.

Необходимо отметить, что вышеуказанные критерии являются весьма общими (осредненными) и пригодны прежде всего при оценке динамических водных ресурсов, отражающих тот объем воды в русловой сети, который может быть использован человеком в разные фазы водности рек.

В целом оценка значений экологического стока и соответствующих водных ресурсов связана с учетом многих требований гидробиологии водного объекта во взаимосвязи с гидрологическими характеристиками и является очень сложной задачей.

УДК 631.85.61:628.54

*Т.И. ПРОКОФЬЕВА,
Н.А. БРОДСКАЯ (РГТМУ)*

Моделирование водного баланса – метод оценки техногенной нагрузки на грунтовые воды

В условиях все возрастающего техногенного воздействия на природную среду, накопления значительных объёмов информации об экологическом состоянии природных объектов актуальной является проблема эффективной организации этой информации с целью получения прогнозных и текущих оценок роли промышленных и аграрных комплексов в формировании уровня и гидрохимического режимов подземных вод. В связи с этим несомненный интерес представляет метод водного и солевого балансов земельных участков и водных объектов – универсальный метод обработки и обобщения гидрометеорологической информации. В районах сильного влияния техногенного фактора использование этого метода позволяет получить важные в практическом отношении выводы:

- об изменении отдельных составляющих баланса – стока, испарения, инфильтрации и др. – в условиях техногенно измененной земной поверхности в сравнении с аналогичными характеристиками, рассчитанными за период ненарушенных природных условий;

- о степени воздействия загрязненных техногенных стоков на природные воды с учетом многолетних колебаний естественных приходных и расходных статей водного баланса.

Учет временной изменчивости составляющих водного баланса необходим как в многолетнем разрезе, так и для элементов баланса, рассчитанных за короткие интервалы времени. Первое важно для оценки степени воздействия локальных постоянно действующих мало меняющихся во времени техногенных факторов на природные объекты, водный баланс которых определяется комплексом факторов, прежде всего метеорологических, имеющих стохастический характер.

Очевидно, что степень такого воздействия будет неодинакова для лет различной водности. Второе имеет наибольшее значение для прогноза последствий различных аварийных ситуаций, действие которых, как правило, хотя и кратковременное, но очень интенсивное.

Разработка модели водного баланса территорий промкомплексов, позволяющей решать перечисленные выше задачи, очень сложна. Связано это со слабой изученностью промышленных зон в отношении количественных характеристик уровня режима грунтовых вод, внутригодового хода основных режимообразующих факторов и таких составляющих водного баланса, как водообмен между грунтовыми водами и верхним слоем почвогрунта, поверхностный и дренажный сток. Поэтому обычно ограничиваются составлением упрощенного уравнения водного баланса, включающего в себя средние многолетние значения количества осадков, испарения и стока. Использование подобных уравнений возможно лишь для получения самых общих оценок изменения условий увлажнения территории под воздействием источников техногенного питания и изменения вида подстилающей поверхности. Там же, где стоит задача исследования процессов загрязнения, происходящих как за счет систематического поступления загрязняющих веществ в поверхностные и подземные воды, так и при аварийных ситуациях, модель должна включать в себя все основные составляющие и позволяет вести расчет за короткие интервалы времени (сутки, декада).

Перечисленным требованиям удовлетворяет дифференциальное уравнение водного баланса, сформулированное для деятельного слоя почвогрунта, через который осуществляется связь между грунтовыми водами и атмосферой. По физическому механизму режима влажности деятельный слой делится на корнеобитаемый (КСП) и подстилающий (ПС). Последний является аккумулятором влаги, сбрасываемой из КСП при его переувлажнении сверх водоудерживающей способности, которая определяется значением наименьшей влагоемкости (НВ). Вода, накопленная в ПС, может возвращаться в КСП при его иссушении. При близком залегании грунтовых вод ПС служит буфером, через который осуществляется водообмен между КСП и грунтовыми водами.

Уравнения водного баланса
— для корнеобитаемого слоя:

$$\frac{dw_1}{dt} = \frac{w_2 - w_1}{H} \cdot \frac{dh}{dt} + \frac{p - e + q}{h}, \quad (1)$$

— для подстилающего:

$$\frac{dw_2}{dt} = \frac{w_2 - w_1}{H} \cdot \frac{dh}{dt} + \frac{Q - q}{H - h}, \quad (2)$$

где w_1 и w_2 — средние значения объемной влажности КСП и ПС; h и H — мощность КСП и всего деятельного слоя почвы, см; p и e — интенсивности осадков и суммарного испарения, мм/сут; q и Q — интенсивности водообмена между КСП и ПС, а также между ПС и грунтовыми водами, мм/сут; t — время, сут.

Решением системы уравнений (1), (2) является временной ход $w_1(t)$.

В качестве начальных условий при глубоком залегании грунтовых вод берется равновесный профиль влажности, который формируется весной с момента окончания процесса впитывания талой воды ($t = 0$) и может быть схематично представлен в виде:

$$w(z) = \begin{cases} \text{НВ}, & 0 < z < H \\ \text{ВЗ}, & z > H \end{cases}, \quad (3)$$

где НВ и ВЗ — наименьшая влагоемкость и влажность завядания; z — вертикальная координата.

В соответствии с (3) при $t = 0$ можно принять $w_1 = w_2 = \text{НВ}$. В случае близкого залегания грунтовых вод, критерием которого является нахождение капиллярной каймы в деятельном слое почвы, начальные значения влажности (w_1 и w_2) рассчитываются по заданному уровню грунтовых вод и величине $\Psi_{\text{НВ}}$ (потенциал почвенной влаги при НВ), которая определяется либо экспериментально, либо с помощью эмпирических формул.

При отсутствии экспериментальных данных подход к расчету величин, входящих в систему уравнений (1), (2), основывается на максимально возможном использовании материалов сетевых метеорологических и воднобалансовых наблюдений, учете гидрогеологических особенностей территории, водно-физических свойств почвогрунтов, а методы расчета отдельных составляющих баланса базируются на ясных физических закономерностях и апробированных зависимостях.

Так, для основной расходной статьи водного баланса деятельного слоя почвы – суммарного испарения – перечисленным требованиям удовлетворяет физически обоснованная эмпирическая модель, разработанная А.Р. Константиновым, усовершенствованная и адаптированная впоследствии к условиям решения рассматриваемой задачи. В качестве комплексной характеристики условий теплового обеспечения, в которых происходит испарение, используется испаряемость e_0 , рассчитываемая по среднедекадным значениям температуры воздуха и парциального давления водяного пара с учетом теплового баланса поверхности и интенсивности турбулентного обмена [1]. Для учета влажности почвы и водно-физических свойств почв, от которых зависит подвижность почвенной влаги и, следовательно, доступность ее для испарения, применяется относительная влажность v . В [2] на основании опыта построения связей суммарного испарения с влажностью почвы обосновывается преимущество использования v в виде $v = (W - B_3)/(H_B - H_3)$ перед другими относительными характеристиками (здесь W – запасы влаги (в мм) в расчетном слое почвы). Подробное описание усовершенствованной методики расчета суммарного испарения имеется в [3].

Территории промкомплексов, за исключением зоны застройки и заасфальтированных участков, обычно представляют собой сочетание участков оголенной почвы, где растительность отсутствует, и участков, занятых многолетними травами и остатками кустарников. Для этих видов испаряющих поверхностей по многолетним данным наблюдений воднобалансовых станций построены универсальные (относительно климатических и почвенных условий) зависимости вида:

$$e/e_0 = f(v), \quad (4)$$

которые используются в уравнении (1) для расчёта интенсивности суммарного испарения e по данным о температуре воздуха и упругости водяного пара.

Весьма сложной является оценка интенсивности вертикального влагопереноса в зоне аэрации, т.е. величин q и Q в системе уравнений (1), (2). Решение полной задачи влагопереноса при нестационарном режиме влажности в деятельном слое почвы, который имеет место в природных условиях, является пока невыполнимой задачей. Однако поскольку при решении уравнений водного баланса достаточно найти интенсивности потоков q через нижнюю границу КСП и Q между ПС

и грунтовыми водами, задачу можно решить в квазистационарном приближении при условии, что на нижней границе КСП влажность почвы остается практически постоянной, а ее изменчивость во много раз меньше колебаний влажности в целом по профилю.

Если характеризовать энергетическое состояние почвенной влаги через ее капиллярно-сорбционный потенциал $\Psi(w)$, то для расчета q можно использовать соотношение:

$$q = -K \left(\frac{d\Psi}{dz} - 1 \right), \quad (5)$$

решение которого в конечно-разностном виде приведено в [5]. Здесь K и Ψ – соответственно коэффициент влагопроводности и потенциал почвенной влаги, являющиеся функциями w . Зависимости $K(w)$ и $\Psi(w)$ аппроксимируются с помощью эмпирических формул, полученных на основе анализа большого объема экспериментальных данных [4].

Расчет водообмена Q между ПС и грунтовыми водами также осуществлен в квазистационарном приближении. Распределение потенциала почвенной влаги и профиль влажности могут быть найдены из уравнения [7]:

$$\frac{dz}{d\Psi} = - \frac{1}{1 + Q/K(\Psi)} \quad (6)$$

с граничными условиями

$$\Psi|_{z=0} = \Psi_0; \quad \Psi|_{z=H_1} = \Psi_h = \Psi(w_h), \quad (7)$$

где H_1 – расстояние от зеркала грунтовых вод до нижней границы КСП. Интегрирование уравнения (6) с учетом (7) и численное решение полученного интегрального уравнения на сетке значений H осуществлено в [6]. Результатом этого решения является функция $Q(H)$: $Q > 0$ соответствует подпитыванию ПС грунтовыми водами, $Q < 0$ – инфильтрации воды из ПС.

Поверхностный сток имеет место, когда интенсивность поступления воды на поверхность почвы p больше максимальной интенсивности впитывания g . Разность между этими величинами определяет интенсивность поверхностного стока, которая явно не входит в систему уравнений (1), (2): если $p > g$, то в уравнении (1) вместо p берется величина g .

Реализация представленной модели водного баланса возможна только с применением ЭВМ. Программа расчета для ЭВМ серии ЕС составлена Л.К. Швецовым и Н.М. Химиным (входит в фонд алгоритмов и программ ВЦ РГГМУ), а для ПК IBM PC – Н.М. Химиним и Ю.А. Зарецким. Проведенная нами апробация модели в различных районах страны при значительной вариации почвенных, климатических и гидрогеологических характеристик дала удовлетворительные результаты. Опыт многочисленных поверочных расчётов показал, что расхождение между наблюдаемыми и рассчитанными значениями уровней не превышает 20-25 % амплитуды уровня, а между соответствующими значениями суммарного испарения 5-15 %, что считается вполне удовлетворительным при воднобалансовых расчетах.

В заключение приведем результаты численных экспериментов с представленной моделью водного баланса, осуществленных для территории ПО «Кондопогабумпром» с целью изучения многолетних колебаний элементов водного баланса и их изменения под действием техногенных факторов. Среди последних выделяются уничтожение растительности на большей части территории и дополнительная инфильтрация за счет утечек из водозаборной и сбросной сети, действующей на предприятии.

В табл. 1 приведены результаты расчетов составляющих водного баланса деятельного слоя почвы за 1971-1991 гг. для двух типичных в геолого-гидрогеологическом отношении участков, находящихся вне зоны непосредственного влияния техногенных факторов, на территории ПО «Кондопогабумпром».

Средняя сумма осадков P за расчетный период составила 326 мм, суммарное испарение E – 415 мм, водообмен между КСП и грунтовыми водами Q – 72 мм. Изменчивость перечисленных элементов водного баланса охарактеризована с помощью коэффициента вариации C_v . Для ряда P значение $C_v = 0.26$; для E – $C_v = 0.04$; для Q $C_v = 0.72$. Приведенные значения хорошо согласуются с общими закономерностями природной изменчивости атмосферных осадков и испарения и свидетельствуют о том, что при необходимости учета суммарного испарения в каких-либо проектных водохозяйственных расчетах можно пользоваться его среднемноголетними значениями, тогда как сумма осадков должна быть определена с учетом ее изменчивости. Воднобалансовые расчеты должны проводится для характерных по водности лет.

Таблица 1

Суммарные значения основных элементов водного баланса деятельного слоя почвы (мм) и изменение УГВ за теплый период года

Супесчано-суглинистый разрез, УГВ = 180 см					Песчаный разрез, УГВ = 80 см		
Год	Количество осадков	Испарение	Водообмен	ΔH_r	Испарение	Водообмен	ΔH_r
1971	264	416	107	-88	406	89	-75
1972	277	417	107	-87	429	91	-75
1973	355	424	113	-91	434	50	-37
1974	432	420	-10	30	425	68	-55
1975	249	406	119	-96	406	108	-98
1976	477	—	—	—	427	0	15
1977	429	411	-15	28	448	14	2
1978	350	390	40	-30	413	36	-24
1979	264	395	100	-88	401	99	-82
1980	179	390	122	-97	368	105	-93
1981	471	407	-37	69	447	-4	17
1982	235	415	108	-86	390	95	-79
1983	290	431	104	-83	411	92	-75
1984	285	426	114	-89	408	96	-61
1985	297	428	94	74	422	77	-62
1986	304	427	103	-81	405	67	-55
1987	417	413	9	0	411	4	9
1988	432	454	-4	15	418	3	-2
1989	309	410	102	-87	401	52	-53
1990	198	378	121	-98	360	101	-89
1991	370	437	39	-29	439	35	-19

Как видно из данных табл. 1, увлажненность теплого периода года определяет результирующее направление влагопереноса в зоне аэрации: в маловодные и средние по водности годы поток влаги направлен вверх, за счет чего уровень грунтовых вод (УГВ) опускается от максимального весеннего положения на 60-100 см, в то время как в многоводные годы, когда осадки преобладают над испарением, УГВ поднимается на 30-70 см. Такие годы наиболее неблагоприятны для общей экологической ситуации на территории предприятия, поскольку одновременно происходит ряд негативных процессов: вынос загрязняющих веществ с земной поверхности в грунтовые воды интенсивными осадками и последующий перенос их в поверхност-

ные водотоки и водоемы в условиях значительных уклонов грунтового потока.

Сравнительные расчеты хода УГВ для участков, покрытых многолетними травами и лишенными растительности для лет различной водности показывают, что при прочих равных условиях только за счет существенного уменьшения испарения с поверхности почвы по сравнению с суммарным испарением УГВ в первом случае постоянно превышает УГВ на варианте с растительностью. К концу расчетного периода эта разница достигает 50-80 см. Только в очень маловодный год УГВ от высшего положения весной срабатывается к концу лета на 40 см, на участках с растительностью эта сработка достигает 1 м. В периоды средней водности УГВ, снижаясь примерно на 80 см на участках с травяным покровом, сохраняет постоянно высокое положение в течение всего теплого периода там, где растительности нет. Таким образом очевидно, что сведение растительности значительно усложняет гидрогеологическую обстановку на территории предприятия, способствуя поддержанию постоянно высокого уровня грунтовых вод.

Анализ графиков режима УГВ в естественных условиях и на фоне дополнительного инфильтрационного питания грунтовых вод (pp) в размере 3 и 7 мм/сут для двух характерных литологических разрезов: преимущественно песчаного и супесчано-суглинистого показывает, что дополнительная инфильтрация практически не отражается на режиме УГВ в маловодные годы, компенсируя дефицит суммарного испарения. В годы с большим количеством осадков ее влияние сказывается весьма существенно, являясь причиной повышения УГВ по сравнению с естественными условиями почти на 1 м в годы средней водности. Принятые для расчетов значения (pp) определены на основе среднего годового значения водозабора предприятия и потерь этой воды в виде различных утечек, что позволяет в первом приближении сделать вывод о значительном влиянии техногенного питания грунтовых вод на режим их уровня, особенно в периоды средней и высокой увлажненности.

Проведенные численные эксперименты с моделью водного баланса показали перспективность данного подхода к решению проблем, связанных с оценкой влияния техногенных факторов на природные условия в зонах функционирования промкомплексов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Константинов А.Р.* Испарение в природе. — Л.: Гидрометеиздат, 1968. — 532 с.
2. *Лисовский И. Б., Прокофьева Т.И.* Обоснование показателей увлажнения при расчете испарения. — В кн.: Вопросы охраны и рационального использования вод суши. — Л., 1988, вып. 89. — С. 45-48.
3. *Лисовский И.Б., Прокофьева Т.И., Химин Н.М.* Универсальный метод расчета испарения с орошаемого поля. — Мелиорация и водное хозяйство, 1988, №4. — С. 31-34.
4. *Мотовилов Ю.Г.* Расчет основной гидрофизической характеристики по данным о почвенно-гидрологических константах. — Метеорология и гидрология, 1980, № 12. — С. 93-101.
5. *Химин Н.М.* Метод расчета водообмена между корнеобитаемым слоем почвы и грунтовыми водами. — Метеорология и гидрология, 1989, №8.
6. *Химин Н.М.* Модель квазистационарных колебаний уровня грунтовых вод. — Метеорология и гидрология, 1991, №9.
7. *Чайльдс Э.* Физические основы гидрологии почв. — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — 426 с.

УДК 628.54

С.А. ЧЕЧКИН, Н.А. БРОДСКАЯ (РГТМУ)

Районирование зон промышленных комплексов по показателям антропогенных изменений грунтовых вод

Окружающая среда — это многокомпонентная система и изучение ее в условиях интенсивной техногенной нагрузки — сложная комплексная проблема. Гидрогеологические аспекты этой проблемы определяют содержание нового техногенного направления современной гидрогеологии. Актуальность развития этого направления вполне очевидна и возрастает в связи с усилением деградации природных комплексов, вызванной глобальными региональными и локальными нарушениями тепло- и массообмена в гидрогеотехнической системе. Такие нарушения обуславливаются целым рядом причин, рассмотренных в [2, 4].

Основными показателями антропогенной нарушенности природных комплексов можно считать режим уровней грунтовых вод (УГВ), включающий амплитуду их колебания $A(z_{гв})$, сроки наступления экстремальных УГВ, продолжительность их высоких и низких значений, а также отличие содержания основных макро- и микро-

компонентов в грунтовых водах промышленных зон от региональных фоновых значений.

Объективными показателями антропогенного изменения состава грунтовых вод является также их пространственно-временная изменчивость в пределах промышленной зоны. К таким показателям относятся обеспеченные значения УГВ, их среднеквадратические отклонения (дисперсия), корреляционные и автокорреляционные функции приращений (снижений) УГВ. Эта пространственно-временная изменчивость вызвана влиянием большого числа факторов, определяющих особенности режима УГВ, и приводит к тому, что даже на сравнительно локализованных по площади участках промзон выделяются различные черты режима УГВ.

Основным критерием для выделения гидрогеологических участков территории промзоны с различным типом режима УГВ является литологический состав пород зоны аэрации и водовмещающих пород.

Именно состав пород определяет скорость фильтрации атмосферных и грунтовых вод (условия их разгрузки) и размеры возможной инфильтрации (условия питания). Границы участков подвижны во времени и пространстве, но приуроченность их к областям различной степени техногенного воздействия сохраняется. Эти участки взаимосвязаны и взаимодействуют. Природные закономерности, в частности зависимость $A(z_p)$ от мощности зоны аэрации, на участках техногенного воздействия нарушаются. Для аналогичных природных условий (климата, геологического строения, геоморфологических особенностей и фильтрационных свойств пород), но при различных глубинах залегания ГВ максимальная $A(z_p)$ должна формироваться при глубине залегания вод, примерно равной высоте капиллярного поднятия, свойственной данной породе, или несколько больше.

При увеличении мощности зоны аэрации происходит уменьшение $A(z_p)$. При весьма близком к поверхности залегании ГВ годовые амплитуды колебания уровня обычно незначительны [3].

В зависимости от мощности техногенного источника питания ГВ режим их настолько отличается от природного, что вблизи источника он, по существу, не зависит от естественных факторов; грунтовые воды весь год имеют высокий уровень с минимальной годовой амплитудой. По мере удаления от источников техногенного

питания в ходе УГВ все больше проявляется взаимосвязь с природными режимобразующими факторами, $A(z_{гп})$ увеличивается.

Как показали исследования, на территории промышленного комплекса выделяются несколько типов гидрогеологического разреза. Внутри каждого типа по изменчивости отдельных гидрогеологических параметров (водопроводимость T и водоотдача μ) дифференциация территории еще более дробная, что приобретает особую значимость при решении прогнозных задач методом математического моделирования поля геофильтрации.

Первой задачей по оценке изменчивости УГВ является расчет корреляционной функции $K_x(l', l'')$, коэффициента автокорреляции $r_x(l', l'')$ по формулам:

$$K_x(l', l'') = \frac{1}{n} \sum [x_i(l') - \bar{x}(l')] \cdot [x_i(l'') - \bar{x}(l'')] \quad (1)$$

и

$$r_x(l', l'') = \frac{K_x(l', l'')}{\sigma_x(l') \cdot \sigma_x(l'')}, \quad (2)$$

где $x_i(l')$ и $x_i(l'')$ – отметки УГВ на один и тот же момент времени в наблюдательных точках (скважинах) 1 и 2.

Выборка парных значений $x_i(l')$ и $x_i(l'')$ проводится на одну и ту же дату, объем совокупностей во всех выборках одинаковый.

Затем все наблюдательные точки группируются по выделенным режимобразующим признакам (типу гидрогеологического разреза, величине $A(z_{гп})$ и срокам наступлений экстремальных периодов) с опорной точкой. В табл. 1 приведены результаты расчета парной корреляции УГВ, характеризующие тесноту связи между величинами x_i , с учетом вероятной ошибки.

Таблица 1

Автокорреляционная функция уровней грунтовых вод

№ участка по типу режима	Статистический параметр	
	$r_x(l', l'')$	$4E_r$
I	0.76-0.95	0.177-0.041
II	0.82-0.96	0.136-0.032
III	0.03-0.77	0.420-0.172
IV	0.42-0.97	0.345-0.0247
V	0.50-0.97	0.316-0.0247

Как показывают результаты, выбранные критерии для дифференциации территории промкомплекса вполне обоснованы и рекомендуются для использования в качестве принципов районирования промзон.

Следующим этапом оценки УГВ и выполнения районирования территории промкомплекса является выделение параметров режима УГВ на основе статистических данных.

Количественная оценка роли вклада различных режимообразующих факторов УГВ в природных и антропогенно измененных гидрогеологических условиях необходима для решения ряда важных вопросов (объективного анализа пространственно-временных изменений УГВ, выбора оптимальной частоты измерений, оценки рациональной плотности сети контрольно-наблюдательных скважин и точности расчета среднего по площади УГВ, прогнозных оценок УГВ).

Если рассматривать поле УГВ как случайный процесс, для описания его макроструктуры можно использовать математический аппарат, применяемый при изучении случайных функций (поля ветра, геопотенциала, влажности почв, снежного покрова и т.д.). Предварительно необходимо установить закон распределения УГВ во времени и однородность средних значений УГВ для участков территории с различной степенью техногенной нарушенности.

В табл. 2 приведены данные расчета среднеквадратического отклонения $A(z_p)$ по 7-летнему ряду наблюдений на промплощадке.

Таблица 2

Средняя годовая амплитуда колебаний УГВ $A(z_p)$, дисперсия, среднеквадратическое отклонение по типам режима, м

Год наблюдения	Тип режима				
	I	II	III	IV	V
1983	1.27	1.04	0.44	0.75	0.71
1984	1.43	1.00	0.53	0.76	0.78
1985	0.51	0.46	0.20	0.26	0.13
1986	0.71	1.08	0.58	0.99	0.58
1987	0.60	0.57	0.38	0.54	0.28
1988	0.89	0.87	0.48	0.42	0.50
1989	0.83	0.59	0.45	0.44	0.93
Сумма	6.24	5.61	3.06	4.16	3.91
Среднее за период	0.89	0.80	0.44	0.59	0.56
Дисперсия	0.100	0.056	0.012	0.071	0.067
СКО	0.316	0.237	0.113	0.263	0.260

Полученные результаты логично подтверждают проведенное на основе изменения режимобразующих факторов дифференцирование территории, и, следовательно, параметр $A(z_{гр})$ может рассматриваться как один из критериев оценки изменчивости УГВ.

Следует, однако, отметить, что проверка этого признака, произведенная для фазовооднородных уровней по различным типам скважин дает низкий коэффициент корреляции между уровнями смежных лет. Причем значимость (r_x) увеличивается для такого периода по скважинам, характеризующим техногенно нарушенный режим УГВ. За ряд лет изменение $A(z_{гр})$ по ним незначительно. По всей вероятности, необходимо принимать для расчета более короткий промежуток времени, например среднее месячное значение УГВ, а для отдельных участков – декадные значения УГВ, также фазовооднородные.

Объективной характеристикой изменчивости УГВ на территории промкомплекса может служить коэффициент вариации УГВ как в пределах каждого выделенного по изменчивости основных режимобразующих факторов участка, так и всей территории.

Для оценки изменчивости $z_{гр}$ в пределах выделенных участков необходимо сравнение коэффициента вариации УГВ C_{vi} . Результаты расчета для исследованной промзоны приведены в табл. 3.

Таблица 3

Средние значения коэффициента вариации УГВ
за многолетний период C_{vi}

Участок по типу режима	$z_{гр}, м$	$\sigma(z_{гр}), м$	C_v	$\sigma(C_v), м$
I	14.92	0.31	0.02	0.0024
II	20.26	0.33	0.02	0.0018
III	16.25	0.09	0.01	0.0006
IV	18.09	0.20	0.01	0.0012
V	15.00	0.34	0.02	0.0026

Из данных табл. 3 следует, что УГВ за период наблюдений изменялся незначительно. На участках территории промкомплекса с естественным режимом ГВ (участки I, II), вне зависимости от водности года C_v УГВ в два раза выше, чем на участках антропогенного изменения режима УГВ (участки III, IV).

Таким образом, использование C_v для районирования территории промышленного комплекса вполне корректно и перспективно.

На основе изложенного предлагается использовать рассмотренные показатели изменчивости УГВ как объективные критерии для районирования техногенно нагруженных зон промышленных комплексов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бродская. Н.А. Режим грунтовых вод на территории предприятия фосфорных удобрений. – В кн.: Вопросы охраны и рационального использования вод суши. – Л.: изд. ЛГМИ, 1985. – С. 23-28.
2. Исаченко А.Г. Оптимизация природной среды. – М.: Мысль, 1980. – 264 с.
3. Коноплянцев А.А., Ковалевский В.С., Семенов С.М. Естественный режим подземных вод и его закономерности. – М.: Госгеолтехиздат, 1963. – 163 с.
4. Чечкин С.А., Михайлов Л.Е., Русанов Б.Д. Антропогенное влияние на грунтовые воды. – В кн.: Гидрометеорологическое обеспечение народного хозяйства. – Л.: изд. ЛГМИ, 1982. – С. 102-111.

УДК 556.114

Т.И. ПРОКОФЬЕВА (РГГМУ)

К методике обработки гидрохимической информации по территориям промкомплексов

В результате изучения химического состава грунтовых вод, приуроченных к территориям промкомплексов, получают значительный объем информации, обработка и систематизация которой часто представляет собой значительные трудности. В гидрогеохимии для интерпретации гидрохимической информации широко применяются вероятностные модели [2, 3, 5], что вполне объяснимо, так как в общем случае на концентрацию элемента в данной точке объекта оказывает влияние большое число разнообразных факторов, детерминированное описание которых практически невозможно. Кроме того, содержание любого компонента определено с некоторой ошибкой, которую можно рассматривать как величину случайную. В математической модели, описывающей распределение химического элемента в природном объекте, можно выделить детерминированную составляющую, отражающую закономерные изменения химического состава объекта, и случайную, характеризующую случайные изменения химического состава, связанные с воздействием природных факторов.

Для химического состава грунтовых вод, находящихся под техногенным воздействием, наличие детерминированной составляющей

связано прежде всего с существованием различных источников загрязнения и предысторией освоения изучаемой территории. Исключить детерминированную составляющую можно путем разделения объекта на районы, в пределах которых выделяется тот или иной ведущий (обычно техногенный) фактор формирования химического состава грунтовых вод, тогда как все прочие (природные) оказывают воздействие на весь объект в целом.

После разбиения объекта на статистически однородные районы формируется выборочная совокупность случайных величин. Выборка должна быть репрезентативной, достаточного объема, между результатами наблюдений не должно быть значимой автокорреляции.

Обычно гидрохимическое опробование скважин осуществляется от одного до нескольких раз в год. Число скважин наблюдательной сети в основном не превышает нескольких десятков. Таким образом, для отдельных районов промзоны типичным является наличие небольшого (в пределах 10) числа наблюдательных точек и в выборку приходится включать данные опробования за ряд лет с обязательной проверкой значимости связи между величинами, объединяемыми в выборочную совокупность. Как правило, автокорреляционная связь отсутствует уже для соседних лет.

Важным условием применимости методов теории вероятности в гидрогеохимии является требование соблюдения однородности включенных в одну совокупность величин. Показателем такой однородности может служить принадлежность рассматриваемых гидрохимических показателей к одной фазе водного режима.

Сформировав выборки достаточного объема, можно найти закон распределения случайной величины, устанавливающий связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями. Распределение эмпирических вероятностей случайной величины изображают в виде гистограммы или кривой накопленных частот (эмпирическая кривая обеспеченности). В ряде случаев построения эмпирической кривой обеспеченности бывает достаточно для общего представления о закономерностях распределения элемента внутри выделенных однородных районов, о степени различия между районами, об обоснованности разделения территории на отдельные районы по особенностям химического состава грунтовых вод. Для более объективной количественной оценки такого разделения необходимы расчет статистических парамет-

ров (среднего арифметического, стандарта); установление аналитического вида кривой распределения, наилучшим образом описывающей эмпирическую совокупность случайных величин, использование различных статистических критериев для доказательства сходства (различия) между выделенными районами, соответствия эмпирического распределения теоретическому.

Гидрохимическая информация, получаемая на территориях промкомплексов, содержит результаты определения макро- и микрокомпонентов. Из всего комплекса данных необходимо выбрать те, которые обладают наибольшей информативностью для конкретного промкомплекса. Степень изменения состава грунтовых вод относительно фоновых значений или относительно ПДС (предельно допустимая концентрация) оценивается по ряду показателей, которые выбираются с учетом специфичности относительно состава сбросов, преобладания в общем объеме сброса, максимального превышения над ПДК. Для выбранных показателей загрязненности, таких, как, например, сумма минеральных веществ, содержание фтор-иона, нитрат-иона, строятся кривые обеспеченности и рассчитываются основные статистические параметры. Результаты расчетов позволяют проверить обоснованность первоначального разделения территории промзоны на однородные районы, охарактеризовать частоту встречаемости загрязнения различных степени и состава в пределах районов, дифференцировать районы на подрайоны при наличии значимых различий между статистическими параметрами, полученными для отдельных частей выделенных районов, или объединить последние при отсутствии значимых различий между ними. В конечном итоге на основе обобщения единичных показателей загрязненности можно определить комплексный показатель.

В настоящее время отсутствует единый подход к оценке степени загрязненности подземных вод, к выбору показателей оценки их качественного состава [6]. Обзор практически всех используемых сейчас показателей имеется в [4]. Для обобщенной характеристики качества грунтовых вод наиболее перспективным, на наш взгляд, направлением является расчет показателей, позволяющих комплексно оценить состояние воды, которое характеризуется многими компонентами и изменяется во времени и пространстве. Эти показатели получили название коэффициентов загрязненности (КЗ). Обзор различных модификаций КЗ и способов их расчета приведен в [1]. В

общем случае КЗ равен нулю только тогда, когда среди всех измерений качества воды нет ни одного, нарушающего ПДК. Значение КЗ тем выше, чем выше уровень превышения ПДК, чем чаще они нарушаются, чем больше показателей, по которым имеются нарушения и чем на большей части района это наблюдается.

Основной модификацией КЗ является α -показатель:

$$\alpha_{ijn} = \frac{\Delta_{ijn}}{\text{ПДК}_i}, \quad (1)$$

где i – номер показателя; j – номер пункта контроля; n – номер измерения i -го показателя в j -м пункте;

$$\Delta_{ijn} = \begin{cases} (C_{ijn} - \text{ПДК}_i), & \text{если ПДК нарушен;} \\ 0, & \text{если ПДК удовлетворяется;} \end{cases}$$

C_{ijn} – концентрация i -го показателя в j -м пункте при n -м измерении;

$$\text{КЗ} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \alpha_{ijn}, \quad (2)$$

где N_{ij} – общее число измерений всех I показателей в J пунктах.

Коэффициент загрязненности, рассчитанный по (2), является удобным в практическом отношении обобщенным показателем, позволяющим оценивать и сопоставлять между собой уровни загрязненности отдельных участков промкомплекса и тенденции их изменения.

Изложенная концепция обработки и обобщения гидрохимической информации применена для районирования территории ПО «Фосфорит» по показателям загрязненности грунтовых вод. Предварительно исследуемая промзона была разделена на районы, однородные по геолого-гидрогеологическим условиям и по расположению относительно источников техногенного загрязнения и питания грунтовых вод, т.е. на статистически однородные районы. В качестве показателей загрязненности взяты содержания специфических для предприятий по производству фосфорных удобрений компонентов: сульфатов, фторидов, ионов аммония, фосфатов – и интегральный показатель загрязненности – сумма минеральных веществ.

При формировании статистической выборки использовались результаты анализов проб воды, отобранных в период летней межени (август). Для каждого из шести гидрогеологических районов чис-

ло членов выборочной совокупности составило от 20 до 64. Наиболее представительная информация характерна для территории техногенной зоны (III и IV районы) как по числу пунктов наблюдений (скважин), так и по частоте отбора проб. Выборка наименьшего объема имеется для V района, который характеризует участки промышленной зоны с проведенной рекультивацией, где в настоящее время техногенное влияние отсутствует. Данные по I и II районам объединены в одну выборку. Эти районы характеризуются отсутствием влияния техногенных факторов и различаются только по глубине залегания уровня грунтовых вод. Проверка нулевой гипотезы о принадлежности двух выборок к одной генеральной совокупности, осуществленная по критерию Стьюдента, показала равенство средних и дисперсий. На территории промзоны есть еще участок с ненарушенным геологическим разрезом, но с сильно нарушенными гидрогеологическими условиями. Для этого района и района I-II нулевая гипотеза о равенстве средних была отвергнута и данная часть территории выделена в VI район.

В табл. 1 приведены значения некоторых статистических параметров для интегрального показателя загрязнения — суммы минеральных веществ.

Для всех районов построены кривые обеспеченности суммы минеральных веществ, содержания сульфатов, фторидов, ионов аммония и фосфатов. Для первого показателя кривые строились в абсолютном выражении, а для остальных — для отношения концентрации данного иона к предельным значениям его фонового содержания C_f . Последние приведены в табл. 2. Здесь же для сравнения даны значения ПДК, соответствующие требованиям ГОСТ-2874-73 «Вода питьевая».

Таблица 1

Значения среднего арифметического ($\Sigma м.в.$), стандарта (σ) и коэффициента вариации (C_v) для суммы минеральных веществ

Район	Число членов ряда	$\Sigma м.в., г/дм^3$	σ	C_v
I-II	52	0.54	0.225	0.47
III	64	5.1	6.5	1.3
IV	54	2.6	2.0	0.78
V	20	1.1	1.36	1.24
VI	31	0.72	0.25	0.35

Таблица 2

**Предельные значения фоновых концентрации и ПДК
некоторых загрязняющих компонентов, мг/дм³**

Компонент	Фон	ПДК	Компонент	Фон	ПДК
NH_4^+	2.9-5.5	5	SO_4^{2-}	37-100	500
$\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$	0.2-1.0	—	$\Sigma \text{м.в.}$	150-710	1000
F	0.2-1.0	0.7-1.5			

Анализ информации, относящееся к центральной части техногенной зоны (район III) показал, что сумма минеральных веществ составляет выборку из одной генеральной совокупности, а распределение содержания остальных показателей разделяется на две совокупности, которые относятся к разным источникам загрязнения: III¹ – район, прилегающий к шламонакопителю и хранилищу пиритных огарков; III² – район хранилищ фосфогипса.

Кривые обеспеченности, построенные для всех специфических показателей загрязнения грунтовых вод, позволяют установить пределы изменения их концентраций относительно фоновых значений, частоту встречаемости вод различного состава в пределах гидрогеологических районов, характерные различия в степени и составе основных загрязняющих веществ для отдельных участков территории.

Для районов промзоны, выделенных по показателям загрязнения, по формулам (1), (2) рассчитаны районные коэффициенты загрязненности для каждого i -го показателя (α_{ijn}) и общего коэффициента (КЗ), полученного по всем анализируемым показателям. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения общего показателя загрязненности (КЗ) и частных (по i -му показателю α_{ijn}) для различных гидрогеологических районов

Район	Показатель				
	SO_4^{2-}	H_2PO_4^-	F	NH_4^+	КЗ
I-II	0	0.01	0.01	0.14	0.04
III	2.2	22.1	0.45	11.4	9.0
III	0.5	33.6	0.67	29.2	16.1
IV	1.29	23.1	0.92	17.0	10.0
V	0.01	0	0.1	2.3	0.6
VI	0.01	0	0	2.3	0.57

Наименьшие значения КЗ отмечены для объединенного района I-II с ненарушенными природными условиями. Однако и здесь $\text{КЗ} > 0$ в основном за счет повышенного содержания иона аммония, так же

как и для района VI, где при отсутствии прочих видов загрязнения содержание NH_4^+ превышает ПДК более чем в три раза. Наиболее загрязненные районы III¹, III² и IV, где содержание нормируемых веществ в 10-17 раз превышает ПДК. Самый большой вклад в формирование загрязнения грунтовых вод в этих районах вносят фосфаты и ион аммония, их содержание превышает ПДК в 30-35 раз. Интересно отметить невысокий уровень загрязнения в V районе, который приурочен к техногенной зоне с проведенной рекультивацией.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности принятых методов обработки гидрохимической информации. Расчетные значения основных статистических параметров, частных и общих коэффициентов загрязненности могут быть основой для районирования территории по степени техногенной нагрузки, позволяют судить о тенденциях изменения гидрохимической обстановки на территории и, следовательно, давать прогнозные оценки развития экологической ситуации для отдельных участков промзоны.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Белогуров В.П. и др. Применение обобщенных показателей оценки уровня загрязненности водных объектов. – В кн.: Комплексные оценки качества поверхностных вод. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – С. 33-47.
2. Гавришин А.И. Гидрогеохимические исследования с применением математической статистики и ЭВМ. – М.: Недра, 1974. – 145 с.
3. Рыжов П.А., Гудков В.М. Применение математической статистики при разведке недр. – М.: Недра, 1966. – 235 с.
4. Справочник по гидрохимии. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 392 с.
5. Шарапов И.П. Применение математической статистики в геологии. – М.: Недра, 1965. – 260 с.
6. Шерстюк А.Н., Сапрыкина М.П. К оценке загрязненности подземных вод. – В кн.: Комплексные оценки качества поверхностных вод. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – С. 65-71.

УДК 556.18

Г.С. АРСЕНЬЕВ (РГТМУ)

Эколого-гидрологические проблемы рационального использования водных ресурсов

С каждым годом в нашей стране, да и во всем мире, усиливается интерес к вопросам рационального использования водных ресур-

сов и ограничения неблагоприятного воздействия на природные комплексы хозяйственной деятельности человека.

Рационализм подлежит обосновывать технико-экономическими расчетами эффективности в масштабе народного хозяйства, а сохранение жизненных условий – прогнозированием изменений природных комплексов и разработкой соответствующих мероприятий.

Отсутствие методологии и жестко нормированных требований окружающей среды к режиму водных объектов, критериев допустимости того или иного воздействия на природные комплексы, а также методов научно-обоснованной экономической оценки ущерба от недодачи воды отдельным участникам энергетоводохозяйственных комплексов (ЭВХК) сдерживает не только реализацию новых проектов ЭВХК, но и усложняет разработку правил использования водных ресурсов действующих водохранилищ.

Для уменьшения или предупреждения нежелательных явлений в нижнем бьефе практика гидростроительства предусматривает осуществление специализированных и природоохранных попусков из водохранилища. В основу определения их положены следующие условия:

- обеспечение жизнедеятельности реки на участке нижнего бьефа путем создания искусственного водного режима, приближающегося к бытовому режиму в маловодный период;
- максимальное обеспечение требований участников ЭВХК к уровням и расходам в нижнем бьефе.

Критериями при назначении природоохранительного, в том числе санитарного, расхода является половодный сток, имеющий значение для санитарной профилактики русла и поймы реки и необходимой влагозарядки пойменных земель, а также последующий меженный сток, достаточный для разбавления загрязнений, поступающих в реку.

При эксплуатации водохранилищ на крупных и средних реках приходится решать вопросы об обеспечении комбинированного сельскохозяйственного и рыбохозяйственного попуска в нижние бьефы регулирующего сооружения для обводнения поймы, а также и навигационного попуска.

Коснемся некоторых аспектов этой проблемы применительно к правилам регулирования (использования) водных ресурсов водохранилищами. Как уже отмечалось, в летне-осенний период на судоход-

ных реках в нижние бьефы гидроузлов производятся навигационные попуски, чтобы обеспечить требуемый уровень в расчетных створах. Величина попусков устанавливается специализированными проектными институтами на основе их технико-экономического обоснования. При принятой величине попусков устанавливается энергоотдача ГЭС в зимний период. Однако проводимые в процессе эксплуатации водохранилища русловые работы (Ангара, Енисей), а также стихийная добыча стройматериалов из русла (Иртыш у г. Омска, Обь у г. Новосибирска) приводят к «посадке» уровней воды и последующему ухудшению работы городских водозаборов и судоходства. Для компенсации этих последствий требуется увеличение против установленных в проекте расходов воды, подаваемых в нижние бьефы Бухтарминской и Новосибирской гидроэлектростанций в летние и осенние месяцы. Повышение попусков возможно лишь за счет уменьшения зимних расходов воды, т.е. за счет сокращения выработки электроэнергии на ГЭС в самые напряженные по топливно-энергетическому балансу месяцы. Вызывает тревогу и ориентация работников водного транспорта на увеличение габаритов (осадки) речных судов. В отрыве от рассматриваемых водных ресурсов ими первоначально устанавливается экономическая эффективность перевозки грузов в судах повышенной тоннажности (осадки), а затем уже выдвигаются требования по обеспечению этих глубин. Вряд ли, это оправдано на всех реках, особенно на тех, где грузооборот сравнительно невелик, а энергетические потери от увеличения навигационных расходов значительны. В настоящее время в условиях складывающегося дефицита водных ресурсов в ряде водных объектов необходим экономический анализ широкого использования мелкосидящих судов и последующего перераспределения водных ресурсов энергетически используемых рек. Естественно, это требует проведения специальных научных исследований и проектных проработок вариантов режима и установления возможных хозяйственных последствий по сравнению с проектным и естественным режимом водотока.

В период, когда отраслевые требования не предъявляются, производятся природоохранные (экологические) попуски, под которыми подразумеваются минимальные попуски, обеспечивающие жизнедеятельность реки в нижнем бьефе. Проблема этих расходов разработана крайне слабо: нет единого понятия минимально необходимого расхода и подхода к установлению его критериев и величины.

Узаконенное нормирование их также носит формальный характер и вызывает сомнение.

В соответствии с действующими «Методическими указаниями о составе, содержании, порядке разработки, согласования, утверждения, уточнения схем комплексного использования и охраны водных ресурсов» (М.: Минводхоз СССР, 1987) объем природоохранного попуска должен приниматься в размере 75 % от объема половодья года 95%-ной обеспеченности в течение полноводного периода, в остальные месяцы объем попуска должен обеспечивать сохранение минимального среднемесячного расхода года 95%-ной обеспеченности.

Объем санитарного попуска должен обеспечивать расход в реке не менее 75 % от минимального среднемесячного расхода воды года 95 %-ной обеспеченности. Следует заметить, что в изданных в 1975 г. тем же ведомством «Правилах охраны поверхностных вод от загрязнений сточными водами» санитарный попуск устанавливается не менее минимального среднемесячного расхода воды маловодного года 95 %-ной обеспеченности. Таким образом, нормируемые попуски определяются минимальными расходами воды маловодного года обеспеченностью (по стоку) 95 %, при этом забывается о наблюдаемой естественной внутригодовой изменчивости стока. Поэтому разница между значениями минимальных расходов воды, установленных по моделям разных маловодных лет, возможна значительная. Правильнее в этом случае говорить о минимальном среднемесячном расходе воды той или иной обеспеченности за периоды летней и зимней межени или о среднесезонном расходе воды заданной обеспеченности.

Для примера в табл. 1 приведены среднемесячные расходы воды р. Свири в створе Верхне-Свирского гидроузла за период летне-осенней и зимней межени. Анализ таблицы показывает, что бытовому состоянию маловодных лет отвечают в большей степени рекомендуемые автором природоохранные (экологические) попуски.

Не меньшие трудности при разработке правил управления водными ресурсами водохранилищ связаны с отсутствием завершенных научных исследований в области расчетной обеспеченности водоподачи как гаранта удовлетворения требований отраслей народного хозяйства.

В настоящее время обеспеченность водоснабженческих расходов регламентируется общегосударственными нормативами. Обес-

печенность ирригационной водоподачи устанавливается традиционно в диапазоне от 75 % (в зонах неустойчивого увлажнения) до 90 % (в аридной зоне).

Из-за неясности размера ущерба отрасли рыбного хозяйства при снижении объема или повторяемости попуска установление необходимой обеспеченности рыбохозяйственных попусков находится на стадии формирования.

Без какого-либо надежного научного и эколого-экономического обоснования обеспеченность санитарного попуска в соответствие с вышеупомянутыми правилами принята равной 95 %. Из вышеизложенного напрашивается вывод: практика нормирования экологических и других видов попусков в нижние бьефы не отвечает требованиям охраны окружающей среды. Как один из вариантов решения этой проблемы, очевидно, следует рассматривать переход к научно обоснованному экологически безопасному гидрографу как неприкосновенной собственности каждого водного объекта. Объем такого гидрографа, по-видимому, должен изменяться в зависимости от водности года.

Таблица 1

Среднемесячные расходы р. Свири ($\text{м}^3/\text{с}$) в створе Верхне-Свирского гидроузла за период летне-осенней и зимней межени

Характеристика	Месяц								
	VII	VII	IX	X	XI	XII	I	II	III
Вычисленные средние месячные расходы воды 95%-ной обеспеченности за многолетний период Объем — 8.6 км^3	418	415	439	447	345	256	266	343	335
Природоохранные попуски, в том числе и санитарные: нормативные Объем — 6.1 км^3	256	256	256	256	256	256	256	256	256
рекомендуемые, как среднемеженные обеспеченностью 95 % Объем — 9.3 км^3	466	466	466	466	335	335	335	335	335
фактические минимальные зарегулированные расходы воды Верхне-Свирской ГЭС Объем — 8.3 км^3	350	350	350	350	350	350	350	350	350

Что касается установления при этом величины санитарного попуска, то, очевидно, одновременно с ним следует регламентировать и предельно допустимое количество загрязнений, которое при таком попуске может допускаться на протяжении нижнего бьефа. С установлением этих двух критериев попутно будет обосновываться необходимая степень очистки сточных вод, сбрасываемых в гидрографическую сеть, а также размеры затрат на эти цели.

Выводы:

1. Необходимо разработать методологию формирования требований окружающей среды к режиму водных объектов.
2. Сформированный на базе этих исследований экологически безопасный гидрограф попусков, исходя из потребностей здравоохранения и охраны природных ресурсов реки, сохранения санитарных условий и биологического равновесия в водной и окружающей среде, геоморфологии русла и гидрогеологических условий в прибрежных районах, красоты природы и условий рекреации, должен удовлетворяться безоговорочно.

УДК 556.545

Г.Н. УГРЕНИНОВ (РГТМУ)

Оперативный контроль экологического состояния городского участка р. Преголи

Изменение экологического состояния водного объекта носит черты полигармонических колебаний. На фоне многолетнего тренда важнейших экологических показателей прослеживаются сезонные фазы и быстротечные возмущения, связанные, к примеру, с аварийными выпусками хозяйственных и промышленных стоков, а также с возникновением характерных гидрометеорологических ситуаций, вызывающих быстрый отклик водной экосистемы.

Сравнение экологического состояния в начале и конце десятилетнего периода (1982-1992 гг.) свидетельствует о квазистабильности антропогенного пресса на устьевом участке р. Преголи в пределах Калининграда. Такое сравнение произведено с использованием весьма информативного гидробиологического показателя — индекса

сапробности Пантле и Букка [2] и с учетом водности реки за сравнимые периоды.

Зафиксировав, в первом приближении, поступление загрязняющих веществ, можно связать все изменения экологического состояния с гидрометеорологическими, гидрохимическими, гидробиологическими и микробиологическими процессами.

Показатели перечисленных процессов в ряде случаев тесно коррелируют между собой: например, температура воды и растворимость кислорода или содержание кислорода и интенсивность самоочищения воды.

К сожалению, в реальной практике даже гидрометеорологические наблюдения ведутся с частотой, не всегда достаточной для отслеживания короткопериодных возмущений. Отбор проб воды и оперативное проведение гидрохимического анализа производится не чаще одного раза в декаду и преимущественно для фоновых оценок. Таким образом, встает задача проведения оперативного контроля экологического состояния устьевых участков р. Преголи на основе преимущественно косвенных гидрометеорологических показателей.

Одним из наиболее беспокоящих калининградскую общественность явлений следует назвать сероводородное заражение воды на городском участке в летние месяцы. Комплексное обследование условий такого заражения показывает, что определяющим здесь является микробиологический процесс сульфатредукции. Цепочка событий, приводящих к H_2S -заражению воды, примерно такова:

- накопление в воде органики и сульфатов;
- летнее прогревание воды, уменьшающее растворимость кислорода и одновременно активизирующее развитие микрофлоры;
- исчезновение кислорода в результате окисления разного рода загрязняющих веществ, прежде всего легкоокисляемой органики;
- сульфат редукция с выделением свободного сероводорода.

Интенсивная сульфатредукция может привести к истощению сульфатов, поэтому схема оперативного контроля должна учитывать явления, способствующие пополнению сульфатов в воде.

Важнейшее звено в вышеприведенной цепи событий – исчезновение растворенного в воде кислорода, так как с этого момента запущен собственно процесс сульфатредукции. Укажем, что преобладающее число сульфатредуцирующих бактерий – строгие анаэробы.

В качестве одного из косвенных показателей интенсивности процесса сульфатредукции принят показатель водности:

$$z_{t,i} = \frac{Q_{t,i}^{\text{речн}} + \Delta Q_{t,i}}{Q_{t_0,i}^{\text{речн}}}, \quad (1)$$

где $Q_{t,i}^{\text{речн}}$ и $Q_{t_0,i}^{\text{речн}}$ – речные расходы в i -м створе на заданный момент времени t и в первый день t_0 , исчезновения растворенного кислорода в данный сезон; $\Delta Q_{t,i}$ – расход, сформированный вторжением в устье р. Преголи нагонно-сгонной волны.

В качестве речных расходов в данной работе приняты расходы воды р. Преголи при ординате отметки поверхности воды на «морской границе устьевой области реки» [1]; нагонно-сгонный расход $\Delta Q_{t,i}$ имеет знак плюс (при сгоне) или минус (при нагоне).

Относительная форма выражения показателя водности избрана для сопоставимости значений показателя $z_{t,i}$ при различной водности р. Преголи; ключевым в определении значения этого показателя является отнесение суммарного расхода $Q_{t,i}^{\text{речн}} + \Delta Q_{t,i}$ к речному расходу в день исчезновения кислорода ($Q_{t_0,i}^{\text{речн}}$) – таким образом, независимо от абсолютной водности реки при $z_{t,i} < z_{t_0,i}$ и температуре воды $t_{t,i} \geq t_{t_0,i}$ сульфатредукция неизбежна. Введение в показатель $z_{t,i}$ нагонно-сгонной составляющей $\Delta Q_{t,i}$ объясняется тем, что при нагоне подток морских вод обогащает акватории устьевых участков сульфатами.

Как видим, уже на этом этапе оценки экологического состояния возникла необходимость учета температуры воды $t_{t,i}$. Примем значения $t_{t,i}$ в качестве дополнительного косвенного экологического показателя.

По достижении некоторой пороговой стадии процесса наблюдается замедление интенсивности развития микрофлоры, чему способствует изменение внешних условий, например, понижение температуры воды. Реализации повторного цикла сульфатредукции в условиях р. Преголи в 1992г. не удалось проследить, но в 1991 г. зафиксировано начало осеннего процесса HS_2 -заражения, прерванного резким похолоданием, сопровождающимся возрастанием водности и

содержания растворенного кислорода. Предварительные оценки явления таковы: продолжительность периода нарастания содержания сероводорода в воде р. Преголи 57 дней, если вести отсчет времени с момента исчезновения кислорода; устойчивое появление растворенного кислорода в конце лета – начале осени наблюдается через 42 дня после пика сероводородного заражения. Приведенные сведения получены на крайне ограниченном по объему натурном материале – два года наблюдений, хотя предположение о циклическом характере процесса сульфатредукции не столь уж экстравагантный вариант рабочей гипотезы.

В сегодняшнем социально-экономическом состоянии Калининградской области нет оснований ожидать финансирования программ регулярного гидрохимического, гидробиологического и микробиологического мониторинга устьевого участка р. Преголи. По-видимому, сейчас нет альтернативы предлагаемым косвенным методам экологического контроля преимущественно на основе гидрометеорологической информации. С учетом вышеизложенного возможны два варианта зависимостей для контроля содержания сероводорода в воде на момент времени t в i -м створе:

$$u_i = f_{1,i}(z_i, t_i', T_{1,i}) \quad (2)$$

и

$$u_i = f_{2,i}(z_i, t_i', T_{2,i}), \quad (3)$$

где u_i – содержание сероводорода (мг/л); $T_{1,i}$ – продолжительность периода от первого дня исчезновения кислорода на i -й акватории до расчетной даты t ; $T_{2,i}$ – продолжительность периода от даты максимума HS_2 -заражения i -й акватории до расчетной даты t .

Статистический анализ натурных данных позволил определить параметры функций $u_i = f_{1,i}(z_i, t_i', T_{1,i})$ и $u_i = f_{2,i}(z_i, t_i', T_{2,i})$ для одной из важнейших городских акваторий – окончательного слияния рукавов р. Преголи ниже острова Кнайпхоф. Эти зависимости таковы:

за период нарастания содержания HS_2 в воде:

$$u_i = 0.057T_1 - 2.03z_i - 0.0128t_i' + 0.263; \quad (4)$$

за период затухания процесса сульфатредукции:

$$u_i = 17.22 + 0.807z_i - 0.634t_i - 0.242T_2. \quad (5)$$

Полные коэффициенты корреляции зависимостей (4) и (5) составляют соответственно $R=0.88$ и 0.96 , т.е. связи достаточно тесные.

Проведенное исследование показывает, что в ряде случаев косвенные гидрометеорологические показатели экологического состояния достаточно информативны, однако было бы преувеличением принять функции типа (2) и (3) в качестве универсальных для устьевых участков рек, тем более что значимое сероводородное заражение воды, к счастью, не столь частое проявление неблагополучия экосистемы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Михайлов В.Н., Rogov М.М., Чистяков А.А. Речные дельты. Гидролого-морфологические процессы. — Л.: Гидрометеиздат, 1986. — 280 с.
2. Унифицированные методы исследований качества вод. Ч. 3. Методы биологического анализа вод. — М., 1975. — 176 с.

УДК 556.536(247.217)

В.А. СОКОЛОВА,
Е.С. СУББОТИНА (РГГМУ)

К оценке скоростного режима и застойных зон на участке р. Вуоксы

Река Вуокса берет начало из оз. Сайма и через каскад гидростанций несет свои воды в Ладожское озеро. Она оказывает существенное влияние на гидрологический режим и экологическую обстановку района. На участке реки между Светогорской (11-й) и Лесогорской (10-й) гидроэлектростанциями регулярно осуществляются сбросы промстоков от Светогорского ЦБК и ряда других промышленных предприятий, что оказывает неблагоприятное воздействие на окружающую территорию и чистоту бассейна Ладожского озера.

При суточном цикле регулирования стока на рассматриваемом участке реки между гидростанциями возникают застойные зоны, приводящие к замедлению процессов разбавления промстоков и загрязнению Вуоксы. В решении задачи очищения промышленных стоков от примесей существенное значение имеет расчет длины пути, на котором происходит полное перемешивание сточных вод. В ряд формул, используемых в настоящее время для расчета диффузи-

онного перемешивания, в число морфометрических и гидравлических параметров входит значение скорости потока на участке. Причем значение скорости часто берется как осредненное для всего расстояния между 10-й и 11-й ГЭС, что является грубым приближением. Для повышения точности расчета необходимо иметь более полные сведения о распределении скоростей на участке.

Получение данных о скоростном поле, расположении застойных зон и продолжительности этого явления в природных условиях для такого объекта, как р. Вуокса, представляет большие трудности и заставляет искать другие пути решения задачи. Поскольку задача эта весьма трудоемкая и многоплановая, решалась она поэтапно в течение ряда лет.

Летом 1987 г. в рассматриваемом районе работала экспедиция ЛГМИ в составе сотрудников кафедры гидрометрии и студентов. Был получен ряд интересных и ценных материалов, послуживших основой для выполнения данной работы. Отдельные аспекты проблемы были рассмотрены в дипломных проектах студентов С. Кузьмина, В. Барботько, О. Клименко, О. Кадик, М. Богдановой, Ю. Смолиной. Основные итоги работы изложены в научно-технических отчетах, посвященных гидрологическому и гидрогеологическому обоснованию мероприятий по охране водосбора Ладожского озера от загрязнения отходами Светогорского и Сясьского ЦБК.

Исследованный участок р. Вуоксы имеет протяженность 11 км и характеризуется сложной морфометрией, плесы здесь чередуются с перекатами, общее падение реки составляет 17 м. Долина реки не ярко выражена, склоны изрезаны многочисленными оврагами. Берега густо поросли смешанным лесом и кустарником. Пойма отсутствует. Очертание русла реки в плане напоминает вытянутую к югу пальцеобразную излучину, что обусловлено орографическими особенностями местности. Для уточнения сложной картины рельефа во время работы экспедиции была проведена морфометрическая съемка, а также гидрологическое обследование участка р. Вуоксы.

Обработка материалов наблюдений позволила получить морфометрические и гидравлические характеристики по большому числу створов реки. Ширина русла в узких местах составляет 150-180 м в среднем изменяется от 250 до 300 м. Средняя глубина увеличивается от 6-8 м (у 11-й ГЭС) до 18-20 м (в верхнем бьефе 10-й ГЭС). Водный режим реки находится в зависимости от режима регулиро-

вания стока Вуоксинским каскадом ГЭС. Подпор от расположенной в замыкающем створе 10-й ГЭС распространяется на весь исследуемый участок.

Так как в естественных условиях морфометрические и гидравлические элементы потока непрерывно меняются по длине, при выполнении гидравлических расчетов обычно оперируют со средними значениями, которые принимают за действительные характеристики данного водотока. Поскольку измеренные профили водной поверхности отсутствовали, при разбивке на участки приходилось руководствоваться только морфометрическими признаками. Такая разбивка была произведена по признаку относительного постоянства площади живого сечения и ширины в пределах выделенного отсека. Весь участок р. Вуоксы был разбит на 21 отсек (расчетный участок) с помощью серии створов, в пределах каждого из них были намечены 3-4 расчетных поперечника, по которым устанавливались средние значения расчетных параметров. Для каждого отсека были определены ширина русла B , средняя глубина h и площадь водного сечения ω .

Одной из важнейших гидравлических характеристик является коэффициент шероховатости n . Определение значений этого коэффициента для выделенных отсеков представляло особую сложность ввиду почти полного отсутствия сведений об измеренных расходах воды на р. Вуоксе. Назначение n по таблицам по описательным признакам было бы весьма неточным. Основным исходным материалом для определения коэффициентов шероховатости явились обнаруженные в архиве сведения об измеренном расходе воды и профиле водной поверхности на рассматриваемом участке реки в естественном состоянии до постройки гидростанций. Сопоставление продольных профилей дна 1934 г. и 1987 г. позволило сделать вывод о достаточной устойчивости русла, что объясняется геологическими условиями (русло реки врезано в скальные породы и не меандрирует).

Опираясь на архивные данные и материалы полевых наблюдений 1987 г. и используя формулы Шези и Маннинга [3], мы определили значения коэффициентов шероховатости. Для разных отсеков на рассматриваемом участке р. Вуоксы они изменяются от 0.029 до 0.133. Столь большую изменчивость коэффициентов n можно объяснить тем, что р. Вуокса относится к каскадному типу рек, для которого характерны многочисленные чередования плесовых и порожистых участков. Конечно, не следует забывать, что в основу этого

определения положены данные единственного натурного измерения, однако это все же лучше, чем использование таблиц с описательными признаками.

Учет стока на рассматриваемом участке р. Вуоксы осуществляется по водно-энергетическим характеристикам 10-й и 11-й ГЭС. Обе станции в специальном гидрометобслуживании не нуждаются, все необходимые сведения получают через диспетчерскую энергосистемы. Подсчет стока ведется по известной зависимости, связывающей расход воды с мощностью, коэффициентом полезного действия турбины и напором нетто, определенным как разность отметок уровней воды верхнего и нижнего бьефов с учетом потерь на турбинных решетках [1]. Наблюдения за мощностью и напором ведутся ежечасно.

Летом 1987 г. 10-я ГЭС работала в базисном режиме и пропускала постоянный расход воды в среднем равный $640 \text{ м}^3/\text{с}$, на 11-й ГЭС проводилось суточное регулирование. Среднее время добегания на участке составляло около 1.5-2.5 ч. По результатам наблюдений были получены типовые графики ежечасных расходов и уровней в створах 10-й и 11-й ГЭС. Анализ графиков показал, что на фоне общего неустойчившегося характера движения на участке р. Вуоксы между гидростанциями, вызванного суточным регулированием расходов воды, можно выделить два характерных цикла: 1-й – цикл дневного наполнения рассматриваемого участка и 2-й цикл – ночной сработки. Во время 1-го цикла происходит сработка верхнего бьефа 11-й ГЭС и наполнение верхнего бьефа 10-й ГЭС, во время 2-го цикла происходит сработка верхнего бьефа 10-й ГЭС. Цикл наполнения начинается около 6 ч. и продолжается до 22 ч., затем наступает цикл сработки.

Наименьший перепад отметок уровней воды на участке между 10-й и 11-й ГЭС, обусловленный циклом дневного наполнения, наступает в момент времени $t_1=1$ ч. ночи, составляет 0.45 м и сохраняется таким примерно в течение трех часов. Наибольший перепад отметок уровней воды на участке устанавливается в момент t_2 после цикла ночной сработки в период интенсивного нарастания расходов воды на 11-й ГЭС и приходится на 9-10 ч. Перепад отметок уровней воды при этом составляет около 1 м и также сохраняется в течение трех часов. В обоих случаях на участке регулирования стока наблюдался подпор уровней, однако по ряду объективных причин (труд-

недоступность объекта, сложность и большой объем работ) положение водной поверхности в р. Вуоксе измерено не было.

Вопрос о получении мгновенного профиля водной поверхности расчетным путем для рассматриваемого водотока представляет сложную задачу. Прежде всего это связано с тем, что в условиях неустановившегося движения связь между гидравлическими характеристиками потока и силами, действующими на массу движущейся жидкости, выражается системой дифференциальных уравнений Сен-Венана [3], решение которой связано со значительными теоретическими и техническими трудностями. Так как в то время кафедра не располагала ни программой счета, ни электронно-вычислительной техникой, используемой обычно при решении подобных задач, был предложен иной путь для получения кривых водной поверхности и расчета поля скоростей.

На данном этапе задачей расчета явилось определение средних по сечению скоростей течения на участке между 10-й и 11-й ГЭС, соответствующих наименьшему и наибольшему перепадам отметок уровней воды. Для этого необходимо было прежде всего рассчитать координаты кривых водной поверхности для характерных моментов времени t_1 и t_2 регулирования стока. Известно, что если стоит задача об определении кривой водной поверхности в пределах данного участка водотока на какой-то короткий промежуток времени, то можно воспользоваться приемами расчета установившегося неравномерного движения.

В условиях установившегося неравномерного движения уравнение динамического равновесия принимает вид:

$$i - \frac{dh}{dS} = \frac{d}{dS} \left(\frac{\alpha v^2}{2g} \right) + \frac{Q^2}{K^2}. \quad (1)$$

Уравнение (1) в случае естественных русел интегрированию не поддается и приходится обращаться к специальным методам расчета. Наиболее часто в инженерной практике построение кривых водной поверхности осуществляется методом непосредственного суммирования. Здесь наряду с аналитическими способами можно указать целый ряд графоаналитических и графических [3]. При расчетах по методу суммирования водоток с помощью отдельных створов разбивается на участки; для каждого участка устанавливаются средние значения гидравлических элементов.

Для получения координат кривых водной поверхности был выбран метод Н.М. Бернадского. Этот способ требует предварительно построения «опорных кривых» для каждого расчетного участка водотока, причем все эти кривые должны быть совмещены на одном чертеже. Приемы построения «опорных кривых» и методика расчета по ним кривых водной поверхности известны [3], однако практическое осуществление этого для рассматриваемого участка р. Вуоксы явилось довольно сложной и трудоемкой задачей.

«Опорные кривые» можно построить двумя приемами: 1) с помощью кривых связи $Q=f(z)$ для каждого отдельного створа и 2) с помощью графиков функции $\Psi = f(\bar{z})$ для каждого расчетного участка. Поскольку измеренные расходные кривые на участке р. Вуоксы между 10-й и 11-й ГЭС отсутствуют, для построения «опорных кривых» был выбран второй прием.

Значения функции Ψ были найдены с помощью гидравлических расчетов по выражению:

$$\Psi = \frac{\bar{K}^2}{l}, \quad (2)$$

где $\bar{K} = \bar{\omega} \bar{C} \sqrt{\bar{R}}$ – средний модуль расхода воды на участке; $\bar{\omega}$ – средняя площадь живого сечения, $\bar{C}$ – средний коэффициент Шези; $\bar{R}$ – средний гидравлический радиус, l – длина расчетного участка, $\bar{z}$ – средняя отметка уровня воды для расчетного участка.

Таким образом, «опорные кривые» были построены расчетным методом по формулам гидравлики для 21 участка, по которым предварительно были установлены осредненные морфометрические и гидравлические параметры потока. При расчете кривой водной поверхности по «опорным кривым» должен быть известен расход воды в реке Q и отметка уровня воды z в одном из граничных створов рассматриваемого участка водотока. По типовым графикам ежечасных расходов и уровней воды в створе 10-й ГЭС были назначены расчетные расходы и отметки уровня воды для двух характерных моментов времени (t_1 – для дневного наполнения и t_2 – для ночной сработки).

Располагая «опорными кривыми», расходом и отметкой в конце 21-го расчетного участка, мы определили отметки водной поверхности во всех отдельных створах между 10-й и 11-й ГЭС. Отметки уровня воды в нижнем бьефе 11-й ГЭС на те же моменты времени служили, в некоторой степени, для контроля расчета. Сами «опор-

ные кривые» были проверены подобным же образом на материалах наблюдений за ряд характерных по водности лет (многоводных, маловодных и средних по водности). При этом были использованы данные ежечасных наблюдений за уровнями и расходами воды на 10-й и 11-й ГЭС в условиях, близких к установившемуся движению, когда через обе гидростанции проходили одинаковые расходы воды в течение достаточно длительного промежутка времени.

По откорректированным «опорам кривым» были рассчитаны и построены профили водной поверхности для характерных моментов времени. Поскольку отметки уровней воды известны, по морфометрическим зависимостям $\omega = f(\bar{z})$, установленным для каждого расчетного участка, были определены площади сечения и найдены средние по сечению скорости. Для момента времени t_1 скорости течения уменьшаются от 0.28 м/с для 1-го расчетного участка (нижний бьеф 11-й ГЭС) до 0.09 м/с на 21-м расчетном участке (верхний бьеф 10-й ГЭС); для момента t_2 скорости соответственно уменьшаются от 0.46 до 0.16 м/с. Однако это только средние по сечению скорости.

Для более полного представления о скоростном поле рассматриваемого участка р. Вуоксы на следующем этапе решения задачи была предпринята попытка построить планы течений, используя рассчитанные кривые водной поверхности для характерных моментов времени и план участка местности.

Планы течений, как известно, дают представление о распределении скоростей по длине и ширине реки, позволяют подсчитать средние скорости в струях, наметить области пониженных скоростей и застойные зоны. Из известных методов расчета планов течений был выбран метод Бернадского-Проскуракова, основы его изложены в работе [2]. Расчет по этому методу проводится в три этапа с соблюдением условий продольного и поперечного равновесия. Основной расчетной зависимостью является выражение для расхода воды:

$$Q = K_1 \int_0^B \frac{H^{5/3}}{L^{1/2}} dy, \quad (3)$$

где B — ширина реки в рассматриваемом створе; H — глубина на данной вертикали; L — расстояние между двумя соседними горизонталями; y — поперечная координата.

Важной характеристикой в выражении (3) является коэффициент K_1 . Если принять коэффициент шероховатости n неизменным по ширине водотока в данном сечении, то для K_1 получается зависимость:

$$K_1 = \frac{\Delta z^{1/2}}{n}, \quad (4)$$

где Δz – разность отметок двух соседних горизонталей.

По выражению (3) для ряда поперечников производится построение интегральной кривой, по которой выполняется разбивка на струи, затем строится план участка реки в горизонталях и рассчитываются средние скорости потока в струях.

На основе полученной морфометрической и гидравлической информации методом Бернадского-Проскурякова были рассчитаны планы течений для участка р. Вуоксы между 10-й и 11-й ГЭС для двух моментов времени t_1 и t_2 в цикле суточного регулирования стока, характерных для летнего сезона 1987 г. Планы течений строились по 21 расчетному участку, каждый створ разбивался на 8 струй, для которых были определены средние скорости течения. При анализе скоростного поля р. Вуоксы были выделены зоны пониженных скоростей с диапазоном от 0.20 до 0.10 м/с и зоны малых скоростей с диапазоном от 0.10 до 0.01 м/с.

Результаты расчетов интересно было сравнить с данными натурных наблюдений. Как уже отмечалось, детально поле скоростей в природе исследовано не было, но были проведены эпизодические наблюдения по выявлению застойных зон, циркуляционных течений и противотоков. Работы проводились с помощью поверхностных и глубинных поплавков в штилевую (практически) погоду. Полученные сведения о застойных зонах относились к утренним и дневным часам, т.е. к началу перестройки скоростного поля после цикла ночной сработки.

Сопоставление рассчитанного поля скоростей с данными натурных наблюдений показало удовлетворительное качественное совпадение. О количественном же совпадении судить трудно, так как измеренные и рассчитанные величины относятся к несколько разным моментам времени.

В заключение следует отметить, что материалы натурных наблюдений, полученные в экспедиции 1987 г., послужили основой для разработки поэтапной схемы расчета полей скоростей на рас-

смаатриваемом участке р. Вуоксы и в целом показали, что предлагаемый путь решения задачи, хотя и весьма трудоемкий, может привести к положительным результатам. Динамику перестройки скоростного поля потока, очевидно, можно было бы проследить более наглядно, если расчеты полей скоростей выполнить не для двух, а для большего числа моментов времени.

Следует отметить, что натурные наблюдения 1987 г. были выполнены при условиях повышенной водности р. Вуоксы: так, средний расход за август составил $616 \text{ м}^3/\text{с}$ при норме $527 \text{ м}^3/\text{с}$ (за период 1945-1975 гг.). Предлагаемая схема расчета позволяет получить представление о скоростном поле потока для иных гидрологических условий и режимов регулирования стока на участке между 10-й и 11-й ГЭС, что могло бы дать возможность оценить экстремальные (с природоохранной точки зрения) ситуации. Выполненное исследование может быть использовано при гидрогеологическом обосновании мероприятий по защите от загрязнения водосбора Ладожского озера.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гаврилов А.М. Основы учета стока на гидроэлектростанциях. — Л.: Гидрометеоздат, 1965.
2. Проскуряков Б.В. Расчет скоростного поля планового течения руслового потока. — Труды ГГИ, 1972, вып. 192. — С. 66-80.
3. Спицын И.П., Соколова В.А. Общая и речная гидравлика. — Л.: Гидрометеоздат, 1990.

УДК 556.555.2

А.В. БАБКИН (ГГИ)

Исследование перехода бессточного водоема из одного равновесного состояния в другое

Бессточные водоемы: Каспий, Арал, Балхаш, Чад и др. — являются интегральными показателями увлажнения обширных территорий. На протяжении истории развития Земли площади акваторий бессточных озер и отметки их уровней сильно отличались от современных [1], а некоторые из них, например Арал и Каспий, в отдельные периоды соединялись, составляя единую водную систему.

В связи с изменениями климата и ростом населения в бассейнах озер, расположенных, как правило, в засушливых районах, постоян-

но увеличивался расход воды на нужды различных видов хозяйственной деятельности. Особенно велики в бассейнах озер расходы воды на орошение. Например, в бассейне Аральского моря в 70-е–80-е годы настоящего столетия эти расходы превышали $80 \text{ км}^3/\text{год}$ а водные ресурсы впадающих в него рек Амударьи и Сырдарьи составляли $106 \text{ км}^3/\text{год}$.

Поскольку по этим рекам в море поступали главным образом лишь так называемые возвратные воды (сток с орошаемых полей), то воды моря оказались сильно загрязненными, а весь бассейн представляет собой в настоящее время зону экологического бедствия.

Поэтому возникает много научных вопросов, связанных либо со стабилизацией уровня этого моря на его современной отметке, либо с доведением его до определенного значения, соответствующего заданному равновесию между климатическими и антропогенными факторами. При этом, естественно, необходимо оценить хотя бы приближенно время перехода уровня моря в новое равновесное состояние.

В связи с тем, что данные наблюдений за уровнем бессточных водоемов довольно непродолжительны, они не характеризуют всю амплитуду колебаний этих водоемов в прошлом.

Палеоданных о бессточных водоемах обычно недостаточно. Поэтому вполне надежно оценить время перехода уровня водоема с одной отметки на другую при новых соотношениях водного баланса, опираясь только на палеоданные, затруднительно. В настоящей статье сделана попытка подойти к решению рассматриваемой проблемы теоретическим путем.

Следуя Д.Б. Зайкову [2] под уровнем равновесия бессточного водоема будем понимать такую его отметку, при которой приходящая часть водного баланса полностью расходуется на испарение с его акватории, при этом площадь акватории и его уровень остаются неизменными.

Охарактеризуем произвольный бессточный водоем суммарным притоком воды в него P ($\text{км}^3/\text{год}$), испарением с его поверхности E ($\text{км}^3/\text{год}$), площадью акватории S (км^2) и уровнем H (км). Пусть при постоянном значении суммарного притока P водоем либо находится в равновесном состоянии, либо рано или поздно приходит в него.

Введем понятие скорости изменения уровня водоема. Скорость изменения уровня водоема v ($\text{км}^3/\text{год}$) определим как разность меж-

ду суммарным притоком воды и испарением с его поверхности, которая отнесена к площади акватории водоема.

Зададим два произвольных равновесных состояния бессточного водоема:

1) низкое:

$$P=P_1; E=E_1; S=S_1; P=E_1; v=0 \quad (1)$$

2) высокое:

$$P=P_2; E=E_2; S=S_2; P=E_2; v=0 \quad (2)$$

Так как значения характеристик бессточного водоема в равновесном состоянии постоянны, то можно записать $P_2=P_1+\Delta P$; $E_2=E_1+\Delta E$; $S_2=S_1+\Delta S$; $H_2=H_1+\Delta H$; $\Delta P=\Delta E$. Величины ΔP и ΔE , равные разности суммарных притоков воды в бессточный водоем двух равновесных состояний, назовем дополнительным систематическим притоком (систематическим изъятием части притока).

Если рассматриваемый водоем, находящийся в состоянии (1), получает дополнительный систематический приток, то он переходит в состояние (2). Процесс перехода (1) $\rightarrow$ (2) представляет собой изменение значений величин E и S от значений E_1 и S_1 до $E_2=E_1+\Delta E$ и $S_2=S_1+\Delta S$ при фиксированном

$$P=P_2=P_1+\Delta P. \quad (3)$$

Разность конечных и текущих значений величин E и S можно представить в виде:

$$E_2 - E = \alpha \Delta E, \quad (4)$$

$$S_2 - S = \beta \Delta S. \quad (5)$$

Здесь α и β – параметры перехода. Каждому значению E , которое оно принимает в процессе перехода, соответствует свое α , и каждому значению S – свое β . Параметры α и β , выраженные в долях от единицы, характеризуют процесс перехода водоема из одного равновесного состояния в другое. Очевидно, α и β равны единице в начальный момент процесса и нулю в конечный момент (момент достижения нового равновесия).

Используя определение скорости и выражения (3) – (5), получим:

$$v \uparrow = \frac{P - E}{S} = \frac{P_2 - E_2 + \alpha \Delta E}{S_2 - \beta \Delta S} \Big|_{P_2=E} = \frac{\alpha \Delta E}{S_2 - \beta \Delta S}, \quad (6)$$

Процесс перехода (2) $\rightarrow$ (1) представляет собой изменение значений величин E и S от значений $E_2=E_1+\Delta E$ и $S_2=S_1+\Delta S$ до E_1 и S_1 при фиксированном

$$P = P_1. \quad (3')$$

Разность текущих и конечных значений E и S можно представить в виде:

$$E - E_1 = \alpha \Delta E \quad (4')$$

$$S - S_1 = \beta \Delta S. \quad (5')$$

Здесь параметры α и β принимают те же значения и имеют тот же смысл, что и в переходе (1) $\rightarrow$ (2). Используя определение скорости и выражения (3') - (5'), получим:

$$v \downarrow = \frac{P - E}{S} = \frac{P_1 - E_1 + \alpha \Delta E}{S_1 + \beta \Delta S} \bigg|_{P_1=E_1} = - \frac{\alpha \Delta E}{S_1 - \beta \Delta S}. \quad (7)$$

Знак (-) в (7) показывает направление изменения уровня водоема в сторону уменьшения. Для того чтобы представить процесс перехода водоема из одного равновесного состояния в другое во времени, используем аналогию с механикой:

$$v = \frac{dH}{dt}; \quad dt = \frac{dH}{v}; \quad t = \int_{H_0}^H \frac{dH}{v}. \quad (8)$$

Здесь t (год) - время принятия уровнем значения H , отсчитанное с момента принятия уровнем значения H_0 .

Рассмотрим переход водоема из низкого равновесного состояния в высокое. Представим разность конечного и текущего значений уровня водоема в виде, аналогичном (4) и (5):

$$H_2 - H = \gamma \Delta H. \quad (9)$$

Тогда:

$$d(H_2 - H) = \Delta H d\gamma \bigg|_{H_2, \Delta H = \text{const}}, \quad (10)$$

$$dH = -\Delta H d\gamma$$

Подставим (6) и (10) в (8):

$$t \uparrow = \int_{H_0}^H \frac{dH}{v} = - \int_{\gamma_0}^{\gamma} \frac{\Delta H}{\frac{\alpha \Delta E}{S_2 - \beta \Delta S}} d\gamma \quad \left| \begin{array}{l} \Delta H, \Delta E = \text{const} \end{array} \right. = - \frac{\Delta H}{\Delta E} \int_{\gamma_0}^{\gamma} \frac{S_2 - \beta \Delta S}{\alpha} d\gamma. \quad (11)$$

Проделав аналогичные операции для перехода водоема из высокого равновесного состояния в низкое, получаем:

$$t \downarrow = - \frac{\Delta H}{\Delta E} \int_{\gamma_0}^{\gamma} \frac{S + \beta \Delta S}{\alpha} d\gamma, \quad (12)$$

Для того, чтобы вычислить интегралы (11) и (12), необходимо установить связь между α , β , и γ . С этой целью рассмотрим возможные пути перехода водоема из одного равновесного состояния в другое. (1) $\leftrightarrow$ (2).

Первый случай. Для произвольного водоема существуют три возможные пути перехода (2) $\rightarrow$ (1). Кривые перехода наиболее приемлемо описывать функциями вида:

$$E - E_1 = A(S - S_1)^{a'}, \quad (13)$$

При $a'=1$ переход водоема осуществляется по прямой, при $a'>1$ по одной кривой, а при $a'<1$ по другой кривой.

Коэффициент A найдем из условия, что все кривые проходят через точку с координатами (S_2, E_2) :

$$\begin{aligned} E_2 - E_1 &= A(S_2 - S_1)^{a'}, \\ \Delta E &= A \Delta S^{a'}, \\ A &= \frac{\Delta E}{\Delta S^{a'}}, \\ \frac{E - E_1}{\Delta E} &= \left(\frac{S - S_1}{\Delta S} \right)^{a'} \end{aligned} \quad (14)$$

Сравнивая выражения (14), (4) и (5), получаем:

$$\alpha = \beta^{a'}. \quad (15)$$

Так как символ a' характеризует изменение испарения с изменением площади в процессе перехода (2) $\rightarrow$ (1), а испарение являет-

ся важнейшей климатической характеристикой, то назовем его физико-климатическим показателем перехода (2) → (1).

Второй случай. Для произвольного водоема представлены три возможных пути перехода (1) → (2). Кривые перехода наиболее приемлемо описывать функциями вида:

$$E - E_2 = -A(S_2 - S)^a, \quad (16)$$

где a – физико-климатический показатель перехода (1) → (2).

$$\alpha = \beta^a. \quad (17)$$

Связь γ и β целиком зависит от кривой соответствия площади водоема высоте его уровня, т.е. от формы котловины водоема.

Рассматривая возможные кривые соответствия площади произвольного водоема высоте его уровня, аналогичными рассуждениями нетрудно установить:

$$\text{для перехода (2) } \rightarrow (1) \quad \gamma = \beta^{k'} \quad (18)$$

$$\text{для перехода (1) } \rightarrow (2) \quad \gamma = \beta^k \quad (19)$$

Здесь k и k' – физико-морфометрические показатели. Так как переходы (2) → (1) и (1) → (2) будут происходить в одной и той же котловине, то для их описания целесообразно использовать одну и ту же кривую соответствия площади водоема высоте его уровня. При ее преобразовании в соответствии с вышеизложенными рассуждениями в аналитическое выражение, если при этом учитывать симметрии функций вида $y=x^k$ и $y=x^{1/k}$ относительно оси $y=x$, следует полагать, что $k' = 1/k$.

Подставим (17) и (19) в (11):

$$\begin{aligned} t \uparrow &= -\frac{\Delta H}{\Delta E} \int_{\gamma_0}^{\gamma} \frac{S_2 - \beta \Delta S}{\alpha} d\gamma = -\frac{\Delta H}{\Delta E} \int_{\beta_0}^{\beta} \frac{S_2 - \beta \Delta S}{\beta^a} d\beta^k \\ &= -\frac{\Delta H}{\Delta E} \int_{\beta_0}^{\beta} \frac{(S_2 - \beta \Delta S) k \beta^{k-1}}{\beta^a} d\beta, \end{aligned} \quad (20)$$

При интегрировании выражения (20) в общем виде получим:

$$t \uparrow = -k \frac{\Delta H}{\Delta E} \left(\frac{S_2}{k-a} (\beta^{k-a} - \beta_0^{k-a}) - \frac{\Delta S}{k-a+1} (\beta^{k-a+1} - \beta_0^{k-a+1}) \right). \quad (21)$$

Очевидно, что формула (21) не позволяет получить результаты при $k=a$ и $k+1=a$. Интегрирование выражения (20) специально для этих случаев дает:

$$t \uparrow = -k \frac{\Delta H}{\Delta E} \left(S_2 \ln \frac{\beta}{\beta_0} - \Delta S (\beta - \beta_0) \right); \quad (22)$$

$$t \uparrow = k \frac{\Delta H}{\Delta E} \left(S_2 \left(\frac{1}{\beta} - \frac{1}{\beta_0} \right) + \Delta S \ln \frac{\beta}{\beta_0} \right). \quad (23)$$

Подставляя (18) и (15) в (12) и проводя рассуждения, аналогичные анализу перехода (1) $\rightarrow$ (2), для перехода (2) $\rightarrow$ (1) получаем:

$$t \downarrow = -k' \frac{\Delta H}{\Delta E} \left(\frac{S_1}{k'-a'} (\beta^{k'-a'} - \beta_0^{k'-a'}) + \frac{\Delta S}{k'-a'+1} (\beta^{k'-a'+1} - \beta_0^{k'-a'+1}) \right); \quad (24)$$

$$t \downarrow = -k' \frac{\Delta H}{\Delta E} \left(S_1 \ln \frac{\beta}{\beta_0} + \Delta S (\beta - \beta_0) \right); \quad (25)$$

$$t \downarrow = -k' \frac{\Delta H}{\Delta E} \left(\Delta S \ln \frac{\beta}{\beta_0} - S_1 \left(\frac{1}{\beta} - \frac{1}{\beta_0} \right) \right). \quad (26)$$

Формулы (21) – (26) следует использовать не для прогноза нового уровня равновесия, а для описания изменения площади водоема с учетом его климатических и морфометрических особенностей при переходе от одного равновесного состояния к другому. Для определения нового уровня равновесия необходимо провести дополнительное исследование. При этом в наиболее общей форме вопрос следует ставить так: «Какую площадь (уровень) должен принять водоем, чтобы новый суммарный приток воды в него полностью компенсировался бы испарением с поверхности его акватории?»

Исследование зависимости уровней равновесия от поверхностного притока для Аральского моря выполнено Б.Д. Зайковым. Для выявления зависимости площади водоема от времени при различных значениях параметров a , a' воспользуемся его данными: $S_1 = 24100 \text{ км}^2$, $E_1 = 22.89 \text{ км}^3/\text{год}$, $\Delta H = 2 \cdot 10^{-2} \text{ км}$, $S_2 = 64110 \text{ км}^2$, $E_2 = 63.92 \text{ км}^3/\text{год}$.

Рассчитывая время текущего значения β с момента изменения притока воды в водоем (начало процесса), принимаем $\beta_0 = 1$. Так как

в рассматриваемом интервале перехода водоема от отметки уровня с 53.3 до 33.3 м зависимость площади Арала от высоты его уровня по Б.Д. Зайкову линейна, физико-морфометрический показатель к принимался равным единице.

Анализ динамики сокращения площади при переходе (2) $\rightarrow$ (1) показывает, что при меньшем физико-климатическом показателе процесс перехода проходит быстрее, чем при большем. Так как каждый физико-климатический показатель перехода (2) $\rightarrow$ (1) характеризует траекторию перехода (2) $\rightarrow$ (1), а каждая рассмотренная траектория имеет физико-климатический смысл, то можно сделать следующие выводы:

1. Если в процессе перехода водоема (2) $\rightarrow$ (1) в области больших площадей с сокращением площади испарение уменьшается медленнее, чем в области меньших площадей, то такой процесс будет идти быстрее и завершится раньше, чем процесс с пропорциональным уменьшением площади и испарения.

2. Если в процессе перехода водоема (2) $\rightarrow$ (1) в интервале больших площадей с сокращением площади испарение уменьшается быстрее, чем в интервале меньших площадей, то такой процесс будет идти медленнее и завершится позже, чем процесс с пропорциональным уменьшением площади и испарения.

Анализируя динамику роста площади при переходе водоема (1) $\rightarrow$ (2), нетрудно сделать такие выводы:

1. Если в процессе перехода водоема (1) $\rightarrow$ (2) в области меньших площадей испарение с ростом площади растет быстрее, чем в области больших площадей, то такой процесс будет идти медленнее и завершится позже, чем процесс с пропорциональным ростом площади и испарения.

2. Если в процессе перехода водоема (1) $\rightarrow$ (2) в интервале меньших площадей с ростом площади испарение растет медленнее, чем в интервале больших, то такой процесс будет идти быстрее и завершится раньше, чем процесс с пропорциональным ростом площади и испарения.

Следует ожидать, что при установившихся климатических условиях, предполагаемых выражениями (1) и (2), значения годового испарения с поверхности любого бессточного водоема для произвольной площади, взятой в интервале двух равновесных площадей, при переходах (2) $\rightarrow$ (1) и (1) $\rightarrow$ (2) будут близки друг к другу. Это

означает, что траектории переходов $(1) \rightarrow (2)$ и $(2) \rightarrow (1)$ также будут близки друг к другу.

Согласно математическому анализу класса функций, взятых нами для описания траекторий переходов, если траектории $(1) \rightarrow (2)$ и $(2) \rightarrow (1)$ совпадают, то физико-климатические показатели этих процессов принимают обратные значения. Следовательно, если для конкретного водоема $a' > 1$, то $a < 1$, и наоборот.

Это, в свою очередь, означает, что если бессточному водоему свойственен ускоренный переход из высокого равновесного состояния в низкое при систематическом изъятии части притока, то обратный переход из низкого равновесного состояния в высокое будет замедлен. Водоем, обладающий таким свойством, очевидно, является неблагоприятным для разбора части его притока на хозяйственные нужды. И наоборот, если бессточному водоему свойственен замедленный переход из высокого равновесного состояния в низкое, то обратный переход из низкого состояния в высокое будет осуществляться с большей скоростью. Бессточные водоемы, как видим, по своим физико-климатическим свойствам можно разделить на благоприятные для хозяйственного использования их притока и неблагоприятные.

Анализ кривых показывает, насколько трудно восстановить первоначальный уровень Аральского моря. Даже при полном восстановлении объема первоначального притока вод в Арал дефицит его площади через десять лет в лучшем случае сократится лишь на 50 %.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Варуценко С. И., Варуценко И. Н., Клизе Р. К. Изменение режима Каспийского моря и бессточных водосмов в палеовремени. — Н.: Наука, 1987. — 239 с.
2. Зайков Б. Д. Очерки по озераведению. — Л.: Гидрометеиздат, 1960, т. 2. — 238 с.

УДК 556.338

В.А. БЕРЕЖНОЙ, И.В. ФИЛИМОНОВ (РГТМУ)

Долгосрочное загрязнение Ладожского озера подземными водами

Общая, чрезвычайно неблагоприятная экологическая ситуация на акватории Ладожского озера является результатом различных процессов производства на всей территории водосбора (в том числе на территории Финляндии). Однако значительный вклад в процесс

эвтрофикации Ладожского озера вносят и Российские предприятия целлюлозно-бумажной промышленности, расположенные по его периметру и сбрасывающие сотни тысяч тонн органических отходов в сутки. При этом следует подчеркнуть, что негативное техногенное воздействие данных производств на экологическое состояние озера продолжается и после закрытия целлюлозно-бумажных комбинатов (ЦБК). Это можно хорошо проиллюстрировать на примере рассмотрения динамических процессов, протекающих в литосфере и гидросфере в зоне влияния бывшего Приозерского ЦБК (научно-исследовательские работы выполнялись Ленинградским горным институтом и были продолжены в РГГМУ).

Совершенно очевидно, что интенсивность загрязнения природной среды протокдами бывшего Приозерского ЦБК и бытовыми стоками может быть корректно оценена только при детальном рассмотрении всех процессов массообмена и массопереноса в атмосфере, в поверхностных и подземных водах. Однако если физико-химические и бактериологические показатели поверхностного стока в залив Темный контролировались соответствующими химическими лабораториями комбината и города, то вопросы массопереноса и аккумуляции загрязнения в подземных водах вообще не рассматривались.

При построении аналоговой и математической моделей геофильтрации на участке водосбора оз. Дроздово и зал. Щучьего использовалась общепринятая методика решения прямых и обратных задач гидродинамики, а также результаты топогеодезических и геологосъемочных работ ПГО «Севзапгеология» (Соколова и др.), материалы «Гипробум»а (В.Г. Виноградов), данные геофизических и геохимических исследований Горного института (А.Н. Павлов и др):

На первом этапе – построение концептуальной модели процесса массопереноса – нами предполагалось следующее:

- 1) в результате искусственного подъема уровня в заливе Темный на 2.3 м подземные воды стали одним из значимых факторов, контролирующих процесс переноса химического и бактериологического загрязнения из поверхностного «накопителя-отстойника» в акваторию Ладожского озера;

- 2) процесс массопереноса наиболее близок к конвективно-диффузионной схеме. При этом часть химических соединений и бактериологическое загрязнение может рассматриваться в качестве несорбируемых;

3) процессами плотностной конвекции на данном этапе исследований можно пренебречь в связи со стратифицированностью геологического разреза, анизотропией фильтрационных свойств горных пород в разрезе, а также в связи с незначительной разницей в плотности подземных вод и промстоков комбината;

4) водоносные горизонты в пределах водосборной площади имеют повсеместное инфильтрационное питание и разгружаются вдоль береговой линии в акватории озера (заливов);

5) основными источниками загрязнения подземных и поверхностных вод являются промышленные стоки ЦБК, хозяйственно-бытовые стоки г. Приозерска, свалка на водораздельном западном участке рассматриваемой площади, а также золонакопитель городской ТЭЦ.

На втором этапе решения обратной задачи – обоснование системы, ее границ в плане и разрезе и выбора расчетных параметров состояния подземной гидросферы и техногенных источников – был произведен анализ геолого-гидрогеологической и гидрохимической информации, осуществлена отбраковка противоречивых данных и гидродинамическая схематизация условий, выявлены возможные диапазоны изменения параметров состояния системы и составлен план численных экспериментов.

Основные результаты выполненного анализа можно сформулировать следующим образом:

1) грунтовые горизонты в архейских, протерозойских и четвертичных отложениях рассматриваются в виде единого гидравлического потока, ограниченного в плане линией водораздела (границы второго рода) и береговой линией (границы первого рода), а в разрезе свободной поверхностью грунтовых вод и непроницаемыми глинистыми или слаботрециноватыми скальными породами ниже зоны площадного выветривания;

2) питание водоносных горизонтов осуществляется повсеместно и исключительно за счет инфильтрации атмосферных осадков, причем инфильтрационное питание составляет не более 25 % от суммарного количества атмосферных осадков, но и не менее 5-10 %, что примерно соответствует диапазону $3 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$;

3) режим движения подземных вод - безнапорный;

4) разгрузка является рассосредоточенной вдоль береговой линии;

5) диапазон изменения коэффициента фильтрации для терригенных пород (K_1) задается в пределах 0.4 – 6.0 м/сут, а для скаль-

ных (K_2) – на порядок ниже при постоянной мощности горизонтов, равной 10 м;

6) начальное распределение уровня грунтовых вод задается по разновременным данным режимных наблюдений «Гипробум»а с максимальным уровнем 18 м вблизи водораздела;

7) возможное значение коэффициента уводнепроводности (a^*) в терригенных породах принято равным $4.3 \cdot 10^3 - 4.3 \cdot 10^5$ м²/сут (гравитационная водоотдача 0.1–0.001), а в скальных породах – 10^4 м²/сут.

8) моделировался временной интервал в 25 лет от начала заполнения зал. Темного с выделением десяти временных шагов и заданием точности расчета уровней 0.01 м. В процессе численной итерации конечно-разностного уравнения движения планового нестационарного потока использовался метод Гаусса – Зейделя.

В этом случае планом эксперимента предусматривалось проведение не менее восьми вариантов счета с различным заданием определяющих параметров и проверкой правильности решения: по общей конфигурации гидродинамической сетки, сравнением модельных и фактологических уровней в контрольных точках (режимные скважины участка), анализом баланса подземных вод, а также динамикой изменения уровней в контрольных точках при изменяющейся в течение года инфильтрацией (решение гидродинамической задачи на аналоговой технике нами оценивается в качестве приближенного и в данной работе не приводится).

На третьем этапе – построение и идентификация математической модели геофильтрации – вся площадь водосбора была разбита по прямоугольной нерегулярной сетке с числом блоков, равным 44x30, при снижении линейных размеров блоков вблизи границ (береговой линии зал. Темного) до 10-50 м и увеличении размеров на водораздельных участках до 125-250 м. В каждом блоке модели задавались значения уровней подземных или поверхностных вод, значения коэффициентов фильтрации и гравитационной водоотдачи, абсолютные отметки подошвы водоносных горизонтов.

Наилучшее совпадение модельных и фактических данных (по всем уровням проверки результатов) было получено по варианту PR-8, который характеризовался следующими значениями параметров: $K_1 = 5 \cdot 10^{-5}$ м/с (4.3 м/сут); $K_2 = 5 \cdot 10^{-6}$ м/сут (0.4 м/сут); гравитационная водоотдача четвертичных отложений принималась равной 0.1, а скальных пород – 0.01; инфильтрация – 10^{-9} м³/(м²·с) (32 мм/год). Данные

результаты позволяют нам в значительной мере уточнить естественные условия формирования ресурсов подземных вод территории.

Так, полученные модельные значения параметров, которые интерпретируются как наиболее близкие к эффективным, находятся в пределах обоснованных ранее интервалов возможного диапазона изменчивости. Достаточно низкое интегральное по площади инфильтрационное питание (около 8 % суммы осадков) хорошо коррелирует с оценками гидрологов (12 % для данной площади) и не может быть увеличено, так как модельное значение водопроницаемости ($43 \text{ м}^2/\text{сут}$) близко к выбранному максимальному пределу. Полученное значение инфильтрационного питания свидетельствует о резком преобладании поверхностного стока и испарения.

Кроме того, сопоставление модельных данных для условий естественной и нарушенной циркуляции подземных вод свидетельствует о том, что создаваемое искусственное возмущение при заполнении акватории зал. Темного в наибольшей степени сказывается только вблизи от залива. При этом естественный водораздел подземных вод между заливами оз. Дроздово в результате подъема уровня в «накопителе» полностью исчезает.

Данный вариант решения обратной задачи идентификации математической модели гидродинамики в дальнейшем использовался для решения прогнозных задач массопереноса бактериологического и химического загрязнения. Однако поскольку фактологические данные о сорбционной емкости горных пород полностью отсутствуют, полученные результаты носят характер предельных и отражают условия переноса несорбируемого индикатора с учетом эффекта макродисперсии. Подобный подход позволяет оценить направленность и максимально возможную дальность массопереноса за конечный отрезок времени (срок эксплуатации накопителя хозяйственно-бытовых и промышленных отходов или 400 сут. — контрольное время жизни бактерий в подземной гидросфере).

Результаты расчетов дальности и направления массопереноса несорбируемых соединений и бактериологического загрязнения свидетельствуют:

1) о наличии двух зон подземного перетекания из зал. Темный в акваторию Ладожского озера, каждая из которых имеет резко выраженные индивидуальные характеристики: скорости фильтрации и линейные размеры;

2) что наиболее интенсивно фильтрационные потери из зал. Темный происходят через искусственную дамбу и вблизи нее в оз. Дроздове и составляют не менее $900-1200 \text{ м}^3/\text{сут}$ при разнице в уровнях 2.3 м, а при снижении разницы в уровнях за счет поверхностного сброса вод из зал. Темный до 1.0 м расход подземного потока снижается до $300-500 \text{ м}^3/\text{сут}$.

3) бактериологическое загрязнение через искусственную дамбу и вблизи нее проходит в оз. Дроздове практически беспрепятственно, так как время движения составляет от 25-30 дней (фильтрация через дамбу) до 300-350 дней (фильтрация через естественные отложения вблизи дамбы) при суммарной ширине потока перетекания около 200 м. Это приводило и приводит к интенсивному бактериологическому загрязнению акватории оз. Дроздово, так как начальная концентрация в зал. Темный превышает ПДК в миллионы раз;

4) по мере удаления от искусственной дамбы время переноса загрязнения в акваторию оз. Дроздово постепенно увеличивается и, в зависимости от динамической пористости отложений, может составлять 30-50-70 лет, начиная от момента инфильтрации поверхностных вод зал. Темного, т.е. данный процесс непрерывного загрязнения подземных вод происходит в настоящее время и будет происходить в дальнейшем до полной ликвидации поверхностного очага загрязнения;

5) фронт возможного загрязнения подземных вод тяжелыми металлами на площади городской свалки и на участке золонакопителя Приозерской ТЭЦ достигает области разгрузки в подземных условиях за период от 300 до 1200 сут в зависимости от расстояния, что приводит к площадному загрязнению водоносного горизонта по всему пути фильтрации. При этом следует подчеркнуть, что, разгружаясь в поверхностные воды с «ураганным» содержанием органических соединений (отходов Приозерского ЦБК), тяжелые металлы образуют сложные комплекс-ионы, обладающие повышенной миграционной способностью и недостаточно изученными медико-биологическими свойствами;

6) скорость массопереноса и интенсивность площадного загрязнения подземных вод по пути фильтрации во многом определяется значениями активной пористости горных пород и коэффициента поперечной гидродисперсии, что предопределяет необходимость их

определения в процессе дополнительных геолого-гидрогеологических исследований.

Таким образом, на территории водосбора оз. Дроздово — зал. Щучьего имеется площадной долговременный очаг загрязнения природной среды значительной интенсивности. Данный очаг в настоящее время включает: поверхностные воды зал. Темного и части зал. Щучьего, подземные воды и часть литосферы, удерживающей химическое загрязнение за счет биоаккумуляции в почвенном слое и сорбции на глинистых частицах грунтов. При этом если предположить возможное внедрение загрязненных подземных вод в грунтовый горизонт вдоль всей береговой линии за счет более высокой плотности, приближенные аналитические расчеты показывают, что суммарный объем загрязненных подземных вод превышает объем поверхностных вод зал. Темного. Поэтому инженерные мероприятия, направленные на рекультивацию земель данной территории и восстановление экологической безопасности, должны обязательно учитывать разнообразие видов и форм загрязнения природной среды, а также долговременный характер массопереноса загрязнений в подземной гидросфере.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бонем-Картер Г., Харбук Дж. Моделирование на ЭВМ в геологии. М.: Мир, 1975.
2. Лукнер Л., Шестаков В.М. Моделирование миграции подземных вод. — М.: Недра, 1986.

УДК 556.383:556.388

*В.А. БЕРЕЖНОЙ (РГГМУ),
Б. САДЕК (ГОС.УНИВЕРСИТЕТ, АЛЕППО, САР),
В.А. ФЕДОРОВА (СПГИ)*

Оценка естественных и искусственных ресурсов подземных вод Ижорского плато гидродинамическим методом

Наблюдаемая в последние годы тенденция ухудшения качества поверхностных вод Ладожского озера, накопление на его дне высокотоксичных техногенных отложений, ускоряющих процесс эвтрофикации несмотря на закрытие некоторых производств, предопреде-

ляют необходимость проведения научно-исследовательских и опытно-технологических работ по двум основным направлениям:

- прогнозная оценка естественных ресурсов и запасов подземных вод на наиболее перспективных площадях с целью выявления возможных альтернативных источников водоснабжения, а также оценка перспективности внедрения на данных площадях систем искусственного пополнения ресурсов и запасов подземных вод;

- разработка и реализация комплексной программы по оптимизации природопользования на территории водосбора Ладожского озера и по восстановлению естественных гидрогеохимических и термодинамических условий в акватории.

В качестве наиболее вероятного альтернативного источника водоснабжения г. Санкт-Петербурга или отдельных его районов уже давно рассматриваются подземные воды трещинно-пластовых закарстованных карбонатных и терригенных пород Ижорского плато, расположенного к юго-западу от города. Более того, подземные воды Ижорского плато уже используются для городов Петродворца, Пушкина, Павловска, Крондштата и др. В настоящее время разведано девять относительно крупных участков, шесть водозаборов эксплуатируется. Однако разведанные эксплуатационные запасы подземных вод по промышленным категориям составляют менее $500000 \text{ м}^3/\text{сут}$, что составляет менее 10 % необходимой городу водопотребности. В то же время при оценке естественных ресурсов (подземного стока), проведенной разными авторами, полученные значения разнятся в несколько раз. Поэтому на первом этапе исследований представлялось целесообразным решение данной задачи геофильтрации методом математического детерминированного моделирования с критическим отношением к использованным ранее методам гидрогеологической схематизации условий, выбору определяющих параметров состояния гидросферы, ее связи с атмосферными процессами и обоснованию граничных условий. На втором этапе численных экспериментов планировалась проверка перспективности внедрения искусственных методов регулирования подземного стока, в том числе родникового стока вдоль северной границы плато (вдоль глинта).

Подобная экспертная оценка ресурсной базы Ижорского плато представляет собой многоплановую задачу, решение которой должно базироваться на всей совокупности имеющейся информации и возможно только с использованием современных вычислительных

средств и программ с поэтапным и постадийным проведением численных экспериментов и обязательным соблюдением основных принципов и методов гидродинамической схематизации с одной стороны, соблюдением контроля полученных результатов на разных уровнях – с другой.

В наиболее общем виде последовательность решения задачи включала:

- сбор, анализ, обобщение и отбраковку результатов ранее проведенных работ;
- определение системы и разработку концептуальной модели формирования естественных ресурсов и запасов подземных вод;
- гидрогеологическую и гидродинамическую схематизацию условий, обоснование выбора начальных и граничных условий;
- выбор численной программы моделирования, построение численной модели и решение обратной задачи геофильтрации с контролем результатов и определением балансовых составляющих режима;
- решение прогнозных задач гидродинамики на двух уровнях реализации: при стандартной схеме отработки месторождений подземных вод и с учетом возможного искусственного регулирования подземного стока (при этом следует отметить, что разнообразие технологических решений данного вопроса предопределяет необходимость многофакторного численного эксперимента).

Как и следовало ожидать, наиболее сложным и трудоемким был этап идентификации математической модели, однако определенные сложности возникали и при реализации каждого из них. При этом характерно, что сложность выполнения первого этапа была вызвана избыточным объемом информации, что для геологических объектов наблюдается довольно редко, а также ее противоречивостью (например, данные об абсолютных отметках некоторых постоянно действующих источников свидетельствовали, что они располагаются выше земной поверхности).

Однако следует подчеркнуть, что анализировался весь блок информации: от гидрологических и метеорологических данных до результатов специализированных съемок (карстовой, ландшафтной и др.) и опытно-фильтрационных работ на участках проведения геологоразведочных изысканий, и хотя при анализе результатов многие из них были отбракованы, например, данные опробования скважин с резко выраженным несовершенством по степени и/или характеру

вскрытия продуктивных зон, непредставительные ряды гидрологических наблюдений, тем не менее многие спорные вопросы не могли быть решены без оценки их значимости в процессе математического моделирования обратной задачи геофильтрации. Подобная ситуация предопределила необходимость отказа от классической схемы решения данной задачи и построения плана численных экспериментов в матричной форме с заданием отдельных параметров состояния системы и граничных условий на двух-трех уровнях с обязательной проверкой корректности предшествующих оценок, выполненных другими авторами. В частности, необходима проверка возможности использования принципа усреднения параметров, задания схемы с ленточным распределением водопроницаемости (по лентам тока), а также ограничения моделируемой системы фиктивной границей подземного водораздела. Поэтому выполненное нами численное моделирование геофильтрации на территории Ижорского плато не только являлось многоплановым и многовариантным, но и включало несколько концептуальных моделей процесса формирования естественных ресурсов подземных вод.

На основании данных гидрологических и метеорологических работ в годы 95 %-ной и 50 %-ной обеспеченности, гидрогеологической и карстовой съемок, гидрогеологических (в том числе разных видов опытно-фильтрационных) работ, площадных геофизических исследований по картированию зон трещиноватости, а также каротажных геофизических работ, в качестве переменных параметров состояния (на двух-трех уровнях) нами задавались: инфильтрационное питание, а также характер его распределения в пространстве и времени; коэффициенты водопроницаемости, водоотдачи, уровнепроводности и пористости, конфигурация зон родниковой разгрузки, общая моделируемая площадь системы, а также режим источников на северной границе плато и их суммарное количество.

Всего при решении обратной задачи геофильтрации было реализовано более 40 вариантов расчета с различным заданием начальных и граничных условий. Проверка точности решения обратной задачи контролировалась путем сопоставления модельной и фактической гидродинамических сеток движения, модельных и фактических уровней в режимных скважинах территории (более 20 контрольных точек), балансового распределения источников формирования естественных ресурсов подземных вод, а также динамики из-

менения уровней в контрольных скважинах и расходов источников при изменяющейся во времени инфильтрации и понижении уровней при откачках. Подобная многократная проверка результатов решения обратной задачи позволила резко снизить число возможных вариантов решения, в той числе путем отбраковки некорректных концептуальных моделей при получении первых результатов счета. Так, например, уж первые результаты по реализации концептуальных моделей других авторов показали их несостоятельность:

1) при усреднении фильтрационных параметров по площади, несмотря на достаточно высокую сходимость гидродинамических сеток движения, балансовые оценки свидетельствуют, что расчетные значения инфильтрационного питания, составляющие всего 5-8 мм/год, резко противоречат гидрологическим оценкам (занижены не менее чем на два порядка);

2) при задании ленточного распределения водопроводимости расчетная и фактологическая гидродинамические схемы движения сильно отличаются друг от друга.

Поэтому основное внимание было уделено выявлению наиболее вероятного инфильтрационного питания ордовикского водоносного комплекса (в годы 95 %-ной и 50 %-ной обеспеченности), гидродинамической значимости поверхностных форм карста и заболоченности отдельных участков, распределению водопроводимости, а также определению усредненных значений пьезопроводности и водоотдачи. А на второй стадии – решение прогнозной задачи по оценке перспективности различных методов искусственного регулирования подземного стока.

В результате прогонки более 20 вариантов счета в стационарных и нестационарных условиях циркуляции подземных вод, многоступенчатой проверки данных и выбора оптимального варианта задания граничных и начальных условий, расчетные параметры которого минимально отличаются от фактических, можно сделать следующие выводы:

– среднегодовое значение инфильтрационного питания ордовикско-девонского водоносного комплекса при принятом диапазоне изменения водопроводимости не может превышать 30 % от количества атмосферных осадков; некорректная интерпретация факта отсутствия на территории поверхностных водотоков приводит к систематическому завышению ресурсов подземных вод в 1.5 – 2.0 раза.

При этом результаты моделирования свидетельствуют, что гидродинамическая значимость проявления локальных трещинных зон с карстовыми формами на поверхности является относительно слабой: учет данных форм приводит к увеличению расчетных значений инфильтрации не более чем на 3 – 7 % по сравнению с соседними участками, но на участках накопления болотных отложений инфильтрационное питание должно быть снижено не менее чем на два порядка. Как следует из результатов моделирования, в зависимости от строения зоны аэрации расчетные значения инфильтрационного питания варьируют в пределах $1.5 \cdot 10^{-9}$ до $4.0 \cdot 10^{-11}$ м/с, составляя в среднем 100-110 мм в годы 95 %-ной обеспеченности и до 250 мм в годы 50 %-ной обеспеченности;

– после многократных изменений распределения значений водопроводимости в отдельных блоках и/или на участках, вызываемых как изменениями в оценке естественной разгрузки на территориях водосбора рек Шингарки, Стрелки, Ижоры, Сумы, Сисы и других, так и необходимостью корректировки математической модели для получения максимальной сходимости расчетных и фактологических данных, распределение водопроводимости по площади приобрело сложное пятнисто-неоднородное строение с сохранением общей тенденции снижения фильтрационных свойств от участков разгрузки к водоразделу. Как показали результаты численных экспериментов, коэффициент водопроводимости варьирует в пределах 2000-9000 м²/сут;

– значения водоотдачи корректировалось в процессе численных экспериментов только нестационарного режима фильтрации с изменяющимся в течение года инфильтрационным питанием. В результате сопоставления модельных данных с динамикой изменения уровня режима в наблюдательных скважинах в естественных и нарушенных условиях циркуляции, а также режима источников в качестве наиболее вероятного значения нами принято 1.5 %.

Наилучшее совпадение модельных и натурных данных было получено для нескольких вариантов расчета, причем для каждого были проведены балансовые оценки условий формирования естественных ресурсов подземных вод. Результаты показывают (для вариантов с максимальной сходимостью), что ресурсы подземных вод в карбонатных отложениях Ижорского плато составляют не более 11-14 м³/с в годы 95 %-ной обеспеченности и возрастают до 24-28 м³/с в

годы 50 %-ной обеспеченности, т. е. территория имеет значительные резервы, которые можно вовлечь в процесс эксплуатации, однако их недостаточно для полного обеспечения городской водопотребности.

В этих условиях прогнозная гидродинамическая задача включала оценку не только ожидаемого понижения уровней в существующих и проектных водозаборах, но и перспективности применения различных технологических схем регулирования подземного стока, в том числе родникового.

Организация систем водоснабжения за счет квитиования нисходящих и восходящих источников подземных вод за столетия применения данной технологической схемы практически не претерпела никаких существенных изменений. Однако в последние годы в связи с ростом дефицита воды в засушливых районах и вблизи крупных населенных пунктов в районах с гумидным климатом интенсивно развиваются новые технологии, базирующиеся на методах искусственного восполнения ресурсов и запасов подземных вод и/или на методах изменения гидродинамической схемы движения за счет создания специальных гидротехнических сооружений. Данный подход к регулированию режимов питания, циркуляции и разгрузки подземных вод возможен и на водозаборах родникового стока, но с некоторыми изменениями и дополнениями, вызванными как особенностями режима эксплуатации, так и специфическими ограничениями, накладываемыми экологическими требованиями.

В этом случае регулирование режима подземного стока включает в себя как схемы искусственного пополнения ресурсов и запасов подземных вод – активные формы воздействия, так и технологические схемы, изменяющие распределение потоков подземных вод в плане и разрезе без изменения условий питания – пассивные формы воздействия. Задание целевой функции регулирования стока при активных формах воздействия позволяет рассматривать процесс эксплуатации в качестве системы управления.

При этом основным принципом регулирования является перераспределение внутригодового подземного стока в сторону его снижения во время паводков и увеличения в меженные периоды при обязательном росте суммарного среднегодового расхода.

Как правило, методы регулирования режимов родникового стока и искусственного пополнения запасов и ресурсов подземных вод подразделяются на четыре группы:

– создание в пределах области влияния источников поверхностных гидротехнических сооружений маганизирования и/или инфильтрации;

– создание на разном удалении от родников подземных систем водоотбора, пополнения (нагнетания) и/или подпора;

– искусственное изменение условий выхода родников на дневную поверхность путем снижения или увеличения фильтрационных сопротивлений непосредственно на границе разгрузки;

– комбинированные методы воздействия.

Прогнозное моделирование осуществлялось на базе решения обратной задачи идентификации параметров состояния и включало все четыре направления возможного техногенного воздействия на подземный сток. Однако данный аспект решения прогнозной задачи оценивался нами только на уровне приближенных оценок. Это позволило при проведении численных экспериментов ограничить площадь моделируемой системы исключительно территорией водосбора р. Стрелки и оценивать перспективность применения различных технологических схем по динамике изменения расхода источников применительно к климатическим условиям года с 95 %-ной обеспеченностью: начало инфильтрационного питания приходится на вторую декаду марта с резким ростом в апреле и постепенным снижением в последующие месяцы и полным прекращением поступления инфильтрационных вод в январе и феврале.

В результате численных экспериментов по оценке перспективности различных технологических схем регулирования подземного стока можно сделать ряд выводов:

– задание на модели непроницаемых и/или слабопроницаемых противофильтрационных экранов, расположенных вверх по потоку подземных вод, не приводит к сколь-нибудь значимым изменениям подземного стока;

– при моделировании скважинных систем нагнетания паводковых вод, маганизируемых в накопителях атмосферных и поверхностных вод, возможно увеличение подземного стока в меженные периоды от 4 до 18 % в зависимости от продолжительности и расхода нагнетания, а также в зависимости от расстояния между родниками и линейным рядом нагнетательных скважин;

— при создании инфильтрационных бассейнов облегченного типа, расположенных на участках V-образных долин ручьев, расчетное увеличение подземного стока также составило от 4 до 15-18 %;

— в вариантах искусственного изменения давления в воронке родников (за счет создания систем каптажа) получены максимальные значения прироста расхода потока, достигающие 33 %.

Таким образом очевидно, что выбор систем искусственного регулирования подземного стока может быть осуществлен только после проведения дополнительных исследований. Однако при существующих климатических, геоморфологических и геолого-гидрогеологических условиях естественные ресурсы подземных вод не могут быть увеличены более чем на 1/3 и, соответственно, заявленная водопотребность Санкт-Петербурга не может быть обеспечена и в этом случае.

Поэтому решение проблемы поиска альтернативных источников водоснабжения города представляется возможным только при комплексном подходе и решении некоторых частных вопросов:

1. Необходимо разделение систем водоснабжения города на питьевое и техническое с ориентацией на подземные воды в первом случае и на поверхностные воды (включая воды Финского залива) во втором.

2. Целесообразно проведение дополнительных геологоразведочных работ на Ижорском плато, направленных на изучение параметров состояния геологической среды на участках возможного строительства инфильтрационных сооружений для пополнения естественных ресурсов и запасов подземных вод.

3. Переориентация технологических режимов производства на схемы с возвратным (оборотным) водоснабжением.

4. Поиск дополнительных источников питьевого водоснабжения в межморенных отложениях четвертичного возраста.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочеввер Ф.М., Лакишин Н.Н., Орадовская Н.Е. Защита подземных вод от загрязнений — М.: Недра, 1979 г.
2. Лукнер Л., Шестаков В.М. Моделирование миграции подземных вод. — М.: Недра, 1986.
3. Методы охраны подземных вод от загрязнения и истощения / под ред. И.К. Гавич. — М.: Недра, 1985.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Ю.А. Федоров. Биографическая справка.....	4
Ю.А. Федоров и гидрометеорологические техникумы России.....	7
Федоров Ю.А. Космический мониторинг водных объектов суши.....	10
Чечкин С.А. Индикационные признаки антропогенных изменений грунтовых вод.....	14
Владимиров А.М. Экология и водные ресурсы.....	19
Прокофьева Т.И., Бродская Н.А. Моделирование водного баланса – метод оценки техногенной нагрузки на грунтовые воды.....	24
Чечкин С.А., Бродская Н.А. Районирование зон промышленных комплексов по показателям антропогенных изменений грунтовых вод.....	32
Прокофьева Т.И. К методике обработки гидрохимической информации на территории промкомплексов.....	37
Арсеньев Г.С. Эколого-гидрологические проблемы рационального использования водных ресурсов.....	43
Угрюминов Г.Н. Оперативный контроль экологического состояния городского участка р. Преголи.....	48
Соколова В.А., Субботина Е.С. К оценке скоростного режима и застойных зон на участке р. Вуоксы.....	52
Бабкин А.В. Исследование перехода бессточного водоема из одного равновесного состояния в другое.....	60
Бережной В.А., Филимонов И.Г. Долгосрочное загрязнение Ладожского озера подземными водами.....	68
Бережной В.А., Садек Б., Федорова В.А. Оценка естественных и искусственных ресурсов подземных вод Ижорского плато гидродинамическим методом ..	74

Научное издание

**ЭКОЛОГИЯ И ОХРАНА
ПРИРОДНЫХ ВОД**

Сборник научных трудов, вып. 122

Редактор И.Г. Максимова
ЛР № 020309 от 30.12.96

Подписано в печать 28.09.2000 г. Формат 60х90 1/16
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ.л. 5,3
Уч.-изд.л. 6,2 Тираж 120. Зак. 127
РГТМУ. 195196, СПб, Малоохтинский пр., 98.
Отпечатано ООО «Концепт»
