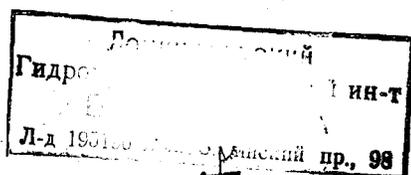


ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ГИДРОЛОГИИ

Сборник статей

Под редакцией
д-ра геогр. наук, проф. А. А. СОКОЛОВА



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1979

Дан краткий обзор вклада ученых Государственного гидрологического института в развитие гидрологической науки и обеспечение запросов народного хозяйства за последние 10—15 лет. Рассматриваются вопросы совершенствования гидрометрических измерений, внедрения общегосударственной системы учета вод и ведения водного кадастра, качественных изменений водных ресурсов под влиянием хозяйственной деятельности, взаимосвязи элементов водного баланса речных бассейнов, применения аэрокосмических методов исследований в гидрологии и др.

Представляет интерес для широкого круга гидрологов, специалистов смежных наук, а также студентов и аспирантов вузов.

306782

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник, подготовленный учеными Государственного ордена Трудового Красного Знамени гидрологического института (ГГИ), посвящается 60-летию со дня его основания. Материалы, помещенные в сборнике, однако, не претендуют на освещение многосторонней деятельности института за истекшие шесть десятилетий. Такой обзор сравнительно недавно был дан в работе А. А. Соколова и А. И. Чеботарева «Очерки развития гидрологии в СССР». Поэтому в сборнике дан лишь краткий обзор вклада ученых института в развитие гидрологической науки и обеспечение запросов народного хозяйства за последние 10—15 лет.

В сборнике рассмотрены проблемы гидрологии, над решениями которых в настоящее время работают ученые ГГИ. Одной из них является перестройка системы наблюдений, сбора, обработки и обобщения гидрологической информации, совершенствование методов измерений, повышение их точности, внедрение общегосударственной системы учета вод и ведения водного кадастра, охватывающего все виды вод, составляющих в целом единый государственный водный фонд. В соответствии с решениями Партии и Правительства эта система должна связать воедино существующие новые ведомственные службы учета и кадастра Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды (по поверхностным водам), Министерства геологии СССР (по подземным водам) и Министерства мелиорации и водного хозяйства СССР (по использованию вод в народном хозяйстве).

В связи с возрастанием влияния антропогенного фактора на гидрологические явления и процессы в сборнике рассмотрены гидрологические аспекты качественных и частично количественных изменений водных ресурсов под влиянием хозяйственной деятельности. Более подробно эта проблема будет рассмотрена в монографии И. А. Шикломанова «Антропогенные изменения водности рек», в которой обобщены результаты обширных исследований в этой области, выполненных ГГИ и другими учреждениями за последние годы.

Из многих проблем гидрологии, связанных с гидрологическим обоснованием крупнейших современных народнохозяйственных мероприятий, в сборнике рассматриваются лишь две — проблема межзонального перераспределения речного стока и проблема преобразования водного и теплового балансов мелиорируемых земель Нечерноземной зоны РСФСР.

Наряду с проблемами практического приложения гидрологической науки в сборник включен ряд статей, в которых поднимаются некоторые теоретические и методические вопросы современной гидрологии. На новом, более современном материале, чем это было сделано в свое время Э. М. Ольдекопом, рассмотрена взаимосвязь элементов водного баланса речного бассейна. Достигнутые в последние годы существенные успехи в области измерения и расчета атмосферных осадков, испарения и других элементов водного баланса позволяют сделать новый шаг на пути изучения круговорота воды в природе.

Значительное место в сборнике уделено быстро развивающейся в наши дни аэрокосмической гидрологии, опирающейся на дистанционные измерения элементов гидрологического режима с помощью авиасредств и спутников, а также новой для советской гидрологической науки проблеме влияния урбанизации на водный баланс.

Директор ГГИ, заслуженный деятель науки
и техники РСФСР, д-р геогр. наук,
проф. А. А. Соколов

А. А. Соколов

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ — НАРОДНОМУ ХОЗЯЙСТВУ

6 октября 1979 г. исполняется 60 лет со дня основания Государственного гидрологического института (ГГИ). За истекшие десятилетия из небольшого научного учреждения, первоначально размещавшегося на квартире его основателя и первого директора В. Г. Глушкова, институт превратился в крупный центр современной гидрологической науки, широко известный в нашей стране и за рубежом. В настоящее время в его составе более 20 научных отделов и лабораторий по различным разделам гидрологии, отделение водного кадастра с вычислительным центром, экспериментальные базы (Валдайская гидрологическая лаборатория им. В. А. Урываева и Главная экспериментальная база ГГИ в пос. Ильичево с комплексом лабораторий), центральная научно-техническая библиотека с обширным фондом отечественной и иностранной литературы по гидрологии и другие подразделения.

Учеными института выполнены многие фундаментальные исследования, в результате которых гидрология из небольшого раздела физической географии, каким она была в первые годы советской власти, превратилась в обширную область научных знаний, тесно связанную со многими другими научными дисциплинами и всеми отраслями народного хозяйства. Стимулом для развития гидрологической науки послужил бурный рост производительных сил в нашей стране и всевозрастающее значение водных ресурсов в различных сферах жизни и деятельности нашего общества.

Наряду с исследованиями физических и географических закономерностей гидрологических явлений и процессов коллектив института выполнил большие работы, непосредственно связанные с изучением водных ресурсов и гидрологическим обеспечением самых разнообразных водохозяйственных мероприятий.

Первоначально деятельность ГГИ, исходя из представлений В. Г. Глушкова об единстве природных вод, распространялась на все их виды — моря, реки, озера, подземные воды. В дальнейшем под влиянием возрастающих требований народного хозяйства и

расширения сферы деятельности гидрологической науки из состава ГГИ выделились самостоятельные институты по отдельным видам водных объектов и хозяйственного использования водных ресурсов. В связи с этим исследования ГГИ в последние десятилетия были сосредоточены главным образом на изучении поверхностных вод. Тем не менее ГГИ, являясь в области гидрологии центральным научным учреждением в стране, сохранил тесные связи с образованными на его базе научными организациями. В целях объединения усилий ученых и специалистов разных ведомств для решения наиболее важных проблем гидрологии ГГИ ведет большую работу по междуведомственной координации научных исследований в этой области.

В связи со все увеличивающимся потреблением воды во всем мире в последние годы проблемы гидрологической науки приобретают все более глобальный характер. В силу этого расширяется международное сотрудничество ученых и специалистов по весьма обширному кругу вопросов, связанных с рациональным использованием и охраной водных богатств нашей планеты. Ученые ГГИ принимают деятельное участие в разработке проектов учрежденной ЮНЕСКО Международной гидрологической программы (МГП), в активном сотрудничестве стран — членов СЭВ по многим аспектам гидрологии и водного хозяйства.

В краткой статье нет возможности осветить весь круг проблем, являвшихся предметом работ института за шесть десятилетий его деятельности. Можно отметить лишь некоторые, наиболее важные из них, в разработку которых вклад ученых института является наиболее значительным.

Разработка методических основ единой системы государственного учета вод

До Великой Октябрьской социалистической революции в России имелась лишь сравнительно небольшая сеть уровенных постов на больших реках и озерах, обеспечивавшая в основном интересы судоходства.

Уже в первые годы после организации института была выдвинута, а в последующем претворена в жизнь идея создания в нашей стране, в условиях планового социалистического хозяйства с его общественной собственностью на землю и воду, принципиально новой опорной общегосударственной гидрологической сети станций и постов. Обосновывая это предложение, институт исходил из необходимости гидрологического обеспечения не отдельных, узковедомственных интересов, а требований всех отраслей народного хозяйства, так или иначе связанных с использованием водных ресурсов страны.

Большое значение при этом имел вывод, сделанный учеными ГГИ о возможности не сплошного, а выборочного изучения водного режима так называемых типичных (репрезентативных) вод-

ных объектов, данные наблюдений на которых можно было затем использовать для выявления общих территориальных закономерностей. Важнейшим преимуществом созданной на этой основе опорной гидрологической сети является возможность распространения характеристик гидрологического режима в пределах однородного в физико-географическом отношении региона на неизученные или слабо изученные водные объекты. Такой прием пространственного гидрологического интерполирования позволял решать различные задачи гидрологического обеспечения народного хозяйства, используя материалы наблюдений сети со сравнительно небольшим числом станций и постов по сравнению с чисто гидрометрическими методами.

На основе разработанных научных принципов размещения гидрологических станций и постов в нашей стране создана опорная сеть оптимальной плотности, ведущая наблюдения по единым программам. Состав и методика наблюдений на ней регламентируются разработанными ГГИ наставлениями, инструкциями и руководствами по всем элементам гидрологического режима, обеспечивающими единообразие сбора и обработки гидрологической информации в масштабе всей страны. Наблюдения на сети выполняются с помощью приборов отечественного производства, созданных учеными и конструкторами института.

Данные наблюдений на опорной гидрологической сети, накопленные за многолетние периоды действия станций и постов, представляют собой богатейший государственный фонд сведений о водных ресурсах страны; они широко используются при проектировании, строительстве и эксплуатации различного рода сооружений на водных объектах, а также для государственного планирования и научных целей.

Для более детального изучения гидрологических явлений и процессов в дополнение к массовой опорной сети гидрологических станций и постов была создана сеть специализированных обсерваторий и станций (озерные, болотные, русловые, воднобалансовые и др.), на которых производятся детальные наблюдения за элементами водного и теплового баланса, баланса химических и загрязняющих веществ, наносами, русловыми процессами и др. Наличие специализированной воднобалансовой сети позволило подойти к изучению речного стока как звена единого гидрологического цикла.

В последние годы в связи с ростом водопотребления для удовлетворения потребности в воде народного хозяйства (особенно орошаемого земледелия) возникла необходимость осуществления ряда государственных мер по рациональному использованию водных ресурсов и охране их от истощения и загрязнения. Для решения этих новых задач коллективом ученых под руководством И. Ф. Карасева разработаны предложения по рационализации гидрологической сети, пересмотру принципов ее размещения, состава наблюдений с учетом требований науки и возросших запросов народного хозяйства.

Основная идея, касающаяся современной перестройки сети, выдвинутая ГГИ и нашедшая отражение в постановлении Правительства по этому вопросу (1975 г.), заключается в необходимости разработки и внедрения на основе ведомственных сетей Госкомгидромета (поверхностные воды), Министерства геологии СССР (подземные воды) и Министерства мелиорации и водного хозяйства СССР (использование вод в народном хозяйстве) единой общегосударственной системы учета вод и их использования по количественным и качественным показателям.

Создание единой системы учета вод является не только практической мерой, связанной с необходимостью бережного использования водных ресурсов. Одновременно это вызвано интересами развития гидрологической науки, требующей изучения природных вод в их единстве и взаимосвязи в соответствии с идеями ее основоположников — В. И. Вернадского, В. Г. Глушкова, Б. Л. Личкова. Претворение в жизнь этих идей обуславливает необходимость более широкого внедрения в работу сети и научные исследования воднобалансового метода, по возможности точного измерения всех элементов гидрологического цикла, включая влияние антропогенных факторов на отдельные его звенья.

Новая система учета вод должна обеспечить систематические, с достаточной частотой и точностью, следующие виды измерений:

— гидрологических и гидрохимических элементов режима водных объектов (реки, озера, водохранилища, ледники, подземные воды и моря), составляющих единый водный фонд;

— количества воды, забираемой всеми водопользователями из водных объектов;

— количества и качества промышленных, сельскохозяйственных, дренажных и коммунально-бытовых сточных вод, сбрасываемых в водные объекты.

Значительное расширение объема информации, получаемой при внедрении единой системы учета вод, обуславливает необходимость создания автоматизированной системы сбора, обработки и обобщения данных о водных ресурсах с широким использованием современной вычислительной техники. Эту задачу решают ученые и специалисты ГГИ и ВНИГМИ—МЦД совместно с научными учреждениями Министерства мелиорации и водного хозяйства и Министерства геологии СССР.

Изучение водных ресурсов и водного баланса территории СССР и земного шара

Изучение водных ресурсов в целях их планомерного использования является одной из важнейших задач гидрологической науки. К ее решению институт приступил сразу же после его основания. Уже в 1924 г. на I Всероссийском гидрологическом съезде институт предложил систематизировать в виде водного кадастра имеющиеся в то время разрозненные данные о водах СССР.

В отличие от зарубежных кадастров, носящих узкоприкладной характер (кадастр водных сил, кадастр водопадов и др.), водный кадастр планового социалистического хозяйства СССР, по предложению ГГИ, должен охватывать все виды вод и по своему содержанию отвечать запросам всех отраслей народного хозяйства.

За 60 лет существования ГГИ под его руководством было дважды осуществлено обобщение и систематизация данных о водных ресурсах СССР в виде водного кадастра.

Первый кадастр был составлен в 1931—1940 гг. в виде четырех серий: 1) Кадастр поверхностных вод; 2) Кадастр подземных вод¹; 3) Морской кадастр; 4) Гидрометеорологический кадастр.

Важнейшими изданиями водного кадастра явились, в частности, «Материалы по режиму рек СССР» и порайонные «Справочники по водным ресурсам СССР», сыгравшие большую роль в обеспечении запросов народного хозяйства в годы первых пятилеток. Вместе с тем кадастр оказал большое влияние на развитие гидрологической науки. На его материалах были выполнены фундаментальные исследования по речному стоку и водным ресурсам Б. Д. Зайковым, Д. Л. Соколовским, К. П. Воскресенским и другими учеными, заложившими основы учения о речном стоке.

В 1959—1974 гг. под руководством ГГИ был выполнен второй комплекс кадастровых работ. Материалы второго водного кадастра опубликованы в трех сериях: 1) «Гидрологическая изученность»; 2) «Основные гидрологические характеристики»; 3) «Ресурсы поверхностных вод СССР», представляющие собой фундаментальные порайонные монографии. В период составления кадастра впервые была осуществлена полная инвентаризация рек и озер СССР.

Одним из важных итогов работ по созданию кадастра явилась монография «Водные ресурсы и водный баланс территории СССР» (1967 г.), материалы которой положены в основу разработки генерального плана использования водных ресурсов на ближнюю и отдаленную перспективу.

Увеличение водопотребления и возникшая местами угроза истощения водных ресурсов поставили перед гидрологической наукой новые задачи.

В соответствии с Основами водного законодательства Союза СССР и союзных республик (1970 г.), регламентирующими новый, более строгий порядок пользования водными ресурсами, материалы водного кадастра должны систематически обновляться и служить основой для водохозяйственного планирования, разработки генеральных и бассейновых схем комплексного использования вод и их охраны. В связи с этим Совет Министров СССР своим постановлением (1977 г.) обязал Главгидрометслужбу (ныне Госкомгидромет), Министерства геологии, мелиорации и водного хозяйства СССР создать общегосударственную

¹ Кадастр подземных вод был завершен ВСЕГИНГЕО уже после окончания Великой Отечественной войны.

автоматизированную систему ведения водного кадастра, в составе которой должны быть тесно согласованы и увязаны между собой ведомственные системы кадастра по поверхностным и подземным водам и учету использования вод в народном хозяйстве.

Для выполнения этих задач в 1978 г. при ГГИ создано отделение водного кадастра. Как головное учреждение ГГИ разрабатывает методические основы организации и ведения кадастровых работ. В новых условиях система водного кадастра должна иметь большее оперативное значение и удовлетворять следующим требованиям:

— Водный кадастр будет содержать сведения по всем видам вод, составляющих единый государственный водный фонд, по их количественным и качественным показателям, включая данные об использовании в различных сферах хозяйственной деятельности;

— первичные материалы по учету водных ресурсов и их использованию намечено занести на технические носители (перфокарты, магнитные ленты) для последующей оперативной обработки и обобщения в кадастровые формы;

— автоматизированные системы государственного учета вод и их использования и государственного водного кадастра Госкомгидромета и указанных выше министерств позволят осуществлять взаимный обмен материалами.

Создание автоматизированной системы сбора, хранения и обработки данных о ресурсах поверхностных и подземных вод и их потреблении явится важнейшим этапом на пути решения проблемы рационального использования и охраны водных богатств нашей страны от истощения и загрязнения, послужит новым стимулом для развития гидрологической науки.

Наряду с изучением водных ресурсов и водного баланса территории СССР значительное место в деятельности института занимают исследования мирового водного баланса и водных ресурсов Земли. Говоря об этом, нельзя не упомянуть работы М. И. Львовича «Элементы водного режима рек земного шара» (1945 г.), Б. Д. Зайкова по стоку рек Европы (1938 г.), А. А. Соколова, А. П. Муранова, А. М. Норватова и А. П. Доманицкого по гидрологии зарубежных стран (1941—1964 гг.), явившиеся большим вкладом в проблему глобальной гидрологии.

Еще большее развитие это направление получило в последние годы в связи с участием ГГИ в международном сотрудничестве по программе Международного гидрологического десятилетия (МГД, 1965—1974 гг.) и Международной гидрологической программе (МГП), учрежденной ЮНЕСКО с 1975 г. после завершения работы по программе МГД. В качестве вклада в эту программу ГГИ при участии ряда научных учреждений выполнил фундаментальное исследование, результаты которого опубликованы в монографии «Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли» и «Атласе мирового водного баланса» (1974 г.), получивших высокую оценку в нашей стране и за рубежом.

В монографии дана полная инвентаризация всех видов вод на Земле, рассмотрен современный водный и водохозяйственный баланс континентов, включая Антарктиду, баланс пресных вод Мирового океана, влагооборот в атмосфере и многое другое. С учетом роста населения, развития экономики и культуры дан прогноз водопотребления в мире на 2000 г. Учитывая большое научное и практическое значение монографии и Атласа, ЮНЕСКО осуществило их перевод и публикацию на английском языке (1978 г.).

Как уже отмечалось, в последние годы при изучении водных ресурсов и решении многих научных проблем все более широкое применение находит метод водного баланса. В связи с этим в работах института большое развитие получили теоретические и экспериментальные исследования отдельных элементов баланса. В результате существенно усовершенствованы методы расчета осадков, стока, испарения с водной поверхности и различных угодий, передвижения влаги в зоне аэрации и др. Среди многочисленных публикаций особо следует отметить «Руководство воднобалансовым станциям» (1973 г.) и «Методы расчета водных балансов» (международное руководство по исследованиям и практике, изданное в 1976 г.).

Антропогенные изменения режима, баланса и качества вод

Влияние антропогенных факторов на состояние гидросферы является, пожалуй, наиболее важной частью проблемы воздействия человека на окружающую среду. История ее уходит далеко в глубь веков, к первым активным действиям человека, связанным с расширением пространства его обитания за счет главным образом сведения леса. Позднее, в связи с мелиорацией переувлажненных земель, возник вопрос о влиянии осушения болот и заболоченных земель на водный режим и климат. В наш век, в условиях быстрого роста населения и развития производительных сил общества, виды и масштабы воздействия человека на окружающую среду, влекущие за собой те или иные изменения естественного режима и баланса вод, неизмеримо возросли. Большой научный и практический интерес приобрели многие новые аспекты этой проблемы, а именно: распашка целинных и залежных земель, развитие агротехнических мероприятий, расширение площадей орошаемых земель, создание водохранилищ и прудов, урбанизация территорий и др.

Вопрос о влиянии антропогенных факторов на режим, баланс и качество вод из сферы чисто научных исследований перешел в область практического учета этих влияний при планировании использования водных ресурсов на ближнюю и дальнюю перспективу. Этой проблеме посвящены многие работы ученых ГГИ (И. А. Шикломанов, С. И. Харченко и др.). Острота вопроса, однако, заключалась в том, что исследования по этой проблеме

в СССР и за рубежом не давали однозначного ответа. Выводы, касающиеся влияния тех или иных антропогенных факторов, нередко носили прямо противоположный характер. В связи с этим в последние годы в планах научно-исследовательских работ ГГИ проблема влияния хозяйственной деятельности на режим, баланс и качество вод заняла одно из центральных мест.

Большой заслугой коллектива института (О. Л. Маркова, Н. М. Алюшинская, Р. В. Донченко и др.), работающего под руководством И. А. Шикломанова над решением этой, одной из сложнейших проблем современной гидрологической науки, является прежде всего создание объективных методов оценки влияния как отдельных видов хозяйственной деятельности, так и их комплекса. Новый методический подход к решению проблемы заключался в оценке происшедших изменений стока двумя взаимно независимыми способами — посредством воднобалансового расчета безвозвратных потерь воды в бассейне под влиянием того или иного вида хозяйственной деятельности и путем анализа многолетних колебаний водоносности рек по гидрометрическим данным. Использование данных многолетних гидрометрических наблюдений и изучение колебаний стока в их связи с колебаниями метеорологических факторов позволило избежать возможных ошибок в оценке изменений стока методом водного баланса, элементы которого все еще определяются недостаточно точно.

В результате этих исследований оказалось возможным впервые дать однозначную количественную оценку изменений водных ресурсов в бассейнах основных рек СССР, внутренних морей, экономических районов и по территории страны в целом. Было показано, что антропогенные изменения в наши дни оказывают все более существенное влияние на водные ресурсы и с этим нельзя не считаться при долгосрочном планировании использования последних. Эти изменения существенно различаются в годы, характеризующиеся различной водностью. Наиболее значительные изменения (уменьшение стока) происходят в маловодные периоды и годы, что делает водохозяйственные балансы еще более напряженными.

Разработанный ГГИ метод оценки влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы позволяет не только оценить уже происшедшие изменения речного стока, но и дать прогноз состояния водных ресурсов на 2000 г. с учетом роста населения, развития промышленности, сельского и других водопотребляющих отраслей народного хозяйства.

Исследования показали, что за последние годы безвозвратные потери стока в основных речных бассейнах СССР возросли с 14 км³ в 1940 г. до 95 км³ в 1975 г.

Более 75% уменьшения стока (безвозвратных потерь) падает на реки внутренней бессточной области (в основном бассейны Каспийского и Аральского морей). В перспективе на 2000 г. по расчетам ГГИ безвозвратные потери возрастут до 190 км³/год. При планируемых водохозяйственных мероприятиях сток в бассейне

Каспийского моря к 2000 г. уменьшится на 22%, в бассейнах Азовского моря — на 44%, Аральского моря — на 76%.

Полученные ГГИ объемы безвозвратных потерь хотя и являются весьма значительными, но все же они существенно меньше (примерно на 100 км³/год) потерь стока, которые в практике проектных организаций нередко рассчитывались методом водохозяйственных балансов с использованием весьма приближенных нормативов потерь воды в различных сферах производственной деятельности. Отсюда вытекает важное практическое значение этого вывода, так как компенсация безвозвратных потерь требует весьма больших капитальных затрат.

Большое внимание в работах института занимает также проблема качественных изменений водных ресурсов.

В результате исследований, выполненных А. В. Караушевым и Б. Г. Скакальским, разработан новый методический подход к оценке качества воды, основанный на комплексном учете главных гидролого-гидродинамических и гидрохимических факторов. ГГИ разработаны и предложены для практического применения интегральные показатели, позволяющие характеризовать качество воды в том или ином водном объекте в целом или отдельных его частей (участков), а также изменение этого качества с учетом гидрологической фазы водного режима.

Для практического применения этих показателей подготовлены и опубликованы соответствующие методические рекомендации. Разработаны расчетные методы, позволяющие прогнозировать распространение консервативных загрязняющих веществ в речных потоках и водоемах. Разработаны и успешно внедряются в практику рекомендации по гидрологическому обоснованию рассеивающих выпусков сточных вод, что явилось существенным вкладом в решение проблемы охраны водных ресурсов от загрязнения.

Гидрологическое обоснование территориального перераспределения речного стока

Результаты исследований ГГИ по оценке водных ресурсов и их распределения на территории СССР, а также прогноз их изменения под влиянием хозяйственной деятельности послужили обоснованием важнейшего вывода об истощении водных ресурсов в основных сельскохозяйственных районах страны и необходимости в недалекой перспективе, особенно в связи с развитием орошаемого земледелия, переброски в эти районы части стока рек из зон избыточного увлажнения.

Проектными организациями разработан ряд вариантов переброски стока северных рек Европейской и Азиатской территорий СССР на юг, в бассейн р. Волги, Казахстан и Среднюю Азию.

Большое народнохозяйственное значение проблемы межзонального перераспределения речного стока, ее исключительная сложность и отсутствие подобных примеров в мировой практике

выдвинули перед учеными и специалистами института многие новые задачи. Среди них одно из важных мест занимает определение оптимального отъема воды из северных рек и озер и оценка возможного влияния территориального перемещения значительных объемов воды из одной зоны в другую на природные условия и хозяйственную деятельность в обширных районах нашей страны. Исходным аргументом для такой оценки является прогноз возможных изменений режима баланса и качества вод в районах, в которых в той или иной мере могут сказаться мероприятия по территориальному перераспределению водных ресурсов.

У нас в стране и за рубежом нередко высказываются суждения о возможных неблагоприятных последствиях планируемого крупномасштабного перемещения водных масс на гидрометеорологический режим и климат планеты, вплоть до углового смещения оси ее вращения. В результате проведенных ГГИ исследований по этой проблеме получены выводы, имеющие исключительно важное значение для определения оптимальных отъемов воды из бассейнов северных рек и озер и возможного влияния этих изъятий на водный, ледово-термический и другие элементы гидрологического режима. В подготовленной коллективом авторов ГГИ монографии «Межзональное перераспределение водных ресурсов» даны оценка и прогноз возможных изменений режима и баланса вод, расчет потерь стока на испарение по трассе проектируемого канала, баланс наносов и развития русловых процессов, а также возможного изменения климата и влагооборота в районах, затрагиваемых перераспределением стока.

Касаясь существа результатов, полученных при разработках по этой проблеме, можно сделать вывод о том, что высказывавшиеся опасения о возможных отрицательных последствиях территориального перераспределения речного стока при намечаемых сравнительно скромных объемах перебросок являются преувеличенными. Изменения водного режима, баланса и качества вод по оценке ГГИ в основном будут иметь локальный характер; они поддаются расчету, и институтом даны соответствующие рекомендации по учету при проектировании инженерных мероприятий изменений годового стока и его внутригодового распределения, уровня, ледового, термического и других элементов режима.

Осуществление мероприятий по переброске части стока северных рек Европейской территории СССР на юг перед гидрологами ставит ряд задач, связанных главным образом с выбором наиболее эффективного варианта и разработкой его гидрологического обоснования.

Значительно сложнее обстоит дело с проблемой гидрологического обоснования переброски стока из бассейна р. Оби в Среднюю Азию по каналу, имеющему большое протяжение (через Тургайские ворота) и очень малые уклоны. При неизбежном развитии на канале русловых процессов его пропускная способность, как показали исследования ГГИ, по-видимому, не обеспечит полностью переброску воды в намечаемом объеме.

Полученные предварительные выводы по проблеме территориального перераспределения стока требуют дальнейших исследований.

Заглядывая в будущее, ученые ГГИ уже сейчас работают над проектами создания автоматизированной системы гидрологических наблюдений и оперативного гидрологического обслуживания сооружений, обеспечивающих процесс переброски стока, в период их эксплуатации и контроля за изменением режима, баланса и качества вод. Необходимые для этой цели гидрометрические сооружения и установки должны войти составной частью в разрабатываемые проекты.

Совершенствование методов инженерно-гидрологических расчетов и прогнозов

Расчеты и прогнозы элементов режима, баланса и качества вод при проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений и осуществлении водохозяйственных мероприятий являются основными видами применения гидрологической науки в практических целях. Поэтому исследованиям, направленным на повышение точности определения расчетных гидрологических характеристик, а также надежности и заблаговременности прогнозов, уделяется большое внимание.

Общеизвестными являются фундаментальные работы в области инженерной гидрологии, выполненные Д. Л. Соколовским, Б. Д. Зайковым, П. С. Кузиным, К. П. Воскресенским, Г. А. Алексеевым, А. И. Чеботаревым, В. Г. Андреяновым и многими другими учеными ГГИ.

Широкие теоретические и экспериментальные, а также региональные исследования речного стока позволили впервые в мировой практике осуществить задачу общегосударственного нормирования гидрологических расчетов, осуществляемых при проектировании инженерных сооружений. Под руководством А. И. Чеботарева, А. А. Соколова, К. П. Воскресенского в 1962—1969 гг. в ГГИ была подготовлена серия нормативных документов по расчетам годового стока и его внутригодового распределения, максимального и минимального стока при наличии, недостаточности или отсутствии фактических данных наблюдений. На основе практического опыта их применения Госстроем СССР в 1972 г. утверждены разработанные институтом единые общесоюзные «Указания по расчетам характеристик гидрологического режима» (СН 435-72) и «Руководство по гидрологическим расчетам», явившиеся крупным вкладом в инженерную гидрологию. Важной особенностью Указаний и Руководства является надежная проверка и обоснование параметров, рекомендуемых приемов расчета, в основу которых положена вся совокупность данных многолетних наблюдений на сети гидрологических станций. Эти

работы получили высокую оценку, а участники удостоены премии им. В. Г. Глушкова и В. А. Урываева.

В настоящее время под руководством Б. М. Доброумова и А. В. Рождественского ведутся исследования, связанные с обобщением опыта применения Указания СН 435-72 в инженерной практике и подготовкой его второго издания, в котором намечено поместить результаты разработок по существенному усовершенствованию методов определения важнейших расчетных гидрологических характеристик.

Наряду с общегосударственным нормативным документом по расчетам стока при строительном проектировании ГГИ выполнены исследования по многим другим элементам гидрологического режима. Подготовлены и опубликованы для практического использования ведомственные указания по расчетам испарения с водной поверхности и поверхности суши, заиления водохранилищ, сгонно-нагонных денивеляций, разбавления и смешения сточных вод, русловых деформаций и некоторые другие пособия, широко используемые в практике инженерно-гидрологических расчетов.

В настоящее время ученые ГГИ работают над усовершенствованием методов гидрологических расчетов при проектировании мелиоративных мероприятий, водохранилищ, рассеивающих выпусков сточных вод и др.

Прогнозы элементов гидрологического режима наряду с расчетами являются одной из важнейших форм обеспечения запросов народного хозяйства, нуждающегося в заблаговременном предвидении изменений водного режима, особенно в области оповещения о стихийных опасных явлениях — наводнениях, маловодьях, заторах и зажорах и др.

Многолетние исследования процессов формирования стока, ледового и других элементов гидрологического режима, выполненные в ГГИ, заложили основы современной, весьма эффективной службы гидрологических информаций и прогнозов.

В 1943 г. оперативная и исследовательская работа в области прогнозов была возложена на Гидрометцентр СССР. В ГГИ, однако, продолжают исследования гидрологических явлений и процессов применительно к требованиям совершенствования службы гидрологических прогнозов.

С 1969 г. ГГИ развернул широкие комплексные исследования процессов формирования весеннего половодья в бассейнах рек Дона и Камы в связи с рядом неудачных его прогнозов. Основной задачей при этом являлись разработки теории и методов расчета и прогноза потерь талых вод (водопоглотительной способности речных бассейнов). В течение десяти лет (1969—1978) институтом проведены теоретические, экспедиционные и лабораторные исследования основных факторов, определяющих сток половодья — снежного покрова, физико-механических свойств почв, влажности, промерзания, инфильтрации воды в мерзлую и талую почву и т. д.

Результаты исследований явились существенным вкладом в изучение роли этих факторов в формировании стока половодья, в частности так называемого запирающего слоя, теория и методы расчета которого разработаны В. В. Романовым. В итоге лабораторных исследований, выполненных И. Л. Калюжным и К. К. Павловой, значительное развитие получила теория инфильтрации воды в мерзлую и талую почву, миграции воды в зоне аэрации, имеющая важное значение для оценки водопоглотительной способности почв и грунтов речных бассейнов.

На основе выполненных теоретических, экспедиционных и лабораторных исследований ученые ГГИ работают над созданием математической модели стока весеннего половодья, описывающей все его звенья. Это позволит существенно улучшить применяемые в оперативной работе методы прогнозов одного из важнейших элементов гидрологического режима — стока весеннего половодья.

Значительное внимание уделяется разработке методов долгосрочных прогнозов ледового режима, исследованию механизма заторов и зажоров льда на реках. С этой целью организованы и проведены детальные исследования заторов льда на Днестре, Северной Двине, Лене, Волге (в нижних бьефах ГЭС) и других реках.

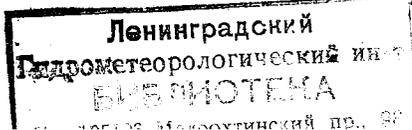
Участие ГГИ в гидрологическом обеспечении крупных народнохозяйственных мероприятий в стране

Деятельность ГГИ тесно связана с интересами и запросами народного хозяйства. Еще в годы первых пятилеток были выполнены многочисленные исследования и изыскания для проектирования и строительства Турксиба, водоснабжения Кузбасса, Магнитки, реконструкции водных путей, строительства Беломорско-Балтийского водного пути, канала им. Москвы, г. Комсомольска-на-Амуре и других народнохозяйственных объектов.

Особенно широкое развитие в последние годы получила деятельность ГГИ по гидрологическому обеспечению крупных народнохозяйственных мероприятий истроек. Проведены исследования для гидрологического обоснования таких крупных строек девятой и десятой пятилеток, как Печерская и Каховская ГРЭС, Ново-Воронежская АЭС, Волжский автозавод, Тобольский нефтехимический комбинат, Комсомольский и Селенгинский целлюлозно-картонные комбинаты и др. Институт ежегодно снаряжает около десяти экспедиций для изучения водных ресурсов в различные районы Советского Союза.

Для проектирования и строительства Волго-Донского судоходного канала им. В. И. Ленина и Цимлянского водохранилища в 1948—1952 гг. были проведены гидрологические исследования в Сальских степях и низовьях р. Дона.

В связи с постановлением Партии и Правительства об освоении целинных и залежных земель Казахстана и Западной Сибири



институтом выполнены обширные полевые, экспедиционные и теоретические исследования для гидрологического обоснования проектов создаваемых совхозов, колхозов, рабочих поселков и машинно-тракторных станций. Экспедиционные исследования ГГИ на целине велись несколькими отрядами и продолжались в течение десяти лет (1955—1964). В работе по изучению водных ресурсов целинных и залежных земель, проводившейся под руководством В. А. Урываева, принимало участие более 150 чел., в том числе А. П. Браславский, П. П. Воронков, Н. П. Головин, А. П. Муранов, В. С. Сумароков, И. А. Максимов, О. А. Спенглер, М. С. Протасьев, А. Б. Заводчиков и другие ученые и специалисты института.

Экспедицией было обследовано более 200 рек и 150 озер, организовано свыше 70 гидрологических станций и постов, открыта специальная стоковая станция в районе г. Кустаная. По материалам экспедиции изданы научно-справочные пособия по водным ресурсам Целиноградской, Кустанайской, Северо-Казахстанской, Павлоградской и Актюбинской областей, а также равнинной части Алтайского Края. Они явились настольными пособиями для проектных и водохозяйственных организаций и во многом способствовали решению сложных задач освоения целины, о чем так вдохновенно рассказано в книге Л. И. Брежнева «Целина» (1978 г.).

В течение 15 лет, начиная с первых шагов по освоению нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири, в этих районах работает экспедиция института под руководством С. М. Новикова. Программа работ экспедиции предусматривает проведение комплекса исследований гидрометеорологического режима, формирования стока, водного и теплового балансов болот и заболоченных территорий.

Результаты экспедиционных работ широко используются при проектировании обустройства вновь осваиваемых нефтяных и газовых месторождений. В частности, на первых порах в условиях бездорожья большое значение имело весьма эффективное предложение о прокладке мерзлотных дорог через болота. Важным научным итогом исследований в этом районе явилась монография «Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим» (1976 г.).

Учитывая большое развитие мелиоративных работ в нашей стране и расширение площадей орошаемых земель в аридной зоне, институтом начиная с 1963 г. организованы под руководством С. И. Харченко специальные экспериментальные лабораторные и экспедиционные воднобалансовые исследования в районах орошаемого земледелия — на полях Ростовской области, в Закавказье, на Северном Кавказе, в Казахстане и Средней Азии. На основе этих исследований разработан тепловоднобалансовый метод расчета дефицита водопотребления сельскохозяйственных культур, рекомендации по назначению норм и режима орошения, дающие значительный экономический эффект и позволяющие су-

щественно повысить урожайность орошаемых земель. Результаты этих исследований опубликованы в монографии С. И. Харченко «Гидрология орошаемых земель» (1975 г.), удостоенной премии им. В. Г. Глушкова и В. А. Урываева.

В 1975 г. ГГИ приступил к аналогичным исследованиям в Нечерноземной зоне РСФСР с целью научного обоснования и разработки рекомендаций по гидрологическому обоснованию осушительно-увлажнительных мелиораций.

В течение последних лет ГГИ совместно с другими учреждениями Госкомгидромета ведет большие комплексные экспедиционные исследования в районе трассы Байкало-Амурской магистрали. Эти исследования проводятся с целью изучения водных ресурсов территории, прилегающей к трассе БАМ, и усовершенствования методов гидрологических расчетов. Предварительные результаты исследований частично нашли отражение в опубликованной монографии «Водные ресурсы рек зоны БАМ» (1977 г.).

Непрерывный рост водопотребления выдвигает первоочередные задачи рационального управления водными ресурсами и создания единой общегосударственной водохозяйственной системы. Для этого необходимо всемерно ускорить разработку и внедрение общегосударственной системы учета вод и их использования в народном хозяйстве, создание автоматизированной системы ведения водного кадастра с целью более оперативного гидрологического обеспечения запросов народного хозяйства.

Повышение роли водного фактора в экономическом и социальном развитии общества обуславливает необходимость нового подъема гидрологической науки, расширения фундаментальных научных и прикладных исследований. Важнейшей задачей при этом является совершенствование теории и методов расчета всех элементов водного баланса.

Успешному выполнению этих задач будет способствовать принятое в декабре 1978 г. постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О дополнительных мерах по усилению охраны природы и улучшению использования природных ресурсов».

И. Ф. Карасев

НОВЫЕ МЕТОДЫ РЕЧНОЙ ГИДРОМЕТРИИ

Гидрометрия — наиболее древняя из наук о воде. Измерения уровней и расходов воды выполнялись задолго до того, как гидравлика и гидрология определили сферы своих исследований. Опережающее развитие гидрометрии было естественным для того периода развития науки, который обычно связывают с накоплением данных о процессах и явлениях природы. Примат гидрометрии необходим и в современных условиях, когда гидравлика и гидрология составляют стройную систему знаний о водных потоках и закономерностях режима вод. Для определения гидрометрии как науки недостаточно перевести с греческого слова, составляющие ее название: «измерение воды». Наиболее точно речную гидрометрию можно определить как раздел гидрологии, занимающийся разработкой методов наблюдений за режимом рек, в первую очередь за уровнями и стоком воды. Именно этот узкий круг задач наиболее характерен для современной речной гидрометрии. Другие виды наблюдений, в частности за стоком наносов и ледотермическим режимом, составляя аспекты речной гидрометрии, все более превращаются в обособленные разделы гидрологии.

Речная гидрометрия не сразу пришла к современной программе наблюдений. Первоначально она развивалась как измерительная часть гидравлики и ее предметом было определение гидравлических элементов потока. Измерения на отдельных реках выполнялись изолированно, без взаимной увязки наблюдений в разных пунктах. С развитием гидрологических исследований значение речной гидрометрии коренным образом изменилось: в комплекс ее задач включаются уже не только собственно измерения, но и методическое обоснование развития сети пунктов наблюдений, обеспечивающих более или менее целостное и систематическое изучение режима вод суши.

Основы массовой сети гидрометеорологических постов и станций в России были заложены в 1874—1884 гг. Первые общесетевые инструкции были изданы в 1879 г. Таким образом, в 1979 г. исполнилось 100 лет со времени создания гидрологической сети в нашей стране.

В современных условиях чрезвычайно возросла роль водного фактора в экономике и социальном развитии общества. Новый этап развития гидрологии и водного хозяйства требует преобразования всей системы получения и сбора гидрологических данных. Речь идет именно о системе наблюдений — понятии, которое в прошлом было чуждо гидрологии. В связи с этим претерпевает радикальные изменения методический и приборно-аппаратурный комплекс речной гидрометрии. До недавнего времени, когда гидрология еще оставалась преимущественно наукой описательной, любые результаты измерений рассматривались как «точные» данные. При организации наблюдений стремились «учредить» измерения как таковые, не всегда регламентируя их точность.

Оптимизационные мероприятия должны быть направлены, с одной стороны, на повышение надежности гидрологической информации, а с другой — на ускорение измерений и обеспечение технико-экономической эффективности внедрения новой измерительной техники. Оптимизация охватывает прежде всего такие элементы системы гидрологических наблюдений, как состав, частота и точность измерений и размещение постов. Рассмотрим наиболее существенные результаты исследований, выполненных в отделе гидрометрии ГГИ по этим основным направлениям.

Оптимизация частоты и точности измерений

Для речной гидрометрии характерны дискретные измерения во времени и пространстве. Следовательно, критерии оптимизации должны вытекать из условий надежности представления полей и процессов совокупностью дискретных измерений элементов. Это представление осуществляется лишь с известным приближением, которое характеризуется так называемой погрешностью гипотезы (по терминологии В. Г. Глушкова). Обычно гипотезам придается форма математических моделей — детерминированных или вероятностных.

Среди математических моделей, используемых в гидрологии, могут быть выделены две разновидности — измерительные и расчетные. Первые основываются непосредственно на измеренных характеристиках элементов, вторые синтезируют результаты предшествующих наблюдений. В связи с этим имеют место две крайности:

- 1) интерпретация данных измерений без преемственности по отношению к предшествующим наблюдениям;
- 2) тенденция замены измерения вычислением без учета неоднозначности конкретных реализаций общих закономерностей.

В первом случае, обрабатывая результаты наблюдений, поступают так, словно до них ничего не было известно об изучаемом явлении (иллюзия первооткрытия), во втором, напротив, проявляется иллюзия его полной изученности. В частности, предпринимаются попытки свести теорию гидрометрии к изложению

различных гидравлических концепций. Между тем еще в 1909 г. известный гидротехник Н. Н. Жуковский говорил: «... всякая попытка... подвести результаты наблюдений к выводам гидродинамики не может рассматриваться иначе, как покушение к переходу на чисто спекулятивное отношение к явлениям природы». Иными словами, недопустимо любое рассеяние данных наблюдений относительно гидравлических зависимостей отождествлять с погрешностью измерений. На самом же деле если наблюдения соответствуют требованиям метрологии, то колебание их результатов отражает влияние факторов, которые не учтены гидравлическими формулами. Вместе с тем интерпретация и обобщение результатов измерений должны предполагать синтез методов гидрометрии и гидравлики.

Элементы физико-географической среды описываются функцией времени и пространственных координат $y(\xi, t)$. В практических расчетах это достаточно сложная функция может быть представлена суммой [1]

$$y = \bar{y}(\xi, t) + f(\xi, t),$$

в которой $\bar{y}(\xi, t)$ является фоновой функцией, а $f(\xi, t)$ — вариацией элемента.

Первая составляющая может быть получена на основании статистической обработки данных предшествующих наблюдений или физической модели процесса (поля). Отклонения $f(\xi, t)$ описываются методами теории случайных функций. Например, применительно к квазистационарным случайным процессам $f(t)$ учитываются дисперсия элемента $D_f = \sigma_f^2$, автокорреляционная функция времени $r_f(\tau)$ и среднее время корреляции Θ . Точность измерения оценивается мерой ошибок $\eta = \frac{\sigma_n^2}{D_f}$ и параметром дискретности (частоты) $\vartheta = \frac{\Theta}{\tau_d}$ (τ_d — промежуток между измерениями, σ_n — их средняя квадратическая погрешность).

Восстановление элемента $f(t)$ в промежутке между измеренными значениями производится на основании интерполяции — линейной и оптимальной, характеризуемой мерой ошибок $\epsilon = \frac{\sigma_{ин}}{D_f}$ ($\sigma_{ин}$ — средняя квадратическая погрешность интерполяции). Используемые при этом методы в принципе не новы и в той или иной форме рассматривались при оптимизации пространственного размещения пунктов метеорологических наблюдений. В отделе гидрометрии они были применены к изучению изменения пропускной способности речных русел и характеристик стока [3, 4 и др.]. Некоторые общие результаты выполненных исследований отражает универсальный график для меры ошибок интерполяции — линейной ($\epsilon_{л}$) и оптимальной (ϵ_0) (рис. 1).

Рассмотрим методику оптимизации косвенных измерений, если задана их необходимая точность в виде допустимой средней квад-

ратической погрешности Δ_d . Тогда для оптимизации измерительного комплекса целесообразно использовать принцип равного или регулируемого влияния частных погрешностей σ_i на точность результата, оцениваемую средней квадратической погрешностью σ_F :

$$(\Delta_d)^2 = \frac{\sigma_F^2}{N} = k_1 \left(\frac{\partial F}{\partial X_1} \right)^2 \sigma_1^2 = k_2 \left(\frac{\partial F}{\partial X_2} \right)^2 \sigma_2^2 = \dots = k_N \left(\frac{\partial F}{\partial X_N} \right)^2 \sigma_N^2 \quad (1)$$

(величины σ_i предполагаются взаимонезависимыми).

Коэффициентами k_N регулируются допускаемые значения дисперсий σ_i^2 . Значения k_i находятся в пределах $1 \leq k_i \leq k_{\text{пр}}$, причем наименьшее значение k_i , равное единице, обеспечивает равное влияние частных погрешностей на результат измерения, а принятие для какой-либо из них $k_i = k_{\text{пр}}$ означает такое требование к точности измерения элемента, которое соответствует практически полному исключению влияния этой погрешности по сравнению с другими. Согласно ГОСТу 1297—76, можно считать, что величина не оказывает влияния на точностную характеристику, если вызванное ею изменение не превосходит 0,2 значения этой характеристики (при этом $k_{\text{пр}} = 25$).

При оптимизации частоты (дискретности) наблюдений необходимо учитывать одновременно три характеристики: погрешность измерения $\sigma_{\text{и}}$, вариацию элемента σ_X и его пространственно-временную корреляцию $r_X(\tau, \zeta)$. Эта задача решается на основании приведенного на рис. 1 графика $\bar{\varepsilon}(\phi)$, который одинаково пригоден как для временных, так и для пространственных

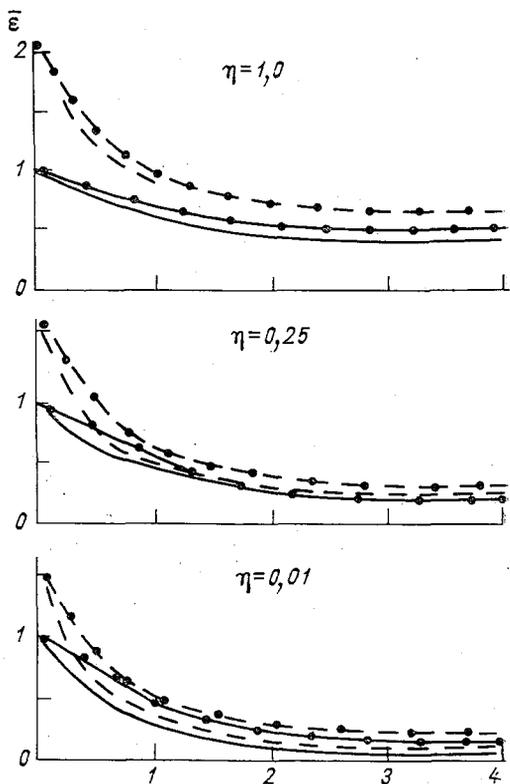


Рис. 1. Зависимость меры ошибок линейной (пунктирная линия) и оптимальной (сплошная линия) интерполяции от параметра дискретности ϕ (по горизонтали).

Линии с кружками относятся к интерполяции элемента на середину интервала между измерениями.

реализаций и в этом смысле является универсальным. Из графика $\varepsilon(\vartheta)$ можно заключить:

а) оптимальная интерполяция во всех случаях точнее линейной, особенно при увеличении погрешностей наблюдений и уменьшении параметра дискретности (частоты) наблюдений;

б) при сравнительно малой дискретности (частоте) измерений (например, при $\vartheta \leq 0,5$, $\eta = 0,25$) линейная интерполяция вообще теряет смысл, так как вместо интерполированных значений в этом случае целесообразно принять норму изучаемого элемента (осредненное за длительный период значение), что позволяет избежать увеличения меры погрешностей интерполяции сверх $\varepsilon = 1$;

в) оптимальная дискретность (частота) наблюдений ϑ_0 лежит в пределах 1—2. При $\vartheta < 1$ наблюдается скачкообразный рост погрешности интерполяции, а при $\vartheta > 2$, напротив, увеличение частоты измерения существенно не повышает точности интерполированных значений. Значение ϑ_0 может служить в качестве критерия оптимизации наблюдений;

г) эффект увеличения частоты наблюдений ϑ тем больше, чем выше их точность. Иными словами, опровергается еще бытующее мнение о том, что недостаточная точность наблюдений может быть компенсирована увеличением их частоты.

Измерения, характеризуемые $\eta = 1$, вообще теряют смысл, поскольку их погрешность $\sigma_{\text{и}}$ не отличается от изменчивости самого элемента $\sigma_{\text{х}}$.

Требуемую точность измерений можно установить исходя из их оптимальной частоты $\vartheta = \frac{\tau_{\text{к}}}{\tau_{\text{д}}} = 1,5$. На основании принципа равных влияний $\sigma_{\text{и}} \leq 0,65\sigma_{\text{х}}$ для линейной интерполяции, $\sigma_{\text{и}} \leq 0,5\sigma_{\text{х}}$ — для оптимальной.

Таким образом, изменчивость и методы пространственно-временного разрешения элемента, с одной стороны, частота и точность измерений — с другой, образуют систему взаимосвязанных характеристик. Ни одна из них не должна «назначаться» в отрыве от остальных.

Принципы оптимизации наблюдений использованы в ГГИ при методическом обосновании размещения и планировании развития основной гидрологической сети, а также для усовершенствования математических моделей расхода воды и учета речного стока.

Принципы оптимизации сети пунктов гидрологических наблюдений

Гидрологическая сеть складывалась исторически, по мере хозяйственного освоения обширной территории нашей страны. Этим были обусловлены некоторые элементы случайности в географическом распределении пунктов наблюдений. В настоящее время разработаны гидролого-статистические методы планирования сети, реализуемые на основании гидрологического районирования территории страны [2].

Оптимизация размещения сети заключается в том, чтобы обеспечить такую густоту (плотность) пунктов наблюдений, которая была бы достаточной для получения достоверных и репрезентативных гидрологических характеристик и в то же время не требовала бы открытия излишнего количества постов. Гидрологические элементы всегда относятся к дискретной области — площади речного бассейна F . В то же время при рассмотрении территории достаточно больших размеров (район, зона) можно исходить из непрерывного распределения элементов режима.

Сток обычно характеризуется нормой m_Y , а также его значениями в отдельные годы Y . Зональные нормы стока устанавливаются при отнесении их к площади водосбора достаточных (зонально-репрезентативных) размеров $F_{з-р}$. Не приводя анализа физических факторов, объясняющих ту или иную зависимость стока от площади рассматриваемого бассейна, укажем, что в каждом случае площадь зонально-репрезентативного водосбора $F_{з-р}$ устанавливается с достаточной определенностью (за исключением горно-тундровой и горно-степной зон) [10].

Сток в отдельно взятые годы обнаруживает черты несинхронности в разных бассейнах. Эта несинхронность может быть учтена оценкой корреляции средних годовых расходов воды в зависимости от расстояния между центрами соответствующих бассейнов. Таким образом, распределение стока по территории есть не что иное, как поле значений Y , составленных нормой стока и наложенных на нее случайных отклонений f , зафиксированных для каждого отдельно взятого года. Функция изменения годового стока в одном измерении l , совпадающем с направлением его градиента, может быть представлена наиболее просто в виде комбинации

$$Y(l) = m_Y(l) + f(l). \quad (2)$$

На основании характеристик гидрологического поля в работе [2] установлены два условия надежности информации о стоке соответственно двум членам уравнения (2).

1. В качестве первого члена вводится градиентный критерий как минимально необходимое расстояние $\xi_{гр}$ между центрами бассейнов, позволяющее выявить изменение нормы стока:

$$\xi_{гр} \geq \frac{2,82\sigma_0 m_0}{\text{grad}_0(m_Y)}, \quad (3)$$

где m_0 — осредненное значение нормы стока в данном гидрологическом районе; $\text{grad}_0(m_Y)$ — средний относительный градиент изменения нормы стока в пределах района; σ_0 — погрешность определения годового стока по гидрометрическим данным. Значению $\xi_{гр}$ соответствует площадь водосбора $F_{гр}$.

Таким образом, чем больше расстояние между постами, тем надежнее можно определить изменение нормы стока. Но безграничное увеличение площади водосбора, приходящейся на один

пост, привело бы к потере корреляции годового стока. Чтобы этого не произошло, необходимо установить верхний предел для ξ .

2. Это ограничение и обуславливает корреляционный критерий, который выводится из второго члена выражения (2) так, чтобы погрешность линейной интерполяции годового стока на середину расстояния между центрами бассейнов не превосходила σ_0 :

$$\xi_k \leq \frac{\sigma_0^2}{C_v^2} \xi_0, \quad (4)$$

где C_v — коэффициент вариации годового стока; ξ_0 — радиус корреляции, при котором автокорреляционная функция годового стока принимает нулевое значение (в среднем для умеренной зоны Советского Союза $\xi_0 = 1600$ км): расстоянию ξ_k соответствует площадь водосбора F_k .

Таким образом, оптимальная площадь водосбора F_0 при размещении постов должна находиться в диапазоне $F_{з.-р} < F_{гр} \leq F_0 \leq F_k$.

В табл. 1 приведены критериальные площади водосборов, осредненные по основным физико-географическим зонам СССР. В той же таблице помещены данные расчетов, выполненных нашим методом в Канаде [11].

Таблица 1

Критериальные площади водосборов для планирования опорной гидрологической сети, км²

	$F_{з.-р}$	$F_{гр}$	F_k	F_0
Зоны СССР:				
гундровая	200	—	32 000	15 000
лесная	500	4000	7 000	5 000
степная	1500	2000	2 000	2 000
Канада	—	8950	20 590	15 600

Для изучения малых рек с азональными характеристиками стока наблюдения организуются выборочно, на характерных водосборах с различной расчлененностью рельефа, залесенностью, озерностью, заболоченностью и др. В горных районах расположение постов должно учитывать закономерности изменения стока с высотой.

Наряду с размещением пунктов наблюдений на основании гидрологического районирования для изучения общих закономерностей режима вод суши и обслуживания народного хозяйства требуется информация о состоянии отдельных водных объектов и участков рек. В связи с этим приобретает значение пообъектный принцип размещения сети, в первую очередь на реках с площадью бассейна, превышающей оптимальную F_0 , где требуется иметь по крайней мере по одному посту на каждой реке

с порядком k выше оптимального k_0 . Число постов на таких реках, которые относятся к большим, можно установить на основании известного соотношения Хортон

$$N_6 = \sum_{i=k_0+1}^s r^{s+1},$$

где s — порядок речной системы; r — показатель ее разветвленности, равный в среднем 3.

Общая численность гидрологических постов будет равна

$$N = N_m + N_o + N_6 = (N_o + N_6)(1 + \alpha),$$

где α — доля постов на малых реках ($\alpha = 0,15 \div 0,30$).

Таким образом, гидрологическое районирование в сочетании с корреляционно-статистическими характеристиками стока и строения речных систем служит объективной предпосылкой для оптимизации густоты сети гидрологических постов. Само же размещение пунктов наблюдений осуществляется на дискретной основе и определяется структурой гидрографической и водохозяйственной сети, административным делением территории и ее расчленением на водохозяйственные районы.

Основные, приведенные выше, научно-методические принципы были положены в основу плана рационализации и развития сети пунктов гидрологических наблюдений на 1975—1990 гг., составленного в ГГИ при участии всех управлений гидрометслужбы. Составителями сводного плана, кроме автора, являлись Р. Д. Курдин, Р. А. Шестакова и Л. А. Попова. Разработка этого плана была прежде всего вызвана необходимостью устранения наблюдавшегося в последнее десятилетие некоторого отставания количественного прироста постов от темпов развития водного хозяйства страны, особенно в ее азиатской части (рис. 2).

К моменту составления и начала реализации нового плана развития гидрологической сети в ее составе насчитывалось 6535 постов, из них 5860 речных и 675 озерных. Наблюдения за стоком воды велись на 5115 постах, наносы изучались в 1635 пунктах, а качество воды — в 3340. К оперативной информации привлекалось 55% постов.

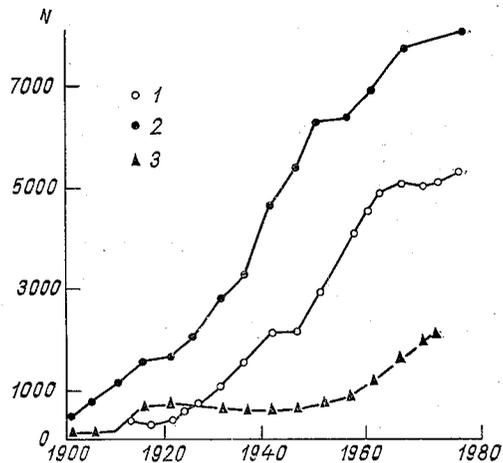


Рис. 2. Число пунктов регулярного учета стока в СССР (1), США (2) и Канаде (3).

Основные показатели перспективного плана приведены в табл. 2.

Таблица 2

Планируемый рост числа пунктов наблюдений за основными элементами гидрологического режима

Год	Уровень воды в реках	Сток воды	Сток наносов	Уровень воды в озерах и водохранилищах	Качество воды
1985	7504	6832	2647	1016	6055
1990	8089	7385	2857	1177	6408

Особую важность имеет развитие сети в районах Сибири и Дальнего Востока, где ее количественный состав намечено увеличить в 1,8 раза. Потребуется организовать гидрологические наблюдения в труднодоступных и необжитых районах. В связи с этим планом предусмотрена механизация и автоматизация гидрологических наблюдений на основе строительства гидрологических расходомеров и автоматических уровнемеров. Намечено широкое применение ускоренных методов измерения расходов воды, в том числе аэрометодов, которые позволят развить аэрогидрометрическую сеть.

Все более возрастающую роль в изучении гидрологического режима будут играть спутниковые съемки. Спутники позволяют обозревать огромные пространства, наблюдать за элементами, которые раньше не включались в модели гидрологических характеристик (площади покрытия бассейна снегом и льдом и др.). Вместе с тем, как показывает опыт США, спутники могут служить весьма эффективным средством сбора информации от наземных пунктов наблюдений.

Плановые показатели численности сети получены «от частного к общему» — по данным схем размещения и подсчета постов в границах конкретных речных бассейнов. Гидролого-статистические расчеты общей численности сети, выполненные на основе описанных выше методов без использования этих трудоемких операций [2], дали практически те же результаты: они отличаются от плановых контрольных цифр всего на 5%. Это указывает на высокую эффективность объективных методов планирования сети. Их дальнейший прогресс может быть связан с объективизацией гидрологического районирования как основы оптимизационных расчетов численности сети. Для решения этой задачи, в частности, может быть использована теория распознавания образов и методы выделения главных компонентов полей гидрологических элементов.

Наблюдения за режимом и качеством вод суши играют все более важную роль в составе общегосударственной системы наб-

людений и контроля за уровнем загрязнения внешней среды. Гидрологические посты входят в состав создаваемых в нашей стране станций фонового мониторинга окружающей среды как элемента глобальной системы. Назрела необходимость создания гидрологических заповедников и заказников. По предварительным расчетам Р. Д. Курдина (ГГИ), общая площадь таких заказников составит 1 млн. км², на ней должно быть размещено до 500 реперных постов. Для сравнения укажем, что общая площадь имеющих в нашей стране более чем 100 природно-экологических заповедников достигает 9 млн. га.

Наряду с усовершенствованием методов планирования густоты сети новых решений потребует информационное обеспечение гидрологических моделей с распределенными параметрами, например для прогноза расходов воды весеннего половодья и паводков. В подобных случаях должны создаваться локальные автоматизированные сети с более полной программой и высокой степенью пространственно-временной дискретизации наблюдений.

Наблюдения за уровнями воды

Режим стока рек изучается на основе непрерывных наблюдений за уровнями и дискретных измерений расходов воды. В этом состоит основная особенность речной гидрометрии в отличие, например, от измерений расходов в трубопроводах.

Наиболее просты срочные наблюдения за уровнями воды: они сводятся к визуальному отсчету их высоты по стационарной или переносной рейке. Установки для непрерывной регистрации уровней достаточно сложны и дороги (ими оснащена только треть постов массовой сети). Поэтому важно установить оптимальную частоту дискретных (срочных) наблюдений за уровнями или надежного учета их суточного хода. Этот вопрос исследован в отделе гидрометрии ГГИ для разных типов водного режима рек.

Если представить средний суточный уровень воды H_c как линейную комбинацию срочных значений

$$H_c = a_0 + \sum_1^N a_i H_i, \quad (5)$$

то количество сроков наблюдений N и весовые коэффициенты a_i можно выбирать по условиям минимизации погрешности определения H_c . Задача решалась методом наименьших квадратов на примере ряда рек Киргизии, Кавказа, Средней Азии. В каждом случае использовалась совокупность лент самописцев уровня за один месяц. Установлено, что даже при весьма сложном изменении уровней в естественных условиях, например на горных и полугорных реках, в большинстве случаев достаточно не более четырехсрочных наблюдений за уровнем, но взятых с различными весовыми коэффициентами. Случайная погрешность определения

H_c при этом составит 0,5—2% амплитуды суточных колебаний уровня.

В тех же условиях определялась погрешность стандартного способа вычисления H_c как среднеарифметического из срочных значений. Оказалось, что при сложном суточном ходе уровня погрешность вычисления его средних суточных значений была в 1,5—2 раза больше по сравнению с погрешностью оптимального варианта. Использование уровней, наблюдаемых вечером и утром за смежные сутки, в дополнение к 2- и 4-срочным наблюдениям расчетных суток практически не увеличивает точности определения H_c .

Что касается необходимой точности измерения срочных уровней, то она устанавливается на основе сформулированного выше принципа регулируемых влияний частных погрешностей. В табл. 3 приведены допустимые погрешности измерения уровня применительно к задачам учета стока с использованием зависимости $Q(H)$.

Таблица 3

**Допускаемые погрешности измерения
уровня воды при вычислении стока
по зависимости $Q(H)$**

Амплитуда колебания уровней воды, м	Допускаемая погрешность, см
< 2,5	0,5
2,5—5	1,0
5—10	2,0

Указанную точность измерения уровней рекомендуется принимать при разработке автоматических датчиков уровня для учета стока в русловых гидростворах. Если датчики предназначаются для определения напоров на гидрологических расходомерах, то погрешность измерения уровня не должна превышать 1—2 мм.

**Усовершенствование моделей расходов воды и оптимизация
процессов их измерения**

Расход воды на реках определяется, как правило, в результате косвенных измерений его элементов. Последние синтезируются в моделях измеренного расхода воды, аналитическая форма которых зависит от применяемых методов измерения его элементов.

Наиболее трудоемкая операция при определении расхода воды — регистрация и пространственно-временное осреднение скоростей потока. Стремление сократить затраты труда и вместе с тем ускорить процесс измерений привело к разработке интеграционных способов определения расхода воды.

Все многообразие существующих моделей и способов определения расходов воды по данным измерений обусловлено различием методов пространственно-временного осреднения скоростей течения и геометризации «тела» секундного расхода. Применяемые в настоящее время методы интерполяции средних скоростей как точных величин без учета их пространственно-временной изменчивости не соответствуют динамическим свойствам турбулентного потока. В действительности измеренные средние скорости на вертикалях могут быть разложены на три составляющие

$$v = v_r + w + f_v,$$

где v_r — детерминированная величина, гидравлически обусловленная местной глубиной, уклоном свободной поверхности и шероховатостью русла; w — структурное отклонение скорости, вызванное действием возмущающих факторов и крупномасштабной турбулентностью; f_v — величина, отражающая локальные пульсации скоростей и погрешности измерения.

Каждая составляющая, естественно, должна предполагать различные способы ее интерполяции по ширине потока. Детерминированная величина представляется по формуле Шези—Маннинга

$$v = ah^{2/3},$$

где коэффициент a , равный $\frac{r^{1/2}}{n}$, принимается постоянным для данного гидроствора (аналогичная предпосылка используется при построении плана течений методом М. А. Великанова).

Что касается составляющих w и f_v , то в совокупности они определяются как отклонения измеренных средних скоростей на вертикалях v_i от гидравлически обусловленных величин

$$\Delta v_i = w_i + f_{v_i} = v_i - v_{r_i}.$$

Значения Δv_i по ширине отсека между i -той и j -той скоростными вертикалями являются случайными функциями поперечной координаты y . Осредняя их значения, интерполированные по ширине потока, получаем

$$\Delta v_s = P_s (\Delta v_i + \Delta v_j).$$

В простейшем случае линейной интерполяции весовые коэффициенты P_s равны 0,5; при использовании оптимальной интерполяции значения P_s определяются с учетом корреляции отклонений Δv_i и меры погрешностей измерения η .

Распределение местных глубин между скоростными вертикалями аппроксимируются по В. Н. Гончарову с использованием коэффициента полноты сечения отсека площадью ω_s

$$\varphi_s = \frac{B_s h_{\max}}{\omega_s}.$$

оптимального выбора А—А. Наибольшими преимуществами в условиях больших и средних равнинных рек обладает интеграция скоростей по вертикали: при достаточной для практики точности 4—5% она обеспечивает ускорение измерений в 1,5 раза по сравнению с двухточечным методом.

В перспективе, после разработки необходимых технических средств, наиболее эффективным представляется измерение расхода воды с движущегося судна, а именно: вариант многократной дискретно-непрерывной интеграции поверхностных скоростей

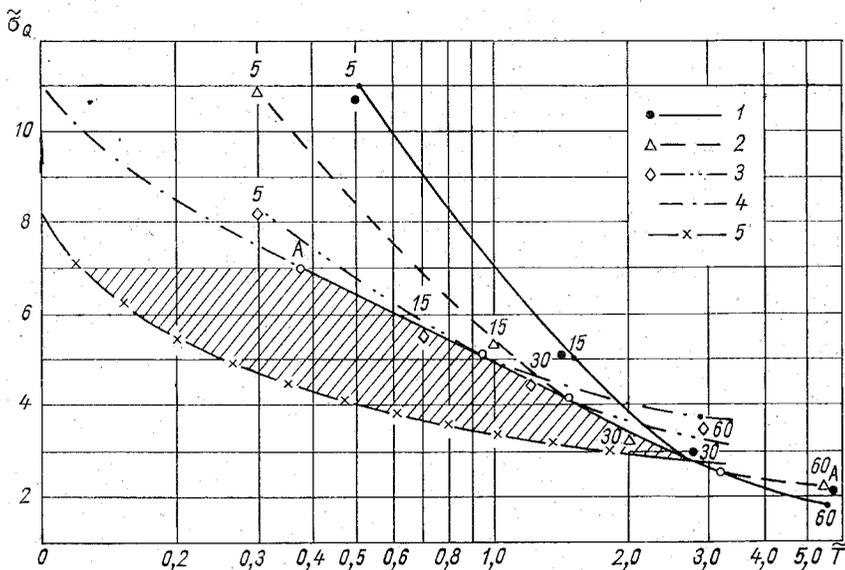


Рис. 3. Оптимизационный график погрешности измерений расхода воды в зависимости от относительных затрат времени на их выполнение (по сравнению с основным способом).

Способы измерения: 1 — детальный (пятиточечный), 2 — основной (двухточечный), 3 — интеграция скоростей по вертикали, 4 — интеграция скоростей по ширине потока, 5 — непрерывно-дискретная интеграция по ширине; к способам 1—3 относятся точки, полученные по данным опытных измерений на р. Сясь у д. Яхново.

по ширине потока. Возможности этого метода характеризует заштрихованная область на рис. 3.

В современных условиях необычайно возросло значение автоматизированных и ускоренных измерений расходов воды с применением ультразвуковых установок, вертушечно-эхолотных агрегатов для интеграции скоростей течения и съемки поперечных сечений с движущегося судна, методов смешения и аэрометодов. Подобные методы испытаны во многих странах мира, в том числе и в Советском Союзе. На создание новой измерительной техники направлена программа сотрудничества специалистов стран—членов СЭВ.

Методы гидрометрического учета стока

По условиям использования гидрометрических данных для изучения гидрологического режима и обслуживания народного хозяйства необходимо различать два варианта учета стока — режимный и оперативный.

В режимном варианте сток вычисляется по истечении годового цикла, так сказать задним числом, когда имеется в распоряжении вся совокупность выполненных измерений. Существует много способов режимного учета стока. В большинстве своем они основаны на использовании кривых расходов и различных поправок к ним.

Оперативный учет необходим для гидрологических прогнозов и текущего контроля водности рек. При устойчивой связи расходов и уровней определение оперативных значений расходов не представляет затруднений — достаточно снять их непосредственно с кривой $Q(H)$. Задача становится неизмеримо сложнее при неоднзначной зависимости расходов от уровней, обусловленной переменным подпором, деформацией и зарастанием русла, ледовыми явлениями и другими факторами. В этих изменяющихся условиях для оперативного расчета ежедневных расходов воды требуется экстраполяция характеристик пропускной способности русла по результатам каждого предшествующего измерения.

Все еще существует разрыв между режимным и оперативным учетом стока, да и ведется он в разных гидрометеорологических организациях: режимный — в центрах обработки и хранения данных, оперативный — в гидрометбюро и службах прогноза. Оперативные данные о стоке, как выясняется по истечении года, нередко на 30—50% отличаются от данных, публикуемых в гидрологических ежегодниках.

В настоящее время применяется более 20 различных способов вычисления ежедневных расходов воды. Множественность методов учета стока по гидрометрическим данным в какой-то мере обусловлена многообразием учитываемых факторов. Вместе с тем эта пестрота расчетных методов сложилась исторически, поскольку они разрабатывались в разное время многими специалистами без необходимой преемственности исследований. В тех случаях, когда наряду с закономерными наблюдается действие случайных факторов, которые можно учесть только статистически, и особенно при недостаточной частоте измерений становится очевидной искусственность и схематичность некоторых указанных методов, в частности Стаута и Больстера. Было бы неправомерно реализовать на ЭВМ подобные схематичные построения, обедненные физическим содержанием.

Совершенство и физическая обоснованность моделей учета стока должны определяться возможностью их использования как для режимных, так и для оперативных целей. Такие модели созданы в отделе гидрометрии ГГИ. Они основаны на корреляционно-гидравлических характеристиках пропускной способности русла,

зафиксированных измерениями расходов воды. Аналитическая форма этих моделей зависит от состава учитываемых факторов и представляется в виде уравнения множественной линейной регрессии независимо от характера и сложности исходных гидравлических зависимостей. Теоретически показано, что включение в линейные уравнения нелинейных членов в преобразованном виде существенно расширяет возможности регрессионного анализа.

Рассмотрим некоторые модели гидрометрического учета стока применительно к факторам, создающим неоднозначность связи расходов и уровней воды.

При деформациях и переформированиях русла кривая расходов $Q(H)$ или ее уравнение

$$Q = a_0 + a_1 H + a_2 H^2 + \dots + a_m H^m \quad (9)$$

отвечает осредненным условиям движения потока и дает лишь первое приближение к значению расхода при фиксированном уровне. Его можно существенно уточнить, если учесть изменения пропускной способности русла в результате русловых деформаций. Эти изменения в конечном счете характеризуются относительными отклонениями q_i расходов Q_{pi} , измеренных при уровнях H_i , от соответствующих значений Q_{pi} по кривой расходов или уравнению регрессии расходов по уровням (9).

Математическая модель режимного учета стока приобретает вид [3]

$$Q = (a_0 + a_1 H + a_2 H^2 + \dots + a_m H^m) [1 + P_i(t) q_i + P_{i+1}(t) q_{i+1}]. \quad (10)$$

Уравнение регрессии (первый член в скобках) получают методом наименьших квадратов по данным измерений расходов и уровней расчистного года. Для аппроксимации поля точек (Q, H) в речных гидростворах обычно достаточно уравнение третьего порядка ($m=3$). Весовые коэффициенты P_i определяются по зависимостям оптимальной интерполяции [8 и др.].

Трудность оперативного учета стока заключается в том, что вычисление ежедневных расходов воды (ЕРВ) производится при отсутствии полной совокупности измерений данного года. В этих условиях естественно базировать расчеты на многолетних характеристиках пропускной способности русла, т. е. уравнении регрессии (9) для многолетнего ряда измеренных расходов.

Наиболее проста модель оперативного учета стока, основанная на уточнении свободного члена уравнения (9) за многолетие по данным текущих измерений:

$$Q = a_{0_i} + a_1 H + a_2 H^2 + a_3 H^3, \quad (11)$$

где a_{0_i} определяется каждый раз на основании последнего измеренного расхода Q_{pi} :

$$a_{0_i} = Q_{pi} - a_1 H_i - a_2 H_i^2 - a_3 H_i^3. \quad (12)$$

Значения a_{0i} принимаются для определения ЕРВ каждый раз на весь интервал времени вперед до очередного измерения расхода.

Значительно сложнее экстраполяционно-статистическая модель оперативного учета стока, синтезированная автором [3].

Различные варианты моделей учета стока испытывались в численных экспериментах на ЭВМ по материалам наблюдений на р. Амударье в створе Керки. На рис. 4 сопоставлены четыре варианта гидрографа за паводочный период 1973 г. Как видим, модели оперативного учета стока обеспечивают близкое соответствие рассчитанного гидрографа измеренным расходам (5) и практическое совпадение режимных и оперативных значений ЕРВ.

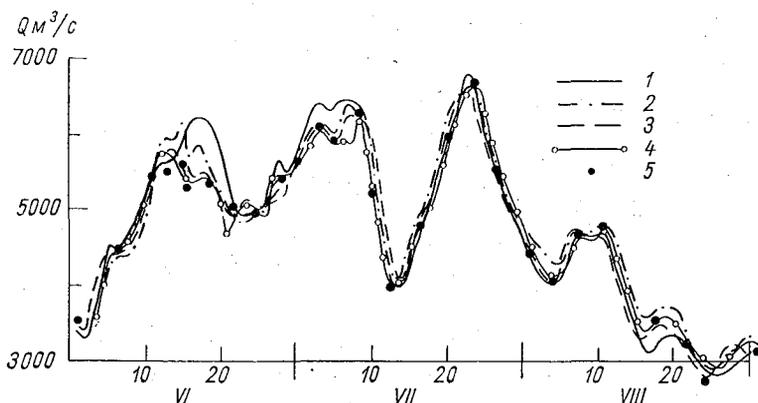


Рис. 4. Сопоставление гидрографов за характерные фазы паводочного периода 1973 г.

1 — по данным гидрологического ежегодника; 2 — по оперативным данным УГКС с использованием временных кривых расходов; 3 — на основе модели режимного учета стока; 4 — на основе моделей оперативного учета стока; 5 — измеренные расходы.

Средняя квадратическая погрешность модели режимного учета стока составляет 8—10%, а погрешность оперативных данных превышает эти значения в 1,5 раза. Обе модели оперативного учета стока практически приводят к одинаковым результатам.

Как показала проверка, и в других случаях неоднозначной зависимости расходов от уровней воды оптимальная экстраполяция характеристик пропускной способности ненамного точнее схемы, в которой принимается постоянное значение a_0 , определяемое для каждого экстраполяционного интервала по результатам последнего измерения. Но вариант экстраполяции свободного члена уравнений регрессии очень прост по форме и не требует предварительного определения корреляционно-статистических характеристик пропускной способности русла.

Высокая степень неоднозначности расходов и уровней воды возникает при переменном подпоре свободной поверхности. Он, как известно, наблюдается в створах, расположенных

в хвостовых зонах водохранилищ и выше впадения крупных притоков в главную реку.

Пропускная способность русла при переменном подпоре может быть выражена формулой Шези—Маннинга, включающей уклон свободной поверхности и коэффициент шероховатости. Эти характеристики, трудно определяемые вообще и в зонах переменного подпора в особенности, в конечном счете зависят от положения уровня в двух смежных створах — верхнем (H_v) и нижнем (H_n). Уровни H_v и H_n служат аргументами зависимости $Q(H_v, H_n)$ в виде абак, как это было предложено А. В. Огиевским, или в аналитической форме. Таким образом, при переменном подпоре расход воды может быть представлен в зависимости от двух уровней:

$$Q = a_0 + a_1 H_v + a_2 H_v^2 + a_3 H_n. \quad (13)$$

Надежность уравнений регрессии во многом определяется положением входного створа и пунктов наблюдений за уровнями воды. Этот вопрос исследован Т. И. Соколовой на примере Куйбышевского водохранилища. С точки зрения полноты охвата притока измерениями, входные створы предпочтительно располагать возможно ниже по течению, в пределах хвостовой части водохранилищ. При этом должны соблюдаться два условия: отсутствие обратных течений и достаточные скорости потока, превышающие по крайней мере в два раза начальную скорость вертушки, т. е. скорость течения должна быть не менее 0,10 м/с. Что касается нижнего (сопряженного) створа, то он по возможности должен находиться вне зоны различных денивеляций: сгонов и нагонов, волн перемещения при увеличении и сокращении попусков ГЭС и др.

Учет стока становится особенно сложным при наличии препятствий для движения потока — зарастания русла и ледяных образований в нем. С их появлением связано дополнительное стеснение живого сечения и возрастание шероховатости русла. Поэтому прежде чем воспользоваться гидравлическими зависимостями для оценки его пропускной способности, необходимо учесть влияние дополнительных сопротивлений.

На этой основе в отделе гидрометрии синтезированы модели учета стока в зимний и переходный периоды [3]. Одна из таких моделей применительно к относительной характеристике пропускной способности $K_{зим}$ и формуле Шези имеет вид

$$K_{зим} = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i X_i; \quad (14)$$

здесь переменные X_i выражают:

— фактор шероховатости, представленный как фактор времени

$$X_1 = \beta_n e^{-5\beta_n};$$

— фактор стеснения русла льдом

$$X_2 = \frac{\omega_{\text{л}}}{\omega_0}; \quad X_4 = \frac{\omega_{\text{л}}^2}{\omega_0^2};$$

— смешанные факторы

$$X_3 = \frac{\omega_{\text{л}}}{\omega_0} \beta_{\text{л}} e^{-5\beta_{\text{л}}}; \quad X_5 = \frac{\omega_{\text{л}}^2}{\omega_0^2} \beta_{\text{л}} e^{-5\beta_{\text{л}}},$$

где $\beta_{\text{л}} = \frac{T}{T_{\text{л}}}$ (T — время в сутках от начала льдообразования, $T_{\text{л}}$ — продолжительность зимнего периода); $\omega_{\text{л}}$ — площадь погруженного льда, ω_0 — полная площадь сечения (с погруженным льдом).

Величины a_0, a_1, \dots, a_5 обобщают параметры гидравлической зависимости для $K_{\text{зим}}$.

Толщина льда, как известно, не измеряется ежедневно, но может быть представлена в зависимости от суммы модулей отрицательной температуры воздуха $h_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}} \sqrt{|\sum t_{\text{в}}|}$, что позволяет в каждый из сложных аргументов X_2, \dots, X_5 вместо $\omega_{\text{л}}$ ввести $B_0 \sqrt{|\sum t_{\text{в}}|}$. Так определилась структура гидравлико-метеорологической модели учета зимнего стока, которая особенно удобна для применения в оперативном варианте.

При неустойчивом ледоставе и заторно-зажорных явлениях, когда зимние уровни нередко бывают выше весенне-летних, коэффициент $K_{\text{зим}}$ теряет свою определенность. Для построения модели учета стока в этих случаях целесообразно использовать непосредственно формулу Шези—Маннинга, которая после логарифмирования позволяет получить уравнение регрессии вида

$$\lg Q = a_0 + \sum_1^3 a_i X_i, \quad (15)$$

где $X_1 = \lg \omega_{\text{зим}}$; $X_2 = \lg h_{\text{зим}}$; $X_3 = \sqrt{|\sum t_{\text{в}}|}$.

Созданы также модели, основанные на закономерностях истощения зимнего стока, которые оказались особенно эффективными для шугоносных горных водотоков и перемерзающих рек с наледями.

В гидрохимической модели используется обратная зависимость минерализации от расходов воды

$$Q = \frac{Q_0 S_0}{S} + \alpha \frac{H}{S}, \quad (16)$$

где Q_0 и S_0 — соответственно расход и минерализация воды непосредственно перед ледоставом; H и S — уровень и минерализация воды после его наступления. Аргументами уравнения регрессии являются:

$$X_1 = \frac{1}{H}; \quad X_2 = \frac{H}{S}.$$

Все эти и другие модели режимного и оперативного учета стока приведены в специальных методических указаниях ГГИ.

В теплое время года дополнительное сопротивление движению потока создает водолюбивая растительность. Зарастают главным образом русла малых рек и каналов. Как показано в работе Л. А. Поповой [7], рост биомассы пропорционален корню квадратному из суммы средних суточных значений температуры воды $\sqrt{\sum t_b}$ после их перехода через некоторое пороговое значение (10°C для средней полосы ЕТС). Наряду с этим происходит старение и отмирание сначала части, а затем и всей массы водолюбивых растений. Поэтому кроме учета термического фактора при описании процесса развития—отмирания биомассы требуется специальная функция времени [7]. Ее аргументом служит величина $\beta = T/T_p$ (T — время от начала зарастания, T_p — весь период существования растительности в потоке). Аналитическая основа моделей учета стока в зарастающих руслах вытекает из формулы Шези с учетом термического и временного факторов. Структура этих моделей сходна по форме с моделью (14) и приведена в работах [3, 7].

Предложенный комплекс моделей даст возможность выбрать для каждого конкретного створа оптимальный вариант режимного и оперативного учета стока.

Корреляционно-гидравлические модели учета стока в своей основной (регрессионной) части реализованы на ЭВМ. Типовая блок-схема вычисления на ЭВМ, составленная А. В. Савельевой, приведена на рис. 5.

Модели режимного и оперативного учета стока проверялись непосредственно по данным наблюдений. Точность режимного учета стока оценивалась непосредственно средним квадратическим отклонением данных от значений, рассчитанных по уравнению регрессии, а погрешность оперативных данных — отклонением измеренных и вычисленных расходов при одних и тех же уровнях. В результате проверки оказалось, что модель учета стока при переменном подпоре по точности не уступает бесподпорным кривым расходов: средняя квадратическая погрешность вычисления ЕРВ составила всего 8—10%, а для оперативных данных 10—15%; погрешность режимного учета стока в зимний и переходный периоды на основе регрессионно-гидравлических моделей составляет 5—15%, а в оперативном варианте 20—25%. Те же характеристики точности получены и при проверке моделей учета стока в зарастающих руслах. В среднем по всей совокупности моделей погрешность оперативного учета стока в 1,5—2 раза превышает погрешность режимных данных, что соответствует теоретическим предпосылкам интерполяционных и экстраполяционных методов.

Математическая форма моделей учета стока не только не снижает значимости измерений расхода воды, но, напротив, повышает их роль, так как только они фиксируют фактическую водность реки в отдельно взятом створе. Особенно важно увеличивать

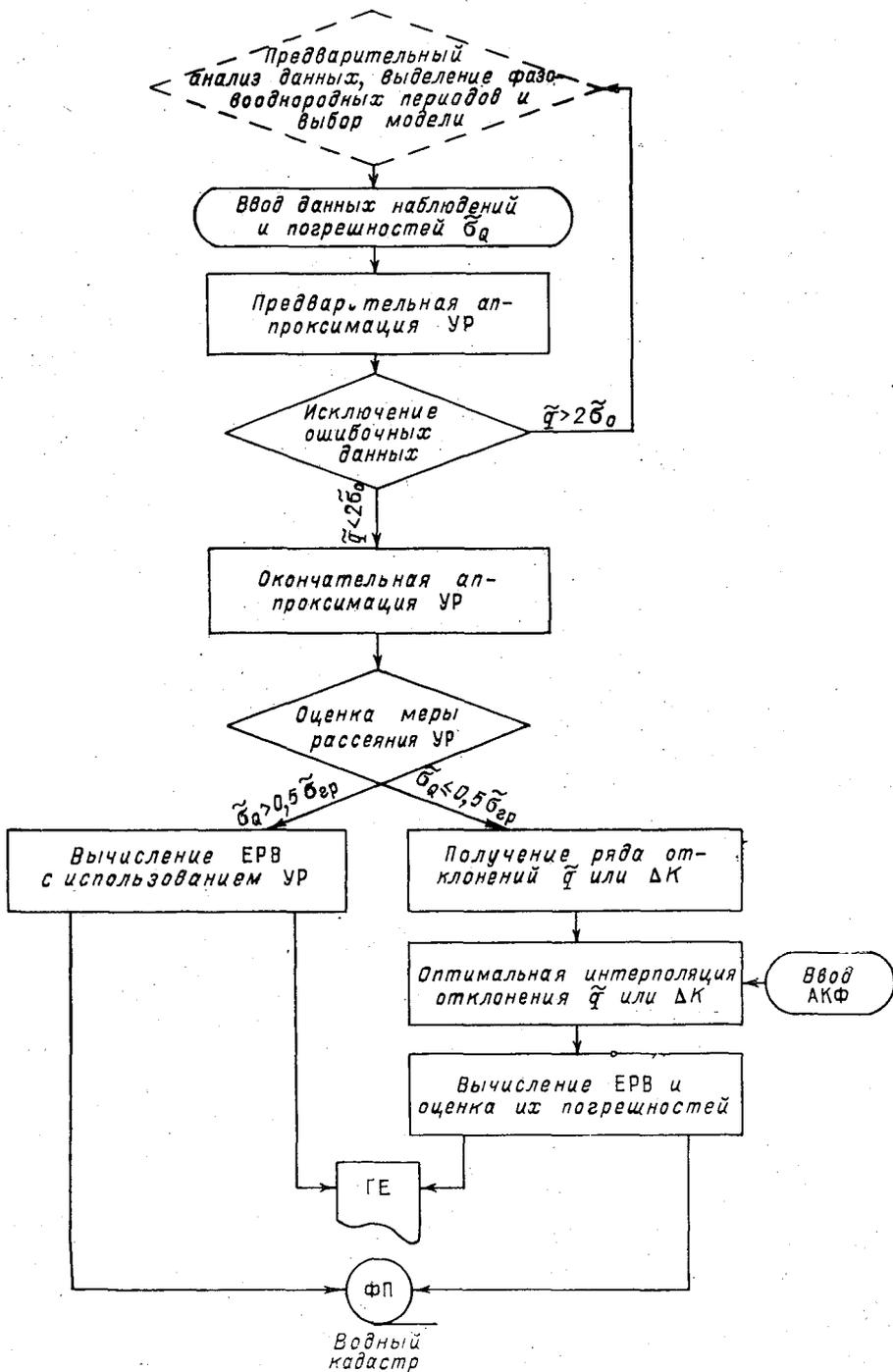


Рис. 5. Типовая блок-схема вычисления стока на ЭВМ.

АКФ — автокорреляционная функция; УР — уравнение регрессии; ЕРВ — ежедневный расход воды; ГЕ — гидрологический ежегодник; ФП — фонд памяти.

частоту измерений в период смены фаз гидрологического режима, чтобы вовремя зафиксировать моменты резких изменений пропускной способности русла.

Методические основы русловых водных балансов и государственного учета вод

Балансовые методы широко используются при изучении закономерностей формирования речного стока и преобразований его режима в результате человеческой деятельности. В гидрологических процессах на водосборе сток воды выступает как элемент ландшафта. В русловой же сети, сохраняя эти черты, речной сток становится одним из видов природных ресурсов, требующих повышенной точности его учета и контроля, особенно в районах водного дефицита. В гидрологии сформировалось представление о русловых водных балансах (РВБ) как о соотношении между поступлением воды на участок через верхний граничный створ, а также из боковых притоков, и оттоком ее через нижний (замыкающий) створ с учетом изъятий и сбросов оросительной зоны, потерь на испарение и фильтрацию, поступления от осадков и подземного притока [4, 5]. Детальные РВБ включают три группы составляющих: гидрометрическую, гидрофизическую и гидрогеологическую. Если значения элементов первой группы могут быть получены по данным основной сети, то для определения элементов двух других групп необходимы специальные наблюдения. Поэтому наиболее доступным оказывается составление так называемых гидрометрических РВБ по уравнению

$$Q_{в} - Q_{н} + Q_{б.п} + Q_{ск} - Q_{вз} + Q_{с} \pm Q_{р.р} \pm Q_{о} = 0, \quad (17)$$

где $Q_{в}$ и $Q_{н}$ — расходы воды соответственно в верхнем и нижнем створе; $Q_{б.п}$ и $Q_{ск}$ — соответственно расходы воды боковых притоков и склонового стока; $Q_{вз}$ и $Q_{с}$ — соответственно расходы водозаборов и сбросов (водоотведение); $Q_{р.р}$ — расходы руслового регулирования, обусловленные аккумуляцией воды в емкостях русла или возвратом из них при паводках и попусках.

Остаточный член $Q_{о}$ компенсирует неучтенные элементы или невязки РВБ. Как известно, многие водные балансы вообще не могут считаться замкнутыми, а тем более гидрометрические РВБ. Выделение остаточного члена $Q_{о}$ в явном виде исключает какую-либо подгонку баланса, которая, как отметил Р. Нейс (США), часто служит источником умозрительных представлений о количестве воды. В этом смысле предпочтительна именно та форма уравнений водного баланса, которая включает остаточный член $Q_{о}$.

Надежность расчета РВБ определяется точностью исходных данных. Чем короче расчетный период и чем больше число элементов водного баланса, тем точнее должны быть исходные дан-

ные. В противном случае погрешности расчета становятся соизмеримыми с самим значением определяемого элемента, а решение уравнения водного баланса сводится к некорректной задаче определения малой величины по разности больших, заведомо неточных величин.

Конечная цель составления РВБ заключается в том, чтобы установить природу остаточного члена, т. е. определить, является ли он погрешностью расчета или отражает некоторые физические факторы, непосредственно не учтенные РВБ. Эта задача может быть решена методами статистической проверки гипотез о значении остаточного члена РВБ в сравнении с ошибками его определения [4].

При нормально распределенных погрешностях расчета РВБ для надежной оценки Q_0 (с доверительной вероятностью 95%) необходимо соблюсти условие

$$|Q_0| \geq m_{95} = 1,96\sigma_0, \quad (18)$$

где m_{95} и σ_0 — соответственно предельная и средняя квадратическая погрешность определения остаточного члена.

Роль РВБ особенно возрастает в связи с переходом к системе ведения государственного учета вод (ГУВ) и государственного водного кадастра (ГВК). Существуют участки напряженного водного баланса — лимитированного водопользования (ЛВП); на которых необходимо осуществлять оперативный контроль использования вод. К ним относятся участки рек от истока либо от верхнего (входного) створа до нижнего замыкающего створа, на протяжении которых наблюдается недостаток водных ресурсов в течение всего года или в отдельные лимитирующие периоды. Критерием для выделения участка ЛВП служит неравенство для замыкающего створа

$$Q_p \leq Q_{вз} - Q_c + Q_{т(сан)}, \quad (19)$$

где Q_p — расход воды, характеризующий водные ресурсы; $Q_{вз}$ — расход водозаборов; Q_c — расход сбросных (возвратных) вод; $Q_{т(сан)}$ — минимальный заданный транзитный (санитарный) расход.

Безвозвратное водопотребление может быть определено двумя способами (с точностью до остаточных членов, компенсирующих погрешности определения элементов):

1) на гидрологической основе по разности стока в замыкающих створах с учетом естественного притока и потерь воды на участке:

$$Q_r = Q_n - Q_b - Q_{б.п} - Q_{ос} \pm Q_{и,т} \pm Q_{р.р} \pm Q_{ф} \pm Q_{п.с}, \quad (20)$$

где $Q_{ос}$ — поступление воды за счет осадков; $Q_{и,т}$ — испарение с водной поверхности и транспирация влаги растениями в русле и пойме реки; $Q_{ф}$ — фильтрационный приток и потери русловых вод на фильтрацию в берега, пойменные массивы, депрессионные воронки; $Q_{п.с}$ — отъемы или поступления воды при межбассейновой переброске стока;

2) по учетным данным, поступившим от водопользователей, как разность заборов и сбросов воды

$$Q_y = Q_{с.к.} + Q_{с.п.} + Q_{с.о.} - Q_{в.к.} - Q_{в.п.} - Q_{в.о.}, \quad (21)$$

где $Q_{с.к.}$, $Q_{с.п.}$, $Q_{с.о.}$ — сбросы воды в русло реки соответственно коммунального, промышленного водоснабжения и возвратные воды оросительных систем; $Q_{в.к.}$, $Q_{в.п.}$, $Q_{в.о.}$ — заборы воды на нужды коммунального, промышленного водоснабжения, орошения и обводнения.

Балансы, основанные на дифференциации и взаимоконтроле гидрологических данных и сведений об использовании вод, получили название учетных водных балансов (УВБ). Сопоставление их невязки

$$Q_{нев} = Q_r - Q_y$$

с предельной совокупной погрешностью позволяет получить критерий надежности учета водных ресурсов

$$|Q_{нев}| \leq 1,96 (\sigma_r^2 + \sigma_y^2)^{1/2}. \quad (22)$$

В процессе разработки методических основ ГУВ было изучено состояние учета вод и их использования в характерных физико-географических районах. С этой целью ГГИ и рядом УГМС проведены обследования объектов водопользования и гидрометрические съемки участков ЛВП в бассейнах рек Амударьи, Урала, Камы, Днепра, Оскола и др. Всего за 1974 и 1975 гг. обследовано более 200 водозаборов и 250 водосбросов систем промышленного, коммунального и сельскохозяйственного водоснабжения. На многих объектах водопользования надежность учета воды не может считаться обеспеченной. Хотя современные расходомеры по конструктивным возможностям обладают точностью 1—3%, реже 5%, она оказывается недостижимой из-за недостатков технического состояния и эксплуатации расходомерного хозяйства. В тех случаях, когда расходомеры неисправны или длительное время не тарированы, точность учетных данных оказывается низкой и отличается на 10—35% от результатов контрольных измерений. Значительные расхождения (от 15 до 45% и более) имеют место в тех случаях, когда расходы воды рассчитываются водопотребителями по мощностям насосных установок и нормам потребления воды на единицу продукции.

На основании обобщения результатов исследований ГГИ подготовлены и опубликованы «Методические рекомендации по оценке точности и гидрологическому контролю данных государственного учета вод и их использования», содержащие положения единой системы ГУВ [5]. «Методические рекомендации» представляют собой первое практическое руководство по анализу и обобщению данных ГУВ с использованием критериев системного подхода и балансовых методов контроля.

Методическое руководство наблюдениями на основной гидрологической сети

Как известно, весь комплекс гидрометеорологических наблюдений в Советском Союзе регламентирован наставлениями гидрометстанциям и постам. Основная гидрологическая сеть руководствуется тремя из них: вып. 6, ч. I — Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках; вып. 6, ч. II — Гидрологические наблюдения и работы на малых реках; вып. 2, ч. II — Гидрологические наблюдения на постах.

Все выпуски этих наставлений вышли в свет в 50-х годах (2-е издание). За два десятилетия произошли значительные изменения в техническом оснащении и методах наблюдений на реках. Возросли возможности речной гидрометрии, но и повысился уровень требований к выполняемым наблюдениям. Назрела необходимость творческого пересмотра действующих методических руководств и наставлений. Эта задача решалась Н. Н. Федоровым, С. С. Гинко, А. М. Гавриловым, В. Л. Виноградовым, В. В. Гончаровым, Р. В. Донченко, А. В. Ивановым, Г. А. Петуховой, Л. А. Поповой, А. В. Савельевой, Р. А. Шестаковой и другими опытными методистами ГГИ под общим руководством автора.

В течение 1970—1978 гг. были подготовлены и вышли в свет новые издания трех указанных наставлений. В них получили освещение рациональные приемы и прогрессивная методика наблюдений, основанные на результатах специальных исследований в области речной гидрометрии и практических достижений, а также на зарубежном опыте.

Отметим положения, отличающие новые издания наставлений от прежних.

В Наставлении вып. 6, ч. II расширена область применения гидрологических расходомеров (водосливы, лотки, контрольные русла): вместо регламентированной ранее предельной пропускной способности в $20 \text{ м}^3/\text{с}$ рекомендовано рассчитывать гидрометрические сооружения на пропускную способность расхода воды $50 \text{ м}^3/\text{с}$ при обеспеченности 5%. Гидрологические расходомеры рассматриваются в качестве основных средств измерения расходов на малых реках. Русловой способ рекомендуется применять лишь в тех случаях, где строительство расходомеров оказывается дорогостоящим мероприятием (отдаленные и труднодоступные районы).

Предусмотрено использование хорошо зарекомендовавших себя в эксплуатационной гидрометрии водомерного порога и лотка САНИИРИ. Широко использован зарубежный опыт, в частности рекомендации ВМО по применению водослива Крампа и лотков Вентури.

В соответствии с последними исследованиями в отечественных и зарубежных лабораториях был уточнен ряд гидравлических формул для зависимости $Q(H)$.

Много внимания в выпуске уделяется рекомендациям по технической эксплуатации гидрометрических сооружений.

Наставления вып. 2, ч. II и вып. 6, ч. I взаимосвязаны и разработаны на единой методической основе. Так, например, методика наблюдений на постах по стандартной программе, включая характеристики приборов, излагается в первом из указанных источников, а во втором содержится методика более сложных видов наблюдений (в частности специальных), а также более детально изложен порядок обработки данных.

В области измерения расходов воды и наносов новыми являются следующие положения:

— рекомендуется более широко применять сокращенные методы измерения (по единичной скорости на репрезентативной вертикали и по связям ее со средней скоростью потока);

— при вертушечных измерениях установлено минимальное расстояние от водной поверхности и дна для размещения оси вертушки; это повлекло за собой изменение значений максимальных глубин, рекомендуемых при применении одно, двух, пятиточечного метода;

— в целях унификации методики измерений расхода воды при открытом русле и подо льдом при основном способе рекомендовано применять в обоих случаях двухточечный способ вместо ранее применявшегося трехточечного для русел под ледяным покровом;

— предусмотрено более широкое применение механизированных установок для измерения расходов воды (ГР-64, ГР-70, интегратор скорости ГР-101), а также измерение расходов с автодорожных (в отдельных случаях и с железнодорожных) мостов;

— при изучении стока наносов указано на необходимость измерения расхода донных наносов по перемещению гряд и применения фотографического определения гранулометрического состава донных отложений.

Одно из важнейших требований к системе наблюдений на сети — единство метрологического обоснования и сопоставимость результатов измерений. Поэтому в наставлениях соблюдается определенная преемственность и в то же время дается широкий простор творческой инициативе, направленной на усовершенствование методики и техники измерений. В связи с этим особое внимание уделено постановке специальных методических исследований, выполняемых гидрологическими станциями.

В Наставлении вып. 2, ч. II большое значение имеет глава «Наблюдения за химическим составом воды», повышающая роль гидрологических постов в области контроля качества и охраны вод от загрязнения. Новые методы гидрометрии нашли отражение также в главах, посвященных способам интеграционных измерений расходов воды с применением установок ГР-101 и ГР-70.

В Наставлении вып. 6, ч. I, рассчитанном на работников гидрологических станций, введен ряд новых глав. Изложены основные задачи станций по ведению ГУВ и оценке точности гидрометриче-

ских данных о водопользовании. Приведены общие организационные положения по общегосударственной службе наблюдений и контроля за загрязнением объектов окружающей среды (ОГСНК). Значительное место отведено специальным научно-методическим исследованиям, даны примеры проведения исследований, с которыми инженер-гидролог наиболее часто сталкивается в своей практической деятельности.

В связи с ведением ГВК изложены основные организационно-технические положения автоматизированной обработки данных наблюдений.

В заключение отметим, что не все изложенные выше новые методы и подходы стали достоянием гидрологической сети. Их усовершенствование и внедрение в практику наблюдений — задача дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойчук В. В., Марченко А. С. Фон и вариация элементов физико-географической среды.— М.: Наука, 1968.— 64 с.
2. Карасев И. Ф. О структуре и принципах рационального размещения опорной гидрологической сети.— Метеорология и гидрология, 1972, № 5, с. 51—62.
3. Карасев И. Ф. Математические модели гидрометрического учета речного стока.— Труды ГГИ, 1978, вып. 256, с. 3—35.
4. Карасев И. Ф., Савельева А. В. Методическое обоснование русловых водных балансов.— В кн.: Труды IV Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 2, Л., 1976, с. 110—122.
5. Карасев И. Ф., Устюжанин Б. С. Научно-методические основы государственного учета вод и их использования.— Водные ресурсы, 1978, № 3, с. 5—13.
6. Методические рекомендации по оценке точности и гидрологическому контролю данных государственного учета вод и их использования.— Л.: Гидрометеиздат, 1977.— 117 с.
7. Попова Л. А. Новые модели учета стока зарастающих рек.— Труды ГГИ, 1978, вып. 256, с. 50—58.
8. Савельева А. В. Применение оптимальной интерполяции поправок к уровням для вычисления стока р. Амурь на ЭВМ.— Труды НИИАК, 1973, вып. 87, с. 17—35.
9. Сибирякова Н. К. О методах оценки точности измеренных расходов воды.— Труды ГГИ, 1973, вып. 202, с. 74—82.
10. Соколов А. А. К теории гидрологического картирования.— Известия ВГО, 1968, № 1, с. 38—43.
11. Leclerc M., Bobée B., Villeneuve I. P. Adaptation and application of the Karasev method to the rationalization of Quebec's Hydrometric basic network.— Nordic Hydrology, 1974, N 5.

Р. Д. Курдин

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УЧЕТ ВОД И ВОДНЫЙ КАДАСТР

Общие положения

Рациональное использование и охрана водных ресурсов невозможны без строгого учета вод, наличия общего государственного фонда систематизированных данных о водных ресурсах страны и их использовании. Основами водного законодательства Союза ССР и союзных республик (1970 г.) предусмотрена система, включающая государственный учет вод и их использование, ведение государственного водного кадастра, составление водохозяйственных балансов, разработку схем комплексного использования и охраны вод [5].

Важное место в этой системе занимают государственный учет вод и их использования (ГУВ) и государственный водный кадастр (ГВК). Постановлением ЦК КПСС и СМ СССР «Об усилении охраны природы и улучшении использования природных ресурсов» (1972 г.) и последующими постановлениями СМ СССР по вопросам ГУВ (1975 г.) и ГВК (1977 г.) государственный учет вод и ведение государственного водного кадастра возложены на Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды (головная организация), Министерство геологии СССР (подземные воды) и Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР (использование вод).

Государственный учет вод и их использования предусматривает производство измерений и первичный учет количества и качества поверхностных и подземных вод (водных объектов), регистрацию водопользований, учет вод, забираемых из водных объектов, количества и качества сбрасываемых в них вод, а также выдачу потребителям данных первичного учета. Систематизация, обобщение и хранение данных учета вод и доведение их до потребителей осуществляются в рамках государственного водного кадастра.

Государственный учет вод и государственный водный кадастр предусматривают получение и систематизацию сведений о вод-

ных ресурсах и их использовании по следующим видам водных объектов:

— реки и каналы, соединяющие различные водные системы или служащие для межбассейновой переброски стока;

— озера и водохранилища;

— внутренние моря и территориальные воды океанических морей (территориальное море СССР);

— ледники;

— подземные воды.

Разработка научно-технических основ и системы ведения государственного учета вод и их использования и государственного водного кадастра выполняются ГГИ совместно с ГХИ (качество поверхностных вод суши), ГОИН (моря и морские устья рек), САРНИГМИ (ледники), ВНИИГМИ—МЦД (автоматизированная обработка, хранение и выдача информации), ВСЕГИНГЕО (подземные воды), ЦНИИКИВР (использование вод).

ГГИ является головным институтом по разработке и ведению раздела «поверхностные воды», головным институтом по разработке и ведению ГВК в целом и непосредственно осуществляет разработку систем ГУВ и ГВК в области поверхностных вод суши (реки, каналы, озера и водохранилища).

Первые обоснования, общие положения и принципы построения ГУВ и ГВК были сформулированы в статьях В. И. Корзуна [5] и С. К. Черкавского [11], а также в работах ГГИ [1, 4, 8, 9 и др.]. В основу научного обоснования систем ГУВ и ГВК была положена идея единства природных вод и их использования, в частности учета взаимосвязи поверхностных и подземных вод и их использования. Поверхностные воды в СССР являются основным видом водных ресурсов, поэтому основополагающим принципом единой системы ГУВ и ведения ГВК должна быть привязка данных учета подземных вод и использования вод к створам учета поверхностных вод.

Как известно, водные ресурсы той или иной территории состоят из ежегодно возобновляемых ресурсов (поверхностный и подземный сток, формирующийся на данной территории, приток или подача воды с соседних территорий) и многолетних запасов воды в поверхностных водных объектах, подземных бассейнах и ледниках, т. е. включают динамическую и статическую их составляющие.

При изучении и оценке ресурсов поверхностных вод одной из важнейших задач является изучение динамической составляющей — стока воды, его среднего многолетнего и ежегодных значений для конкретных водных объектов, бассейнов, административных и экономических районов, территории СССР в целом, водного баланса этих территорий, а также водохранилищ и внутренних морей. Соответствующие характеристики намечено публиковать в изданиях ГВК и выдавать потребителям по их запросам. Для составления водных балансов участков рек, водоемов, водосборов, экономических и административных районов необходимо иметь

сведения о подземных составляющих водного баланса (подземном стоке).

В Министерстве геологии СССР подземные воды рассматриваются преимущественно как полезные ископаемые, а их ресурсы (общие и эксплуатационные) — как запасы. Задача учета подземного стока, поступающего в реки, каналы и озера, в настоящее время еще не входит в функции гидрогеологической службы министерства.

Ресурсы поверхностных и подземных вод формируются во взаимосвязанных процессах единого круговорота природных вод (гидрологического цикла). Недоучет этой взаимосвязи может послужить причиной просчетов в оценке общих водных ресурсов на той или иной территории. Это обстоятельство обуславливает необходимость раздельного учета подземных вод, использование которых может привести к изменению поверхностных водных ресурсов.

Государственный учет вод и их использования

В соответствии с положением, утвержденным Советом Министров СССР (1975 г.), Госкомгидромет обеспечивает:

1) государственный учет ресурсов поверхностных вод и наблюдение за их режимом и качеством;

2) наблюдение и контроль за уровнем загрязнения вод (кроме подземных вод) по физическим, химическим и гидробиологическим показателям;

3) представление заинтересованным организациям данных о водных объектах (кроме подземных вод) и их гидрологическом режиме, гидрологических прогнозов, систематической информации об уровне загрязнения водных объектов (кроме подземных вод) и о возможности его изменения под влиянием хозяйственной деятельности и гидрометеорологических условий.

Министерство геологии СССР осуществляет:

1) государственный учет подземных вод, включая учет эксплуатационных запасов, наблюдение за их режимом и качеством, а также наблюдение и контроль за уровнем загрязнения подземных вод по физическим, химическим и гидробиологическим показателям;

2) представление Госкомгидромету и заинтересованным организациям обобщенных данных по учету подземных вод и их режиму, гидрогеологических прогнозов, систематической информации об уровне загрязнения подземных вод и о возможности его изменения под влиянием хозяйственной деятельности и гидрометеорологических условий, а также экстренной информации о резких изменениях загрязнения подземных вод.

Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР осуществляет:

1) регистрацию водопользований и сводный учет использования вод;

2) контроль за правильностью первичного учета количества забираемых из водных объектов и сбрасываемых в них вод и определение их качества;

3) представление Госкомгидромету обобщенных данных по учету использования вод.

Государственные, кооперативные и общественные предприятия, организации и учреждения, осуществляющие водопользование, ведут первичный учет (измерение и запись) количества вод, забираемых из водных объектов и количество и качество сбрасываемых в них вод (в порядке и в сроки, утвержденные Минводхозом СССР по согласованию с Госкомгидрометом и Министерством геологии СССР).

По заданию Государственного комитета СССР по науке и технике в 1973 г. была начата разработка системы ведения ГУВ. В результате выполненных исследований разработаны научно-методические основы ГУВ, определены порядок ведения учета вод, формы обобщения материалов первичного учета, состав пунктов наблюдений и порядок обмена данными между ведомствами. Подготавливаются единые методические указания по ГУВ.

ГГИ выполнены полевые и теоретические исследования по оценке точности и усовершенствованию учета стока воды в реках и каналах, рациональному размещению и развитию гидрологической сети, разработаны методы составления русловых водных балансов и балансов химических веществ участков рек, методы гидрологического контроля надежности данных об использовании вод и оценки точности учета стока на ГЭС и мелиоративных каналах.

Результаты исследований обобщены в методических пособиях для УГМС [7] и научных статьях [4, 8, с. 56—77; 12]. Более подробно научно-методические основы ГУВ рассматриваются в настоящем сборнике в статье И. Ф. Карасева «Новые методы речной гидрометрии».

Государственный водный кадастр

В соответствии с постановлением СМ СССР «О порядке ведения государственного водного кадастра» к этой работе приступили в 1978 г. Для повышения оперативности в обеспечении народного хозяйства данными о водных ресурсах и их использовании предусматривается создание автоматизированной информационной системы (АИС).

Ведение кадастра традиционными методами, основанными на ручной обработке данных и доведении информации до потребителей в виде периодических и разовых публикаций, уже не удовлетворяет современным запросам водного хозяйства. Применение ручной обработки не позволяет ускорить публикацию данных, ограничивает возможность обобщения их с учетом конкретных запросов потребителей.

Для обеспечения этих работ созданы отделения государственного водного кадастра при ГГИ (г. Ленинград), ВСЕГИНГЕО (пос. Зеленый, Московской области) и ЦНИИКИВР (г. Минск) с вычислительными центрами и отделы государственного водного кадастра при республиканских и территориальных органах Госкомгидромета и Министерств геологии, мелиорации и водного хозяйства СССР.

Государственный водный кадастр ведется на основе данных государственного учета вод и представляет собой ежегодно пополняемый систематизированный свод сведений о водных ресурсах (водных объектах), составляющих единый водный фонд СССР, и их использовании. От водного кадастра прежних лет он отличается следующими принципиальными особенностями:

1) ГВК ведется на общегосударственной (межведомственной) основе и включает сведения о всех видах вод и их использовании;

2) материалы ГВК являются официальными государственными данными;

3) ГВК представляет собой постоянно действующую динамичную систему накопления, обработки, хранения и выдачи потребителям информации о водных ресурсах, их режиме и использовании, основанную на использовании ЭВМ.

Данные ГВК предназначены для использования при:

— текущем и перспективном планировании использования вод и проведения водоохраных мероприятий, размещении производительных сил на территории страны;

— составлении схем комплексного использования и охраны вод, водохозяйственных балансов;

— проектировании водохозяйственных, транспортных, промышленных и иных предприятий и сооружений, связанных с использованием вод;

— прогнозировании изменений гидрологических условий, водности рек и качества вод;

— разработке мероприятий по повышению эффективности работы водохозяйственных систем;

— нормировании потребления и сброса вод, а также показателей качества вод;

— разработке мероприятий по предупреждению и ликвидации водного воздействия вод;

— осуществлении государственного контроля за проведением мероприятий по рациональному использованию и охране вод;

— регулировании взаимоотношений между водопользователями;

— решении других вопросов, связанных с использованием вод.

Разработка новой системы ведения ГВК была начата в 1972 г. в соответствии с постановлением ГКНТ. Получены следующие основные результаты:

— собраны, изучены и обобщены требования основных потребителей к составу ГВК, формам и методам выдачи систематизированных сведений о водных ресурсах и их использовании;

— разработаны научно-методические основы и общая структура ГВК, состав фонда памяти на технических носителях, схемы территориального деления ГВК, системы кодирования водных объектов и пунктов наблюдений;

— определены в общих чертах структура и технологические схемы систем сбора, контроля, обработки, обобщения и хранения информации о водных ресурсах и их использовании;

— определен состав программно-аппаратурных комплексов, необходимых для контроля, обработки, занесения на технические носители и хранения информации;

— определены основные способы и формы выдачи потребителям данных о водных ресурсах и их использовании;

— подготовлены состав публикуемых данных и предварительный макет публикуемой части водного кадастра (издан в 1975 г.);

— подготовлены проект «Положения о ведении государственного водного кадастра» и проект постановления СМ СССР о создании и ведении ГВК;

— разрабатывается техническое задание на проектирование автоматизированной информационной системы ведения ГВК (АИС ГВК);

— начата работа по созданию методов, алгоритмов и программ контроля, обработки и обобщения на ЭВМ исходной информации, разработке математического обеспечения АИС ГВК.

Результаты исследований и разработок, выполненных в ГГИ по проблеме ГВК, изложены в научных отчетах, технических заданиях, проектах, макетах изданий ГВК, методических указаниях и рекомендациях УГМС, опубликованы в двух выпусках трудов ГГИ по вопросам ведения ГВК и методов автоматизированной обработки информации [9, 10].

Разрабатываемая автоматизированная информационная система ведения ГВК будет состоять из трех отраслевых подсистем («поверхностные воды», «подземные воды» и «использование вод») и пяти функциональных подсистем:

1) автоматизированная подсистема перфорации, контроля, обработки и занесения на долговременные технические носители первичных данных наблюдений, получения таблиц ежегодников;

2) централизованные (в региональных и союзных центрах ведения ГВК) механизированные архивы данных на долговременных технических носителях (подсистема хранения информации);

3) банки данных на ЭВМ (подсистема обработки, поиска и выдачи кадастровой информации);

4) автоматизированная информационная справочная подсистема «Каталог» (подсистема справочной информации);

5) система оперативной подготовки и издания публикаций ГВК (подсистема публикации).

Основой автоматизированной системы ведения ГВК является ежегодно обновляемый фонд данных на долговременных технических носителях (магнитофильмы, микрофильмы) за весь период наблюдений и банки данных на ЭВМ, осуществляющие

-систематизацию, поиск, обработку и обобщение исходных данных и выдачу необходимой информации.

Доведение кадастровой информации до потребителей будет осуществляться следующими способами:

- публикация в стандартных изданиях широкого пользования;
- публикация в специальных изданиях для ограниченного круга потребителей (тиражирование);
- выдача банками данных информации индивидуальным потребителям по автоматизированной системе «запрос—ответ» (на технических носителях, в виде таблиц или графических изображений, выдаваемых ЭВМ).

На первом этапе система «запрос—ответ» будет выдавать информацию по письменным запросам на специальных бланках.

В будущем основные потребители смогут получать прямой доступ в ЭВМ банков данных с помощью прямых телетайпных или телефонных линий связи и выносных пультов управления ЭВМ (терминалов).

Создание автоматизированной системы ведения ГВК является сложной задачей, требующей создания соответствующего методического, математического и технического обеспечения, строительства специальных центров обработки, координированных усилий ряда научных, проектных и производственных учреждений.

Разработка различных подсистем ГВК находится на разном уровне. По разделу «поверхностные воды» начато внедрение первого варианта разработанной ВНИИГМИ—МЦД автоматизированной системы первичной обработки гидрологических данных на ЭВМ «Минск-32» (АСОГД), занесения их на долговременные носители и получения основных таблиц ежегодников. Ведется разработка усовершенствованной АСОГД для ЕС ЭВМ, принципов построения банков данных. Осуществляется подготовка к занесению на долговременные носители данных за прошлые годы.

В состав АИС ГВК по этому разделу будут входить территориальные центры обработки данных (с банками данных) общего типа (при региональных НИГМИ и крупных УГКС), специализированные центры обработки и банки данных («реки и каналы» — ВНИИГМИ, «озера и водохранилища» — ГГИ, «качество поверхностных вод суши» — ГХИ, «морья и морские устья рек» — ВНИИГМИ, «ледники» — САРНИГМИ, «сели» — КазНИГМИ), а также головные центры ГВК при ВНИИГМИ—МЦД и ГГИ.

Разработка системы ведения ГВК осложняется сложностью согласования общих вопросов. В настоящее время в каждом из ведомств, привлеченных к ведению ГВК, разработаны свои схемы территориального деления, классификации и кодирования водных и водохозяйственных объектов, пунктов наблюдений (измерений). Разработка автоматизированных систем обработки данных до последнего времени велась на ведомственной основе. Принятое министерствами геологии, мелиорации и водного хозяйства СССР территориальное районирование для обобщения данных ГУВ и ГВК не обеспечивает привязку этих данных к створам учета по-

верхностных вод, что ставит под угрозу реализацию зафиксированного в постановлении СМ СССР основополагающего принципа — ведение ГВК по единой для всей страны системе.

В ближайшее время в рамках разрабатываемого единого технического задания на проектирование АИС ГВК предстоит унифицировать основы этой системы, обеспечить единство или увязку методологических, организационных и технических подходов и решений, в частности унифицировать терминологию, «языки» программирования, технические носители информации, технические средства, принципы построения банков данных и систем «запрос—ответ».

С целью стандартизации способов ведения водного кадастра, обмена гидрологическими данными на технических носителях по бассейнам международных рек, взаимного использования опыта разработки и эксплуатации автоматизированных систем ведения кадастра осуществляются сотрудничество стран—участниц СЭВ и разработка международного руководства по ведению водного кадастра и составлению водохозяйственных балансов.

Наиболее трудно разрешимой в научно-методическом отношении задачей автоматизации обработки первичных гидрологических данных является автоматизация подсчета стока и контроля информации, что связано с отсутствием до последнего времени достаточно объективных методов и критериев их применения, недостатками методики измерения, особенностями водных объектов, режим которых определяется различного рода природными и антропогенными факторами.

В ГГИ в настоящее время разработаны научно-методические основы и пути решения обеих задач, созданы некоторые математические модели.

Состояние методической базы и основные концепции по вопросам подсчета стока изложены в работах [3, 6 и др.], по вопросам контроля информации — в работе [7]. До конца текущей пятилетки предстоит завершить создание методов, алгоритмов и программ подсчета стока и контроля текущей режимной гидрологической информации.

Создание в рамках АИС ГВК мощных вычислительных центров и банков данных, располагающих информацией на технических носителях по всем пунктам наблюдений на территории СССР за весь период наблюдений, создает принципиально новые возможности для пространственно-временного обобщения информации, получения комплексных характеристик гидрологического режима, построения кривых обеспеченности пространственного распределения стокообразующих факторов, характеристик гидрологического режима, оценки надежности, точности и репрезентативности гидрологической информации, оценки влияния хозяйственной деятельности на сток воды и другие элементы гидрологического режима, классификации пунктов наблюдений по различным признакам и т. д. Для использования этих возможностей предусматривается поиск новых форм отображения, оценки и обобщения гидрологической

информации, а также разработка, испытание и внедрение соответствующих математических моделей.

На основании тщательного изучения предварительно собранных мнений и пожеланий широкого круга потребителей кадастровой информации (проектные, водохозяйственные, планирующие и научные организации и учреждения) определена структура публикуемой части ГВК. Издания ГВК намечается осуществлять в виде следующих четырех серий:

1) каталоги данных о водных объектах, составляющих единый государственный водный фонд, и водопользованиях (разовые издания, дополняемые и обновляемые по мере необходимости);

2) ежегодные данные о режиме, ресурсах, качестве и использовании вод;

3) многолетние данные о режиме, ресурсах, качестве и использовании вод (издаются 1 раз в 5 лет);

4) данные о водных ресурсах, водных балансах и об использовании вод (1 раз в 5—10 лет).

Серии 1—3 будут издаваться по разделам «Поверхностные воды», «Подземные воды», «Использование вод» отдельными томами и выпусками по территории страны, серия 4 — одной книгой для СССР в целом, в которой будут публиковаться (с выделением бассейнов крупных рек и водоемов, административных и экономических районов) обобщенные данные о ресурсах поверхностных и подземных вод, их качестве, использовании и тенденции изменения во времени.

Серия 1 включает каталоги рек, каналов, озер, водохранилищ, селевых бассейнов, селеопасных очагов, атлас селевых явлений, каталоги морей и морских устьев рек, ледников, подземных вод и водопользований. На первом этапе в качестве каталога рек, каналов, озер и водохранилищ будет использоваться справочник «Ресурсы поверхностных вод СССР», ч. 1 (Гидрологическая изученность), изданный гидрометслужбой. Дополнения по изученности водных объектов публикуются в «Справочнике гидрометфонда СССР», издаваемом отдельными выпусками по территории деятельности УГКС. Основным кадастровым справочником по ледникам будет служить издаваемый Госкомгидрометом совместно с Академией наук «Каталог ледников СССР». Остальные каталоги будут издаваться по мере их подготовки.

Серия 2 состоит из ряда изданий:

— «Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» (вместо «Гидрологического ежегодника»);

— «Ежегодные данные о качестве поверхностных вод суши»;

— «Ежегодные данные о селевых потоках»;

— «Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек»;

— «Ежегодные данные об использовании вод»;

— «Ежегодные данные о режиме, ресурсах и качестве подземных вод».

Аналогичные издания, содержащие обобщенные данные за последние 5 лет и весь период наблюдений, будут входить в состав серии 3.

Издания серии 2 (ежегодные данные) будут публиковаться с 1978 г., а серии 3 и 4 — с 1980 г.

Издания серий 1—3 подготавливаются соответствующими территориальными подразделениями Госкомгидромета и министерств геологии, мелиорации и водного хозяйства СССР. Серия 4 будет издаваться ГГИ по материалам, представляемым головными научно-исследовательскими институтами Госкомгидромета и министерств геологии, мелиорации и водного хозяйства СССР.

ГГИ разработаны и изданы макет «Ежегодных данных о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» и методические указания по их составлению и подготовке к печати. Начата разработка макетов изданий серий 3 и 4.

По мере ввода в действие и развития автоматизированной системы «запрос—ответ» состав публикуемых данных будет сокращаться.

Государственный водный кадастр явится своего рода автоматизированной энциклопедией знаний о воде. Банки данных ГВК позволят быстро произвести выборку и систематизацию данных за любые годы по тем или иным водным объектам и пунктам наблюдений, а также произвести необходимые обобщения и расчеты.

Ведение ГВК на автоматизированной основе позволит ускорить доведение любой кадастровой информации до потребителя, открывает принципиально новые возможности перед гидрологической наукой.

Внедрение АИС ГВК будет способствовать значительному улучшению гидрологического обеспечения народного хозяйства, в частности ускорению разработки научных основ и инженерного обоснования проблем рационального использования и охраны водных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макет публикуемой части Государственного водного кадастра Союза СССР.—Валдай: Изд. ГГИ, 1975.—449 с.

2. Методические рекомендации по оценке точности и гидрологическому контролю данных государственного учета вод и их использования.—Л.: Гидрометеиздат, 1977.—115 с.

3. Карасев И. Ф. Математические модели гидрометрического учета речного стока.—Труды ГГИ, 1978, вып. 256, с. 3—35.

4. Карасев И. Ф. Структура и задачи системы государственного учета вод и их использования.—В кн.: Методы изучения гидрологического режима водных объектов. Ч. 1. Л., 1978, с. 45—55.

5. Корзун В. И. Научные основы водного законодательства.—Водные ресурсы, 1972, № 3, с. 33—43.

6. Курдин Р. Д., Серков Н. К. Методы вычисления ежедневных расходов воды и пути их реализации на ЭВМ.—Труды ГГИ, 1979, вып. 262.

7. Курдин Р. Д., Рупперт М. Л. Принципы построения системы автоматизированного контроля режимной гидрологической информации.— Труды ГГИ, 1979, вып. 262.

8. Методы изучения гидрологического режима водных объектов. Ч. 1.— Л.: Гидрометеоздат, 1978.— 161 с.

9. Труды ГГИ. Вып. 244. Вопросы ведения государственного водного кадастра и методы автоматизированной обработки информации.— Л.: Гидрометеоздат, 1977.— 81 с.

10. Труды ГГИ. Вып. 262. Вопросы ведения государственного водного кадастра и методы автоматизированной обработки данных.— Л.: Гидрометеоздат, 1979.

11. Черкавский С. К. О единой государственной системе учета вод и ведения водного кадастра СССР.— Водные ресурсы, 1972, № 3, с. 44—52.

12. Kurdin R. D. Some aspects of general strategy of hydrological (hydro-metric) network design.— Casebook on hydrological network design practice, WMO, 1978, N 324, ch. III—51.

А. В. Караушев, Б. Г. Скакальский

ОЦЕНКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ВОДОЕМАХ

Постановка вопроса

При различных видах хозяйственного использования водных объектов (реки, каналы, озера и водохранилища), проектировании водопользования, организации и осуществлении контроля за качеством водных масс необходимо располагать достаточно надежными методами расчета качества воды и соответствующей системой объективных критериев. Последние должны обеспечить возможность выполнения сравнительной оценки качества и загрязненности вод конкретных водных объектов и наглядно показать тенденцию развития процесса во времени.

Методику расчета турбулентной диффузии растворенных и взвешенных веществ в потоках начали разрабатывать в ГГИ еще в 30—40-е годы [3, 7, 10, 11]. Можно с полной определенностью говорить о приоритете ГГИ в этом деле. В основу методики было положено представление о физической сущности процесса, для описания которого была предложена система дифференциальных уравнений [10].

В течение ряда последних лет в ГГИ велись исследования в области развития физической модели процесса турбулентного перемешивания и экспериментального ее обоснования, создания и усовершенствования методов расчета диффузии и переноса растворенных и взвешенных загрязняющих веществ в реках, озерах и водохранилищах. Соответственно были разработаны достаточно общие математические модели, реализуемые численными методами вручную или на ЭВМ [7, 8]. На основе указанных моделей при учете данных натурных и экспериментальных исследований был разработан ряд упрощенных методов расчета применительно к случаю речных потоков и каналов [2, 12, 14, 16]. При этом большое внимание было уделено получению эмпирических и полуэмпирических зависимостей для гидродинамических характеристик потока, определяющих перемешивание и перенос веществ (коэффициент

турбулентной диффузии, компоненты осредненной скорости, коэффициент шероховатости и т. д.).

Большие разработки были сделаны и применительно к водоемам [1, 8, 9, 14], однако некоторые из предложенных при этом математических моделей и методов расчета не были достаточно апробированы и нуждались в усовершенствовании и доработке. Последняя заключалась, в частности, в том, что при выводе уравнения диффузии в цилиндрических координатах в балансе вещества была учтена неконсервативность вещества, что сделало уравнение более общим. Задачи, относящиеся к данной проблеме, частично освещаются ниже в настоящей статье, где приводятся новые разработки авторов. Очень важной оказалась возможность корректировать (пока предварительно) предлагаемую модель диффузии от одного источника данными натурных наблюдений. Можно надеяться, что в дальнейшем при накоплении достаточного исходного материала удастся создать на использованной здесь основе надежный метод расчета. Поэтому приведенные в статье результаты следует рассматривать как способ ориентировочной оценки диффузии в водоеме.

Дальнейшие исследования ГГИ по данной проблеме были направлены на создание системы общих интегральных показателей качества воды и загрязненности рек и водоемов. При этом исходили из того, что существующие способы оценки качества воды, основывающиеся на сопоставлении с нормативами результатов определения химического состава и свойств воды в отдельных точках водных объектов, являются недостаточными. Назрела необходимость в показателях качества воды, дающих как пространственные, так и временные обобщения, позволяющих учитывать изменчивость качества водных масс во времени и в пространстве.

Система интегральных показателей качества воды в водных объектах, разработанная в ГГИ [13, 15], тесно увязывается с общей физической моделью процесса, причем каждый из показателей может быть найден на основе соответствующей математической модели. Один из способов вычисления интегральных показателей основан на теоретических расчетах. Другой путь установления интегральных характеристик качества воды и состояния загрязненности водного объекта — это определение их по данным непосредственных измерений.

Настоящая статья не охватывает всех аспектов проблемы и посвящена только процессам, происходящим в водоемах с замедленным течением — в озерах и водохранилищах. В ней излагаются наиболее новые разработки, выполненные в отделе наносов и качества вод ГГИ.

Методика оценки состояния загрязненности водоема

Разработанная в отделе наносов и качества вод ГГИ система интегральных показателей качества воды и загрязненности водных объектов разделяется на следующие три группы.

1. Показатели общей нагрузки потока лимитирующими или репрезентативными загрязняющими веществами, выражающиеся через среднюю концентрацию вещества в поперечном сечении потока, независимо от характера распределения вещества в сечении. Эти показатели позволяют учитывать изменчивость загрязненности потока, принимающего сточные воды, обусловленную изменениями его гидролого-гидродинамических элементов и особенностями режима поступления загрязняющих веществ.

2. Показатели пространственного распределения загрязняющих веществ в реках и водоемах, оценивающие долю загрязненных вод в водном объекте или относительную площадь зоны загрязнения.

3. Показатели, характеризующие процесс накопления или уменьшения содержания загрязняющих веществ в водоеме, позволяющие представить процесс изменения загрязненности во времени. В выражении этих показателей в качестве основной используется характеристика внешнего водообмена водоема.

Первая группа показателей относится только к рекам и каналам и в настоящей статье не рассматривается.

Применительно к условиям водоемов (озера и водохранилища) из второй группы используются относительные двумерные ($\eta_{\text{заг}}$) и пространственные ($\mu_{\text{заг}}$) показатели, выражаемые отношениями:

$$\eta_{\text{заг}} = \frac{\sum \Omega_{\text{заг}}}{\Omega_{\text{общ}}} ; \quad (1)$$

$$\mu_{\text{заг}} = \frac{\sum W_{\text{заг}}}{W_{\text{общ}}} , \quad (2)$$

где $\Omega_{\text{общ}}$ и $W_{\text{общ}}$ — соответственно общая площадь зеркала и общий объем водоема, а $\sum \Omega_{\text{заг}}$ и $\sum W_{\text{заг}}$ — суммарные для всего водоема площадь и объем зон загрязнения. Очевидно, что если в водоеме имеется только одна зона загрязнения, то в формулах (1) и (2) знак суммы будет отсутствовать.

Размеры (площадь и объем) зоны загрязнения в водоеме могут быть определены по данным непосредственных достаточно детальных гидрохимических измерений, по результатам расчетов турбулентной диффузии или же комбинированным методом, предусматривающим сочетание натуральных измерений и расчетов.

Оконтуривание зоны загрязнения производится по данным о распределении в водоеме лимитирующего вещества исходя из условия получения на границе этой зоны его концентрации, равной предельно допустимому ее значению (ПДК), т. е.

$$s_{г.з} = \text{ПДК}. \quad (3)$$

При сбросе сточных вод происходит постепенное увеличение концентрации загрязняющих веществ в водоеме. Остановимся на простейшем случае, когда допустимо оценивать состояние загрязненности водоема по одному лимитирующему веществу. В принципе такой же подход применим и к случаю сброса многих лимитирующих веществ (что обычно и бывает), но расчетные

формулы оказываются весьма громоздкими и малонаглядными. Выделяя в сбрасываемых в водоем сточных водах репрезентативное вещество (из лимитирующих), всегда можно упростить решение и установить общие закономерности переноса этого вещества, что должно облегчить изучение распространения в водном объекте и других веществ.

Процесс накопления и выноса загрязняющих веществ из водоема можно оценить на основании простых балансовых соотношений, которые могут быть получены при использовании различных предположений о переносе и диффузии поступающих в водоем сточных вод. Рассмотрим два основных случая, которые представляются нам предельными: 1) сточные воды, равно как и воды других притоков, полностью перемешиваются с водами водоема, и смешанные водные массы выносятся из него (назовем это моделью полного перемешивания); 2) сточные воды перемешиваются с водами притоков, и эта смесь вытесняет воды водоема, не перемешиваясь с ними, причем вытеснение происходит со скоростью, равной частному от деления пути, по которому идет вытеснение, на условное время внешнего водообмена T_y , определяемое равенством

$$T_y = \frac{W}{Q_B}, \quad (4)$$

где W — объем водоема; Q_B — расход воды в водотоке, вытекающем из водоема. Оценивая некоторые средние условия, будем предполагать, что W и Q_B являются средними многолетними значениями данных величин. Расход Q_B принимаем соответствующим рассматриваемым условиям, т. е. равным бытовому расходу или увеличенному за счет сброса сточных вод.

Обе упомянутые выше модели для условий весьма длительной эксплуатации сбросов сточных вод в водоем (теоретически $t = \infty$) дают одну и ту же среднюю концентрацию рассматриваемого вещества, которую назовем предельной и обозначим через s_* .

Очевидно, что для неконсервативного вещества будем иметь

$$s_* = \frac{Q_{пр} s_{пр} + Q_{ст} s_{ст}}{Q_{пр} + Q_{ст} - k_n W}. \quad (5)$$

Испарение с водной поверхности и осадки на нее в этом соотношении не учитываются. Здесь $Q_{пр}$ — суммарный расход воды притоков, питающих водоем; $s_{пр}$ — средняя (взвешенная) концентрация лимитирующего вещества в водах притоков; $Q_{ст}$ — расход сточных вод; $s_{ст}$ — концентрация данного вещества в сточных водах; k_n — коэффициент, учитывающий неконсервативность вещества и определяемый по соотношению $k_n = -k$, где k — коэффициент, числовое значение которого традиционно устанавливается на основании экспериментального изучения распада химических веществ по реакциям 1-го порядка. Единица времени, принимаемая при составлении размерности Q и k_n , должна быть одной и той же, например секунда, сутки или год.

В работах одного из авторов настоящей статьи [10, 13] была принята модель полного перемешивания и на ее основе получена следующая формула средней (фоновой) концентрации неконсервативного вещества в водоеме и вытекающем из него потоке:

$$s_t = s_* - (s_* - s_6) e^{-\left(\frac{1}{T_y} - k_n\right) t}, \quad (6)$$

где s_t — средняя (фоновая) концентрация данного вещества в момент времени t , время t отсчитывается от момента начала сброса сточных вод в водоем; s_6 — бытовая средняя концентрация данного вещества в водоеме, имевшая место до начала поступления в него сточных вод. Для консервативного вещества получается то же самое уравнение, но в нем будет отсутствовать коэффициент k_n , так как в данном случае он равен нулю.

Коэффициент неконсервативности может быть определен по данным натуральных наблюдений на водоеме-аналоге. Если для рассматриваемого водоема имеются достаточные данные гидрологических и гидрохимических измерений для периода, предшествующего вводу в действие рассчитываемых сбросных сооружений, и, кроме того, неконсервативное вещество, по которому ведется расчет, имелось в водах притока и водоема, то коэффициент неконсервативности может быть вычислен по данным натуральных измерений на изучаемом водоеме. Для этого используется формула

$$k_n = \frac{1}{T_y} \left(1 - \frac{s_{np}}{s_6}\right). \quad (7)$$

Входящие в эту формулу величины s_6 и s_{np} находятся по данным непосредственных измерений, осредненных за достаточно длительный период. При этом значение s_{np} находится как среднее взвешенное по расходам всех учитываемых притоков.

Представляет интерес сопоставление результатов расчетов средней концентрации веществ в створе истока из водоема, выполненных по моделям полного перемешивания и вытеснения. Произведем эти расчеты на примере распространения консервативного вещества. В этом случае уравнение (6), записанное в безразмерном виде, может быть представлено таким образом:

$$\tilde{s}_t = 1 - \left(1 - \tilde{s}_6\right) e^{-\tilde{t}}; \quad (8)$$

здесь волнистой чертой сверху обозначены безразмерные величины концентрации и времени, а именно:

$$\tilde{s}_t = \frac{s_t}{s_*}; \quad \tilde{s}_6 = \frac{s_6}{s_*}; \quad \tilde{t} = \frac{t}{T_y}. \quad (9)$$

Результаты расчета по формуле (9) для некоторого конкретного водоема представлены на рис. 1 графиком, помеченным залитыми кружками. Ломаная линия, обозначенная незалитыми кружками, показывает ход концентрации в водотоке, вытекающем из водоема, полученный по модели вытеснения.

Если полагать (это, по-видимому, близко к истине), что модели вытеснения и полного перемешивания отвечают предельно возможным случаям, то действительная область решения всегда будет находиться внутри заштрихованной зоны чертежа (рис. 1). Экспериментальные исследования на схематической модели показали, что даже при слабой интенсивности перемешивания ход кривой на графике оказывается очень близким к расчетному, полученному на основе модели полного перемешивания. Надо полагать, что именно эта модель в большинстве случаев очень близка к истинной картине водообмена в проточных водоемах со значительно замедлен-

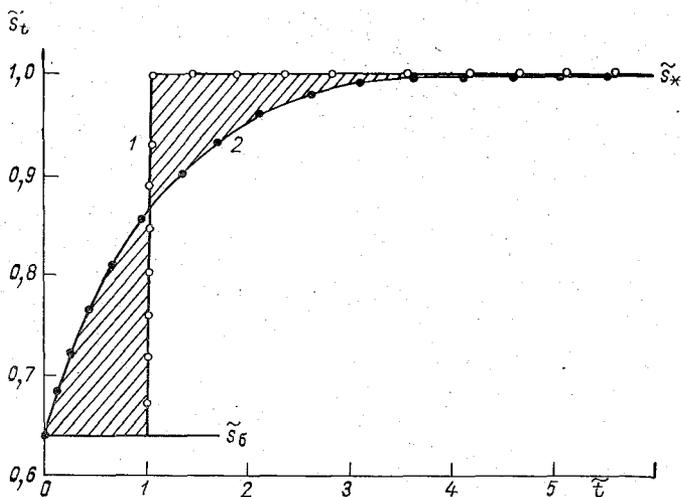


Рис. 1. Схемы изменения в водоеме относительной концентрации s_t во времени ($\tilde{t} = \frac{t}{T_y}$), полученные по моделям вытеснения (1) и полного перемешивания (2).

ным течением. Фактически то же подтверждено исследованиями В. Н. Дерябина, И. М. Ширяка и В. Н. Яшина [6], применивших модель переноса вещества по истинным траекториям (модель частного водообмена), построенную на основе разработанной В. М. Ляхтером модели переноса подогретых вод в водоемах. График, построенный Ширяком на основе его модели, оказался в заштрихованной области (рис. 1) и достаточно близко к кривой полного перемешивания.

Уравнение (7) позволяет получить очень важный интегральный показатель загрязненности водоема — время (в абсолютных или относительных единицах) загрязнения водоема до уровня ПДК, т. е. $t_{\text{пдк}}$ или соответственно $\tau_{\text{пдк}}$, где

$$\tau_{\text{пдк}} = \frac{t_{\text{пдк}}}{T_y}. \quad (10)$$

Очевидно, что при использовании десятичных логарифмов будем иметь

$$t_{\text{пдк}} = \frac{2,3T_y}{1 - T_y k_n} \lg \frac{s_* - s_0}{s_* - \text{ПДК}}. \quad (11)$$

Вообще возможность достижения ПДК в рассматриваемых условиях оценивается по значению s_* . Так; если $s_* \leq \text{ПДК}$, то при планируемых сбросах в водоем в среднем водные массы оказываются отвечающими установленным нормативным требованиям. Это, конечно, не означает, что в водоеме в месте сброса сточных вод не происходит формирования зоны загрязнения. Если же $s_* > \text{ПДК}$, то время достижения ПДК оценивается по формуле (11).

Формирование зоны загрязнения в месте сброса сточных вод

Водные массы в месте выпуска сточных вод в водоем подвергаются воздействию сбрасываемых стоков. Интенсивность этого воздействия зависит, с одной стороны, от химического состава стоков, степени очистки, физических их свойств, а с другой стороны, от гидрологического режима водного объекта, гидравлических элементов течений в месте сброса, их повторяемости и т. д. Вторая группа упомянутых факторов определяет форму и устойчивость образующейся в месте сброса зоны загрязнения. Могут наблюдаться следующие три случая формирования зоны загрязнения.

1. В месте сброса сточных вод имеется постоянное однонаправленное течение. В этом случае загрязненные воды перемещаются от источника загрязнения, образуя вытянутую в одном направлении полосу, имеющую вид факела. Аналогично происходит распространение сточных вод в речных потоках.

2. В районе выпуска сточных вод однонаправленное течение отсутствует, наблюдаются лишь слабые, постоянно меняющиеся по направлению течения или же они полностью отсутствуют (например, под ледяным покровом, на участках водоема, не охватываемых транзитным стоковым течением). В таких условиях образуется устойчивая зона загрязнения, в которой происходит накопление сточных вод. Остаточная турбулентность в этой зоне или же турбулентность, обусловленная влиянием течений в соседних областях водоема, определяет процесс диффузии загрязненных вод в направлении радиусов от источника загрязнения. За счет диффузии происходят размыв краев облака загрязнения и вынос загрязняющих веществ в другие части водоема, что, как и в других случаях поступления сточных вод, приводит к постепенному повышению фоновой концентрации вещества в водоеме. При поступлении неконсервативных загрязняющих веществ одновременно с притоком происходит их распад, причем потери в зоне загрязнения за счет распада возрастают с увеличением общего количества распадающегося вещества в этой зоне. Если не происходит разрушения зоны загрязнения под влиянием возникших здесь течений, то со

временем она стабилизируется при достижении равенства между поступлением вещества и его потерями. При выпуске сточных вод вдалеке от берега зона загрязнения в плане приобретает вид круга, а при выпуске, например, у прямого берега — полукруга.

3. Третий случай характеризуется чередованием ситуаций, указанных в первом и втором случаях. Зона загрязнения при этом в периоды отсутствия течений формируется в виде круга или полукруга. При возникновении устойчивого течения водные массы, сосредоточенные в зоне загрязнения, начинают перемещаться в направлении течения, оставляя за собой шлейф, тянущийся от источника загрязнения. Оторвавшиеся от источника загрязненные массы постепенно перемешиваются с окружающей водой, становятся более чистыми и, наконец, полностью ассимилируются; у источника же загрязнения сохраняется лишь зона в виде факела. По прекращении течения вокруг источника вновь скапливаются загрязненные воды, и зона загрязнения формируется как во втором случае.

Каждый из рассмотренных случаев отличается своеобразием переноса и диффузии веществ, которые должны учитываться при математическом моделировании процесса. Первому случаю отвечают математические модели диффузии, разработанные применительно к русловым потокам. Наиболее общей из них является модель, разработанная в ГГИ [7, 10, 14] и подвергшаяся неоднократной проверке и усовершенствованию. Расчетная схема, относящаяся к этой модели, и достаточно полный алгоритм приведены в упомянутых работах, поэтому указанная модель здесь не рассматривается.

Второй случай может быть достаточно точно моделирован уравнением турбулентной диффузии в цилиндрических координатах [8]. Это уравнение составлено именно для тех условий, которые указаны в п. 2. На этом уравнении и способе его численного решения авторы остановятся подробно ниже, поскольку его вывод и расчетная методика в последнее время подверглись значительной доработке; по существу, предлагается новый расчетный метод, позволяющий воспроизводить все явление в целом, т. е. его новая математическая модель.

Моделирование третьего случая производится путем поочередного применения методики, отвечающей второму и первому случаям. Дополнительный расчет делается для оценки процесса диффузии и ассимиляции облака загрязнения, оторвавшегося от источника.

Рассмотренные выше схемы процессов, протекающих в области влияния сброса сточных вод, показывают, что при любом характере распространения консервативных загрязняющих веществ в водоеме происходит повышение в нем фоновой концентрации этих веществ. При интенсивном поступлении неконсервативных веществ, особенно в сравнительно небольшие водоемы, такой процесс также имеет место, но протекает менее интенсивно.

Из сказанного следует, что общая модель процессов загрязнения и самоочищения водоемов должна представлять собой комплекс методов, оценивающих процессы в зоне сброса сточных вод и во всем водоеме в целом. Методика оценки изменения фоновой концентрации вещества в водоеме под влиянием сброса в него сточных вод уже изложена в настоящей статье. Ниже мы остановимся на рассмотрении процесса в зоне загрязнения.

Метод расчета зон загрязнения в водоемах

Излагаемый здесь метод основан на применении общего уравнения турбулентной диффузии в цилиндрических координатах, которое, как сказано выше, значительно уточнено.

Не повторяя всего вывода уравнения, остановимся лишь на тех моментах, которые позволили записать его для неконсервативного

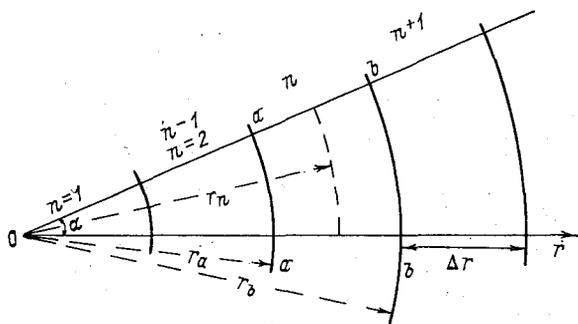


Рис. 2. Схема к выводу уравнения диффузии в цилиндрических координатах и составлению расчетной зависимости.

вещества и уточнить основные соотношения, используемые при численном решении.

Схематически изобразив зону загрязнения в виде круга с источником загрязнения в его центре O , проведем из центра два радиуса r , образующие угол α (рис. 2). Радиусы разделим на равные элементы Δr и через точки деления проведем дуги a , b и т. д. Рассмотрим контрольный объем жидкости, заключенный в элементе круга, ограниченном двумя радиусами и дугами a и b . Среднее значение радиуса для элемента n будет

$$r = \left(n - \frac{1}{2} \right) \Delta r. \quad (12)$$

Составим уравнение баланса вещества для контрольного объема. Приход вещества через дугу a за время Δt выразится так:

$$\Delta P_{\text{спр}} = \left[q_a s_a - D \left(\frac{\partial s}{\partial r} \right)_a l_a H \right] \Delta t, \quad (13)$$

где q_α — расход сточных вод, поступающих в сектор α ; s_a — концентрация вещества на дуге a ; D — средний для участка сброса сточных вод коэффициент турбулентной диффузии; при использовании гипотезы анизотропной турбулентности это будет горизонтальный коэффициент (в нашем предположении об отсутствии заметного течения нельзя говорить о различии между продольным и поперечным значениями D); l_a — внутренняя дуга контрольного объема; $\left(\frac{\partial s}{\partial r}\right)_a$ — производная концентрации по радиусу на этой дуге; H — средняя глубина водоема на участке сброса сточных вод.

Расход вещества за счет переноса через дугу b будет

$$\Delta \Pi_{\text{спрач}} = \left[q_\alpha s_b - D \left(\frac{\partial s}{\partial r} \right)_b l_b H \right] \Delta t; \quad (14)$$

обозначения те же; индексом b помечены величины, относящиеся к дуге b .

Обозначим через ΔK_s потерю вещества в контрольном объеме в промежуток времени Δt за счет распада или увеличения его количества вследствие внутриводоемных процессов. В выражение для ΔK_s входит как множитель коэффициент неконсервативности вещества k_n ; при распаде $k_n < 0$, при возрастании количества вещества $k_n > 0$; для консервативного вещества $k_n = 0$. Через $\Delta \Pi_s$ обозначим изменение количества вещества внутри контрольного объема за время Δt за счет неравенства приходных и расходных членов уравнения баланса.

Общее уравнение баланса вещества в контрольном объеме записывается в виде

$$q_\alpha (s_a - s_b) - DH \left[\left(\frac{\partial s}{\partial r} \right)_a l_a - \left(\frac{\partial s}{\partial r} \right)_b l_b \right] + \frac{\Delta K_s}{\Delta t} = \frac{\Delta \Pi_s}{\Delta t}. \quad (15)$$

Учтем, что контрольный объем δV выражается равенством

$$\delta V = \alpha r \Delta r H. \quad (16)$$

Примем далее, что преобразование вещества проходит по типу реакции 1-го порядка. Соответственно значение ΔK_s представится в виде

$$\Delta K_s = \alpha r \Delta r H k_n s \Delta t. \quad (17)$$

Подставив выражения (16) и (17) в уравнение баланса и заменив содержащиеся в нем разности дифференциалами, приходим к следующему окончательному виду уравнения турбулентной диффузии неконсервативного вещества в цилиндрических координатах с источником загрязнения в центре координат:

$$D \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{\beta}{r} \frac{\partial s}{\partial r} + k_n s = \frac{\partial s}{\partial t}; \quad (18)$$

здесь β — некоторый параметр, определяемый зависимостью

$$\beta = D - \frac{Q_{\text{ст}}}{\varphi H}, \quad (19)$$

где $Q_{\text{ст}}$ — расход сточных вод в центре координат; φ — угол всего сектора распространения сточных вод (при выпуске вдали от берега $\varphi = 2\pi$, при выпуске у прямого берега $\varphi = \pi$).

Значение q_α находится из следующего соотношения:

$$q_\alpha = \frac{\alpha}{\varphi} Q_{\text{ст}}. \quad (20)$$

Для консервативного вещества уравнение (18) записывается без третьего члена левой части.

Следует заметить, что использование при выводе уравнения зависимости (12), т. е. отнесение расчетного значения радиуса к середине контрольного объема, позволяет существенно уточнить алгоритм выполняемого численным методом расчета по сравнению с прежним предложением [8] и добиться лучших результатов при вычислениях.

Если использовать схему деления на элементы сектора области загрязнения, представленную на рис. 2, то расчетную формулу, выведенную на основании общего уравнения (18), в котором дифференциалы заменены конечными приращениями, можно записать в виде

$$S_{k+1, n} = \eta S_{k, n} + \nu_n S_{k, n-1} + \mu_n S_{k, n+1}, \quad (21)$$

где индексы $n-1$, n , $n+1$ показывают номера последовательно расположенных элементов сектора (рис. 2), а индексы k , $k+1$ — последовательные интервалы времени Δt . Коэффициенты при значениях концентрации определяются следующими зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} \eta &= 1 - 2D \frac{\Delta t}{\Delta r^2} + k_n \Delta t; \\ \nu_n &= \left(D - \frac{\beta}{2n-1} \right) \frac{\Delta t}{\Delta r^2}; \\ \mu_n &= \left(D + \frac{\beta}{2n-1} \right) \frac{\Delta t}{\Delta r^2}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Эти зависимости показывают, что коэффициент η является величиной постоянной в данном расчете, значения ν_n и μ_n изменяются вдоль радиусов в зависимости от номера элемента n .

Вычисления по формуле (21) довольно просты, они дают распределение концентрации вещества по радиусу r для ряда моментов времени $t_1 = \Delta t$, $t_2 = 2\Delta t$, ..., $t_N = N\Delta t$.

При расчете учитываются граничные условия в точке, отвечающей источнику загрязнения, т. е. при $r=0$. Чтобы получить расчетную зависимость для первого элемента, граничащего с точкой $r=0$ (для элемента $n=1$), записывается уравнение баланса вещества для этого элемента в форме конечных приращений. Не

перехода к бесконечно малым, из этого уравнения находим следующую расчетную формулу:

$$s_{k+1, 1} = a s_{ct} + b s_{k, 1} + c s_{k, 2}, \quad (23)$$

где индексами «1» и «2» обозначена концентрация соответственно в первом и втором элементах;

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{2Q_{ct}}{\varphi H} \frac{\Delta t}{\Delta r^2}; \\ b &= 1 - \frac{Q_{ct}}{\varphi H} \frac{\Delta t}{\Delta r^2} - 2D \frac{\Delta t}{\Delta r^2} + k_n \Delta t; \\ c &= 2D \frac{\Delta t}{\Delta r^2} - \frac{Q_{ct}}{\varphi H} \frac{\Delta t}{\Delta r^2}. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Для первого отсека вычисления всегда выполняются по формуле (23). В начальный момент времени содержащееся в формуле произведение $a s_{ct}$ не равно нулю, а два остальных члена равны нулю. Во второй момент (второй интервал Δt) первый и второй члены больше нуля, третий равен нулю. Для третьего и последующих интервалов уже все члены будут больше нуля.

Расчетный отрезок радиуса Δr выбирается таким образом, чтобы избежать излишней громоздкости вычислений и в то же время обеспечить необходимую детальность картины распределения концентрации в водоеме. При этом учитывается, что отрезок Δr не должен быть меньше глубины H . Расчетный интервал времени выбирается так, чтобы соблюдалось неравенство

$$\Delta t < \frac{\Delta r^2}{2D + \frac{Q_{ct}}{\varphi H} - k_n \Delta r^2}. \quad (25)$$

Следует иметь в виду, что изложенный выше численный метод решения уравнения диффузии в цилиндрических координатах имеет ограниченную область применения: он используется в тех случаях, когда удовлетворяется предельное условие

$$Q_{ct} \leq 2\varphi H D. \quad (26)$$

Расчет ведется в таком порядке. Сначала по формуле (23) производится вычисление для первого отсека. Затем для второго и далее для всех последующих отсеков вычисления выполняются по формуле (21).

Расчет дает изменение во времени распределения концентрации вещества по радиусам, расходящимся от точки, отвечающей источнику загрязнения. При этом изолинии концентрации будут иметь вид окружностей (или соответственно полуокружностей при выпуске у берега) с центром в точке источника. Для каждого заданного момента времени t по полученным изолиниям могут быть определены площади и объемы зоны загрязнения. Границей этой зоны считается изолиния, на которой концентрация равна ПДК. Имея площади и объемы зоны загрязнения, можно найти показатели $\eta_{заг}$ и $\mu_{заг}$ и проследить их изменение во времени.

Определение интегральных характеристик качества воды по данным натуральных измерений

Формирование химического состава воды водоемов (озера, водохранилища) является сложным процессом, зависящим от значительно большего числа факторов, чем формирование речных вод. Существенное значение здесь имеют объемы притока и выноса водных масс, их химический состав, выпадающие на водное зеркало атмосферные осадки, испарение и инфильтрация, а также различные виды хозяйственного использования водоема. Во многих случаях практически мало влияют такие факторы, как выпадение труднорастворенных соединений, обменно-адсорбционные реакции между водой и донными отложениями, образование и таяние ледяного покрова и ряд других, относящихся к внутриводоемным процессам.

Влияние гидролого-гидродинамических факторов в интегральной форме можно оценить на основе характеристик внешнего и внутреннего водообмена. Антропогенное влияние может быть определено по изменению фоновых характеристик качества воды и параметрам зон загрязнения, возникающих в местах сброса сточных вод. Эти вопросы рассматриваются ниже на примере Ладожского озера — крупнейшего пресноводного водоема нашей страны, достаточно хорошо изученного в гидрохимическом отношении [4, 5].

Одним из важных интегральных показателей, применяемых при оценке качества воды в водоемах, является показатель условного времени внешнего водообмена T_y , определяемый по формуле (4). Его числовые значения могут служить характеристикой инерционности процесса формирования качества вод, связанной с условиями накопления и убыли химических соединений в водоемах. Достаточно большие значения T_y (десятки лет) указывают на относительно полное перемешивание вод, поступающих в водоем, чем обуславливается формирование в нем массы воды со сравнительно однородными характеристиками химического качества.

Для Ладожского озера значение T_y , вычисленное по средним многолетним данным ($W=908 \text{ км}^3$, $Q_b=79 \text{ км}^3/\text{год}$), равно 11,4 года. Как показывают гидрохимические съемки, такой срок вполне достаточен для формирования в срединной части озера основной массы воды, обособленной в гидрохимическом отношении от вод прибрежной зоны. Это положение подтверждается характером распределения как минерализации воды по акватории озера, две трети которой заключено между изолиниями 50—55 мг/л, так и общего содержания растворенных органических веществ. Последнее устанавливается по перманганатной окисляемости, характеризующей сравнительно неустойчивые легкоокисляющиеся органические соединения. Для основной массы озерной воды окисляемость изменяется в очень узком интервале — от 8 до 9 мгО/л [4].

Вместе с тем рассматриваемый показатель T_y дает неполное представление о внешнем водообмене, поскольку не характеризует

развивающийся во времени процесс замены водных масс в водоеме. Количественная характеристика этого процесса может быть получена на основе формул (6) и (7). Результаты расчета для Ладожского озера показали, что за время, равное T_y , из озера удаляется с речным стоком около 60% водных масс, находившихся в нем в начале расчетного интервала времени.

Эта же методика может быть применена и для решения некоторых задач по оценке антропогенного воздействия на водоем, осуществляемого через его притоки. В частности, могут быть оценены предельная (равновесная) концентрация того или иного ингредиента и время, необходимое для достижения равновесия после изменения речного притока. Для случая сокращения притока относительно мало минерализованных речных вод в Ладожское озеро рассчитано новое равновесное значение средней минерализации $\sum_{\text{и}}$ в проектных условиях переброски части стока из бассейна озера. Сохраняя принятые в формулах настоящей статьи обозначения, ниже под величинами s_* и s_t будем понимать соответственно предельное и расчетное (для времени t) значения минерализации. Для расчета применялась формула (7), записываемая для консервативных веществ в виде

$$s_t = s_* - (s_* - s_0) e^{-\frac{Q_{\text{в. изм}}}{W} t}; \quad (27)$$

здесь s_0 — минерализация озерной воды в бытовых условиях; $Q_{\text{в. изм}}$ — расход воды реки, вытекающей из озера в измененных условиях; W — объем озера; t — время, отсчитываемое от начала изменения объема притока в озеро. Здесь и ниже объем W предполагается неизменным.

Расчет значения s_* для случая, когда впадающие в озеро притоки подразделяются на две группы, одна из которых подвергается антропогенному воздействию, производится по формуле, приведенной в работе [9]:

$$s_* = \frac{Q'_{\text{пр}} s'_{\text{пр}} + Q''_{\text{пр. изм}} s''_{\text{пр. изм}}}{W}, \quad (28)$$

где $Q'_{\text{пр}}$, $s'_{\text{пр}}$ — средние значения расхода и минерализации воды притоков первой группы (неизменные условия); $Q''_{\text{пр. изм}}$, $s''_{\text{пр. изм}}$ — то же для притоков второй группы, расходы воды в которых изменены.

Для расчета приняты следующие исходные данные: $W = 908 \text{ км}^3$, $Q_{\text{в. изм}} = 1865 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{\text{в}} = 2550 \text{ м}^3/\text{с}$, $s_0 = 54,3 \text{ мг/л}$.

Результаты расчета приведены в табл. 1. Они показывают, что в данном случае время полной стабилизации общего содержания растворенных солей в воде озера при отъеме $15 \text{ км}^3/\text{год}$ составит около 70 лет, минерализация s_* достигнет $58,4 \text{ мг/л}$, т. е. повысится на 8%. Эта же модель, описывающая процесс изменения состояния водных масс водоема, может быть использована и в отно-

шении других гидрохимических ингредиентов, включая неконсервативные и техногенные вещества. В случае неконсервативности веществ следует применять формулы (5) — (7).

Таблица 1

Изменение минерализации воды Ладожского озера при возможном уменьшении притока вод р. Свири, мг/л

t лет	Объем перебрасываемого стока, км ³ /год	
	7	15
10	55,1	56,2
20	55,4	57,3
30	55,6	57,8
40	55,7	58,1
50	55,8	58,2
60	55,8	58,3
70	55,8	58,4

Интегральные показатели внешнего водообмена не могут характеризовать пространственную неоднородность качества воды в водоеме, обусловленную влиянием притоков или такими антропогенными факторами, как поступление сточных вод с берегов водоема. Такая неоднородность возникает в прибрежной зоне водоема, и ее выраженность определяется главным образом отличием состава приточных вод от гидрохимического фона озера, а также некоторыми гидролого-гидродинамическими факторами (объем притока, характер течений и т. д.). Весьма наглядно указанная неоднородность выявляется по данным гидрохимических съемок. Она может быть оценена по натурным материалам с помощью интегральных показателей пространственного распределения химических ингредиентов, выражаемых отношениями (1) и (2). При этом следует иметь в виду, что в тех случаях, когда измеренные концентрации репрезентативных ингредиентов s сопоставляются не с ПДК, а со средними для водоема фоновыми значениями, упомянутые интегральные показатели не характеризуют загрязненности водоема, а отражают определенные изменения качества воды относительно фона и соответственно обозначаются $\eta_{\text{изм}}$ и $\mu_{\text{изм}}$.

Наиболее выраженные изменения минерализации воды Σ_i на акватории Ладожского озера приурочены к двум его районам: Волховской губе и предустьевому району р. Бурной. Гидрохимические особенности отдельных частей обширного бассейна озера таковы, что эти отклонения от фона оказались противоположными по знаку. Сравнительно мало минерализованные воды р. Бурной весьма заметно влияют на воды озера в прилегающем районе, уменьшая значение Σ_i примерно на 10%. Относительный показатель площади этой зоны $\eta_{\text{изм}}$, рассчитанный по данным детальной

съемки 1966 г., составил 0,086. Примерно такие же значения $\eta_{\text{изм}}$ получаются при использовании данных о концентрации сульфатных ионов.

Гидрохимическая особенность Волховской губы обусловлена своеобразием химического состава вод р. Волхова, сильно отличающихся от озерных вод, в частности повышенной минерализацией и содержанием ионов Cl^- . Вносимые в озеро с водами р. Волхова растворенные соли подхватываются циклональным течением и переносятся в северо-восточном направлении на значительное расстояние. При этом вдоль побережья образуется обширная зона повышенного содержания растворенных солей, внутри которой значения Σ_i изменяются в пределах 55—100 мг/л. Показатель $\eta_{\text{изм}}$ для этой зоны, рассчитанный по значениям Σ_i , составляет 0,2. Таким образом, область, где в результате смешения речных вод с озерными возникают устойчивые изменения качества воды относительно его средних фоновых характеристик, занимает 20% общей акватории озера.

Антропогенное воздействие на качество воды в водоеме, осуществляемое в виде сбросов промышленных сточных вод, также может быть оценено с помощью рассмотренных выше интегральных показателей. Как было отмечено, в ряде случаев целесообразно относить гидрохимические характеристики, определенные в локальных зонах, сформировавшихся вблизи выпусков сточных вод, не к ПДК, а к соответствующим фоновым значениям $s_{\text{ф}}$. Исходя из указанных соображений для районов, примыкающих к наиболее крупным предприятиям на побережье озера, были по данным натуральных наблюдений определены границы, отвечающие условию $s_i = s_{\text{ф}}$. В качестве репрезентативных ингредиентов (показателей) использовались данные по ХПК, БПК₅ и % насыщения воды кислородом. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Интегральные показатели пространственного распределения в Ладожском озере зон с измененным качеством воды

Предприятие	$\Omega_{\text{изм}}$ км ²	$W_{\text{изм}}$ км ³	$\eta_{\text{изм}}$	$\rho_{\text{изм}}$
Сясьский ЦБК	73	0,32	0,0041	0,0004
Приозерский ЦЗ	30	0,48	0,0017	0,0005
Питкярантский ЦЗ	10	0,10	0,0006	0,0001
Ляскельский ЦБК	4	0,04	0,0002	0,0000
Всего	117	0,94	0,0066	0,0010

Полученные значения интегральных показателей дают общее представление о влиянии на озеро промышленных сточных вод. Эти данные наряду с приведенными выше показателями влияния притоков на качество вод озера и данными табл. 1, характеризую-

щей изменение общей минерализации озера, обусловленной антропогенным воздействием на его приток, являются примером того, как рассмотренные в статье интегральные показатели могут использоваться для оценки состояния и тенденции изменения качества вод водоема. Большое значение эти показатели, по-видимому, могут иметь при обобщении материалов, получаемых в рамках мониторинга качества воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Л. П. Натурные исследования турбулентности Баргузинского залива оз. Байкал.— Труды ГГИ, 1978, вып. 249, с. 76—93.
2. Бесценная М. А. Усовершенствование экспресс-метода расчета разбавления сточных вод в реках.— Труды ГГИ, 1972, вып. 191, с. 201—208.
3. Блумберг О. К. Сущность процессов смешения.— Труды ГГИ, вып. 1, 1936, с. 19—57.
4. Воронков П. П., Скакальский Б. Г., Зубарева В. И. Основные черты формирования химического состава вод Ладожского озера.— Труды ГГИ, 1978, вып. 249, с. 5—47.
5. Гидрохимия и гидрооптика Ладожского озера/Под ред. О. А. Алейкина.— Л.: Наука, 1967.— 216 с.
6. Дерябин В. Н., Ширяк И. М., Яшин В. Н. Расчет концентрации неконсервативных загрязнений в слабопроточных водоемах по времени пребывания сточных вод.— В кн.: Материалы V Всесоюз. науч. симпозиума по современным проблемам самоочищения и регулирования качества воды. I секция. Таллин, 1975, с. 57—64.
7. Караушев А. В. Турбулентная диффузия и метод смешения.— Л.: Гидрометеоздат, 1946.— 82 с.— (Труды НИУ ГУГМС. Сер. IV. Вып. 30).
8. Караушев А. В. Речная гидравлика.— Л.: Гидрометеоздат, 1969.— 416 с.
9. Караушев А. В. Внешний водообмен и формирование качества воды в озерах и водохранилищах.— Труды ГГИ, 1978, вып. 249, с. 48—62.
10. Маккавеев В. М. Теория процессов перемешивания при турбулентном движении свободных потоков и вопросы зимнего режима рек.— Записки ГГИ, 1931, т. V, с. 73—116.
11. Маккавеев В. М. О распространении растворов в турбулентном потоке и о химическом методе изменения расхода.— Записки ГГИ, 1933, т. X, с. 229—247.
12. Михайлов В. О. Усовершенствование методики расчета разбавления сточных вод в реках.— Труды ГГИ, 1978, вып. 249, с. 94—108.
13. Оценка загрязненности водных объектов по интегральным показателям/А. В. Караушев, Б. Г. Скакальский, А. Я. Шварцман, Л. И. Фаустова.— В кн.: Материалы V Всесоюз. науч. симпозиума по современным проблемам самоочищения и регулирования качества воды. IV секция. Ч. 1. Таллин, 1975, с. 97—107.
14. Практические рекомендации по расчету разбавления сточных вод в реках, озерах и водохранилищах.— 2-е изд.— Л.: Отпеч. на множит. аппарате ГГИ, 1973.— 101 с.
15. Рекомендации по применению интегральных показателей для оценки качества воды и загрязненности рек и водоемов.— Л.: Отпеч. на множит. аппарате ГГИ, 1973.— 72 с.
16. Фаустова Л. И. Зависимость размеров зон загрязнения от гидрологических факторов.— Труды ГГИ, 1978, вып. 249, с. 109—114.

В. А. Знаменский

ПРОЦЕССЫ ВОДООБМЕНА И ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ВОДОЕМАХ

Интенсивный рост и развитие промышленности и сельского хозяйства приводит в ряде районов страны к возникновению дефицита водных ресурсов. На территории СССР насчитывается около 3 млн. естественных и искусственных водоемов, в которых сосредоточено 285 тыс. км³ воды. Использование этих водных ресурсов непрерывно расширяется при одновременном развитии мероприятий по территориальному перераспределению стока и созданию сезонных и многолетних запасов воды в озерах и водохранилищах.

Интенсификация хозяйственного использования озер и водохранилищ, характеризующихся замедленным водообменом, выдвигает проблему сохранения качества их воды. Одним из важных направлений в решении такой задачи является изучение и количественная оценка влияния гидрологических и гидродинамических процессов на распределение и содержание растворенных веществ в водоемах. К таким процессам прежде всего относятся внешний и внутренний водообмен и гидродинамические особенности потоков в проточных водоемах, определяющие условия формирования водных масс, распределение растворенных веществ и качество воды в водоемах.

Процессы внешнего и внутреннего водообмена обусловлены совокупностью гидрометеорологических и гидродинамических факторов, и поэтому эти процессы проявляются в водоемах одновременно. Однако для оценки влияния этих процессов на перенос и распределение растворенных веществ рассмотрим их в отдельности. Внешний водообмен любого проточного водоема обусловлен тремя воднобалансовыми процессами: поступлением воды со стоком рек и в виде осадков, ее временной аккумуляцией в водоеме и оттоком воды в нижележащую водную систему или поступлением в атмосферу путем испарения. Эти процессы определяют динамику переноса и трансформацию водных масс в водоеме.

Представим уравнение водного баланса водоема в объемных величинах

$$W_{\text{пр}} + W_{\text{ос}} = W_{\text{от}} + W_{\text{исп}} + \Delta W; \quad (1)$$

и, поделив почленно составляющие баланса на объем водоема W_B и выполнив некоторые преобразования, запишем уравнение (1) в безразмерном виде

$$K_{в. пр} - K_{в. от} = \frac{W_{пр}}{W_B} - \frac{W_{от}}{W_B} = \frac{\Delta W}{W_B} - \frac{W_{ос} - W_{исп}}{W_B} = \frac{\Delta W}{W_B} - \frac{\Delta W_a}{W_B}, \quad (2)$$

где $W_{пр}$, $W_{от}$, $W_{ос}$, $W_{исп}$ и ΔW — соответственно объемы притока, оттока, осадков, испарения и аккумуляции; $\Delta W_a = W_{ос} - W_{исп}$. В левой части уравнения (2) представлена разность показателей внешнего водообмена по притоку и оттоку, которая соответственно равна аккумуляции за вычетом разности атмосферных составляющих водного баланса.

Если записать уравнение (1) в более общем виде, полагая $\sum W_{пр} = W_{пр} + W_{ос}$ и $\sum W_{от} = W_{от} + W_{исп}$, то, проведя преобразования, получим уравнение

$$K'_{в. пр} - K'_{в. от} = \frac{\sum W_{пр}}{W_B} - \frac{\sum W_{от}}{W_B} = \frac{\Delta W}{W_B} = \frac{F \Delta h}{FH} = \frac{\Delta h}{H}, \quad (3)$$

в котором разность суммарных показателей водообмена по притоку и оттоку представляет собой изменение уровня Δh (в водоеме со средней для Δh площадью F) по отношению к средней глубине H .

Таким образом, разность стоковых или суммарных показателей внешнего водообмена характеризует изменение объема или уровня водоема, которые в свою очередь определяются характером регулирования, т. е. наполнением, транзитом или опорожнением водоема. Показателем регулирования является отношение показателей водообмена по притоку и оттоку $\left(K_p = \frac{W_{пр}}{W_{от}}\right)$, которое при $K_p > 1$ характеризует наполнение, при $K_p = 1$ — транзит и при $K_p < 1$ — опорожнение водоема.

Время полной смены воды в водоеме определяется (при $K_p = 1$) формулой

$$t = \frac{W_B}{\sum_0^t Q_{пр}} \quad (4)$$

или в более общем случае формулой А. В. Карашева [12]

$$t = \frac{2,3W_B}{Q_{от} - Q_{исп}} \lg \left(1 - \frac{W_{от}}{W_B}\right), \quad (5)$$

где $Q_{пр}$, $Q_{от}$ и $Q_{исп}$ — расходы притока, оттока и испарения соответственно. Показатели внешнего водообмена представляют собой долю объема водоема, в которой вода замещается за счет притока или оттока, и меняются в течение года в соответствии с изменениями составляющих водного баланса. Вследствие этого, как

будет показано ниже, происходит перераспределение содержания растворенных веществ в водных массах водоемов.

На распределение веществ внутри водоемов оказывают также влияние и процессы внутреннего водообмена, которые способствуют переносу и перемешиванию водных масс и выравниванию их физических и химических характеристик. Процессы внутреннего водообмена определяются динамикой водных масс, которая зависит от многих факторов. В общем случае эти процессы можно характеризовать поступательным переносом водных масс между отдельными частями водоема, выражающимся в интегральном изменении объема или уровня в данной части водоема W_i за определенный интервал времени. Для такой интегральной оценки поступления (или оттока) воды целесообразно рассматривать не абсолютное изменение уровня при подъемах (или спадах), а его динамическую характеристику, т. е. интенсивность изменения $\frac{\Delta h}{\Delta t}$. Тогда среднее изменение уровня при подъемах или спадах за период $\sum T$ определится зависимостью

$$\delta h = \sum \left(\frac{\Delta h}{\Delta t} \right)_i \Delta t_i = H \left(\sum \frac{\Delta h}{\Delta t} \frac{\Delta t_i}{H} \right), \quad (6)$$

а изменение объема — зависимостью

$$\delta W = \delta h (BL) k = k W_B \left(\sum \frac{\Delta h}{\Delta t} \frac{\Delta t_i}{H} \right), \quad (7)$$

где k — отношение объема участка к объему всего водоема $\left(\frac{W_i}{W_B} \right)$.

Из уравнения (7) показатель внутреннего водообмена (представляющий собой долю объема водоема, участвующую во внутреннем водообмене), выразится следующей формулой:

$$k_{в. в} = \frac{\delta W}{W_B} = k \left(\sum \frac{\Delta h}{\Delta t} \frac{\Delta t_i}{H} \right). \quad (8)$$

Связь показателей внешнего и внутреннего водообмена определится из сопоставления объемов, участвующих во внутреннем и внешнем водообмене:

$$\frac{\delta W}{\Delta W} = \frac{W_B k_{в. в}}{\sum W_{пр}} = \frac{W_B k_{в. в}}{\sum W_{от}} = \frac{k_{в. в}}{k'_{в. пр} - k'_{в. от}}. \quad (9)$$

Как показывает анализ, проведенный для Волгоградского водохранилища, объемы воды, участвующие во внутреннем водообмене, в отдельные месяцы могут быть значительными (от 0,02 ΔW до 4,0 ΔW) [9].

Основными факторами, обуславливающими поступательное перемещение водных масс внутри водоема, являются сгонно-нагонные явления в любых водоемах и распространение длинных волн при неравномерном режиме работы гидроузлов на водохранилищах.

Для оценки влияния сгонно-нагонных явлений на поступательный перенос и их зависимости от ветрового воздействия можно использовать условные ветровые показатели K_v , представляющие собой сумму произведения проекций вектора скорости ветра w на продольную ось водоема на время его действия T , отнесенное к единице длины L по продольной оси водоема, т. е.

$$k_v = \sum \frac{wT}{L}. \quad (10)$$

Разность ветровых показателей для нагонных и сгонных направлений ветра позволяет выделить преобладающие воздушные потоки и оценить их влияние на формирование сгонных или нагонных явлений, а также на развитие циркуляций в водоемах. Так, например, подобный анализ, проведенный для Волгоградского водохранилища, показал, что изменение ветровых показателей для всей акватории водохранилища практически одинаково, а это обуславливает формирование сгонно-нагонных явлений одновременно по всему водоему [9]. Для оз. Байкал, находящегося в более сложных орографических условиях, было установлено различное распределение результирующих ветровых показателей у западного и восточного побережья, способствующее развитию циркуляционного движения водных масс в озере [13]. Процессы внутреннего водообмена в озере складываются под влиянием ветрового воздействия (сгонно-нагонные явления), изменения атмосферного давления, распространения длинных волн, развития различных систем течений и других причин. Определить вклад каждого из перечисленных факторов очень сложно, и поэтому для количественной оценки внутреннего водообмена целесообразно установить суммарные изменения объема в отдельных частях водоема за некоторый расчетный период. В этом случае суммарный объем притока (оттока) воды в отдельную часть озера площадью F за интервал времени $\sum \Delta t$ определится формулой

$$W_T = \frac{1}{2} F \left(\frac{\Delta h}{\Delta t} \right)_{cp} \sum \Delta t. \quad (11)$$

Расчет по этой формуле за период 1967—1969 гг. показал, что месячные и годовые значения притока и оттока одинаковы в северной и южной частях озера. Это позволяет сделать вывод об одновременном существовании разнонаправленных потоков, что согласуется с наличием основной циркуляции оз. Байкал. Месячные объемы воды, участвующие во внутреннем водообмене, колеблются от 3,2 до 29 км³, а за годовой период — от 100 км³ (1969 г.) до 189 км³ (1967 г.). Эти значения существенно превышают внутренний водообмен, определенный по раздельному водному балансу, и подчеркивают значительную роль динамических факторов, обуславливающих внутренний водообмен и перенос водных масс. При этом влияние разнонаправленных воздушных потоков, характеризующихся алгебраической суммой (K_{Σ}) или разностью (K_{Δ}) ветровых

показателей, на водообмен W может быть оценено следующей региональной зависимостью:

$$W = e^{\left(1,165e - 0,137 \frac{K_{\Delta}}{K_{\Sigma}}\right)} \quad (12)$$

Разнонаправленные воздушные потоки не только создают эффект дрейфового переноса водных масс, но и способствуют циркуляционному движению в пределах отдельных озерных котловин.

Для крупных заливов, сообщающихся с основным водоемом, исследование водообмена было проведено на примере Невской губы и Рижского залива с целью оценки возможности использования этих водоемов для приема сточных вод, а также на примере Чивыркуйского залива оз. Байкал для его рационального использования в рыбопроизводных целях.

Водообмен Невской губы и Рижского залива существенно зависит от речного стока. Из-за малой емкости Невской губы ее полный водообмен за счет речного стока осуществляется 66,6 раза в год, а в Рижском заливе — только один раз за 13,6 лет. Речной сток благодаря наличию градиента уровня при его поступлении в водоем создает систему квазипостоянных, хотя и нередко слабых, стоковых течений, нарушаемую действием ветра, распространением длинных волн, сгонно-нагонными и сейшевыми колебаниями и другими гидрометеорологическими явлениями. При отсутствии стоковых течений (как показывают исследования в Чивыркуйском заливе) водообмен создается за счет постоянного циркуляционного потока и действия преобладающих ветров. Количественная оценка водообмена может быть получена либо путем непосредственного измерения расходов протекающей воды, либо в результате оценки изменения объема водной массы водоема (или залива) по наблюдениям за изменением уровня воды. Первым способом определялся водообмен Чивыркуйского залива, а вторым — водообмен Невской губы, Рижского залива и оз. Байкал. При этом факторы, действующие на водную массу основного водоема, определяют и водообмен заливов. Так, ветер над Балтийским морем и длинная волна в Финском заливе соответственно влияет на водообмен Рижского залива и Невской губы, а циркуляция и колебания уровня в оз. Байкал определяют водообмен Чивыркуйского залива. В результате действия указанных факторов в Невскую губу в среднем за год из Финского залива дополнительно поступает (и уходит) количество воды, составляющее 12—20% годового стока р. Невы, а в Рижский залив дополнительное поступление (и отток) из Балтийского моря составляет свыше 18 объемов речного стока, равного 38,1 км³ (1965 г.).

Таким образом, можно считать, что внутренний водообмен отдельных заливов существенно зависит от динамики водной массы основного водоема, которая в свою очередь определяется изменением составляющих водного баланса, воздействием гидрометеорологических факторов и влиянием антропогенных факторов

(в частности, режимом работы гидротехнических сооружений на водохранилищах).

В результате водообмена и влияния гидрометеорологических факторов в водоемах создаются постоянные или периодические потоки и формируются различные системы течений. Действующей силой для таких потоков является градиент уровня различного знака или касательное напряжение от воздушного потока над водной поверхностью. В отличие от речных условий потоки в водоемах далеко не всегда имеют жесткие границы и рассеивание энергии происходит не только в придонном слое, но и в водной массе, обладающей большой инерцией, вследствие чего существенное значение приобретают силы вязкости.

Анализируя результаты натуральных и лабораторных исследований потоков в проточных водоемах, можно выделить основные динамические структуры (транзитные потоки и циркуляционные образования различного масштаба), характерные для движения жидкости в водоемах. Продолжительность и условия существования циркуляционных, водоворотных и вихревых структур определяются действующими силами, контактом с транзитным потоком и характером передачи и потерь энергии. В качестве показателя потерь энергии общепринято использовать коэффициент гидравлического сопротивления λ . Принципиальная зависимость λ от исходных гидравлических параметров потоков в водоемах может быть записана в виде формулы, полученной исходя из метода размерности (по К. А. Михайлову [1]):

$$\lambda = 2k \frac{\left(\frac{\Delta}{H}\right)^x}{\text{Re}^{2-n}}, \quad (13)$$

где H — глубина потока; Δ — высота выступов шероховатости; $\text{Re} = \frac{vH}{\nu}$ — число Рейнольдса; v — скорость потока; ν — кинематическая вязкость; k , x и n — коэффициенты пропорциональности и показатели степени. Зависимость (13) при $x=0$, $n=1$ и $k=32$ характеризует ламинарный режим, а при $x=1$ и $n=2$ — режим квадратичной области турбулентного движения. В результате анализа многочисленных натуральных и лабораторных материалов [8], а также выполнения специальных экспериментальных исследований кинематики потоков в лабораторных условиях [3] были получены зависимости, характеризующие гидравлические сопротивления потоков в водоемах, в виде следующих формул:

$$\lambda = 2 \frac{H}{\delta \text{Re}}; \quad (14)$$

$$\frac{H}{\delta} = \left(\frac{H}{\Delta}\right)^{0,75}; \quad (15)$$

$$\lambda = \frac{2I}{\text{Fr}} = 2 \frac{\left(\frac{H}{\Delta}\right)^{0,75}}{\text{Re}}; \quad (16)$$

где $\frac{H}{\delta}$ и $\frac{H}{\Delta}$ — относительная толщина придонного слоя δ , в котором осуществляются потери энергии и относительная шероховатость; I — уклон водной поверхности; $\text{Fr} = \frac{v^2}{gH}$ — число Фруда; g — ускорение свободного падения. Влияние пространственного эффекта на коэффициент гидравлического сопротивления исследовалось экспериментальным путем и было оценено следующей формулой:

$$\lambda \frac{B}{H} = k \frac{\left(\frac{H}{\Delta}\right)^{0,75}}{\text{Re}}, \quad (17)$$

где $\frac{B}{H}$ — морфологический параметр (B — ширина потока); k — числовой параметр, равный 63 [8].

Учет потерь энергии необходим при выявлении характера взаимодействия транзитного потока с водоворотными структурами. Применяя закон количества движения и анализируя взаимодействие основных сил, получили уравнение неравномерного движения жидкости в водоемах

$$I_s = \frac{d}{dS} \left(\frac{v^2}{2g} \right) + 2 \frac{v^2}{b_{cp}g} \lambda_b + \frac{v^2}{h_{cp}g} \lambda_d, \quad (18)$$

которое учитывает гидравлические сопротивления на дне (λ_d) и боковых поверхностях (λ_b) потока шириной b_{cp} и глубиной h_{cp} . Совместное решение уравнения (18) с уравнением неразрывности позволило определить закон расширения транзитного потока

$$b_1 = b_0 \frac{h_0}{h_1} e^m, \quad (19)$$

где $m = \left(2 \frac{\lambda_b}{b_{cp}} + \frac{\lambda_d}{h_{cp}} - \frac{g}{v^2} I_s \right) \Delta S$; h_0 , b_0 , h_1 и b_1 — глубина и ширина в начальном (0) и последующем (1) сечениях потока, отстоящих друг от друга на расстояние ΔS .

Для коэффициента бокового гидравлического сопротивления на границе транзитного потока с водоворотом была получена следующая зависимость:

$$\lambda_b = 0,11 \frac{b'_{cp}}{h_{cp}} \lambda_d - 0,33 \frac{b'_{cp}}{\Delta S} \ln \left(\frac{b'_1}{b'_0} \frac{h'_1}{h'_0} \right), \quad (20)$$

где b'_0 , h'_0 , b'_1 , h'_1 , b_{cp} и h_{cp} — половина ширины отсека водоворота и глубина в начальном (0) и последующем (1) сечениях и средняя между сечениями.

Полагая, что полная ширина водоема $B = 4b'_{cp} + b_{cp}$ и $\beta = \frac{B}{b_{cp}} = 4b'_{cp} + 1$ и выполняя преобразования с учетом $\frac{b'_0}{b'_1} \approx 1$

и $\lambda_{д} = \frac{2gh_{ср}I_s}{v^2}$, можем упростить формулы (19) и (20) и получить

$$b_1 = b_0 \left(\frac{h_0}{h_1} \right)^{\frac{1}{6}(\beta+5)} e^p, \quad (21)$$

где

$$p = \frac{\lambda_{д}}{2h_{ср}} \left(\frac{\beta+8}{9} \right) \Delta S \quad (22)$$

и

$$\lambda_{б} = \lambda_{д} \frac{b_{ср}(\beta-1)}{36h_{д}}. \quad (23)$$

Из выражения (23) видно, что поскольку в водоемах $\beta \gg 1$, абсолютное значение $\lambda_{б}$ всегда будет больше $\lambda_{д}$. Именно этим можно объяснить эффект «прилипания» транзитной струи к одному из берегов водоема или протекание ее по затопленному руслу, поскольку (в соответствии с принципом минимума диссипации энергии) поток выбирает такой путь, на котором потери энергии и гидравлическое сопротивление будут наименьшими. Кроме того, наличие неравенства $\lambda_{б} > \lambda_{д}$ обуславливает более значительную передачу энергии в поперечном направлении, что в свою очередь (благодаря действию закона неразрывности) неизбежно приводит к возникновению водоворотных и циркуляционных структур.

Что же касается общего соотношения сил бокового ($F_{б}$) и донного ($F_{д}$) сопротивления в водоемах с транзитным течением, то оно может быть определено по приближенной зависимости

$$\frac{F_{б}}{F_{д}} \approx \frac{\varepsilon}{18} \left(1 - \frac{b_{ср}}{B_{ср}} \right), \quad (24)$$

где $\varepsilon = \frac{L_{тр}}{L}$ — коэффициент извилистости транзитного потока длиной $L_{тр}$ в водоеме длиной L . В реальных водоемах $F_{б} \leq 0,1F_{д}$, т. е. для всего водоема преобладающими являются силы донного сопротивления [5]. Экспериментальные исследования показывают, что донное гидравлическое сопротивление в условиях установившегося режима функционально связано с соотношением размеров площадей транзитного потока и водоворотных структур [5], конфигурация и расположение которых зависят от морфологических особенностей водоема.

Потери энергии при волновом движении, как это показано в работах [4, 14, 15], также осуществляются в придонном слое, толщина которого может быть определена формулой [4].

$$\delta = 2 \sqrt{\frac{\gamma T_{в}}{\pi}}, \quad (25)$$

где T_B — период волны. Используя формулу (25), можно определить значение коэффициента λ_B и число Re_B при волновом движении по следующим зависимостям:

$$\lambda_B = k_\lambda \frac{H \sqrt[4]{L_B}}{h_B^2}; \quad (26)$$

$$Re_B = k_{Re} \frac{h_B^2}{\sqrt{L_B}}, \quad (27)$$

где числовые коэффициенты k_λ и k_{Re} зависят от отношения глубины к длине волны. Значения λ_B и Re_B наиболее быстро убывают с глубиной для коротких волн, а для длинных волн они одинаковы по всей толще.

Передача энергии при контакте потока с дном и окружающими водными массами осуществляется вследствие образования вихревых структур и турбулентного обмена в водоемах. Различие в потерях энергии в продольном и поперечном направлениях определяет разницу и в турбулентном обмене. Для скоростной вертикали плоского потока коэффициент турбулентного обмена по вертикали A_z связан с коэффициентом гидравлического сопротивления следующей зависимостью:

$$A_z = \kappa H v \left(\frac{\lambda}{2} \right)^{0,5} = \frac{\mu}{\rho} \kappa Re \left(\frac{\lambda}{2} \right)^{0,5}, \quad (28)$$

где ρ , μ и κ — соответственно плотность, молекулярная вязкость и коэффициент Кармана [3, 11].

Для продольной составляющей коэффициента турбулентного обмена может быть использована преобразованная формула Харлемана [2]

$$A_x = k_x H \sqrt{2gHI} = k_x v H \lambda^{0,5}. \quad (29)$$

Для поперечной составляющей в работе [5] получена зависимость

$$A_y = A_z k_y^{1,5} \left(\frac{B}{H} \right)^{1,5}. \quad (30)$$

Вводя понятие модуля обмена $A_y = v H \lambda^{0,5}$, получаем систему сравнения составляющих коэффициента турбулентного обмена в продольном, поперечном и вертикальном направлениях

$$\begin{aligned} A_x &= k_x A_I; \\ A_z &= k_z A_I; \\ A_y &= k_z A_I \left(k_y \frac{B}{H} \right)^{1,5}. \end{aligned} \quad (31)$$

Тогда суммарный коэффициент турбулентного обмена для всего потока в целом определится зависимостью

$$A_s = A_x \sqrt{1 + \left(\frac{k_z}{k_x}\right)^2 \left[1 + \left(k_y \frac{B}{H}\right)^3\right]}, \quad (32)$$

где $k_x = 14,3$ (по Харлеману); $k_z = 0,7\kappa$; $k_y = \frac{b'_{cp}}{B}$ [9]. Гидравлические характеристики, входящие в указанные формулы, могут быть выражены через показатели водообмена; тем самым устанавливается влияние последних на турбулентный обмен.

Проведенный анализ показывает, что механизм рассеивания энергии транзитных потоков в проточных водоемах способствует образованию динамических структур в виде циркуляционных и водоворотных зон. В свою очередь подобные структуры влияют на характер турбулентного обмена, перенос и формирование водных масс и распределение растворенных веществ.

Поступление и отток воды и растворенных веществ определяются процессами внешнего водообмена, который обуславливает неоднородное распределение веществ в различных частях водоема. С другой стороны, процессы внутреннего водообмена, определяющие перенос и перемешивание разнородных водных масс внутри водоема, способствуют выравниванию неоднородностей распределения растворенных веществ. Тем самым совокупность процессов внешнего и внутреннего водообмена оказывает влияние на условия формирования качества воды в водоемах.

Анализ распределения растворенных консервативных веществ в водохранилищах волжского каскада по месяцам года показывает, что концентрация веществ в водоеме C_b зависит от содержания веществ в поступающей ($C_{пр}$) и уходящей ($C_{от}$) воде и средних месячных показателей внешнего водообмена:

$$C_b = K_1 C_{от} = K_2 C_{пр}, \quad (33)$$

где

$$K_1 = a K_{в. от} - b \frac{1}{n_{пр}} + 0,5, \quad (34)$$

$$K_2 = 0,5 (\alpha K_p - \beta K_p K_{в. пр} + 1) \quad (35)$$

и a, b, α, β — числовые коэффициенты, различные для разных водоемов [11].

Годовое изменение содержания растворенных веществ, характеризуемое амплитудой их концентрации ΔC в течение года, зависит от соответствующих годовых показателей водообмена

$$\Delta C = k_c K_{в. пр}^n, \quad (36)$$

где k_c и n — числовые коэффициенты и показатели степени; k_c равно 37,2 для волжских и 6,3 для камских водохранилищ, а n — соответственно 0,63 и 2,2 [11]. Из приведенных зависимостей видно,

что сток растворенных веществ, формируемый на водосборе, перераспределяется в водохранилищах под влиянием процессов водообмена, причем для русловых водохранилищ основное влияние оказывают процессы внешнего водообмена, а в озеровидных наряду с ними сказываются процессы внутреннего водообмена, связанные с наличием транзитных потоков и водоворотных зон.

В транзитных потоках изменение концентрации веществ в вытекающей воде в конечный момент времени $C_{\text{лот}}$ определяется зависимостью

$$C_{\text{лот}} = C_{\text{пр}} - (C_{\text{пр}} - C_{\text{лот}}) e^{-K_{\text{в. пр}}}, \quad (37)$$

где $C_{\text{пр}}$ — концентрация веществ в поступающей воде, $C_{\text{лот}}$ — в вытекающей воде в начальный момент времени [10].

Изменение концентрации веществ в пространственных водоворотах и циркуляциях $C_{\text{вд}}$ определяется формулой

$$\frac{C_{\text{вд}}}{C_{\text{тр}}} = (1 - e^{-n}) \left(\frac{1 + q_{\Delta} C_{\Delta}}{1 + q_{\Delta}} \right), \quad (38)$$

а время достижения заданного значения концентрации $C_{\text{вд}}$ — формулой

$$t = \frac{W_{\text{вд}}}{q_{\text{тр}} (1 + q_{\Delta})} \ln \left(\frac{1}{1 - C' \left(\frac{1 + q_{\Delta}}{1 + q_{\Delta} C_{\Delta}} \right)} \right), \quad (39)$$

где

$$n = \frac{q_{\text{тр}} (1 + q_{\Delta})}{W_{\text{вд}}} \quad t = \frac{k_1}{m} K_{\text{в. пр}}; \quad (40)$$

$$k_1 = \frac{q_{\text{тр}}}{Q_{\text{тр}}}; \quad m = \frac{W_{\text{вд}}}{W_{\text{в}}}; \quad q_{\Delta} = \frac{q_{\text{б}}}{q_{\text{тр}}}; \quad C_{\Delta} = \frac{C_{\text{б}}}{C_{\text{тр}}}; \quad C' = \frac{C_{\text{вд}}}{C_{\text{тр}}}.$$

Для нестационарного водоворота, создаваемого частью расхода $q_{\text{тр}}$ транзитного потока (с расходом $Q_{\text{тр}}$) и противоположно направленным расходом $q_{\text{б}}$ берегового потока, концентрация растворенных веществ соответствует значениям $C_{\text{тр}}$ для транзитного потока, $C_{\text{б}}$ для берегового потока и $C_{\text{вд}}$ для водоворота с объемом водной массы $W_{\text{вд}}$. Для стационарных водоворотов, формируемых транзитным потоком, $q_{\Delta} = 0$ и $C_{\Delta} = 0$ и формулы (38—40) соответственно упрощаются:

$$\frac{C_{\text{вд}}}{C_{\text{тр}}} = (1 - e^{-n}); \quad (41)$$

$$t = \frac{W_{\text{вд}}}{q_{\text{тр}}} \ln \frac{1}{1 - C'}; \quad (42)$$

$$n = \frac{q_{\text{тр}} t}{W_{\text{вд}}}. \quad (43)$$

В проточных водоемах нестационарные циркуляции могут образовываться под действием ветра, направленного против движения транзитного потока, при резкой смене направления и скорости ветра, резком изменении расхода воды через агрегаты ГЭС, особенно при остановке или пуске турбин. В последнем случае по водохранилищу распространяется прямая или обратная волна, взаимодействие которой с транзитным потоком приводит к развитию циркуляций в прибрежных зонах и местах резкого изменения морфометрии водохранилищ. Подобные циркуляции часто фиксируются гидрохимическими съемками, отмечающими «пятнистый» характер распределения химических веществ в водоемах, особенно в местах сбросов сточных вод. Нестационарные водовороты относительно быстро разрушаются, но образовавшееся в нем «пятно» вещества является своеобразной «фотографией» некогда существовавшего водоворота; смещаясь вместе с транзитным потоком, оно постепенно размывается за счет турбулентной диффузии.

Стационарные циркуляции, чаще всего образующиеся в результате взаимодействия транзитного потока с выступами дна или неровностями береговой линии, способствуют накоплению растворенных веществ и их неравномерному распределению по акватории водоема. Эти процессы необходимо учитывать при размещении выпусков сточных вод и водозаборов.

Влияние водообмена на перенос и распределение веществ в крупном озере имеет свои особенности, которые были выявлены при исследовании оз. Байкал. Сопоставление независимых оценок внутреннего водообмена между различными частями озера с распространением растворенных веществ показало, что распределение веществ в южной части озера соответствует преобладающей системе течений, а их количество зависит от интенсивности процессов внутреннего водообмена [7]. При этом процессы турбулентного обмена в локальных зонах озера связаны с крупномасштабными процессами внутреннего водообмена между отдельными частями озера. Так, например, для района выпуска сточных вод у г. Байкальска эта взаимосвязь представлена следующими разномасштабными процессами:

а) гидродинамическими процессами в локальной зоне, примыкающей к выпуску сточных вод, которые определяются гидравлическими условиями истечения струи сточных вод в озеро и обеспечивают их начальное разбавление. Размеры этой зоны не превышают десятков метров, а разбавление сточных вод в ней достигает 20-кратного значения;

б) гидрологическими и гидродинамическими процессами, формирующими систему течений и развитие турбулентных структур в прибрежной зоне и определяющими условия смешения сточных вод с окружающей водной массой. Перенос сточных вод в этой зоне осуществляется прибрежными течениями, а периодическое возникновение водоворотных образований обуславливает пятнистое распределение растворенных веществ. Анализ гидрохимических съемок показывает, что такие пятна имеют размеры по продольной

оси от 500 м до 10 км. Скорость турбулентной диффузии в водоворотных образованиях колеблется в пределах 0,8—4,0 см/с. Превышение концентрации веществ в пятнах над окружающим фоном убывает и с удалением от выпуска на расстояние 20 км составляет 5—15% максимальных значений;

в) переносом водных масс и разбавлением сточных вод в системе основной южнобайкальской циркуляции, определяемой внутризозерным водообменом и обусловленной совокупностью гидрометеорологических процессов. В результате этого происходит полное разбавление и перемешивание сточных вод с озерной водой. Как показывают исследования, среднее превышение минерализации в районе сброса сточных вод $\Delta C_{\Sigma и}$ над естественным фоном связано с водообменом W (км³) следующей эмпирической зависимостью:

$$\Delta C_{\Sigma и} = kW^{-1,5}, \quad (44)$$

где k — размерный числовой коэффициент, равный 200 для теплого периода и 63,5 для холодного. Из выражения (44) видно, что $\Delta C_{\Sigma и}$ возрастает с уменьшением водообмена и при его минимальном многолетнем значении (равном 36 км³) может достигать 6,5—8,5 мг/л [12]. Общая оценка количества химических веществ в отдельных котловинах оз. Байкал показывает, что оно меняется от года к году, а величина этих изменений, в 1,5—2,0 раза превышающих суммарный годовой сток растворенных веществ, обусловлена процессами внутреннего водообмена, перераспределяющими растворенные вещества внутри озера.

Таким образом, на примере исследования водохранилищ и крупных озер можно видеть, что процессы внешнего и внутреннего водообмена оказывают очень большое влияние на изменение содержания растворенных веществ и формирование качества воды как в отдельных районах, так и в водоемах в целом.

Непосредственные исследования условий формирования качества воды в крупных водоемах очень сложны и трудоемки, поэтому в ряде случаев, особенно при решении важных народнохозяйственных задач, целесообразно использовать методы гидравлического моделирования. Гидравлическая характеристика процессов в водоемах, изложенная выше, позволяет осуществлять подобное моделирование, а практические приемы, которые могут быть использованы при этом, рассмотрены в работе [6]. Здесь же кратко остановимся на некоторых прикладных аспектах, полученных в результате лабораторного исследования конкретных водоемов. Так, в частности, при экспериментальных исследованиях сбросов сточных вод в Невскую губу и Рижский залив, наряду с более детальным изучением процессов водообмена, переноса и перемешивания сточных вод, решалась задача оптимального размещения выпусков сточных вод. Для объективной оценки различных вариантов размещения выпусков сопоставляли следующие безразмерные показатели, характеризующие:

— относительную площадь распространения сточных вод, разбавленных в n раз (по отношению к площади исследуемого водоема);

— относительную площадь распространения сточных вод, отнесенную к 50-суточному периоду (соответствует времени минерализации органического азота);

— показатель суммарного распространения сточных вод в водоеме.

Многочисленные исследования, проведенные на моделях при различных гидрологических и гидравлических режимах, позволили дать практические рекомендации по выбору, размещению и эксплуатации выпусков с учетом требований охраны водных ресурсов [16]. Лабораторные исследования позволили также решить задачу о назначении водоохранной зоны водозабора Братского лесопромышленного комплекса и оценить влияние процессов внутреннего водообмена на режим работы водохранилища-охладителя Лукомльской ГРЭС. При исследовании на модели Лукомльского озера (используемого в качестве водоема-охладителя) было установлено наличие относительного равновесия между площадями транзитного потока и водоворотных зон, которое нарушается с изменением гидравлических параметров потока и температуры сбрасываемой воды.

На модели оз. Байкал было оценено влияние стока р. Селенги на формирование циркуляции в южной части озера. Было выявлено наличие транзитной зоны между устьем р. Селенги и истоком р. Ангары, средняя скорость стокового течения в которой составила примерно 0,2 см/с, а время поступления вод Селенги к истоку Ангары оказалось равным 1,6 года. Моделирование воздушных потоков показало, что они являются основной причиной существования внутрибайкальской циркуляции.

Экспериментальные исследования во многом расширяют возможности познания гидрологических и гидродинамических процессов в водоемах и открывают пути для решения следующих задач:

1) выделения и исследования квазистационарных динамических структур потока в плане на основе анализа осредненного пространственного скоростного поля;

2) исследования взаимодействия транзитного потока с водоворотными и циркуляционными зонами в зависимости от изменения условий внешнего и внутреннего водообмена;

3) оценки процессов переноса и разбавления растворенных веществ как при их естественном поступлении в водоем, так и при сбросах в результате хозяйственной деятельности;

4) оценки изменения содержания растворенных веществ и качества воды в водоеме в зависимости от сезонных и годовых изменений гидрологических и гидравлических факторов.

Однако при выполнении исследований на пространственных моделях не следует забывать о том, что на них не соблюдается подобие в точке и неизбежно пространственное и временное

осреднение моделируемых процессов, соответствующее условиям масштабирования.

Материалы и данные, полученные в результате натуральных и лабораторных исследований, могут быть эффективно использованы при создании математических моделей, предназначенных для прогнозирования изменения качества воды или экосистем водоемов. При этом результаты исследования отдельных элементов режима целесообразно использовать в виде первичных моделей или блоков более сложной математической модели.

Результаты изучения гидролого-гидравлических аспектов формирования качества воды целесообразно также учитывать и при создании схем комплексного использования и охраны водных ресурсов водоемов.

Основами водного законодательства СССР предусматривается составление научно обоснованных генеральных и бассейновых схем комплексного использования и охраны водных ресурсов. Учитывая широкое развитие работ по регулированию речного стока и созданию водохранилищ, необходимых прежде всего для накопления и перераспределения запасов пресной воды, а также возрастающее использование водных ресурсов крупных озер, целесообразно поставить вопрос о составлении схем комплексного использования и охраны вод крупных водоемов.

Необходимость составления таких схем для отдельных водоемов определяется тем, что крупные водоемы могут одновременно использоваться для удовлетворения зачастую резко противоречивых потребностей различных отраслей народного хозяйства. Так, например, такие водоемы, с одной стороны, используются в качестве источника питьевого и промышленного водоснабжения, для рыбозаведения и как зона рекреации, а с другой — как объекты гидро- и теплоэнергетики, водного транспорта и приемники промышленных и бытовых сточных вод и возвратных вод оросительных систем. При эксплуатации их для приема сточных вод используется самоочищающая способность водоема, включающая физическое (перенос, перемешивание и разбавление), химическое (нейтрализация) и биологическое влияние на переработку сбрасываемых стоков и возвратных вод. Неблагоприятное воздействие сбросов усугубляется тем, что водоем в целом представляет собой единую гидродинамическую и экологическую систему, отдельные части и районы которой тесно связаны между собой. Эти связи, достаточно сложные для одного водоема, еще более сложны для каскадов водохранилищ. Поэтому для увязки потребностей различных отраслей народного хозяйства и одновременного соблюдения условий охраны водных ресурсов и окружающей среды необходимо сформулировать некоторые принципы и рекомендации по учету гидролого-гидравлических факторов.

При составлении схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов следует исходить из того, что показатели, определяющие использование водоема для различных хозяйственных целей, и показатели, характеризующие условия охраны водных

и природных ресурсов, должны быть универсальными. С другой стороны, они должны объективно характеризовать вид использования или условия охраны водных ресурсов определенными количественными величинами. Можно полагать, что такими универсальными и объективными показателями могут быть рассмотренные выше характеристики водообмена.

Требования, которые выдвигают различные отрасли народного хозяйства к режиму уровней и расходов верхнего и нижнего бьефов, могут быть легко пересчитаны (с использованием кривых объемов, площадей и расходов воды) в показатели водообмена, а последние, как было показано выше, характеризуют условия формирования качества воды.

Таким образом, указанные гидролого-гидравлические характеристики могут быть положены в основу схем комплексного использования и охраны водных ресурсов. Разработка схемы должна осуществляться для каждого конкретного водоема отдельно, но предварительно должна быть установлена система оптимальных показателей для каждой такой схемы. В каждом конкретном случае эта система будет иметь свои особенности, и в рамках настоящей статьи обосновывается только основное содержание подобной задачи.

Оптимальное изменение основных показателей водообмена при различном использовании водохранилищ показано в таблице. Ее данные характеризуют изменение показателей водообмена за один полный цикл регулирования (фазу наполнения водохранилища до НПУ и фазу сработки). Общее число циклов регулирования различно и может составлять один (для годового регулирования) и более (для сезонного, месячного и недельного регулирования).

В таблице представлены изменения показателей водообмена при каждом отдельном виде использования водоема. При комплексном использовании водоемов должны быть выбраны определяющие показатели, при которых обеспечиваются требуемое качество воды и оптимальное использование водоема для профилирующих хозяйственных целей. Порядок определения таких показателей предусматривает:

- 1) выделение транзитной и циркуляционных зон в водоеме на основании предварительного исследования его гидролого-гидравлического режима;
- 2) расчет концентраций растворенных веществ в транзитной и циркуляционной зонах и во всем водоеме при различных значениях показателей водообмена и содержания растворенных веществ, поступающих с притоком с водосбора, а также при известном (или заданном) расположении выпусков сточных вод;
- 3) назначение показателей водообмена для различных сезонов года по условиям поддержания необходимого качества воды;
- 4) сопоставление и согласование заданных показателей водообмена с потребностями хозяйственного использования водоема;
- 5) разработку рекомендаций по регулированию и оптимальному использованию водоема.

Оптимальные изменения основных показателей водообмена при различном использовании водохранилищ

Вид использования водохранилища	Фаза наполнения					Фаза сработки				
	верхний бьеф			нижний бьеф		верхний бьеф			нижний бьеф	
	$K_p = \frac{K_{в. пр}}{K_{в. от}}$	соотношение $K_{в. пр}$ и $K_{в. от}$	$\frac{\Delta W}{W_B} = K_{в. пр} - K_{в. от}$	$W_{от}$ заданный	$K_{в. от}$ при $W_{от}$ заданном	$K_p = \frac{K_{в. пр}}{K_{в. от}}$	соотношение $K_{в. пр}$ и $K_{в. от}$	$\frac{\Delta W}{W_B} = K_{в. пр} - K_{в. от}$	$W_{от}$ заданный	$K_{в. от}$ при $W_{от}$ заданном
Гидроэнергетика	≥ 1	$K_{в. пр} \geq K_{в. от. зад}$	> 0	$\neq const$	Убывает	< 1	$K_{в. пр} < K_{в. от. зад}$	≤ 0	$\neq const$	Возрастает
Орошение	≥ 1	$K_{в. пр} \geq K_{в. от. зад}$	> 0	$\neq const$	"	≤ 1	$K_{в. пр} < K_{в. от. зад}$	≤ 0	$\neq const$	"
Водный транспорт	≥ 1	$K_{в. пр} \geq K_{в. от. зад}$	> 0	const	"	≤ 1	$K_{в. пр} \leq K_{в. от. зад}$	≤ 0	const	"
Рыбное хозяйство	> 1	$K_{в. пр} > K_{в. от. зад}$	от > 0 до const	const	"	1	$K_{в. пр} = K_{в. от. зад}$	0	const	"
Водоснабжение, в том числе ТЭС и АЭС	≥ 1	$K_{в. пр} > K_{в. от}$	от > 0 до const	$\neq const$	"	1	$K_{в. пр} \approx K_{в. от}$	$\approx \pm 0$	$\neq const$	"
Сброс промышленно-коммунальных сточных вод	≥ 1	$K_{в. пр} \geq K_{в. от}$	> 0	$\neq const$	"	1	$K_{в. пр} < K_{в. от}$	≤ 0	$\neq const$	"
Качество воды	> 1	$K_{в. пр} > K_{в. от. зад}$	> 0	const	"	≈ 1	$K_{в. пр}$ или $K_{в. от. зад}$	< 0	const	"

Можно полагать, что использование подобных показателей позволит выполнить увязку потребностей различных отраслей народного хозяйства с условиями охраны водных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богомолов А. И., Михайлов К. А. Гидравлика.— М.: Стройиздат, 1965.— 632 с.
2. Гидродинамика береговой зоны и эстуариев/Под ред. А. Т. Иппена.— Л.: Гидрометеиздат, 1962.— 350 с.
3. Знаменский В. А. Анализ потерь энергии в водоемах и предложения по моделированию гидравлического режима.— Труды ГГИ, 1968, вып. 155, с. 88—107.
4. Знаменский В. А. Оценка турбулентности и гидравлических сопротивлений при волновом движении жидкости в водоемах.— Труды ГГИ, 1969, вып. 169, с. 160—168.
5. Знаменский В. А. Гидравлические сопротивления и турбулентный обмен при взаимодействии транзитного потока с плановыми водоворотами в водоемах.— Труды ГГИ, 1969, вып. 173, с. 86—99.
6. Знаменский В. А. Гидравлическое моделирование течений в водоемах.— Труды ГГИ, 1970, вып. 183, с. 180—201.
7. Знаменский В. А. К вопросу о процессах внутреннего водообмена и турбулентности на оз. Байкал.— Труды ГГИ, 1973, вып. 203, с. 71—79.
8. Знаменский В. А. Сравнительная оценка потерь энергии в водоемах, спокойных и бурных потоках.— Труды ГГИ, 1973, вып. 203, с. 186—199.
9. Знаменский В. А. Влияние гидролого-динамических факторов на изменение содержания химических веществ в водохранилище.— Труды ГГИ, 1977, вып. 246, с. 58—78.
10. Знаменский В. А. Влияние гидрологических факторов на формирование качества воды в водохранилищах.— В кн.: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. семинара по опыту проектирования, строительства и эксплуатации водохранилищ электростанций. Л., 1978, с. 81—84.
11. Знаменский В. А., Москвина Н. Н. Влияние основных гидрологических факторов на концентрацию химических веществ в водохранилищах волжско-камского каскада.— Труды ГГИ, 1976, вып. 231, с. 47—78.
12. Караушев А. В. Внешний водообмен и формирование качества воды в озерах и водохранилищах.— Труды ГГИ, 1978, вып. 249, с. 48—62.
13. Комплексные исследования водного баланса, течений и водообмена оз. Байкал/В. А. Знаменский, М. М. Айнбунд, З. А. Викулина, А. С. Судольский, Н. А. Давтян.— В кн.: Труды IV Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 5. Л., 1975, с. 193—204.
14. Лонгинов В. В. Динамика береговой зоны бесприливных морей.— Изд-во АН СССР, 1963.— 379 с.
15. Офицеров А. С. Вопросы методики лабораторных волновых исследований и линейные потери энергии волнения.— М.: изд. ВОДГЕО, 1958.— 92 с.
16. Проектирование и строительство канализаций/Г. С. Шигорин, М. Ш. Лысс, Л. М. Ясман, В. А. Знаменский.— Л.: Госстройиздат, 1971.— 120 с.

А. В. Караушев, Б. Г. Скакальский

ПРОБЛЕМЫ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД СУШИ

Общие положения

Разработка научных основ мероприятий по охране окружающей среды в нашей стране с ее плановым хозяйством должна вестись с учетом дальнейшего развития производительных сил, социального развития и роста благосостояния народа. Этим определяется большое значение, которое приобретают в проблеме охраны природы от загрязнения вопросы оценки антропогенного воздействия на окружающую среду и контроля за изменением ее состояния.

С другой стороны, в последнее время все более четко высказывается мысль об оптимизации взаимодействия человека и природы, о целенаправленном преобразовании природной среды (см., например, работу [10]). Очевидно, что реализация возникающих в связи с этим задач невозможна без достаточных сведений об уровне современного антропогенного воздействия на природу.

Систему наблюдений за изменяющимися элементами окружающей среды с целью выявления роли, которую играет в этих изменениях антропогенный фактор, принято называть мониторингом [1]. Это определение показывает, что в понятие мониторинга вкладывается не только система наблюдений, но и обоснование путей и методов научного обобщения получаемого материала. Это очевидно, поскольку конечной целью является выделение одного фактора (антропогенного) из числа многих действующих природных факторов.

В настоящей статье уделяется внимание лишь проблеме мониторинга качества поверхностных вод суши (реки, озера, водохранилища). Особенностью данного природного объекта по сравнению с другими объектами природной среды, такими, как воды океанов и морей или атмосфера, является его пространственная дискретность. Дискретностью отличается и пространственное распределение антропогенного фактора. Вследствие этого даже близко расположенные друг к другу водные объекты могут оказаться

в совершенно различных условиях в смысле антропогенного воздействия. Так, например, один объект попадет в зону влияния выпусков промышленных сточных вод, соседний окажется под воздействием сбросов сельскохозяйственных предприятий, а третий вовсе не будет подвержен никакому антропогенному влиянию. Сложность усугубляется тем, что между этими водными объектами могут находиться урбанизированные территории, сельскохозяйственные поля, лесные массивы и т. д.

Дискретность объекта и воздействия осложняет выбор путей общей оценки антропогенного влияния на воды суши в пределах рассматриваемой территории и тем более разработку способов количественных региональных обобщений получаемых результатов. Из сказанного следует, что задачи обобщения данных, выполняемого применительно к мониторингу поверхностных вод суши, требуют, во-первых, предварительной разработки методов сравнительной оценки для отдельных зон антропогенного влияния; во-вторых, разработки способов территориальных обобщений характеристик загрязненности вод для типичных по физико-географическим признакам и хозяйственному освоению территорий и, в-третьих, — выработки обобщающих критериев (состояния загрязненности вод) для крупных регионов. Все эти задачи отличаются большой сложностью и не могут быть решены и даже достаточно полно сформулированы в рамках одной статьи. Основное внимание здесь уделяется рассмотрению вопросов организации наблюдений и изложению конкретных предложений, относящихся к первой задаче, а также высказываются некоторые предложения по третьей задаче.

Организация гидрохимических наблюдений

Главные задачи мониторинга качества поверхностных вод суши могут решаться лишь на основе правильно организованных стационарных сетевых наблюдений [3]. Сеть должна удовлетворять следующим требованиям: приоритет отдается изучению и контролю антропогенного воздействия; обеспечивается систематичность и комплексность наблюдений (согласование гидрологических и гидрохимических измерений), оперативность получения и передачи информации.

При разработке структуры сети должны учитываться закономерности формирования речного стока и качества воды, существенные различия условий формирования местных вод, отражающих зональные условия региона и крупных речных артерий, имеющих полизональный характер.

Общим принципом размещения пунктов наблюдения является удовлетворение требованию репрезентативности по масштабам и видам загрязнения, физико-географическим характеристикам и гидрологическому режиму.

В целях надежного выяснения влияния антропогенного фактора на качество вод одновременно с загрязняемыми реками и

водоемами изучаются незагрязняемые. Это позволяет обеспечить изучение природных гидрохимических процессов и получить характеристику фона, на котором развиваются процессы, обусловленные антропогенными факторами.

Наблюдения на загрязненных и незагрязненных объектах различаются не только по своим задачам, но и по методике.

Наблюдения для изучения естественного гидрохимического фона организуются на водных объектах (или их участках), сохраняющих естественный режим и не используемых для отведения сточных вод или обладающих очень высокой самоочищающей способностью. При организации сети на объектах с естественным химическим составом вод, как это впервые было предложено П. П. Воронковым, целесообразно применять две схемы размещения пунктов наблюдения — территориальную и объектную. Территориальная схема размещения пунктов наблюдений применяется для изучения гидрохимического режима малых рек — местного стока — и получения территориальных обобщений по основным его характеристикам, отражающим ландшафтную зональность формирования состава вод. Планирование размещения сети основывается на существующих схемах физико-географического районирования территории с учетом таких важнейших характеристик, как геологическое строение бассейна реки, тип почв, растительность и т. д.

Определенное число пунктов этой сети должно размещаться в пределах государственных заповедников для получения гидрохимического фона, наименее нарушенного антропогенными факторами.

Сеть на малых водотоках должна иметь и оперативное значение, поскольку усиление химизации сельского хозяйства при нерациональном использовании удобрений или ядохимикатов может привести к существенному изменению концентрации различных ингредиентов в водотоках относительно естественного фона и к загрязнению воды. Своевременное обнаружение такого загрязнения с выявлением объектов, служащих источником загрязнения, должно способствовать принятию действенных мер по борьбе непосредственно с причиной сельскохозяйственного загрязнения, неумелым и расточительным применением удобрений и ядохимикатов. Следует особо подчеркнуть, что рациональная борьба с сельскохозяйственным загрязнением может вестись в основном на полях, поскольку меры, направленные на снижение концентрации растворимых веществ непосредственно в водотоках, мало эффективны. Предотвращение сельскохозяйственного загрязнения вод является комплексной задачей, руководящая роль в решении которой, по видимому, принадлежит специалистам, занимающимся проблемами сельского хозяйства.

Объектная схема размещения постов в отличие от территориальной предназначается для рек с водосборами, не отражающими условий формирования местного стока. Это в первую очередь полизональные реки, сток которых формируется в пределах

нескольких природных зон. Объектная схема применяется также на каналах, озерах и водохранилищах.

На больших реках количество и размещение пунктов наблюдений планируется с учетом различий режима на их участках, наличия крупных притоков, а также интересов основных водопотребителей. По данным этих наблюдений предусматривается составление балансов химических веществ и соответственно планируется размещение пунктов наблюдений на границах резкого изменения химического состава вод.

На зарегулированных реках гидрохимические наблюдения организуются в верхних бьефах подпорных сооружений. Как минимум назначается два створа — выше зоны выклинивания подпора и при выходе потока в нижний бьеф.

Основной задачей гидрохимических наблюдений на загрязненных реках является контроль за состоянием вод и изучение основных факторов и процессов загрязнения с целью разработки мер, обеспечивающих снижение вредного воздействия сбросов на реку или даже полное прекращение ее загрязнения. Организуемая сеть гидрохимических наблюдений в то же время должна обеспечивать оперативной информацией об изменении степени загрязненности вод и о всех случаях превышения в них концентрации лимитирующих веществ над ПДК (предельно допустимая концентрация). Наблюдательная сеть организуется с учетом расположения сосредоточенных или неорганизованных сбросов сточных вод и подверженных их влиянию мест водопользования, при этом принимаются во внимание все основные виды водопользования, включая и рыбное хозяйство.

Наблюдательные пункты размещаются в местах расположения городов и крупных поселков, сброса сточных загрязненных и подогретых вод промышленными и энергетическими предприятиями, сброса вод с орошаемых и осушаемых массивов, а также на приплотинных участках зарегулированных рек, в замыкающих створах всех больших и средних рек, впадающих в моря и крупные водоемы большого хозяйственного значения, у пересечения реками государственных границ и т. д.

Размещение створов наблюдений на объекте и расстояния между ними определяются в соответствии с действующими официальными правилами охраны поверхностных вод от загрязнения, а также с учетом гидрологического режима объектов и гидродинамических условий, определяющих смещение сточных вод с водами реки или водоема. При постановке наблюдений в местах крупных сосредоточенных сбросов сточных вод измерения ведутся в створе выше мест сброса (для получения фоновых характеристик) и в створах, расположенных в зонах загрязнения и влияния [5, 7—9].

Основным объектом наблюдения должна быть зона загрязнения. Оконтуривание этой зоны в простейшем случае по одному основному лимитирующему веществу или физико-химическому показателю выполняется по изолинии, где концентрация z равна ПДК для рассматриваемого вещества. Расположенная за

пределами зоны загрязнения остальная часть потока или водоема характеризуется условием $s \leq \text{ПДК}$. Оценку допустимости нагрузки водных масс несколькими веществами с одинаковым лимитирующим показателем вредности принято осуществлять на основании условия

$$\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\text{ПДК}_i} \leq 1, \quad (1)$$

где s_i и ПДК_i — соответственно концентрация и ПДК для одного и того же вещества; n — общее количество учитываемых лимитирующих веществ.

В пределах одного наблюдательного пункта на реке измерения производятся не менее чем в двух-трех створах, а на водоеме — в пяти-семи створах, располагаемых в месте сброса сточных вод и, как правило, по обе стороны от него [3, 7]. Количество и место расположения измерительных вертикалей и точек устанавливаются по данным выполняемых предварительно рекогносцировочных гидрохимических разрезов.

Для пунктов наблюдений на реках должны обязательно иметься данные гидрологических измерений — уровней и расходов воды, скоростей течения; для озер необходимо располагать данными об уровне воды, ветровом режиме, волнении и течениях. Во всех случаях должны иметься батиметрические планы или карты водных объектов на участке сброса и распространения сточных вод.

Состав и частота гидрохимических определений

Гидрохимические измерения на незагрязненных реках включают определения, предусмотренные стандартной программой гидрометеорологической службы. Определяется ионный состав воды, общее содержание растворенных органических соединений, биогенных веществ, газовый состав, а также некоторые широко распространенные специфические загрязняющие вещества, такие, как фенолы, нефтепродукты, детергенты, пестициды и др.

Состав и объем гидрохимических работ в пунктах наблюдений на загрязненных реках определяются требованиями со стороны органов государственного управления и надзора и основных водопользователей. На каждом пункте надо стремиться к определению всех основных веществ, вносимых сточными водами и нормируемых в установленном порядке. Конкретный перечень определяемых ингредиентов может изменяться от пункта к пункту. Для сравнимости данных и последующих обобщений программой наблюдений предусматривается проведение обязательных для всех пунктов гидрохимических измерений, учитывающих общие требования к качеству воды санитарно-бытового и рыбохозяйственного водопользования. Имеются в виду следующие определения: температура

воды, взвешенные вещества, минерализация, цветность, рН, растворенный кислород, БПК, плавающие примеси, запахи, патогенные микроорганизмы. Включается также определение широко распространенных загрязняющих веществ: фенолов, нефтепродуктов, детергентов.

Программы наблюдений, определяющие их состав, частоту и периодичность, должны быть дифференцированы для отдельных пунктов с учетом степени загрязненности, хозяйственной ценности водного объекта и его ландшафтной значимости. По-видимому, могут быть предложены следующие три типа программы: а) ежедневный (в особо ответственных случаях — непрерывный) химико-аналитический контроль; б) еженедельные наблюдения; в) ежемесячные наблюдения. Конкретные даты измерений устанавливаются в соответствии с развитием фаз гидрологического (для рек) или гидрометеорологического (для озер) режима водных объектов.

При возникновении затруднений с выполнением полного объема гидрохимических определений работа может выполняться по сокращенной программе, предусматривающей определение ингредиентов и показателей, общих для всей сети, и репрезентативных веществ для данного вида сточных вод.

Для обеспечения сопоставимости результатов гидрохимических определений все аналитические работы должны проводиться по одному методическому руководству.

Система интегральных показателей качества воды

Материалы сетевых наблюдений, организуемых на изложенной выше основе, достаточны для оценки качества воды в водных объектах. При обобщении данных наблюдений в рамках мониторинга целесообразно использовать разработанную авторами систему интегральных показателей качества воды и загрязненности рек и водоемов [6, 9]. Согласно этой системе, состояние загрязненности рек оценивается двояко: 1) по общей нагрузке потока лимитирующим веществом или группой таких веществ; 2) по относительным размерам образующихся зон загрязнения. Для водоемов (озера и водохранилища) применяются показатели: 1) относительных размеров зон загрязнения; 2) внешнего водообмена, характеризующего изменение во времени средней концентрации лимитирующих веществ, что позволяет судить об их накоплении в водоеме.

Рассмотрим кратко основные показатели, наиболее подходящие для системы мониторинга. Обработка гидрохимических и гидрологических данных по створам, расположенным на реках, производится таким образом, чтобы можно было получить хронологические графики средних в поперечном сечении потока концентраций лимитирующих веществ $s_i(t)$ на фоне гидрографа реки $Q(t)$. Построения производятся для каждого года наблюдений. Графики

позволяют получить годовой сток каждого лимитирующего вещества и его среднюю годовую концентрацию $s_{\text{год}}$. Последняя определяется по соотношению

$$s_{\text{год}} = \frac{1}{V_{\text{год}}} \int_0^{T_{\text{год}}} s_i(t) Q(t) dt, \quad (2)$$

где $V_{\text{год}}$ — полный объем годового стока реки; $T_{\text{год}}$ — продолжительность года в избранной системе единиц (с, сут, год).

Правилами охраны вод от загрязнения, предусматривающими обеспечение качества воды применительно к хозяйственно-питьевому водоснабжению, культурно-бытовым нуждам населения и рыбохозяйственным целям, установлены общие требования к составу и свойствам воды, а по многим вредным веществам — предельно допустимые концентрации (ПДК) этих веществ в воде.

При оценке состояния природных вод и степени их загрязненности пользуются сопоставлением концентраций лимитирующих (нормируемых) веществ в воде со значениями ПДК для них. Такой способ оценки состояния водных объектов вполне приемлем и в рамках мониторинга при изучении антропогенного воздействия на поверхностные воды. Однако мониторинг предполагает учет не только случаев загрязнения вод, но и менее значительных изменений их качества, обусловленных хозяйственной деятельностью человека.

Имеются в виду такие изменения, которые хотя и не приводят к загрязнению по критериям ПДК, но заметно изменяют общие гидрохимические характеристики воды, а в ряде случаев общий гидрохимический фон. Они могут быть обнаружены именно по отклонениям от естественного фона или по крайней мере от фона, зафиксированного на какой-то момент времени, принимаемого за начальный. Такие, на первый взгляд небольшие, отклонения от первоначального фона могут оказаться нежелательными или даже вредными по их экологическим последствиям. По-видимому, в рамках мониторинга полезно использовать некоторый особый критерий качества воды, который характеризовал бы отклонение концентраций содержащихся в воде веществ от первоначального фона или от какого-то другого уровня, установленного по тем или иным соображениям. Указанный уровень концентрации вещества назовем контрольным значением концентрации (КЗК). В общем случае КЗК может устанавливаться исходя из общих или региональных задач охраны окружающей среды. Воды, в которых концентрация вещества превышает КЗК, будем считать условно загрязненными.

Если при анализе данных наблюдений выясняется, что $s_{\text{год}}$ меньше ПДК (или КЗК), то это еще не свидетельствует о полном благополучии, поскольку в отдельные периоды года уровень влияния загрязняющих веществ на водный объект может оказаться превышенным. Более полное представление о состоянии речных вод

дают показатели относительной продолжительности ($\tau_{\text{заг}}$) и объема ($\alpha_{\text{заг}}$) загрязненного (или условно загрязненного) и чистого ($\tau_{\text{ч}}$ и $\alpha_{\text{ч}}$) стока. Эти показатели легко получить на основании совмещенных графиков $s_i(t)$ и $Q(t)$. На чертеже проводятся горизонтальные линии, отвечающие ПДК (или КЗК) для рассматриваемых лимитирующих веществ. Далее анализ ведется по каждому лимитирующему веществу в отдельности. На графике находятся отрезки времени $\Delta T_{\text{заг}}$, соответствующие стоку загрязненной (или условно загрязненной) воды, и отрезки времени $\Delta T_{\text{ч}}$, отвечающие стоку чистой воды. Если анализ ведется по годовым гидрографам, то показатели относительной продолжительности находятся из соотношений:

$$\tau_{\text{заг}} = \frac{\sum \Delta T_{\text{заг}}}{T_{\text{год}}}; \quad (3)$$

$$\tau_{\text{ч}} = \frac{\sum \Delta T_{\text{ч}}}{T_{\text{год}}} = 1 - \tau_{\text{заг}}, \quad (4)$$

где $\sum \Delta T_{\text{заг}}$ и $\sum \Delta T_{\text{ч}}$ — суммы всех частных отрезков времени прохождения соответственно загрязненной и чистой воды. Очевидно, что $\sum \Delta T_{\text{заг}} + \sum \Delta T_{\text{ч}} = T_{\text{год}}$.

Для всех частных периодов $\Delta T_{\text{заг}}$ и $\Delta T_{\text{ч}}$ прохождения через створ соответственно загрязненной (по принятому критерию) и чистой воды могут быть определены объемы загрязненного (или условно загрязненного) ($\Delta V_{\text{заг}}$) и чистого (условно чистого) ($\Delta V_{\text{ч}}$) стока. При этом для года будем иметь

$$\sum \Delta V_{\text{заг}} + \sum \Delta V_{\text{ч}} = V_{\text{год}}. \quad (5)$$

Показатели относительных объемов загрязненного (условно загрязненного) ($\alpha_{\text{заг}}$) и чистого ($\alpha_{\text{ч}}$) стока определяются формулами:

$$\alpha_{\text{заг}} = \frac{\sum \Delta V_{\text{заг}}}{V_{\text{год}}}; \quad (6)$$

$$\alpha_{\text{ч}} = \frac{\sum \Delta V_{\text{ч}}}{V_{\text{год}}} = 1 - \alpha_{\text{заг}}. \quad (7)$$

По интегральным показателям $\tau_{\text{заг}}$, $\tau_{\text{ч}}$, $\alpha_{\text{заг}}$, $\alpha_{\text{ч}}$ могут быть построены диаграммы качества вод для отдельных водотоков или створов, дающие наглядное представление о структуре загрязненности вод по различным лимитируемым химическим веществам и о связи загрязненности с режимом стока. Это облегчает выявление источников загрязнения и разработку мероприятий, направленных на их устранение.

Другая группа интегральных показателей применяется для оценки состояния загрязненности вод в районах локальных источников загрязнения. Три основных показателя этой группы представляют собой относительные показатели линейных размеров

($\lambda_{\text{заг}}$), площади ($\eta_{\text{заг}}$) и объема ($\mu_{\text{заг}}$) зоны загрязнения, выделенной по условиям превышения над ПДК. Здесь надо использовать утвержденные общепринятые ПДК. Формулы для вычисления перечисленных показателей вытекают из самих их наименований, т. е. $\lambda_{\text{заг}}$ является отношением длины зоны загрязнения к общей длине рассматриваемого контрольного участка; $\eta_{\text{заг}}$ равно отношению площади зоны загрязнения к общей площади этого участка; $\mu_{\text{заг}}$ выражает относительный объем зоны загрязнения (взятый относительно общего контрольного участка реки).

Обычно задачи о состоянии загрязненности речного потока ставятся в отношении участка выше створа водопользования. Участок реки, заключенный между створами сброса сточных вод и створом водопользования, и следует рассматривать как контрольный и для него находить перечисленные выше показатели. В принципе размеры контрольного участка могут быть назначены и на основании других соображений (см., например, Руководство [9], где, кроме того, подробно сказано о способах вычисления интегральных показателей).

Показатели локального загрязнения определяются для характерных фаз режима реки (паводок, ледостав, межень и т. д.) или водоема (штиль, ледостав, шторм и т. д.) и учитывают изменения режима сброса сточных вод. В ряде случаев необходимы сведения о полном спектре показателей, в других необходимо знать их для лимитирующих режимов (глубокая межень, ледостав и т. д.).

Размеры зон загрязнения могут быть получены не только по непосредственным измерениям, но и путем расчета [8], скорректированного по возможности данными измерений.

Для водоемов (озера и водохранилища) первая группа показателей ($\tau_{\text{заг}}$, $\tau_{\text{ч}}$, $\alpha_{\text{заг}}$ и $\alpha_{\text{ч}}$) неприменима. Нецелесообразно также использование и первого показателя второй группы — $\lambda_{\text{заг}}$. Зато очень удобны показатели $\eta_{\text{заг}}$ и $\mu_{\text{заг}}$; они вычисляются применительно ко всему водоему в целом, поэтому содержащиеся в знаменателях их формул величины выражают соответственно общую площадь зеркала водоема и полный его объем при среднем многолетнем или минимальном уровне в зависимости от поставленной задачи.

Уровень общей нагрузки водоема лимитирующими веществами и тенденция ее изменения могут быть оценены при использовании соотношений, основным параметром которых является условное время водообмена, найденное как частное от деления объема водоема на сток из него.

Способы обобщения результатов наблюдений по мониторингу

Результаты наблюдений по мониторингу могут обобщаться различными способами с использованием различных методологических основ. Ниже рассматриваются лишь некоторые приемы, ос-

нованные на использовании системы интегральных показателей. Поскольку упомянутую систему можно считать достаточно общей, то и основанные на ней методы обобщения материалов мониторинга окажутся универсальными, позволяющими представить материалы в сравнимых характеристиках.

Рассмотрим конкретно применение системы интегральных показателей для мониторинга по трем видам водных объектов: 1) малые водотоки (малые реки и ручьи), на которых организуются наблюдения за изменениями общего гидрохимического фона; 2) средние и крупные загрязняемые и незагрязняемые реки; 3) загрязняемые водоемы (озера, водохранилища, пруды).

Применительно к задачам мониторинга данные наблюдений за составом вод и стоком на малых водотоках обрабатываются и систематизируются так, чтобы можно было получить для каждого пункта наблюдений значения годового стока основных гидрохимических ингредиентов, обнаружить возможные отклонения от фона или явные загрязнения и вычислить интегральные показатели загрязненности вод — относительные время и объем загрязненного и чистого стока.

Фоновые значения гидрохимических ингредиентов и упомянутые показатели загрязненности могут быть картированы для любого региона, обеспеченного достаточно густой сетью пунктов наблюдений. Эти карты позволили бы составить общее представление о состоянии малых водотоков региона, выяснить степень и очаги их загрязнения.

Для пунктов наблюдений на средних и больших реках вычисляются те же самые характеристики, что и для малых рек; кроме того, для обнаруженных на них участков локального загрязнения вычисляются показатели $\lambda_{\text{заг}}$, $\eta_{\text{заг}}$ и $\mu_{\text{заг}}$.

Показатели $\tau_{\text{заг}}$, $\tau_{\text{ч}}$, $\alpha_{\text{заг}}$ и $\alpha_{\text{ч}}$ используются в целях построения диаграмм качества воды [8] для каждого пункта наблюдений. При этом для тех пунктов, где наблюдения ведутся на нескольких створах, диаграммы строятся для верхнего фонового створа и створа, расположенного ниже источников загрязнения. Диаграммы позволяют оценить интенсивность антропогенного влияния на водоток, структуру загрязнения и зависимость загрязненности вод от гидрологического режима потока.

Показатели $\tau_{\text{заг}}$, $\alpha_{\text{заг}}$, а также $\mu_{\text{заг}}$, $\eta_{\text{заг}}$ и $\lambda_{\text{заг}}$ могут быть картированы для отдельного региона или значительной территории. Такие карты позволяют обнаружить области наиболее интенсивного загрязнения, выделенного не только на основе оценки интенсивности источников загрязнения, но и на основе гидрологических характеристик рек, принимающих сточные воды, т. е. с учетом эффективности самоочищения.

Для всего региона в целом могут быть сделаны обобщения, подобные тем, которые выполняются при вычислении интегральных показателей для отдельных створов. Так, например, общая оценка загрязненности рек региона могла бы быть сделана по одному из

показателей $\lambda_{\text{пер}}$ или $\eta_{\text{пер}}$, вычисляемых для наиболее неблагоприятных гидрологических условий по формулам

$$\lambda_{\text{пер}} = \frac{\sum_{i=1}^N L_{\text{заг}i}}{\sum_{j=1}^M L_j}; \quad (8)$$

$$\eta_{\text{пер}} = \frac{\sum_{i=1}^N \Omega_{\text{заг}i}}{\sum_{j=1}^M \Omega_j}, \quad (9)$$

в которых $\sum_{j=1}^M L_j$, $\sum_{j=1}^M \Omega_j$ — общая длина и общая площадь зеркала (например, в период межени) рек региона, изучающихся по программе мониторинга; $L_{\text{заг}i}$, $\Omega_{\text{заг}i}$ — длина и площадь каждой частной зоны загрязнения (при той же гидрологической ситуации); M и N — соответственно общее число изучающихся рек и общее количество зафиксированных на них зон загрязнения.

Использование указанного вида относительных характеристик загрязненности для сравнительной оценки общего состояния вод территории представляется более наглядным, чем применение абсолютных характеристик размеров загрязненных участков рек. Так, например, приведенная в книге [6] общая длина загрязненных участков рек США применена как показатель загрязненности речных потоков на указанной территории. Эта характеристика, однако, является недостаточной. Требуется дополнительные сведения об общей протяженности обследованных рек.

Полезной обобщающей характеристикой может служить и оценка доли загрязненного стока территории, определяемой по формуле

$$\alpha_{\text{пер}} = \frac{\sum_{i=1}^N V_{\text{заг}i}}{V_{\text{общ}}}, \quad (10)$$

где $V_{\text{общ}}$ — общий учтенный сток с данной территории; $\sum_{i=1}^N V_{\text{заг}i}$ — сумма годовых объемов стока загрязненных вод (например, по критериям ПДК) в створах рек, расположенных на границах рассматриваемой территории.

Показатели загрязненности, получаемые для озер и водохранилищ, анализируются в основном применительно к отдельным объектам и удобны для сравнительной оценки состояния их вод.

Региональные обобщения надо рассматривать как важнейшую составную часть глобального мониторинга. Они позволяют произ-

водить взаимное сопоставление регионов в отношении загрязненности вод, выявлять особенности процессов загрязнения и самоочищения вод в пределах больших территорий и речных бассейнов. Это должно способствовать правильной организации мер по охране поверхностных вод от загрязнения и учитываться при перспективном планировании использования водных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Израэль Ю. А. Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка изменений состояния окружающей природной среды. Основы мониторинга.— Метеорология и гидрология, 1974, № 7, с. 3—8.
2. Караушев А. В. Внешний водообмен и формирование качества воды в озерах и водохранилищах.— Труды ГГИ, 1978, вып. 249, с. 48—62.
3. Караушев А. В., Скакальский Б. Г. Актуальные проблемы исследования качества поверхностных вод.— Метеорология и гидрология, 1973, № 10, с. 73—81.
4. Караушев А. В., Шварцман А. Я., Бесценная М. А. Теоретическое и экспериментальное изучение разбавления сточных вод в реках и водоемах.— В кн.: Труды IV Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 9. Л., 1976, с. 27—35.
5. Кутырин И. М., Беличенко Ю. П. Охрана водных ресурсов — проблема современности.— 2-е изд.— Л.: Гидрометеоздат, 1974.— 104 с.
6. Оценка загрязненности водных объектов по интегральным показателям/А. В. Караушев, Б. Г. Скакальский, А. Я. Шварцман, Л. И. Фаустова.— В кн.: Материалы V Всесоюз. науч. симпозиума по современным проблемам самоочищения и регулирования качества воды. IV секция. Ч. 1. Таллин, 1975, с. 97—107.
7. Практические рекомендации по гидрологическому изучению загрязнения и самоочищения рек, озер и водохранилищ.— Л.: Отпеч. на множит. аппарате ГГИ, 1971.— 26 с.
8. Практические рекомендации по расчету разбавления сточных вод в реках, озерах и водохранилищах.— 2-е изд.— Л.: Отпеч. на множит. аппарате ГГИ, 1973.— 101 с.
9. Рекомендации по применению интегральных показателей для оценки качества воды и загрязненности рек и водоемов.— Л.: Отпеч. на множит. аппарате ГГИ, 1977.— 72 с.
10. Федоров Е. К. Взаимодействие общества и природы.— Л.: Гидрометеоздат, 1972.— 88 с.

*Н. М. Алюшинская, И. Б. Вольфцун, О. Л. Маркова,
Р. А. Нежиховский, И. А. Шикломанов*

ИЗМЕНЕНИЕ ВОДНОГО РЕЖИМА СЕВЕРНЫХ РЕК СССР ПРИ ИЗЪЯТИИ ЧАСТИ ИХ СТОКА

Основные положения

Проектируемые мероприятия по межзональному перераспределению водных ресурсов с целью улучшения водообеспечения южных районов страны по своему значению и масштабам относятся к крупнейшим научно-хозяйственным проблемам современности. Они должны основываться на глубоком знании природных процессов и закономерностей и учитывать не только положительный эффект, но и возможные отрицательные последствия, которые могут возникнуть в результате нарушения установившегося природного равновесия в районах переброски вод. В связи с этим «Основными направлениями развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 гг.» предусмотрено проведение широкого комплекса научных исследований, предшествующих практическому осуществлению перераспределения водных ресурсов и направленных на обоснование наиболее благоприятных и экономически целесообразных его вариантов.

На современном этапе проблема межзональной переброски части стока заключается не столько в преодолении технических сложностей инженерной стороны дела (хотя они и велики), сколько в решении экологических и социально-экономических ее аспектов. Исходя из интересов страны в целом проблема перераспределения и регулирования водных ресурсов должна быть решена так, чтобы предусмотреть наиболее эффективное развитие не только южных аридных, но и северных районов, с минимальными для них отрицательными последствиями. Поэтому очень важно иметь прогностические оценки влияния переброски вод на природные условия районов изъятия стока и в первую очередь оценку изменений элементов гидрологического режима, в значительной мере определяющего все последующие преобразования природной среды.

В соответствии с комплексной программой Государственного комитета СССР по науке и технике Государственным гидрологическим институтом в течение 1976—1978 гг. проведен широкий комплекс исследований по гидрологическому обоснованию территориального перераспределения стока и обеспечению расчетными данными проектных разработок. В настоящей статье рассматриваются методические подходы и приводятся некоторые результаты исследований, связанных с оценкой возможных изменений водного режима и водного баланса районов изъятия части стока: северо-

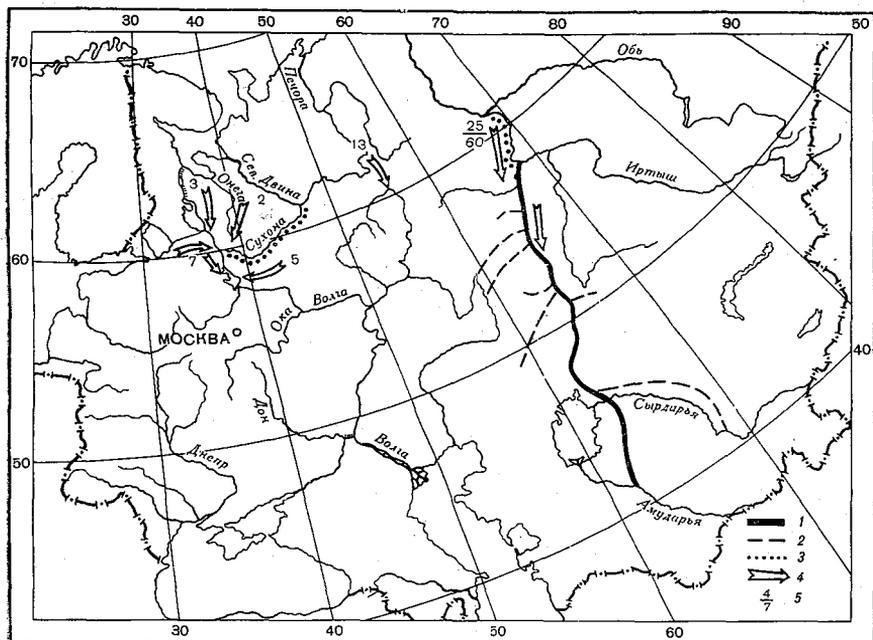


Рис. 1. Схема территориального перераспределения стока.

1 — проектируемый Обь-Каспийский канал; 2 — проектируемые распределительные каналы; 3 — переброска стока по руслам «антирек»; 4 — варианты первой очереди переброски стока; 5 — объемы перебрасываемого стока, км³/год.

запада и севера Европейской территории СССР, а также северной и центральной частей Среднего региона.

В настоящее время рассматривается вопрос привлечения в качестве источников водоснабжения аридного юга многоводных рек севера СССР — Онеги, Северной Двины, Печоры, Оби, Иртыша, Енисея, а также наиболее крупных озер северо-запада — Ладожского, Онежского, Лаца, Воже, Кубенского. Суммарный средний многолетний объем годового стока потенциальных рек-доноров севера и северо-запада ЕТС составляет 340 км³/год, р. Оби (в устье) и Верхнего Енисея (у Абакана) — около 450 км³/год. Запасы воды в Ладожском озере — 910 км³, в Онежском — 295 км³, а средний

годовой объем стока с бассейна р. Невы, включающего эти озера, составляет около 80 км³/год.

На первых стадиях проектирования проблема территориального перераспределения стока решается многовариантно, что определяется ее сложностью. Достаточно сказать, что только по схеме переброски части стока рек Оби и Иртыша в Казахстан и Среднюю Азию проектными организациями было разработано (с разной степенью детальности) более десяти вариантов и около трех десятков подвариантов. Прогностические оценки, выполненные ГГИ, касаются в основном вариантов первой очереди, предусматривающих на 1-м этапе переброску 27—37 км³/год из бассейнов северных рек ЕТС и 25 км³/год из бассейна р. Оби и увеличение объема переброски обских вод на 2-м этапе до 60 км³/год (рис. 1, табл. 1).

Таблица 1

Основные направления и объемы переброски стока

Река или бассейн (район изъятия стока)	Направление переброски стока	Объем перебрасываемого стока	
		км ³ /год	% от стока в устье
Нева	Верхняя Волга (Рыбинское водохранилище)	7	9
Онега	То же	2	13
Северная Двина	„	5—15	5—17
Печора	р. Кама	13	10
Обь	Казахстан и Средняя Азия	25	6
Всего		52—62	—

Методические основы прогностических оценок

При осуществлении мероприятий по переброске части стока прежде всего нарушится водный режим рек и озер, из которых будет изыматься часть воды. Систематическое изъятие стока и функционирование различного рода гидротехнических сооружений (плотины, водохранилища, насосные станции, шлюзы), обеспечивающих водозабор, транспорт воды и поддержание судоходных условий, будут вызывать значительное искажение естественного водного режима рек и озер. Наиболее существенных изменений водного режима можно ожидать на реках или участках рек, намечаемых в качестве путей переброски, особенно при режиме «антиреки».¹ Такие усло-

¹ Антирекой условно называется участок реки, на котором искусственно создается обратное по сравнению с естественным течением воды.

вия течения воды создаются низконапорными плотинами, строительство которых предусматривается в различных проектных схемах на реках Свири, Сухоне, Ижме, Пижме, Нижнем Иртыше.

Изменение объема и режима стока рек (объема воды в озерах) повлечет за собой формирование нового режима уровней, интенсификацию (или замедление) эрозионных процессов и процессов льдообразования, скажется на условиях дренирования и режиме подземных вод и найдет, наконец, отражение в водном балансе, условиях произрастания растений и в других природных компонентах. Влияние отъема стока будет прослеживаться до устьев северных и сибирских рек, что в свою очередь может повлиять на гидрологический режим прибрежных участков арктических морей.

Касаясь вопроса изменений водного режима в бассейнах рек-доноров, можно определить следующую последовательность прогнозистических оценок:

- оценка изменения стока реки в пункте водозабора при различных условиях естественной водности реки;

- трансформация измененного стока от пункта водозабора вниз по течению до устья реки-донора;

- переход от расходов воды к уровням и прогноз изменения уровня режима;

- оценка изменения водного режима пойм как в условиях отъема и регулирования стока, так и при транспорте воды по «антирекам»;

- оценка изменения уровня режима притоков на участках распространения подпоров от главных рек;

- прогноз изменения водного баланса придолинных, приканальных и приводохранилищных территорий и речных бассейнов в целом.

Бассейны рек-доноров характеризуются различными природными условиями, разной степенью хозяйственного использования в настоящее время и в перспективе. Различаются также по бассейнам и инженерные решения водозаборов и переброски стока. Для бассейнов рек Оби и Иртыша, например, весьма важно иметь прогноз влияния переброски части стока на процессы заболачивания и условия затопления обско-иртышской поймы, имеющей большое народнохозяйственное значение. Воды р. Оби и особенно р. Иртыша широко используются на местные нужды, поэтому при определении допустимых объемов переброски стока из этих бассейнов и оценке ее последствий необходимо учитывать постоянно растущие безвозвратные потери воды. В то же время в бассейнах северных и северо-западных рек ЕТС безвозвратные потери стока, обусловленные водохозяйственной деятельностью невелики и в ближайшем будущем не ожидается существенного увеличения их. Для рек северо-запада ЕТС (Нева, Онега) характерна большая естественная зарегулированность стока и малое развитие пойм. Центральными здесь являются вопросы оценки влияния переброски части стока на масштабы наводнений, водообмен озерных вод, их

евтрофикацию и особенно на условия водообмена и санитарное состояние Невской губы.

Прогностические оценки изменения водности рек-доноров могут быть выполнены применительно к различным ее характеристикам, в частности для:

— максимальных и минимальных расходов воды различной обеспеченности;

— средних месячных расходов воды характерных по водности лет (среднего, многоводного и маловодного);

— средних месячных расходов воды непрерывного ряда лет.

Использование в качестве модели для прогноза непрерывного ряда расходов воды позволяет более полно учесть все возможные естественные колебания водности рек и оценить воздействие многолетнего регулирующего эффекта водохранилищ. Оценка изменения экстремальных расчетных уровней и расходов воды на перспективу является сугубо ориентировочной, поскольку они в основном определяются режимом сбросов в нижний бьеф проектируемых водозаборных сооружений и водохранилищ, надежные данные по которым в настоящее время отсутствуют.

Режим отъема стока в исходном расчетном створе принимается по проектным проработкам. В большинстве случаев водоподача к трассам переброски стока предусматривается в проектных схемах постоянной от года к году вне зависимости от водности и равномерной в течение зимних и летних месяцев (с превышением летних расходов над зимними на 40—60% в результате уменьшения пропускной способности канала и русел рек при ледоставе). Исследования ГГИ [11] показывают, что с точки зрения потребностей в воде южных районов и, в частности, для сохранения современных уровней воды внутренних водоемов осуществление равномерной переброски стока является далеко не лучшим вариантом. Так, например, для того чтобы гарантировать в течение ближайших 25—30 лет стабилизацию уровня Каспийского моря в пределах отметок от —28,00 до —29,00 м абс., необходимо предусмотреть возможность водоподачи в отдельные годы до 100—150 км³ при среднем многолетнем объеме переброски воды с севера ЕТС в р. Волгу 10—25 км³/год. При равномерной водоподаче даже в значительно больших объемах амплитуда колебаний уровня моря не уменьшится [11]. По-видимому, вряд ли целесообразно, особенно с точки зрения интересов водного хозяйства в бассейне Аральского моря, поддерживать постоянный режим водоподачи в многолетнем разрезе и внутри года при перебросках части стока р. Оби в бассейны рек Сырдарьи и Амударьи, тем более что значительных регулирующих емкостей по трассам перебросок не предусматривается. При времени добегаания 1,5—2,0 месяца вода северных рек, изымаемая в наиболее напряженный для них летне-осенний период, попадет к полям орошения тогда, когда потребность в дополнительных водных ресурсах уже будет невелика. При общем дефиците водных ресурсов в бассейне Аральского моря в отдельные многоводные годы (каким был, на-

пример, 1969) вряд ли потребуется дополнительная водоподача в этот район.

При расчетах влияния перебросок стока на гидрологический режим следует учитывать, что они будут осуществляться на фоне все более интенсивного местного водохозяйственного использования рек-доноров для целей промышленного и бытового водоснабжения, гидроэнергетики, мелиорации и др. Прогностические оценки ГГИ и проектных организаций показали, что если в бассейнах рек северо-запада и севера ЕТС годовой объем безвозвратных антропогенных потерь стока к концу текущего столетия не будет превышать 1—2% среднего годового стока в устье, то на р. Оби в створе с. Белогорья этот объем достигнет около 8% (25 км³/год), а в устье р. Иртыша — 20% (17 км³/год). Таким образом, в нижнем течении р. Оби уменьшение годового стока за счет изъятия воды на переброску будет на 1-м ее этапе (при водозаборе 25 км³/год) равновелико уменьшению, обусловленному хозяйственной деятельностью внутри бассейна. В отдельные весенне-летние месяцы уменьшение расходов воды за счет комплекса хозяйственных мероприятий (включая аккумуляцию стока водохранилищами) более чем в два раза превысит водозабор (табл. 2). При вводе в строй дополнительно к уже действующим Бухтарминской и Новосибирской ГЭС Шульбинского и Крапивинского гидроузлов регулирующие емкости водохранилищ на Верхнем Иртыше, Верхней Оби и р. Томи достигнут 55 км³. Большая часть этого объема будет изыматься из р. Оби в течение двух весенних месяцев и сбрасываться в основном в осенне-зимний период, что в значительной мере даст возможность управлять режимом меженного стока в среднем и нижнем течении Оби.

Таблица 2

Возможное уменьшение водности р. Оби (м³/с) у с. Белогорья к 2000 г. (при переброске 25 км³/год)

Характеристика	Теплый период (май—октябрь)	Холодный период (ноябрь—апрель)	Месяц с наибольшим уменьшением стока (июнь)	В среднем за год
Безвозвратные антропогенные потери и регулирование стока водохранилищами	—1650	330 *	—3100	—660
Водозабор на переброску	—1000	—600	—1000	—800
Суммарное изменение стока	—2650	—270	—4100	—1460

* Увеличение водности за счет сброски водохранилищ.

Количественная оценка влияния комплекса мероприятий по переброске части стока (с учетом безвозвратных антропогенных

потерь) на водность рек-доноров от места водозабора до устья производилась двумя приемами: с помощью метода руслового водного баланса и путем трансформации вниз по течению реки изъятия или дополнительного сброса воды методами речной гидравлики.

Детальный метод руслового водного баланса принимался в качестве основного. Он позволяет исследовать особенности формирования стока на характерных речных участках, дает возможность прогнозировать не только количественные, но и качественные изменения режима расходов воды в проектных условиях и, в частности, оценить возможные изменения характеристик баланса — руслового регулирования стока, потерь стока на льдообразование и испарение с водной поверхности, подземного водообмена и т. д. Однако этот метод весьма трудоемок и сложен, особенно применительно к участкам северных рек-доноров, характеризующимся слабой гидрологической изученностью и резко выраженными заторно-зажорными явлениями, осложняющими определение руслового регулирования в переходные и зимние месяцы. В связи с этим представляет интерес прогноз водного режима упрощенным гидравлическим методом, опирающимся на данные измерений уровней и расходов воды и позволяющим в сжатые сроки выполнять расчет для более коротких интервалов времени.

Применительно к нижнему расчетному створу исследуемого участка реки изменение средних расходов воды, обусловленное переброской части стока, в соответствии с методом руслового водного баланса может быть выражено следующим уравнением:

$$\Delta Q_{\text{н}} = \Delta Q_{\text{в}} + \Delta Q_{\text{пр}} - \Delta Q_{\text{р.р}} - \Delta Q_{\text{л}} + \Delta Q_{\text{ос}} - \Delta Q_{\text{и.в}} + \Delta Q_0, \quad (1)$$

где $\Delta Q_{\text{в}}$ — изменение расхода воды в верхнем створе участка; $\Delta Q_{\text{пр}}$ — суммарный боковой приток к участку реки-донора; $\Delta Q_{\text{р.р}}$ — изменение расхода руслового регулирования, принимаемого со знаком «плюс» при накоплении воды на участке и со знаком «минус» при отдаче ее; $\Delta Q_{\text{л}}$ — изменение расхода воды в связи с льдообразованием и таянием льда; $\Delta Q_{\text{ос}}$ — изменение расхода воды в результате поступления осадков на водную поверхность; $\Delta Q_{\text{и.в}}$ — изменение потерь на испарение с поверхности воды и транспирацию полупогруженной растительностью; ΔQ_0 — изменение подземного водообмена участка реки с прилегающей территорией.

Таким образом, общая прогностическая оценка изменения водности реки в нижнем створе сводится к определению изменений всех основных составляющих руслового водного баланса этого участка, обусловленных мероприятиями по переброске стока.

Изменение средних за принятый расчетный интервал времени расходов воды в верхнем створе участка, находящемся непосредственно ниже места водозабора ($\Delta Q_{\text{в}}$), принимается по проектным данным, а для последующих участков, расположенных ниже по реке, — равным значениям $\Delta Q_{\text{н}}$, рассчитанным для вышележащего участка по уравнению (1).

Значение $Q_{\text{пр}}$ определяется в основном соотношением между осадками и испарением, а также условиями поверхностного и под-

земного стекания в частном бассейне этого участка. От колебаний стока Q_B в верхнем створе участка значение $Q_{пр}$ практически не зависит, хотя между значениями $Q_{пр}$ и Q_B может иметь место корреляционная связь, обусловленная синхронностью изменений гидрометеорологических условий. Поэтому возможные изменения суммарных расходов бокового притока $\Delta Q_{пр}$ под влиянием переброски части стока можно ориентировочно принять равными нулю.

Значение $\Delta Q_{р.р}$ вычисляется как разность этих расходов в проектных и естественных условиях, рассчитываемых по формуле

$$Q_{р.р} = \frac{\Delta \bar{H} F_B}{8,64 T}, \quad (2)$$

где $\Delta \bar{H}$ — среднее взвешенное по участку реки изменение уровня воды (см) за расчетный интервал времени T (сут); F_B — площадь водной поверхности на участке реки (км²).

При использовании формулы (2) необходимо предварительно по данным наблюдений в естественных условиях решить две задачи. Первая заключается в определении зависимости среднего за принятый интервал времени значения F_B от характеристики, корреляционно связанной со средним расходом воды на участке. В качестве такой характеристики может быть принята, например, сумма расходов воды в верхнем створе участка (Q_B) и в устье крупного притока, существенно влияющего на гидрологический режим реки в нижнем створе. Вторая задача сводится к построению зависимости значений $\Delta \bar{H}$ от полусуммы изменений уровня воды в его верхнем створе и в низовьях впадающего в пределах рассматриваемого участка крупного притока; а при отсутствии на участке значительных притоков — только от изменения уровня воды ΔH_B в верхнем створе.

С помощью указанных зависимостей для естественных и проектных условий определяются площади затопления участка и средние взвешенные по длине участка изменения уровней воды за принятый интервал времени. На основании полученных данных по формуле (2) вычисляются расчетные средние расходы руслового регулирования в измененных и естественных условиях, а по их разности определяются значения $\Delta Q_{р.р}$.

Изменение остальных элементов руслового водного баланса ($\Delta Q_{л}$, $\Delta Q_{ос}$, $\Delta Q_{и.в}$, ΔQ_0) определяется по разности их значений в проектных и естественных условиях, рассчитываемых в соответствии с Методическими указаниями. Для оценки подземного водообмена Q_0 в проектных условиях может быть использована его зависимость от водности реки.

Правомерность прогностических оценок расходов воды рек-доноров ниже пункта водозабора и регулирования стока упрощенным гидравлическим методом путем трансформации вниз по течению реки отъема или сброса воды (ΔQ_B) вытекает из оценки значимости отдельных составляющих руслового водного баланса. Расчеты, выполненные для участка р. Печоры от д. Митрофаново до

с. Оксина (табл. 3) и р. Оби от с. Белогорья до г. Салехарда, показали, что для северных рек, протекающих в условиях избыточного увлажнения, разность осадков и потерь воды на испарение, а тем более абсолютное изменение этой разности в результате переброски стока ($\Delta Q_{ос} - \Delta Q_{и.в}$), очень мала. Невелики также изменения подземного водообмена ΔQ_0 и расхода воды на льдообразование или таяние льда $\Delta Q_{л}$. При переброске части стока боковая приточность практически остается неизменной ($\Delta Q_{пр} = 0$).

Таблица 3

Изменение составляющих руслового водного баланса р. Печоры на участке от д. Митрофаново до с. Оксина под влиянием переброски части стока, м³/с

Месяц	д. Митрофаново		$\Delta Q_{р.р}$	$\Delta Q_{л}$	$\Delta Q_{ос}$	$\Delta Q_{и.в}$	ΔQ_0	с. Оксина		
	$Q_{ест}$	$\Delta Q_{в}$						$\Delta Q_{н}$	$Q_{ест}$	$Q_{изм}$
I	140	-70,0	-57,4	-0,54	0	0	4,00	-8,06	916	908
II	125	-75,0	-34,5	-0,64	0	0	17,0	-22,9	754	731
III	125	-55,0	8,79	-0,23	0	0	23,0	-40,6	685	644
IV	155	-55,0	22,3	-0,02	0	0	26,0	-51,3	686	635
V	2800	-2580	-1320	2,69	-51,7	-2,10	34,0	-1280	10 700	9 420
VI	1320	-1100	750	0	-6,58	-5,90	26,0	-1820	15 200	13 400
VII	765	-545	37,6	0	-1,78	-2,82	74,0	-508	5 180	4 670
VIII	390	-170	122	0	-0,53	-0,59	57,0	-235	2 410	2 180
IX	590	-370	-147	0	-0,95	-0,53	53,0	-170	2 370	2 200
X	390	-140	152	-1,41	-0,65	-0,20	41,0	-250	3 310	3 060
XI	210	-10,0	78,6	-0,64	0	0	27,0	-60,9	1 280	1 220
XII	140	-40,0	-12,8	-0,28	0	0	4,00	-22,9	1 040	1 020
Год	596	-434	-33,4	-0,09	-5,18	-1,01	32,2	-372	3 710	3 340

Примечание. Значения $\Delta Q_{н}$ рассчитаны по уравнению (1).

Пренебрегая указанными выше элементами водного баланса, получаем

$$\Delta Q_{н} = \Delta Q_{в} - \Delta Q_{р.р}, \quad (3)$$

т. е. изменение стока в нижнем створе приблизительно равно изменению стока в верхнем створе, исправленному на изменение руслового регулирования. Последнее в значительной степени учитывается при трансформации значений $\Delta Q_{в}$ вниз по течению реки с помощью кривых добегания. Исходя из этого в качестве исходных данных для прогностических оценок изменения водности рек-доноров в любом створе, расположенном ниже пункта водозабора (сброса), принимались декадные значения $\Delta Q_{в}$ (отклонение проектных расходов от естественных) и характеристика времени добегания, по которой оценивались ординаты кривых добегания.

Для сопоставления прогностических оценок изменения водности рек-доноров, полученных двумя указанными выше методами, были

подсчитаны отклонения σQ средних месячных расходов воды, прогнозируемых гидравлическим методом (Q_r), от соответствующих расходов, определяемых по детальному русловому водному балансу (Q_6):

$$\sigma Q = \frac{Q_6 - Q_r}{Q_6} \cdot 100\% \quad (4)$$

Анализ этих данных приводит к выводу о близкой сходимости результатов и о правомерности применения упрощенного гидравлического метода для приближенных оценок, связанных с переброской стока.

Прогноз изменения режима рек и озер в результате переброски части стока имеет первостепенное значение для других прогностических оценок. Как уже указывалось, изменение высотного положения уровней является причиной формирования новых условий затопления пойм, дренирования прибрежных территорий, режима подземных вод и пр. Кроме того, режим уровней воды определяет степень возможного хозяйственного использования реки (озера) для целей судоходства, водоснабжения, лесосплава, рыбоводства.

Уровенный режим рек будет формироваться не только вследствие изменения их водности, но и в результате интенсификации (или замедления) эрозионной деятельности, изменения условий льдообразования и, в частности, местоположения и мощности заторов и зажоров льда, ослабления или усиления подпорных явлений. Влияние всех этих факторов наиболее существенно проявится на приплотинных участках водохранилищ в местах водозаборов, на «антиреках».

В прогнозах ГГИ изменение уровней рассматривалось только по изменению расходов воды в реке, при этом ледовые условия и морфометрия русла принимались неизменными. Расчет производился с помощью кривых $Q=f(H)$, зимних переходных коэффициентов $K_{зим}$ и зависимостей соответственных уровней воды. Для рек бассейна р. Оби прогнозировалось также изменение подпорных явлений (см. ниже).

Затопление пойм. Народнохозяйственное значение пойменных массивов в бассейнах северных и сибирских рек очень велико. Поймы и тяготеющие к ним земли обычно наиболее хорошо освоены; в пределах пойм сосредоточены основные ресурсы естественных кормов; многочисленные соры и пойменные низины являются местом нереста и нагула ценных пород рыб. На пойме широтного участка течения р. Оби открыты и эксплуатируются нефтегазоносные месторождения. В связи с этим оценка возможных изменений условий затопления поймы при исследовании последствий территориального перераспределения стока имеет важное значение. В первую очередь это относится к одной из самых обширных речных пойм нашей страны — обско-иртышской, общая площадь которой составляет около 70 тыс. км², а ширина на отдельных участках достигает 25—35 км. Вопросу затопления поймы рек Оби

и Иртыша посвящены исследования А. А. Максимова, Л. К. Малик, И. В. Попова и В. Ф. Усачева, В. А. Скорнякова и др.

При научном обосновании перебросок части стока особенно важно оценить необходимые оптимальные условия обводнения пойм. Однако сделать это довольно затруднительно в связи с неоднородностью требований, предъявляемых к увлажнению поймы со стороны различных отраслей народного хозяйства. Так, интересы рыбовоспроизводства требуют сохранения естественного режима пойм. Для Нижней Оби, например, благоприятным является затопление поймы с июня по начало августа, для Средней Оби и Нижнего Иртыша — с мая по июнь и обеспечение плавных колебаний уровней воды на подъеме и спаде половодья [8]. Естественный режим увлажнения поймы и процесса седиментации необходимы также для сохранения плодородия пойменных земель. С другой стороны, высокое стояние уровней воды на пойме затрудняет эксплуатацию месторождений полезных ископаемых, вызывает нежелательные последствия для лесосплава, подтопление населенных пунктов и пр. Снижение уровней благоприятствует мелиорированию заболоченных районов.

Сопоставляя различные положительные и отрицательные аспекты водного режима пойм в естественных условиях, по-видимому, можно прийти к заключению, что при регулировании водного режима рек-доноров желательны:

— сохранить существующую периодичность затопления низкой поймы;

— снизить уровни высоких половодий для предотвращения катастрофических последствий затопления;

— уменьшить продолжительность затопления поймы (особенно на Нижней Оби) за счет снижения расходов и уровней воды на спаде половодья.

Исследования ГГИ в области прогнозов затопления речных пойм включали оценку продолжительности стояния уровней воды на пойме и определение периодичности, продолжительности и площади затопления различных элементов поймы в естественных и проектных условиях. В расчетах использовались данные наблюдений на гидрологических постах и прогностические значения уровней воды. Были использованы также зависимости площадей затопления на характерных речных участках от средних уровней воды, рассчитанных как полусумма их значений на граничных постах ($F_b = f(H)$). В качестве примера на рис. 2 приведена такая зависимость для одного из участков р. Печоры. Аналогичные зависимости, построенные по крупномасштабным картографическим материалам, применялись в ГГИ также при оценке потерь на испарение с пойменных массивов в естественных и проектных условиях.

Подпорные явления в устьях притоков. Мероприятия по переброске части стока скажутся не только на режиме главных рек-доноров, но и на уровнях воды их притоков на участках распространения подпоров. В соответствии с длиной подпорных участков

изменение водного режима притоков может наблюдаться на расстоянии до двух-трех сотен километров от устья (реки бассейнов Оби и Нижней Печоры). При этом возможные предельные значения снижения уровней притоков при отъемах воды из главных рек будут определяться подпорными подъемами в естественных условиях, о которых можно судить по примерам, приведенным на рис. 3; для ряда рек рассматриваемых районов повышение уровней воды на притоках произойдет при сооружении водохранилищ.

Методической основой расчета подпорных подъемов уровня воды в естественных условиях и изменений этих подъемов при переборке части стока послужили эмпирические зависимости уровней

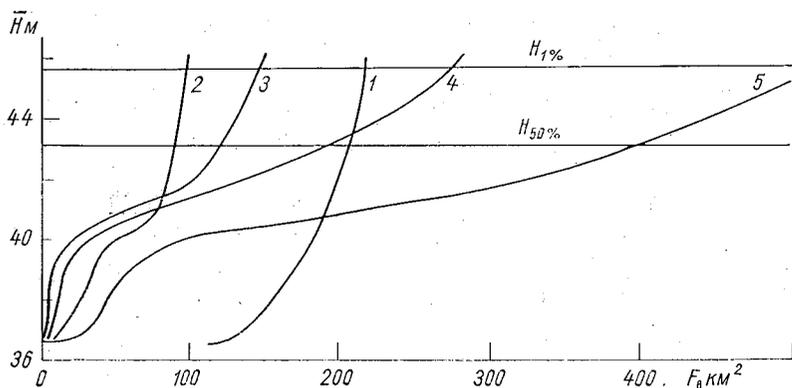


Рис. 2. Зависимость площади затопления от среднего уровня воды на участке р. Печоры между селениями Усть-Кожва и Усть-Уса.

1 — русло; 2—4 — соответственно островной, левобережный и правобережный участки поймы; 5 — вся пойма.

воды притока от характеристик водности последнего и реки-водоприемника. В качестве примера на рис. 4 для р. Уй у с. Баженово показана связь уровней с расходами воды при разных значениях уровня воды р. Иртыша у г. Тары. По существу на этом графике приведено семейство кривых расходов при разных значениях уровня воды главной реки. При этом разность фактического уровня в пункте наблюдений и его значения по нижнейгибающей (при том же расходе воды), соответствующей бесподпорному состоянию реки, представляет собой подпорный подъем уровня. Для устьев рек при определении подпоров за фактический принимался уровень главной реки в месте впадения притока, а за бесподпорный — уровень воды притока по бесподпорной кривой $Q=f(H)$, перенесенный от ближайшего пункта наблюдений к устью (с учетом уклона). С помощью указанных приемов подпорные подъемы уровня воды рассчитаны для 42 рек бассейна р. Оби, 11 притоков р. Печоры и 5 притоков р. Мезени за период 10—20 лет. Для

оценки длин участков распространения подпоров использована ранее применявшаяся с этой целью формула

$$\Delta L = 1,5 \frac{\Delta H_{\text{п}}}{I}, \quad (5)$$

где $\Delta H_{\text{п}}$ — подпор, м; I — уклон нижнего участка реки в неподпортом состоянии, ‰ [4, 7].

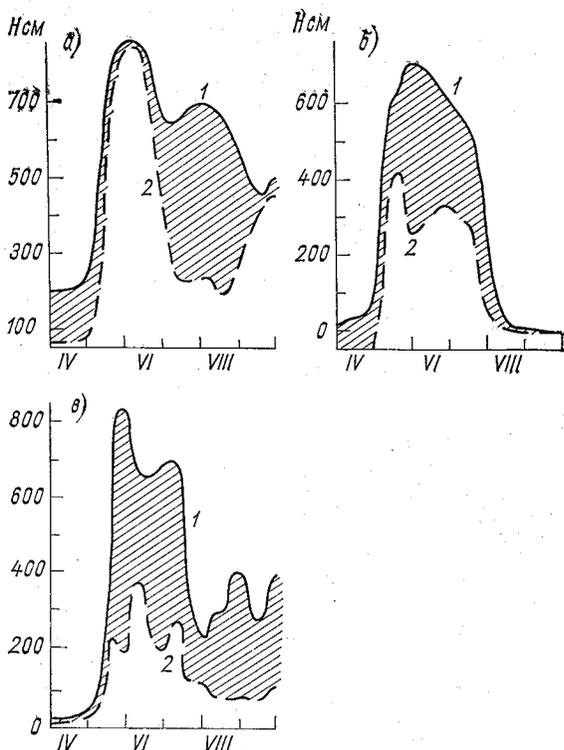


Рис. 3. Подпорные подъемы уровня воды.

а) р. Северная Сосьва — с. Игрим, 1966 г.; б) р. Васюган — д. Наукак, 1966 г.; в) р. Сула — устье, 1962 г.; 1 — фактический уровень, 2 — срезанный на значение подпора.

Произведенные расчеты, а также исследования, выполненные ранее Л. К. Малик [3, 4], свидетельствуют о широком распространении подпорных явлений на реках бассейна Оби. Общая площадь приречной территории, в пределах которой развиты подпорные явления, достигает в среднем 0,8 млн. км², или около 25% площади всего бассейна р. Оби. При этом суммарная протяженность подпорных участков в паводочные месяцы составляет примерно 17 тыс. км, что соответствует примерно 2 км на 100 км² площади. При расчете учитывались притоки 1-го и 2-го порядка длиной более 30 км. К районам наиболее интенсивного развития подпорных

явлений относится левобережье Средней Оби на участке от г. Колпашево до устья р. Иртыша (реки Парабель, Васюган, Большой Салым, Большой Юган и др.) и левобережье Нижней Оби на участке впадения р. Северной Сосьвы, а также нижнее Прииртышье. В этих районах на некоторых реках подпор распространяется на 200—300 км от устья, а в отдельные годы — на 300—400 км (реки Васюган, Северная Сосьва, Вагай). Средние за половодье подпорные подъемы уровня воды достигают в устьях притоков р. Оби обычно 4—5,5 м, а в отдельные годы 7—8 м. Отнесенные ко всей зоне распространения подпорных явлений средние подпорные

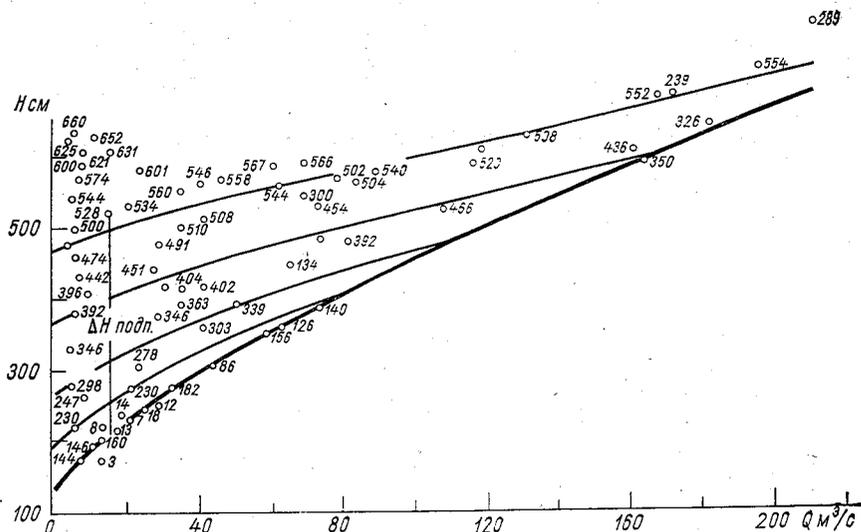


Рис. 4. Связь уровней и расходов воды р. Уй у с. Баженово в условиях подпора от реки-водоприемника. Третья переменная — уровни воды р. Иртыша у г. Тара.

подъемы на реках бассейна Оби могут быть оценены примерно в 1,5—2 м.

В бассейне р. Печоры подпорные явления получили наибольшее развитие в пределах равнинной части, ниже впадения р. Усы. Здесь длины подпорных участков достигают 50—100 км, подъемы в устьях рек составляют 4—6 м, а в отдельные годы до 7—8 м (реки Сула, Цильма, Ижма, Шапкина). В низовьях общая площадь приречной территории, в пределах которой наблюдаются подпоры на притоках, составляет около 26 тыс. км², или примерно 40% площади бассейна реки ниже с. Усть-Цильмы. Общая протяженность подпорных участков в бассейне р. Печоры равна примерно 3000 км, а густота речной сети, находящейся в подпоре, составляет 5,5 км на 100 км² площади.

Сравнительно слабо развиты подпорные явления на притоках р. Мезени. Средние подпорные подъемы в паводочные месяцы не

превышают здесь 1—1,2 м (р. Мезенская Пижма), а длина подпорных участков 3—5 км. Причинами малого развития подпоров являются значительные уклоны притоков, а также сравнительно небольшие различия в основных фазах водного режима притоков и самой Мезени.

Понижение уровней главных рек под влиянием переброски части стока приведет к снижению на то же значение подпорных подъемов в устьях притоков. При намечаемых масштабах переброски стока снижение уровня главных рек (на 1—2 м), как правило, будет совершенно недостаточным для устранения подпоров на притоках. Однако даже небольшое ослабление подпорных явлений, приводящее к некоторому улучшению условий дренирования приречных территорий, может рассматриваться для северных переувлажненных районов как положительное следствие переброски стока.

Оценка возможных изменений водного баланса бассейнов рек-доноров выполнялась на примере бассейна р. Оби. К районам, где изменения водного баланса могут быть существенными, относятся приречные территории (включая пойму) вдоль главной реки и ее притоков на участках подпоров, приводохранилищные и приканальные зоны подтопления, а также площади, которые будут орошаться перебрасываемыми водами. Воднобалансовые расчеты, сводившиеся к оценке изменений местного стока и испарения (в предположении постоянства осадков), основываются на учете понижения уровня грунтовых вод и уменьшения увлажненности приречных территорий ниже мест изъятия стока и, наоборот, на учете повышения уровня грунтовых вод и подтопления территорий выше мест водозабора (вдоль Обь-Каспийского канала и участка «анти-Иртыша», приводохранилищные зоны, новые площади орошения).

На изменение водного режима рек-доноров прежде всего реагирует речная пойма, сокращение площади затопления которой ниже мест водозаборов должно сопровождаться уменьшением потерь на испарение с обсушенной ее части. При создании подпорных сооружений в речных руслах потери воды на испарение с поймы, наоборот, должны увеличиваться. Основой оценки изменения объема испарения с поймы являлись зависимости $F_{в} = f(H)$ (см. рис. 2), позволяющие по данным об уровне воды H в реке до и после переброски стока установить площади поймы, в пределах которых произойдет изменение слоя испарения. Для дальнейших расчетов используются данные по испарению с водной поверхности, а также зависимости уровней грунтовых вод $H_{гр}$ от уровней речных вод $H_{р}$, дающие возможность рассчитать значения $H_{гр}$ и в результате по тепловоднобалансовому методу определить испарение с обсохшей части поймы. В этой связи несомненный методический интерес представляет приведенная на рис. 5 зависимость вида

$$\frac{\Delta H_{гр}}{\Delta H_{р}} = f(B),$$

где B — расстояние от реки. По этой зависимости можно рассчитывать изменение уровня грунтовых вод $\Delta H_{гр}$ в отдельных пунктах поймы по данным об изменении уровня речных вод ΔH_p .

При оценке изменения испарения с приречных территорий (за пределами поймы) для районов ниже мест водозабора применен ввиду их слабой гидрогеологической изученности косвенный метод определения изменений уровня грунтовых вод и площадей, на которых эти изменения будут иметь место. В качестве такого метода, интегрально учитывающего структуру и динамику водоносного комплекса, использованы зависимости, связывающие ширину хорошо дренированных лесных полос b с глубиной вреза русел рек H_0 , установленные К. Е. Ивановым и Е. Л. Шумковой для Среднего и Нижнего Приобья [2]. Эти зависимости имеют вид

$$b = (0,10 + 0,25) H_0. \quad (6)$$

Приняв среднее значение числового коэффициента, можно рассчитать приращение ширины хорошо дренированной приречной полосы как $\Delta b \approx 0,2 \Delta H_p$, где ΔH_p — снижение уровня воды в реке, и тем самым оценить изменение площади этой полосы:

$$\Delta F_{пр} = 2 \sum L \Delta b; \quad (7)$$

здесь $\sum L$ — суммарная длина главной реки и ее притоков на участках распространения подпоров; коэффициент 2 учитывает приращение хорошо дренированной площади с обоих берегов рек.

Исходя из положения, что приращение хорошо дренируемой приречной полосы с глубоким залеганием грунтовых вод происходит за счет равнозначного сокращения площади заболоченных земель, произведена приближенная оценка изменения на этой площади ΔF глубины грунтовых вод при снижении уровней воды в реке — примерно от нуля до критической глубины $H_{кр}$, при которой грунтовые воды практически не влияют на влажность почвы и испарение с ее поверхности. Расчет изменения объема испарения с приречных территорий выполнен по формуле

$$\Delta V_E = \Delta F_{пр} (E_{H_{кр}} - E_{H \approx 0}), \quad (8)$$

где слой испарения $E_{H_{кр}}$ и $E_{H \approx 0}$ определены тепловодобалансовым методом. Необходимое для расчета значение $H_{кр}$ принято

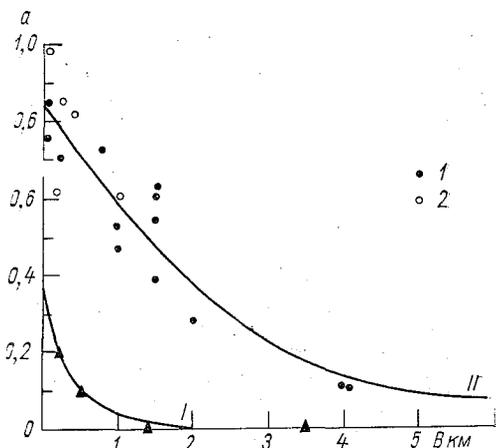


Рис. 5. Зависимость коэффициента $a = \frac{\Delta H_{гр}}{\Delta H_p}$ от расстояния до водотока B .

I — Иртыш; II — Обь (1) и ее крупные притоки без Иртыша (2).

равным 5 м на основании имеющегося эмпирического материала для преобладающих в северной половине бассейна р. Оби суглинистых грунтов.

Для районов выше мест водозабора расчет увеличения испарения с площадей будущего подтопления выполнен как $E_0 - E_1$, где E_0 — испарение в новых условиях, равное максимально возможному его значению, E_1 — испарение в естественных условиях. Значения E_1 и E_0 заимствованы из опубликованных материалов [1, 9]. При ориентировочно оцененных площадях подтопления от 20 тыс. до 40 тыс. км² (для разных вариантов и разных этапов переброски

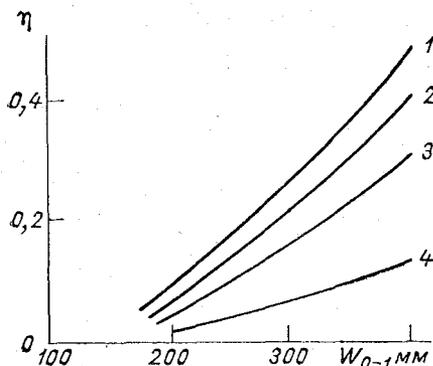


Рис. 6. Обобщенные зависимости коэффициентов годового стока от влажности почвы в слое 0—1 м для разных типов почвогрунтов.

1 — дерново-подзолистые суглинистые почвы; 2 — черноземы суглинистые; 3 — черноземы и каштановые почвы (суглинистые); 4 — каштановые суглинистые почвы.

меньшей влагоемкости $W_{нв}$. Согласно приведенным зависимостям (рис. 6), при значении $W_{нв}$ для метрового слоя, равном 300—320 мм, коэффициент стока для суглинистых грунтов в рассматриваемых районах возрастает до 0,20—0,25, тогда как в естественных условиях он в основном меньше 0,05.

Количество возвратных вод в соответствии с разработками ГГИ принималось равным 10—12% водозабора на орошение.

Расчеты для отдельных территорий выше и ниже мест проектируемых водозаборов позволили подойти к ориентировочной оценке ожидаемых изменений водного баланса для всего бассейна р. Оби. При условии постоянства осадков изменение баланса под влиянием переброски стока может быть записано в виде уравнения

$$\Delta E = (Y_{из} - Y_{пер}) + Y_{д. пот} - \Delta Y, \quad (9)$$

где ΔE — приращение испарения в бассейне; $Y_{из}$ — изъятие стока из р. Оби на переброску (в месте водозабора); $Y_{пер}$ — сток р. Оби, перебрасываемый за пределы ее бассейна; $(Y_{из} - Y_{пер})$ — часть

дополнительные потери воды на испарение, как показали расчеты, могут достигать 4—9 км³/год.

В районах подтопления существенно улучшатся условия стока вследствие повышения уровня грунтовых вод и увеличения влажности почвогрунтов. Методика оценки приращения стока в проектных условиях основана на зависимостях коэффициентов стока от влажности почвы для разных типов почвогрунтов (рис. 6). Эти зависимости получены путем обобщения имеющегося в литературе эмпирического материала. При расчетах коэффициентов стока запас влаги в почве для условий подтопления принимался соответствующим наименьшей

изъятой из р. Оби воды, расходуемой внутри ее бассейна на испарение, фильтрацию из канала переброски и орошение; $Y_{д. пот}$ — дополнительные потери воды р. Оби (помимо потерь в Обь-Каспийском канале) в связи с мероприятиями по переброске стока (в результате сооружения водохранилищ, создания «антирек» и пр.); ΔY — приращение местного стока в зонах подтопления.

Некоторые результаты оценок возможных изменений водного режима рек-доноров

Выполненные исследования позволили в первом приближении оценить возможные изменения водного режима и баланса бассейнов рек-доноров в результате осуществления 1-й очереди переброски стока (см. рис. 1).

При планируемом объеме переброски стока в южные районы в размере 50—60 км³/год водные ресурсы северных и сибирских рек-доноров уменьшатся примерно на 10% (с учетом перспектив развития водопотребления на хозяйственные нужды внутри бассейнов этих рек). На отдельных участках рек непосредственно ниже мест водозабора можно ожидать более значительного изменения водности (р. Печора в нижнем бьефе Митрофановского водохранилища, р. Сухона у д. Камчуга, р. Онега в истоке из оз. Лача (рис. 7). При сравнительно небольшом уменьшении годового стока Нижней Оби (13—22% с учетом хозяйственной деятельности на 2000 г.) в отдельные месяцы маловодных лет расходы воды могут уменьшаться до многолетних минимумов, причем повторяемость этого явления может достигать 20—35% (табл. 4).

Таблица 4

Изменение стока Нижней Оби на участке между с. Белогорьем и г. Салехардом под влиянием переброски стока и хозяйственной деятельности (на 2000 г.)

Характеристика	Переброска 25 км ³ /год			Переброска 60 км ³ /год		
	зима	лето	год	зима	лето	год
Среднее уменьшение расходов воды, %	-10	-14	-13	-28	-20	-22
Повторяемость уменьшения расходов воды ниже многолетних месячных минимумов, число лет в %	5	20	—	35	35	—
Наибольшее уменьшение месячных расходов воды по сравнению с многолетними минимумами, %	-10	-30	—	-35	-50	—

Изменение водности рек повлечет за собой формирование нового режима уровней. Ниже мест водозаборов в теплую часть года будет наблюдаться понижение уровней воды рек до 1—1,5 м (Обь, Печора, Онега, Северная Двина). Более значительно понизятся уровни воды р. Печоры на участке от д. Митрофаново до с. Усть-Щугор (рис. 8).

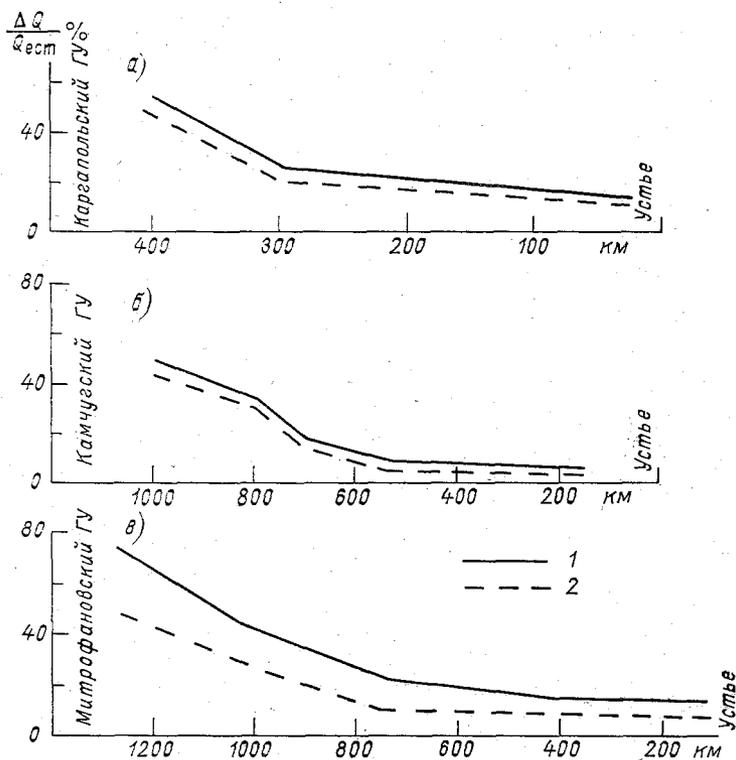


Рис. 7. Уменьшение (%) годовых расходов воды рек-доноров ниже мест водозаборов при отъемах стока.

а — р. Онега, отъем $2,0 \text{ км}^3/\text{год}$; б — р. Сухона, отъем $5 \text{ км}^3/\text{год}$; в — р. Печора, отъем $13 \text{ км}^3/\text{год}$; 1 — в год средней водности, 2 — в маловодный год (95%-ная обеспеченность).

Наиболее существенные изменения уровенного режима произойдут при создании водохранилищ. Выполненные в последние годы исследования показали большой отрицательный эффект водохранилищ, особенно в равнинных районах с избыточным увлажнением. Учитывая это, в настоящее время в проектных разработках стараются максимально сократить объемы водохранилищ и площадей затопления. В частности, разрабатывается вариант переброски части стока из р. Оби без проектировавшегося ранее Тобольского водохранилища. Тем не менее схема переброски стока из бассейна р. Печоры предусматривает создание в среднем тече-

нии этой реки крупного Митрофановского водохранилища с площадью зеркала около 3000 км², способного осуществлять многолетнее регулирование стока р. Печоры. При НПУ, равном 122 м абс., плотина этого искусственного водоема поднимет уровни воды р. Печоры на 25—30 м.

Повысятся уровни воды при создании режима «антирек». В частности, на Нижнем Иртыше, где с помощью низконапорных сооружений будет обеспечиваться подача воды из р. Оби у с. Белогорья

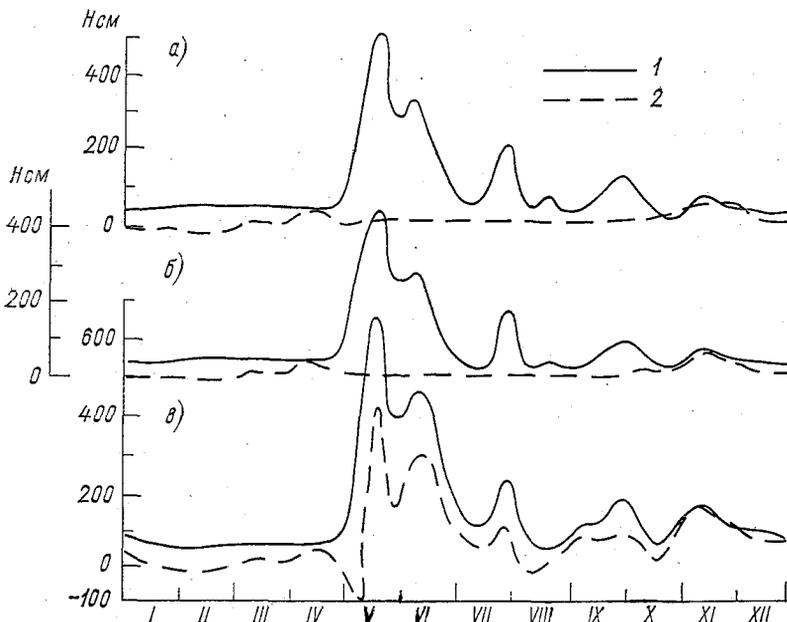


Рис. 8. Колебания уровней воды Печоры на участке от д. Митрофаново до с. Усть-Шугор в естественных условиях (1) и при переброске части стока (2) в год средней водности (1959).

а — Митрофаново; б — д. Савинобор; в — с. Усть-Шугор.

к Обь-Каспийскому каналу, меженные уровни воды на приплотинных участках будут превышать естественные на 2—4 м. Уровненный режим Онежского и Ладожского озер за счет многолетнего и сезонного регулирования каскадом свирских ГЭС и проектируемым Невским гидроузлом останется близким к естественному. Несколько сократится продолжительность стояния высоких уровней воды на озерах Лача и Воже, понизятся на 0,2—0,3 м зимние меженные уровни этих озер.

Понижение уровней воды на речных участках ниже мест водозаборов приведет к изменению режима затопления поймы. На Нижней Оби площадь затопления сократится на 20—30% (с 11,4 тыс. км² до 8—9 тыс. км² в год средней водности), при этом на 0,5—1 месяц уменьшится средняя продолжительность

затопления (табл. 5), что для условий крайнего переувлажнения, в каких находятся низовья р. Оби, по-видимому, можно рассматривать как положительное явление. На р. Печоре, где развитие поймы происходит менее интенсивно, отъем 13 км³/год приведет к уменьшению пойменных разливов в среднем на 500—800 км², что составит 20—30% площади затопления в естественных условиях. Ниже плотины Митрофановского водохранилища на протя-

Таблица 5

Характеристика затопления поймы Нижней Оби на участке от с. Белогорья до г. Салехарда в естественных условиях и после переброски стока

Характеристика условий	Средняя площадь затопления поймы в наиболее многоводный паводочный месяц, тыс. км ²	Средняя ширина затопляемой поймы, км	Средняя продолжительность затопления поймы, сут
Естественные	11,4	16,0	82
Переброска стока:			
25 км ³ /год (с учетом хозяйственной деятельности в бассейне на 2000 г.)	9,0	12,6	69
60 км ³ /год (с учетом хозяйственной деятельности в бассейне на 2000 г.)	7,7	11,1	62

жении примерно 100 км выход воды на пойму практически прекратится.

Снижение уровней главных рек под влиянием переброски части стока повлечет за собой изменение уровня режима притоков на участках распространения подпоров от рек-водоприемников. На притоках, впадающих ниже мест водозабора, уменьшатся подпорные подъемы уровня воды, сократится продолжительность периода развития подпорных явлений и длины участков их распространения. Под влиянием переброски части стока уровни воды на устьевых участках притоков Нижней Оби и Нижней Печоры понизятся в теплый период года на 0,5—1,5 м. Особенно значительно (на 2—2,5 м) снизятся уровни на притоках р. Печоры, впадающих непосредственно ниже Митрофановского водохранилища. В пересчете на всю длину подпорных участков в бассейнах рассматриваемых рек снижение уровней составит в среднем около 0,3—0,5 м. В результате незначительно улучшатся условия дренирования прилегающих территорий. На Нижней Оби это вызовет увеличение на 3—5% площади хорошо дренированных приречных полос и соответствующее сокращение площади болот.

При сооружении водохранилищ, наоборот, произойдет увеличение интенсивности подпорных явлений, причем нижние участки

пойм впадающих рек могут оказаться затопленными на протяжении многих километров. В частности, это произойдет с притоками р. Печоры — реками Велью и Илыч, находящимся в районе проектируемого Митрофановского водохранилища.

Мероприятия по переброске части стока не только отразятся на режиме рек-доноров, но и в какой-то мере повлияют на водный баланс их бассейнов. Расчеты, выполненные для бассейна р. Оби, дают основание полагать, что изменения водного баланса, связанные с улучшением условий дренирования приречных территорий ниже мест водозаборов и с подтоплениями в районах подпорных сооружений, невелики. Для бассейна р. Оби при отъеме 25—60 км³/год возможные изменения элементов баланса не превысят 5—10 км³/год, или <1% их значений в естественных условиях. Так, при переброске 25 км³/год воды из нижнего течения р. Оби (от с. Белогорья) в Казахстан дополнительные потери воды в бассейне этой реки за счет испарения с затопленных, подтопленных и орошаемых на перебрасываемом стоке земель составят 4,2 км³ в год (табл. 6). Изменение потерь на испарение с поймы не превысит 0,1—0,2 км³/год, что может быть объяснено несущественными для большей части бассейна р. Оби различиями в испарении с затопленных и незатопленных участков пойм при неизменных осадках. Дополнительный сток в районах подтопления может быть оценен в 1,2 км³/год. С учетом хозяйственной деятельности по состоянию на 1990—2000 гг., т. е. на время начала осуществления переброски стока, изменения составляющих баланса (испарение и местный сток) возрастут примерно вдвое по сравнению с приведенными выше, но все равно останутся небольшими. Еще менее значительными эти изменения, по-видимому, будут в бассейнах других рассматриваемых рек-доноров.

Таблица 6

Изменение годового водного баланса р. Оби в результате переброски стока в объеме 25 км³/год (по уравнению (9))

$Y_{из}$ км ³	$Y_{пер}$ км ³	$Y_{д. пот}$ км ³	ΔY км ³	ΔE км ³	$\frac{\Delta E}{E} \cdot 100\%$	$\frac{\Delta Y}{Y} \cdot 100\%$	$\frac{Y_{из} - \Delta Y}{Y} \cdot 100\%$
25	19,9	0,3	1,2	4,2	0,4	0,3	6

Примечание. Средний годовой сток р. Оби Y и суммарное испарение в бассейне E в естественных условиях составляют соответственно 395 и 1190 км³/год.

Некоторое улучшение условий дренирования территории, связанное с изъятиями воды из Нижней Оби, ограничится узкими приречными зонами и по существу не отразится на заболоченности Западной Сибири. Структура и водно-тепловой режим господствующих в бассейне Нижней Оби олиготрофных болот не изменятся.

Тем не менее в результате снижения уровней Нижней Оби и вследствие ослабления подпоров на ее притоках создадутся более благоприятные условия для проведения осушительных мелиораций.

Подводя итог выполненным исследованиям, можно сделать заключение, что намеченные первой очередью объемы и направления перебросок части стока не повлекут за собой крупномасштабных изменений водного режима территорий. Мероприятия по переброске стока могут оказать существенное влияние на режим водных объектов и гидрологические условия их бассейнов, но это влияние будет в основном иметь локальный характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубенок Л. И. Испарение на континентах.— Л.: Гидрометеиздат, 1976.— 264 с.
2. Иванов К. Е., Шумкова Е. Л. Гидрологическое обоснование и расчет выпадения лесов и расширения площадей естественного заболачивания при подтоплениях в речных системах.— Труды ГГИ, 1967, вып. 145, с. 3—26.
3. Малик Л. К. О подпорных явлениях на реках Западно-Сибирской равнины.— Труды Новосиб. регион. гидромет. центра, 1971, вып. 4, с. 87—94.
4. Малик Л. К. Методы прогноза подпоров на реках Западно-Сибирской равнины.— Известия АН СССР. Сер. географ., 1973, № 5, с. 38—44.
5. Малик Л. К. Об изменении некоторых элементов режима рек Нижней Оби при регулировании стока (в связи с проблемой перераспределения водных ресурсов в Срединном регионе).— Вестник МГУ, 1975, № 1, с. 70—76.
6. Малик Л. К. Гидрологический аспект проблемы преобразования природы Западно-Сибирской равнины.— Водные ресурсы, 1976, № 3, с. 35—50.
7. Нежиховский Р. А. Руслевая сеть бассейна и процесс формирования стока.— Л.: Гидрометеиздат, 1971.— 476 с.
8. Никонов С. П. Перспективы развития рыбного хозяйства Обь-Иртышского бассейна при условии отбора части его стока.— В кн.: Влияние перераспределения стока рек бассейна Оби на природу тайги Срединного региона. Иркутск, 1975, с. 73—86.
9. Плиткин Г. А. Водный баланс Западной Сибири.— Л.: Гидрометеиздат, 1976.— 247 с.— (Труды ГГИ. Вып. 228).
10. Скорняков В. А. О возможном изменении высоты половодья и условий затопления поймы в нижних бьефах гидроузлов на Средней Оби и Нижнем Иртыше.— Водные ресурсы, 1976, № 3, с. 50—57.
11. Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю. О перебросках стока, необходимых для стабилизации уровня Каспийского моря.— Труды ГГИ, вып. 255, 1978, с. 3—18.

Б. Ф. Снищенко

ПРОГНОЗ РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В КРУПНЫХ КАНАЛАХ

Постановка задачи

Строительство магистральных каналов для территориального перераспределения стока, рассчитываемых на пропуск расходов воды 1000—2000 м³/с и имеющих протяженность несколько тысяч километров, будет связано с выполнением больших объемов земляных работ и потребует значительных капиталовложений. Однако общая стоимость создания искусственного водотока определяется не только капитальными, но и эксплуатационными расходами, которые в свою очередь обуславливаются интенсивностью деформаций первоначального профиля канала, возникающими в процессе его эксплуатации.

Практика показывает, что наибольшее нарушение проектного поперечного и продольного профилей канала вызывают русловые деформации, характер которых зависит от типа руслового процесса, возникающего в канале; при этом каждому типу руслового процесса соответствует своя схема глубинных и плановых изменений морфологического строения русла.

Таким образом, задача прогнозирования типа руслового процесса в канале и количественных показателей деформаций его русла приобретает важное практическое значение. Указанная задача представляет и теоретический интерес, поскольку прогнозирование русловых деформаций в канале должно опираться на знание физических закономерностей процессов взаимодействия воды и деформируемого ложа водотока. Пока в выяснении этих закономерностей, т. е. в построении теории развития руслового процесса в каналах, сделаны лишь первые шаги [1—3, 5—7, 9].

Представляется очевидным, что и в реке, и в канале действуют одни законы взаимодействия между жидкой и подстилающей средой, которые проявляются по-разному. Поэтому в качестве теоретической основы прогноза правомерно воспользоваться теорией

руслowych процессов для речных русел, разработанной в настоящее время более полно. При этом необходимо:

— установить признаки сходства или аналогии в русловых процессах рек и каналов;

— выявить формы проявления руслового процесса, которые должны учитываться при практическом рассмотрении вопроса, например при проектировании крупных каналов;

— разработать методы количественного учета и прогнозирования руслового процесса.

В настоящей статье русловой процесс рассматривается в свете развиваемой в ГГИ гидролого-морфологической теории. Материалы по русловому режиму каналов почерпнуты из данных натурных наблюдений на каналах СССР, проведенных ГГИ самостоятельно и при участии ТуркменНИИГиМ, МГМИ и ЛПИ в 1975—1978 гг.¹ В статье использованы также результаты лабораторных исследований ГГИ 1978 г. на схематизированной модели канала. На основе широкого обобщения материалов натурных и лабораторных исследований руслового режима рек и каналов получены новые зависимости для расчета деформаций русел каналов.

Признаки аналогии руслового процесса в реках и каналах

Русловой процесс в каналах

Сравниваемые свойства и формы проявления руслового процесса. С реками сравниваются лишь те каналы, которые имеют необходимые общие с реками предпосылки для развития в них руслового процесса — неукрепленное, сложенное размываемыми породами русло и поток, способный по своему скоростному режиму транспортировать частицы грунта.

Основные свойства руслового процесса, или общие законы руслообразования, установлены Н. С. Лебявским, М. А. Великановым, Н. Е. Кондратьевым и Н. И. Маккавеевым и сведены К. В. Гришаниным [4] в следующую группу: взаимодействие потока и русла, ограниченность возможных естественных комплексов, дискретность руслового процесса, отставание развития русловых форм от изменения водной среды.

В настоящее время для количественной характеристики руслового процесса наиболее успешно используется его важнейшее свойство — дискретность. Оно лежит в основе гидролого-морфологической теории руслового процесса [8]. Следствием перехода к дискретным представлениям является выделение в русловом процессе структурных уровней, в результате чего все русловые формы по своим размерам, характеру проявления и законам, ими управляющими, четко распределяются по этим уровням.

¹ В работе принимали участие сотрудники ГГИ Б. А. Иванов, В. И. Замышляев, В. С. Кожевников, Г. Г. Месерлянс, Г. С. Ласточкин.

Введение структурных уровней позволяет в пределах гидролого-морфологической теории сформулировать систему взглядов, охватывающую как все свойства руслового процесса, так и все формы его проявления. Поэтому исследование возможности приложения теории руслового процесса к каналам может проводиться в рамках гидролого-морфологической теории, а основные позиции сравнения процессов, протекающих в реках и каналах, могут опираться на постулаты этой теории, ее главные положения, которые, как известно, сводятся к следующему.

1. Русловой процесс имеет дискретную структуру. Движение руслообразующих наносов происходит в виде дискретных русловых образований: микроформ — внутрирусловых мелких песчаных гряд; мезоформ — внутрирусловых скоплений наносов, соизмеримых с размерами русла; макроформ — генетически однородных участков русла и поймы.

2. В качестве факторов, определяющих тип речного русла (тип макроформ), выступают совокупность характеристик стока воды и стока наносов и так называемые ограничивающие факторы, препятствующие свободному развитию русла.

3. В реке одновременно развиваются два различных по своему содержанию процесса — необратимые изменения (деформации) общих морфологических характеристик реки и обратимые изменения (деформации) структурных элементов русла. При этом обратимые русловые деформации представляют собой внешнее проявление транспорта наносов.

4. Естественные реки находятся в состоянии динамического равновесия, при котором все деформации полностью обратимы, т. е. полностью соответствуют транзитному расходу наносов.

Проведем сравнительный анализ указанных основных положений теории руслового процесса применительно к каналам.

Дискретность руслового процесса в каналах. Натурные обследования каналов показали, что в них, как и в реках, наблюдается три типа русловых образований. При этом микроформы и мезоформы наблюдались в основном в тех случаях, когда в потоке транспортировались наносы. Для образования макроформ было необходимо наличие дополнительных условий.

Микроформы. Исследованные на каналах гряды по своим параметрам принципиально не отличаются от речных. Как и в реках, средняя высота гряд составляет 0,1—0,25 глубины потока, средняя длина — 3—5 глубин потока, а скорость смещения колеблется от 1 до 20 м/сут. Указанное обстоятельство свидетельствует о возможности построения универсальных (для рек и каналов) связей между параметрами гряд и характеристиками потока и русла. Такие связи будут даны ниже.

В табл. 1 приведены наиболее типичные значения параметров гряд на обследованных участках каналов.

Сравнение других характеристик грядового рельефа дна также подтверждает аналогию речных и канальных микроформ. Так, в некоторых каналах была обнаружена свойственная рекам

Параметры песчаных гряд на каналах

Канал, участок	Год	Расход воды, м ³ /с	Скорость потока, м/с	Ширина русла, м	Глубина потока, м	Длина гряды, м	Высота гряды, м	Скорость движения гряды, м/сут	Скорость потока над грядой, м/с	Глубина над грядой, м	Диаметр донных наносов, мм	Примечание
Каракумский, 299-й км	1975	300	0,72	107	3,90	21,0	0,90	2,0	—	—	0,15	Ровное дно Побочень
		300	0,76	107	3,70	16,0	0,50	3,8	—	—	0,15	
		300	0,73	105	3,90	13,0	0,70	2,7	—	—	0,15	
Каракумский, 288—292-й км	1977	324	0,72	127	3,56	10,5	0,31	3,0	—	—	0,15	
		324	0,60	155	3,59	12,5	0,35	2,5	—	—	0,15	
Каракумский, 32—35-й км	1978	410	0,79	190	2,31	7,9	0,30	3,0	0,68	3,7	0,31	
		410	0,78	178	2,95	9,7	0,30	3,0	0,96	1,6	0,31	
		410	0,80	183	2,89	13,0	0,40	3,0	0,90	4,3	0,31	
Каракумский, 180—182-й км	1978	337	0,63	148	3,66	9,0	0,30	3,0	0,68	4,7	0,12	
		337	0,65	130	4,21	9,0	0,60	2,5	0,70	5,4	0,12	
		337	0,65	150	3,70	11,0	0,40	2,5	0,72	5,9	0,12	
Каракумский, 410—412-й км	1978	154	0,59	74,0	3,66	14,0	0,25	2,5	0,63	4,2	0,10	
		154	0,63	85,0	2,90	14,0	0,30	2,5	0,64	3,8	0,10	
		154	0,52	76,0	4,30	14,0	0,20	2,5	0,60	2,4	0,10	
Северо-Крымский, 62—64-й км	1977	221	0,56	84,0	4,30	14,0	0,60	—	—	5,8	0,25	
		221	0,56	80,0	4,20	14,0	1,10	—	—	5,2	0,25	
		221	0,56	83,0	4,40	12,0	0,50	—	—	5,7	0,25	
Шават, 2—5-й км	1978	102	0,72	60,9	2,37	7,5	0,25	2,5	0,80	2,0	0,27	
		102	0,72	60,9	2,37	9,0	0,30	2,5	0,80	2,0	0,27	
		102	0,72	60,9	2,37	10,0	0,30	2,5	0,80	2,5	0,27	

иерархия микроформ — наложенные друг на друга системы гряд разных порядков. Двухпорядковая система гряд, наблюдаемая автором совместно с З. Д. Копалиани и С. А. Аннаевым на канале Шават в 1978 г., показана на рис. 1.

Характер пространственного распределения гряд по дну речного русла связывается с пространственной неоднородностью расхода наносов и слоя донных наносов. Эта связь на каналах выражается довольно резко. Так, на участках активного бокового поступления в канал продуктов эолового переноса твердых частиц в его прибрежных частях формируется значительный слой отложений. Прибрежные гряды превосходят по своим размерам средние по сечению. Например, на Каракумском канале высота и

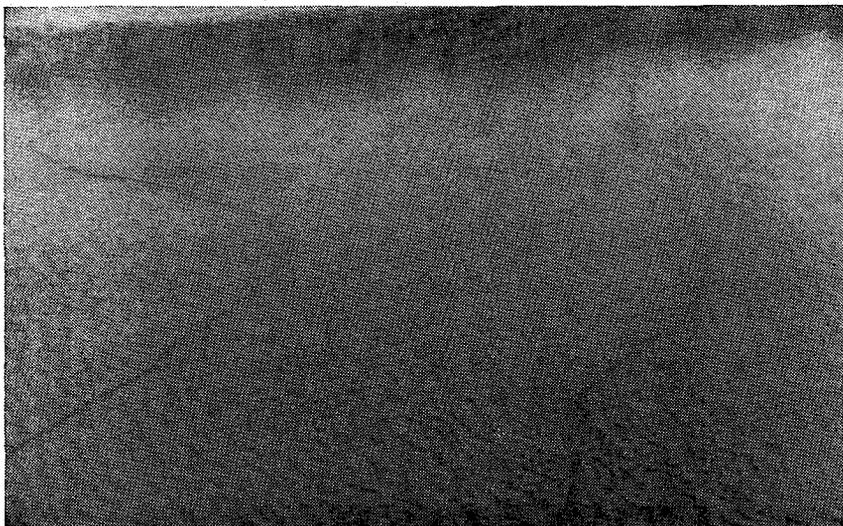


Рис. 1. Донные гряды на канале Шават.

длина подобных гряд (назовем их избыточными) оказались в 1,5—2 раза больше, чем в его стрежневой части.

На участке канала, сложенном связными грунтами, донные наносы перемещаются в виде гряд, однако рельеф грядового дна имеет иную структуру, чем на смежном с ним вышележащем песчаном отрезке. Причина состоит в том, что в неразмываемом русле при постоянстве гидравлических параметров потока толщина слоя донных наносов и расход донных наносов «истощаются» по длине канала. Недостаток твердого материала приводит также к тому, что полоса движущихся гряд приурочена к средней части русла, а его прибрежные части лишены сплошного аллювиального покрова. Поэтому на устойчивых участках канала в их нижних частях и вдоль берегов грядовый профиль дна становится прерывистым, т. е. расстояние между грядами превышает их

длину. Прерывистые гряды в литературе принято называть дефицитными.

На весьма длинных глинистых участках Каракумского канала движение донных наносов ниже прерывистых гряд утрачивало грядовую структуру.

Таким образом, при общей схожести процессов грядового движения наносов в реках и каналах они имеют и различия, состоящие в том, что на дне каналов чаще, чем в реках, формируются избыточные и дефицитные гряды.

Непосредственной причиной образования этих гряд является перенасыщение потока наносами или их недостаток. Общая же причина более глубокая — она связана с чередованием по трассе канала участков рек с разной литологией, с отсутствием вдоль трассы канала долин, заполненных аллювиальными поймами, с отсутствием состояния динамического равновесия на некоторых участках канала и др.

Мезоформы. Организация донных наносов в подвижные структурные формы более высокого порядка, чем гряды, происходит на уровне мезоформ. В каналах обнаружены все разновидности мезоформ, существующих в реках, — ленточные гряды, побочни и осередки.

Если образование микроформ связывается с макротурбулентностью потока и с потерей устойчивости подвижного плоского дна под действием гидродинамических возмущений с длинами волн порядка глубины потока, то образование мезоформ — с потерей плановой устойчивости прямолинейного русла под действием гидродинамических возмущений в потоке с длинами волн порядка ширины потока. В каналах длины мезоформ составляют 3—10 ширины русла, а высоты — от 0,3 до полной глубины потока.

Мезоформы развиваются как на прямолинейных участках канала с однородной шириной, так и в локальных и озеровидных его уширениях. Например, в Келифских озерах Каракумского канала, выполняющих роль отстойника для мутной амударьинской воды, весьма активно развивается осередковый тип руслового процесса. Осередки разделены многочисленными меандрирующими рукавами, внутри которых различимы побочни. Размеры мезоформ: длина 150—300 м, высота 3—4 м. В локальных уширениях канала, например, на участках поворотов, разветвлений, образуются одиночные мезоформы.

В качестве примера рассмотрим развитие одиночного побочни в уширении слабовыраженной излучины Каракумского канала, представляющего собой перекошенную гряду типа переката длиной 1800 м и высотой 1,5 м (рис. 2). Побочень активно воздействует на изменение скоростного поля потока, поперечного и продольного профилей русла и его плановую устойчивость. Средняя по сечению скорость потока в месте максимального уширения и минимальных глубин составляет около 0,5 м/с, а перед перекатом 0,70—0,80 м/с. Ниже гребня переката максимум скоростей смещен вправо, к вогнутому берегу, а еще ниже, на прямолинейном

участке, максимальные скорости обна- руживаются у противоположного бе- рега. Налицо случай «генерирования» одиночным побочнем кинематической структуры потока, вызывающей обра- зование мезоформ на нижерасполо- женном участке.

Так случайный фактор — расшире- ние потока — приводит к закономер- ному образованию русловой формы, способной генерировать себе подобные морфологические элементы русла и на- рушать плановую устойчивость трассы канала.

На реках, русло и пойма которых в течение тысячелетий находятся в со- стоянии динамического равновесия, возможность генерирования подобных себе русловых форм наблюдается редко. На каналах, существующих де- сятки лет, такая возможность имеется и реализуется не только в локальных местах нарушения профиля, но и на прямолинейных участках постоянной ширины.

Наблюденные на прямолинейных участках Каракумского канала по- бочни длиной 100—800 м и высотой 2—5 м постепенно уменьшаются по длине канала. Очевидно, сложный многофакторный процесс их форми- рования (и генерирования) продол- жается. В то же время в период обследо- ваний каналов Хорезма было заме- чено, что в некоторых малых каналах- коллекторах (например, в коллекторе Даудан, рис. 3) четкая цепь побочней прослеживается на всем их протяже- нии. Следовательно, при прогнозе об- разования побочней в канале должна учитываться не только сама возмож- ность их образования и генерирования, но и длительность периода их форми- рования.

Таким образом, результаты иссле- дований мезоформ в каналах показы- вают на их близость к речным средним формам. Различие состоит в том, что мезоформы в канале в связи со

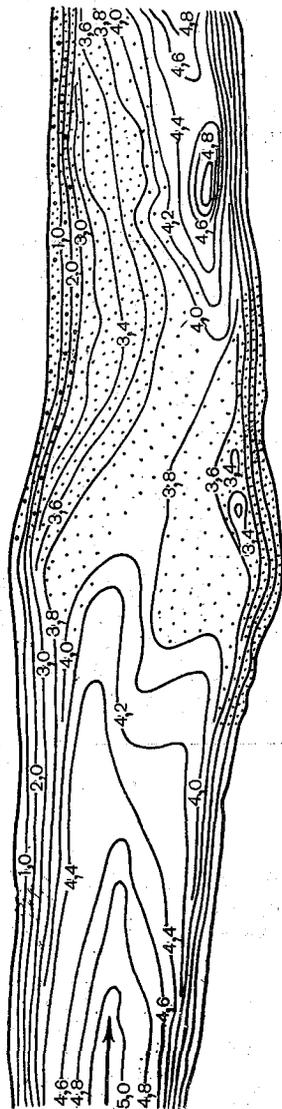


Рис. 2. Песчаный побочень в уширении русла Каракумского канала.

сравнительно коротким периодом их существования могут находиться в процессе формирования, в то время как речные образования, как правило, находятся в состоянии динамического равновесия.

Макроформы. Выделенные в гидролого-морфологической теории типы речных русел имеют разную генетическую природу. Ленточногрядовое, побочное и осередковое русла слагаются внутриусловными формами и могут существовать независимо от наличия у реки поймы. По общепринятой, в том числе и за рубежом, классификации речных русел они относятся к прямолинейным участкам рек. Формирование же меандрирующих и разветвленных участков рек происходит в условиях наносообмена между поймой и руслом при обязательном затоплении поймы.

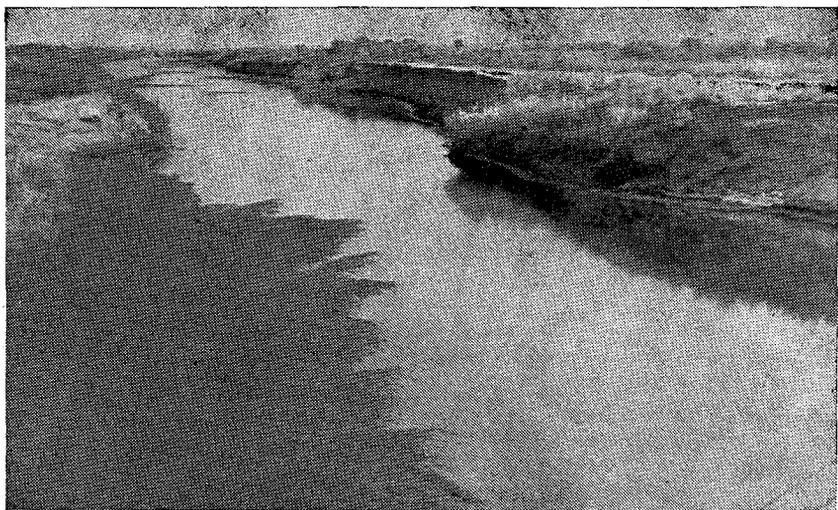


Рис. 3. Побочный тип руслового процесса в коллекторе Даудан.

Каналы, проложенные в коренных породах, не имеют поймы. Поэтому в принципе в таких каналах могут существовать лишь три типа макроформ, присущих прямолинейным речным руслам. Выявленные в каналах и рассмотренные выше мезоформы действительно подтверждают наличие в них ленточногрядового, побочного и осередкового типов руслового процесса. Исключение из этого правила могут составить лишь каналы, прокладываемые в поймах рек и затопливаемые половодьем.

Морфологически однородные комплексы, генетически подобные меандрирующим и разветвленным участкам рек, т. е. охватывающие русло и пойму, на каналах не встречаются. В то же время участки, внешне сходные с ними и даже имеющие некоторые аналогичные признаки внутреннего развития, были обнаружены на некоторых обследованных каналах. Рассмотрим их.

Верхняя часть Каракумского канала проложена по древней долине, заполненной аллювием. Канал, очевидно, унаследовал

древнее русло меандрирующей реки. Русло канала, проходящее по древней пойме, начало перемещаться по дну долины, внешне подобно речному руслу. В плане канал напоминает реку, развивающуюся по типу свободного, незавершенного и ограниченного меандрирования; характер меандрирования, как и в реке, определяется шириной унаследованной поймы.

При ширине унаследованной поймы порядка 300—800 м (рис. 4 а) в ее пределах развиты излучины свободного и незавершенного меандрирования с шагом излучин 300—600 м. Ширина пояса меандрирования 180—250 м. В наиболее широкой части пойменные массивы окаймляются системами излучин, как это бывает и на реках при очень широкой пойме. Участки канала,

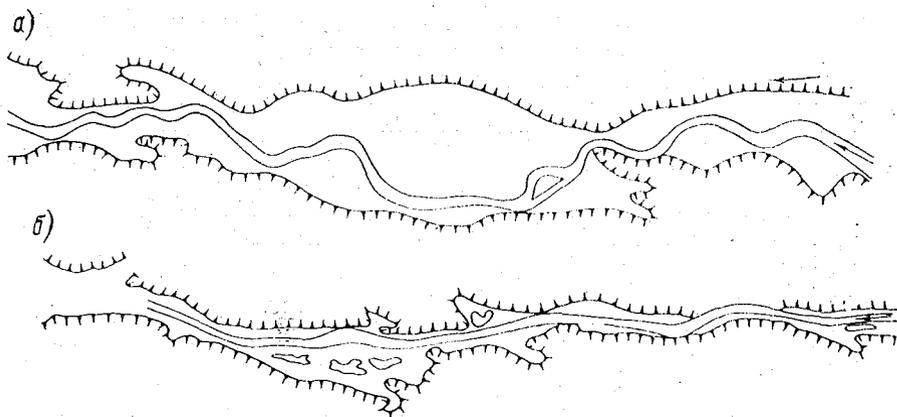


Рис. 4. Плановые очертания русла канала при разных геоморфологических условиях.

а — широкая унаследованная пойма; б — узкая унаследованная пойма.

похожие на незавершено-меандрирующие макроформы, имеют искусственное происхождение — спрямляющие их рукава разработаны не пойменным потоком, а дноуглубительными машинами.

На узкой унаследованной пойме (рис. 4 б) русло канала развивается по типу, близкому к ограниченному меандрированию. При ширине поймы 80—160 м шаг излучин составляет 500—800 м, а ширина пояса меандрирования близка к ширине поймы. Сравнение разновременных съемок анализируемых участков канала указывает на существенные плановые деформации излучин. Поперечные профили русла, построенные по разным участкам излучин канала, подобны речным — они асимметричны, отчетливо выявляют пляж, плёсовую ложину, пережат и т. д. На них отсутствует лишь характерная для рек пойменная часть с ее валами и межвальями.

Непрерывно идущий процесс разрушения вогнутых берегов канала приводит к значительному уширению подводного пляжа

и увеличению площади водного зеркала. Можно предполагать, что процесс сближения вогнутых берегов излучины, как и на реке, завершится разрушением перешейка. Поскольку в спрямлении излучины не участвует пойменный поток, то цикл ее развития будет намного превосходить цикл развития речных меандр. Очевидно, он будет близок к периоду полного развития речных излучин с очень редко затопливаемой поймой, продолжающемуся иногда сотни лет.

На чрезмерно удлиненных затопленных пляжах свободно развивающихся излучин заметны следы спрямляющих протоков. Очевидно, при их развитии возможен переход свободного меандрирования в незавершенное, т. е. отчленение пляжа и образование второго рукава.

При ограниченном меандрировании на реках и каналах процесс формирования пойменных массивов происходит неодинаково.

Лишь переработка потоком первичного искусственно созданного или унаследованного массива происходит в канале так же, как и в реке. Натурные наблюдения позволяют предположить, что новый массив будет формироваться таким образом, что его поверхность окажется полностью покрытой водой. По существу массив превратится в подводный пляж излучины. При этом ширина водного зеркала канала возрастет и станет равной поясу руслоформирования.

На возможность образования в канале разных типов макроформ под слоем воды показывают наблюдения на части Каракумского канала, проходящего через Келифские озера. На аэрофотоснимках этого участка отчетливо просматриваются сквозь воду излучины, протоки, острова, осередки и другие элементы макроформ.

Во время строительства трассам каналов, прокладываемых в коренных породах, искусственно придается криволинейное очертание. По истечении нескольких лет эксплуатации канала на изгибах образуются морфологические элементы, свойственные естественным меандрам. Однако процесс их превращения в развитую излучину, а тем более в систему излучин будет протекать значительно медленнее, чем на реках, и с теми особенностями формирования подводных пляжей, о которых говорилось выше.

Подводя итог рассмотрению материалов наблюдений макроформ на каналах, можно сделать вывод, что на искусственных водотоках развиваются лишь три типа руслового процесса, полностью аналогичных речным — ленточногрядовой, побочневый и осередковый. Процесс развития макроформ на криволинейных и разветвленных участках канала имеет отличную от рек форму его проявления.

Определяющие факторы руслового процесса. Наличие в каналах дискретных русловых форм, подобных речным или отличающихся от них лишь характером развития, указывает на то, что русловой процесс в канале и реке развивается под влиянием одних и тех же определяющих факторов. Остановимся на

некоторых характеристиках последних, учет которых необходим для прогноза руслового режима канала.

Характеристики стока воды. К ним можно отнести: руслоформирующие расходы воды, уровненный режим, уклоны и скорости потока и режим его движения, гидравлические сопротивления и др.

Как известно, в реке между руслоформирующим расходом воды и морфологическими элементами русла устанавливаются устойчивые связи. Исходя из общности руслоформирующих процессов в сравниваемых водотоках можно полагать, что подобные соотношения должны соблюдаться и в канале. Сезонные колебания водности реки являются причиной изменения гидравлических характеристик потока и нестационарности руслового процесса. Изменение гидравлического режима в каналах происходит также с определенной цикличностью, связанной с режимом орошения, водозабором, осушением и заполнением водой ложа и др. Возникающая при этом перестройка кинематической структуры потока приводит к изменению размеров русловых форм и темпов деформаций, шероховатости ложа и пропускной способности русла.

Таким образом, изучение и прогноз руслового процесса в канале возможен лишь при учете хотя бы основных характеристик стока воды.

Характеристики стока наносов. К числу важнейших из них относятся: источники поступления наносов, количество переносимого твердого материала и форма его транспорта, физико-механические свойства частиц.

Речной поток, протекающий по руслу и пойме, вызывает боковую и глубинную эрозию аллювиальных толщ и транспортирует продукты размыва вниз по реке. Заметная роль в формировании стока наносов принадлежит также склоновой эрозии, боковой приточности, эоловым и волновым процессам. Экзогенные процессы и процессы руслоформирования, наблюдающиеся в реке, находятся в состоянии динамического равновесия, установившегося за длительный период существования речной системы.

В канале для установления такого равновесия также требуется продолжительное время. Поэтому в первые годы эксплуатации канала проявление таких экзогенных процессов, как водная эрозия ложа, суффозия, сползание рыхлого покрова с береговых склонов, обвалование, десерпция и осыпание, гляциальные процессы, эоловый перенос, физическое, химическое и биологическое выветривание, будет играть более заметную роль в разрушении русла и поступлении в канал наносов, чем в реке. Пестрота литологии вдоль трассы канала создает предпосылки для неравномерного поступления в него твердого материала.

Кроме перечисленных, к источникам формирования стока наносов в канале может быть отнесено поступление наносов с бокового водосбора, внесение в поток частиц грунта, разрабатываемого землеройными механизмами, а также попадание наносов в исток канала из речного водозабора. Последний источник не

является определяющим в развитии руслоформирующих процессов в канале.

Наносы в каналах, как и в реках, переносятся во взвешенном состоянии и путем перемещения по дну, а их расходы оказываются соизмеримыми со стоком наносов рек. В табл. 2 приведены расходы взвешенных и донных наносов и процентное соотношение между ними (по материалам наблюдений 1978 г.).

Таблица 2

Расходы воды и наносов на каналах Каракумском и Шават

Канал, участок	Дата	Расход воды, м ³ /с	Расход наносов, кг/с			$\frac{G}{R} \cdot 100 \%$
			взвешенных R	донных G		
				измеренный	рассчитанный	
Каракумский, 32—35-й км	6/VI	410	768	1,89	4,68	0,25
Каракумский, 180—182-й км	13/VI	337	101	0,97	0,77	0,96
Каракумский, 410—412-й км	17/VI	150	35	0,45	0,17	1,29
Шават, 2—4-й км	7/IX	102	140	0,46	0,48	0,33

Расход донных наносов измерялся по смещению микроформ и рассчитывался по формуле Б. Ф. Смищенко и З. Д. Копалиани

$$q_{\tau} = 0,011 h_{\tau} \frac{V^4}{(\sqrt{gh})^3}, \quad (1)$$

где h_{τ} — высота гряды; V — скорость потока над грядой; h — глубина потока над гребнем гряды.

Результаты расчета удовлетворительно согласуются с данными измерений.

Количество донных наносов в обследованных каналах Средней Азии составляет около 1% взвешенных.

В табл. 3 показано распределение по длине Каракумского канала среднего диаметра донных и взвешенных наносов и грунтов, слагающих его берега. Из данных таблицы следует, что крупность взвешенных наносов по длине канала практически постоянна. Размеры донных частиц также изменяются незначительно. Исключение составляет верхний участок, где увеличение крупности наносов объясняется попаданием в пробы руслового аллювия древней реки и выпадением крупных частиц перед отстойником — Келифскими озерами.

Сопоставление фракционных кривых проб донных и взвешенных наносов по методу Крессера показало, что по крупности во взвешенных наносах присутствует до 98% донных частиц.

В донных наносах на первом участке присутствует по крупности 10—15% взвешенных частиц, а на других участках это значение приближается к 90%.

Таблица 3

Крупность донных и взвешенных наносов и грунтов, слагающих берега Каракумского канала

Участок канала, км	Средний диаметр, мм		
	донных наносов	взвешенных наносов	грунтов берега
32—35-й	0,30	0,022	0,030
180—182-й	0,12	0,028	0,070
410—412-й	0,17	0,022	0,040

Несмотря на незначительное количество донных наносов в общем стоке наносов их роль в русловом процессе является решающей. Это объясняется формой их перемещения — в виде структурных подвижных скоплений, при котором происходят существенные деформации русла канала.

К рассмотрению особенностей русловых деформаций в каналах перейдем после краткой характеристики последнего из определяющих факторов — условий, ограничивающих свободное развитие руслового процесса в канале. Эти условия могут быть естественными и искусственными. К ограничивающим факторам относятся выходы неразмываемых пород на дне и берегах канала; степень расширения долины, если канал проходит по унаследованной пойме; наличие сооружений, стабилизирующих плановое положение русла, и др. Выступая в качестве случайных факторов руслового процесса, ограничивающие условия способны коренным образом изменить характер деформаций и привести к нарушению проектного профиля канала. На Каракумском канале выходы неразмываемых пород не только затрудняют общий размыв русла, но и приводят к значительным местным деформациям.

Необратимые и обратимые деформации и состояние динамического равновесия русла канала

Выявленные Н. Е. Кондратьевым два вида деформаций речных русел (необратимые и обратимые) присущи и каналам. При водохозяйственном использовании рек основной интерес представляют обратимые деформации. Наблюдения на каналах указывают на необходимость учета тех и других деформаций, приводящих к однонаправленным или знакопеременным изменениям профиля канала.

Естественное изменение русла канала происходит в два этапа. На первом этапе наблюдается однонаправленное, необратимое уширение поперечного сечения канала. В этот период на его дне могут развиваться и обратимые деформации, связанные с периодическим сползанием русловых форм разных типов. Второй этап наступает при стабилизации средних размеров сечения канала — ширины и глубины. Происходящие при этом знакопеременные,

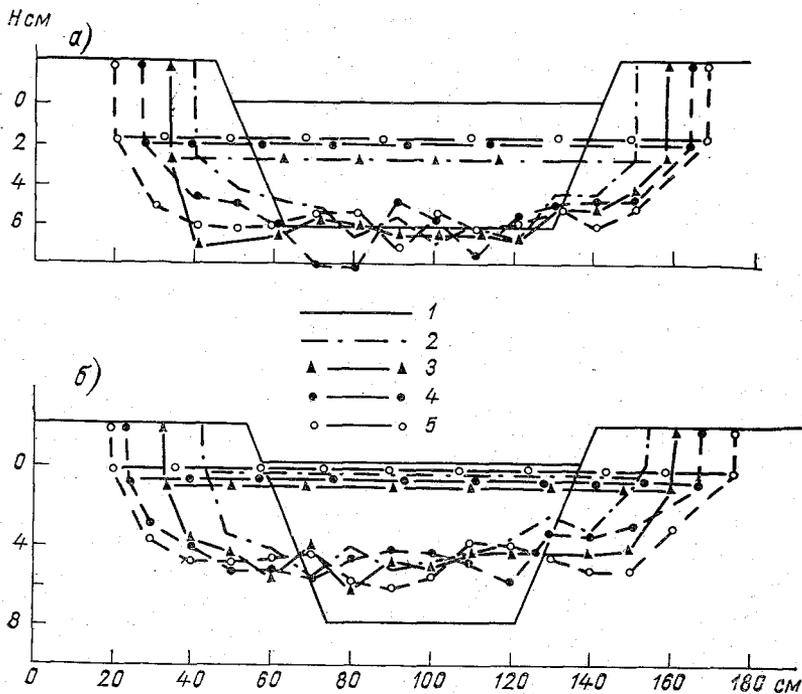


Рис. 5. Совмещенные поперечные профили модели канала с разной относительной шириной начального русла.

а) $\frac{B}{h} = 15$; б) $\frac{B}{h} = 10$; 1 — начальное положение, 2 — через 1 ч, 3 — через 3 ч, 4 — через 5 ч, 5 — через 7 ч; песок, $d = 0,25$ мм.

обратимые изменения русла канала становятся основным видом деформаций. Наступление второго этапа свидетельствует о переходе руслового процесса в канале в качественно новое состояние — динамическое равновесие.

Продолжительность первого этапа определяется интенсивностью бокового отступления берегов канала, а сама интенсивность зависит от руслоформирующих факторов и формы начального поперечного сечения канала.

В ГГИ были проведены эксперименты по отысканию связи между относительной шириной канала (B/h) и устойчивостью его поперечного профиля. Оказалось, что чем меньше параметр B/h ,

тем более интенсивно происходит процесс однонаправленного уширения канала и тем больший слой грунта откладывается на его дне. На рис. 5 приведены последовательные положения поперечного сечения модели канала.

Устойчивые поперечные профили эксплуатируемых каналов, соответствующие состоянию динамического равновесия, характеризуются К. В. Гришаниным [8] критерием устойчивости

$$M = \frac{R (g\chi)^{1/4}}{Q^{1/2}}, \quad (2)$$

где R — гидравлический радиус; χ — смоченный периметр; Q — расход воды.

Анализ критерия M применительно к намечаемым большим каналам (в несвязных грунтах) показывает, что для пропуска расходов воды 1000—2000 м³/с при условии сохранения начального поперечного профиля канала требуется создание относительно широких и мелких водотоков. При этом поперечные размеры канала существенно зависят от уклона местности: чем меньше уклон, тем более распластанной должна быть форма сечения канала, т. е. тем больше параметр B/h .

Существующие в природе водотоки, по своим гидравлическим характеристиками сходные с намечаемыми каналами, подтверждают вывод о необходимости создания в таких каналах относительно мелкого и широкого поперечного профиля. Примером природных аналогов крупных каналов могут служить рукава в низовьях больших рек (типа рукавов р. Оби ниже г. Салехарда).

Анализ характера деформаций канала на первом этапе его развития и рассмотрение имеющихся в природе естественных водотоков-аналогов приводят к выводу, что крупные каналы, параметры которых не соответствуют критерию $M=1,0$, будут испытывать существенные необратимые деформации.

Обратимые деформации, связанные с движением русловых форм по каналам, будут наблюдаться и в том случае, если $M=1,0$.

Наряду с деформациями поперечного профиля канал может оказаться неустойчивым в плане, т. е. будет испытывать продольное искривление своей трассы. Плановая неустойчивость русла связывалась выше с образованием макроформ при трех указанных типах меандрирующих русел.

Автором [10] показано, что основная роль в формировании типа русла принадлежит относительной ширине (B_0/B) и относительному уклону (I_0/I) дна долины (B_0 — ширина дна долины, B — ширина русла, I — уклон потока, I_0 — уклон дна долины).

Характеристикой, определяющей тип руслового процесса, является произведение указанных отношений

$$A = \frac{I_0}{I} \frac{B_0}{B}. \quad (3)$$

Связанное с расходом воды, как с масштабом реки $A = f(Q_{\text{макс}})$, соотношение (3) позволило построить критериальный график, который указывает на области, свойственные разным типам макроформ. Из графика следует, что образование того или иного типа русла не зависит от абсолютного значения расхода воды.

Поскольку в канале поймы отсутствует, то определить для него тип руслового процесса по соотношению (3) не представляется возможным. Поэтому были построены связи между относительными уклонами дна долины (первое отношение в уравнении (3)) и типами руслового процесса. При этом оказалось, что связь между уклоном и типом русел выглядит следующим образом:

Свободное меандрирование	$I = 0,50I_0$
Незавершенное меандрирование	$I = 0,71I_0$
Пойменная многорукавность	$I = 0,82I_0$
Ограниченное меандрирование	$I = 0,86I_0$
Побочневый тип процесса	$I = 0,93I_0$
Осередковый тип процесса	$I = 0,97I_0$

Существующие в природе соотношения между уклоном местности (дна долины) и уклоном потока должны соблюдаться при задании трассы канала определенного планового очертания, сходного с типом речного русла.

Прогноз и расчет русловых деформаций в канале

Прогноз и расчет русловых деформаций в канале должен включать в себя определение типа руслового процесса, количественную оценку обратимых деформаций и выбор оптимального поперечного сечения канала. Решению указанных вопросов должен предшествовать расчет стока наносов в канале, который следует выполнить отдельно для взвешенных и донных наносов.

Тип руслового процесса должен определяться с учетом геоморфологического и геологического строения местности, по которой прокладывается канал. При следовании канала по речной пойме необходимо учитывать возможность унаследования каналом типа древнего или существующего русла. Для прогноза типа руслового процесса в указанном случае допустимо пользоваться выражением (3).

В случае придания при строительстве трассе канала криволинейного очертания тип руслового процесса следует определять исходя из связи $I_0 = f(I)$. На прямолинейных участках, проложенных в коренных породах, при $I = (0,93 \div 0,97)I_0$ возможно образование внутрирусловых мезоформ, соответствующих ленточногрядовому, побочневому и осередковому типам руслового процесса. Размеры мезоформ следует определять по существующим в литературе зависимостям для рек, например по формулам В. В. Ромашина.

Обратимые деформации дна канала, вызываемые движением русловых микроформ, можно определять по новым зависимостям, разработанным в последнее время в ГГИ. Их особенность состоит в том, что исходные данные, положенные в основу формул, получены по наблюдениям не только на реках, но и на каналах.

Для расчета скорости смещения C_r (см/с) Снищенко и Копалиани предложена формула

$$C_r = 0,019V Fr^3, \quad (4)$$

где $Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$ — число Фруда; V — средняя скорость потока; h — его глубина.

Высоту гряд h_r (м) можно определять по формуле Снищенко и Копалиани

$$h_r = 2,1 \frac{d}{Fr^{4,1}} \left(\frac{V - V_0}{V_0} \right)^{1,4} \quad (5)$$

или по известным формулам В. С. Кнороза.

По имеющимся данным о расходах донных наносов автором была доказана возможность определения высоты гряд по зависимости, вытекающей из выражения (1)

$$h_r = \frac{q_r (\sqrt{gh})^3}{0,011V^4}. \quad (6)$$

Как уже отмечалось, расход донных наносов в обследованных каналах колебался в пределах 1% общего стока наносов.

Длину песчаных гряд l_r (см) рекомендуется определять по формуле автора

$$l_r = h \sqrt[3]{\frac{C^2}{g}}, \quad (7)$$

где C — коэффициент Шези.

При отсутствии сведений о характеристиках потока высоту и длину гряд можно определять по следующим приближенным зависимостям:

$$h_r = 0,25h \text{ при } h < 100 \text{ см;}$$

$$h_r = 20 + 0,1h \text{ при } h > 100 \text{ см;}$$

$$l_r = 4,2h.$$

Поперечные размеры канала можно считать оптимальными лишь в том случае, если они одновременно обеспечивают относительную устойчивость его профиля при минимуме суммарных затрат на проведение капитальных и эксплуатационных земляных работ. Соблюдение равенства $M=1$ может привести к выполнению лишь первого условия, т. е. обеспечению устойчивости первоначального профиля. Однако в проект могут быть заложены такие исходные данные (расход, уклон), при которых каналу

необходимо будет придать столь большую ширину и настолько уменьшить в нем скорости, что его сооружение станет явно нереальным. Пропускная способность такого канала будет недостаточна, а объем первоначальной выемки (капитальных затрат) — слишком большим. Положительной стороной такого варианта канала будет то, что объем эксплуатационных работ уменьшится за счет ликвидации или резкого уменьшения необратимых деформаций.

Поэтому с целью уменьшения капиталовложений следует увеличить число M , т. е. принять $M > 1$, и допустить развитие в канале не только обратимых, но и необратимых деформаций. При этом эксплуатационные затраты в канале увеличатся.

В результате проработки нескольких технико-экономических вариантов может быть найдено такое оптимальное значение M , большее единицы, при котором суммарные затраты по строительству и содержанию канала будут наименьшими. Размеры поперечного сечения канала (параметр B/h) окажутся в данном случае оптимальными.

В настоящей статье не затронут ряд важных вопросов, имеющих принципиальное значение для проектирования больших каналов, в частности вопрос гидравлических сопротивлений. Следует указать, что вычисленные для разных каналов значения интегрального коэффициента шероховатости колебались в значительных пределах — от 0,015 до 0,045. Установлено несомненное влияние на эту характеристику размеров песчаных гряд. Необходимо также согласиться с мнением И. Ф. Карасева [7] о заметном влиянии на сопротивление потоку береговых откосов канала. Эти вопросы требуют дальнейшего исследования.

Наблюдения, выполненные на каналах, со всей очевидностью показали, что в них, как и в реках, развивается русловый процесс. Они указали на необходимость учета руслового процесса при проектировании больших каналов переброски стока. Поэтому исследование всех сторон руслового процесса в каналах представляет важную практическую и научную задачу.

Установленные формы проявления руслового процесса имеют много общего с тем, что наблюдается в реках. В то же время некоторые различия между этими явлениями в каналах и реках носят принципиальный характер.

Успех практических решений в области прогноза русловых деформаций будет зависеть от того, как быстро смогут быть решены вопросы теории руслового процесса применительно к рекам и каналам. В качестве первоочередных должны быть поставлены следующие вопросы исследований:

- изучение специфики развития макроформ в условиях отсутствия поймы и разработка метода расчета их деформаций;
- изучение условий образования ленточногрядового, побочного и осередкового типов руслового процесса в каналах и разработка зависимостей для определения их параметров;
- выявление механизма разрушения берегов канала в условиях разной литологии;

— исследование гидравлических сопротивлений в каналах при наличии структурного строения дна и разном влиянии береговых откосов;

— совершенствование методов расчета стока наносов в канале;

— отыскание связи между необратимыми деформациями и параметрами канала;

— установление связи между объемами эксплуатационных землечерпательных работ и обратимыми и необратимыми деформациями.

Решение указанных вопросов можно получить лишь на основе сочетания натуральных, теоретических и лабораторных методов исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алтунин В. С. Деформация русел каналов.— М.: Колос, 1972.— 119 с.
2. Аннаев С. А., Аидов Х. К вопросу формирования русел каналов в песчаных грунтах.— В кн.: Динамика и термика рек. М., 1973, с. 267—275.
3. Викулова Л. И., Калганова М. В. Формирование русла искусственной реки (на примере Каракумского канала).— Водные ресурсы, 1978, № 5, с. 177—189.
4. Гришанин К. В. Теория руслового процесса.— М.: Транспорт, 1972.— 216 с.
5. Гришанин К. В. Устойчивость русел рек и каналов.— Л.: Гидрометеоиздат, 1974.— 144 с.
6. Железняков Г. В., Аннаев С. А. Формирование русла Каракумского канала.— Вестник сельскохозяйственных наук, 1967, вып. 5, с. 52—88.
7. Карасев И. Ф. Русловые процессы при переброске стока.— Л.: Гидрометеоиздат, 1975.— 288 с.
8. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Смищенко Б. Ф. Теория и методы расчета русловых деформаций.— В кн.: Труды IV Всесоюз. гидрол. съезда.— Л.: 1975, т. 1, с. 139—151.
9. Ржаницын Н. А., Аннаев С. А., Сарыев Д. С. Основные направления в развитии русловых процессов на Каракумском канале им. В. И. Ленина.— Речная гидравлика и гидротехника.— М.: Изд. Ун-та дружбы народов им. П. Лумумбы, 1973, т. 65, с. 27—44.
10. Смищенко Б. Ф. Связь типов русла с формами долин.— Геоморфология, 1979, № 1, с. 18—25.

С. И. Харченко

ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОДНОГО И ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА МЕЛИОРИРУЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ НЕЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ РСФСР

Основные положения

Интенсивное развитие мелиорации в различных физико-географических районах Советского Союза и особенно в Нечерноземной зоне РСФСР требует качественно нового подхода к гидрологическому обоснованию регулирования водного и теплового режима переувлажненных почв в гумидной зоне. Традиционные методы, применяемые для обоснования норм осушения (карты норм осушения, связи глубин залегания грунтовых вод с влажностью почвы и пр.), не отвечают требованиям, предъявляемым к проектированию осушительно-увлажнительных систем в современных условиях.

В настоящее время Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР ведет большую работу по совершенствованию и повышению технического уровня мелиоративных работ. В частности, при проведении осушительных мелиораций широко применяется закрытый дренаж, осуществляется переход от самотечного осушения с регулированием реками-водоприемниками к осушению с помощью машинной откачки, создаются осушительно-увлажнительные системы, ставится задача создания и поддержания на протяжении всего вегетационного периода оптимального водного, воздушного, теплового, газового и питательного режима почвы и режима приземного слоя воздуха. Для обоснования этих сложных технических систем недостаточно ориентироваться только на норму осушения.

В ближайшие 10—15 лет намечено создать автоматизированные системы управления водным, воздушным, солевым, тепловым и питательным режимом, обеспечивающие значительное повышение урожайности сельскохозяйственных культур. Эффективная работа этих систем возможна только на основе детального учета основных компонентов природной среды (почва, вода, воздух, растительный

покров и др.), а также водного и теплового режима сельскохозяйственных полей. Это требует, с одной стороны, разработки расчетных методов, основанных на детальном анализе уравнений водного, теплового, химического балансов с учетом интенсивности тепло-, влаго- и солеобмена зоны аэрации с водоносным слоем, а с другой — существенного расширения и улучшения качества необходимой для этого информации.

Для решения упомянутых проблем необходимо повышать не только уровень системы получения, хранения, обработки и выдачи режимной информации, но и совершенствовать методы научного ее обобщения с целью обоснования более совершенных приемов мелиорации. Например, для осуществления осушительно-увлажнительных мероприятий и автоматического управления водным, воздушным, тепловым и солевым режимом необходима непрерывная информация по суточным интервалам времени об избытках влаги и недостатках водопотребления, которая может быть получена лишь на основе детального изучения элементов водного, теплового и солевого балансов на воднобалансовых станциях.

Известно, что гидрологические и водохозяйственные расчеты при проектировании осушительных систем в большинстве случаев выполняются на основе гидрологической информации, получаемой до проведения мелиорации. Однако мелиорация земель существенно изменяет водно-физические свойства минеральных и торфяных почв, а также элементы водного и теплового балансов полей, что приводит к значительным изменениям гидрологических параметров, положенных в основу проектирования мелиоративных систем. В связи с этим условия работы гидротехнических сооружений, дрен, каналов существенно отличаются от проектных, что часто является одной из причин возникновения неблагоприятных явлений на осушительных системах, приводящих к снижению урожая, а именно: нарушению оптимального увлажнения почв, изменению режима речного стока, а также качества воды и т. д.

В настоящей статье обосновывается методика определения избытков влаги и недостатков водопотребления как основа проектирования режима осушения и орошения сельскохозяйственных полей в гумидной зоне.

Методика определения избытков влаги на сельскохозяйственных полях и недостатков водопотребления растений

Избыток влаги I_d на сельскохозяйственном поле характеризуется инфильтрационным питанием грунтовых вод за счет атмосферных осадков с учетом изменений элементов водного баланса, которые могут произойти под влиянием мелиорации:

$$I_d = I_1 + (\Delta S_r - \Delta S_{r_1}) + (R_{п.г} - R_{п.г_1}) - (R_r - R_{r_1}) - (K - K_1); \quad (1)$$

$$I_d = I_1 + (X - X_1) + (R_{п.п} - R_{п.п_1}) - (R_p - R_{p_1}) - (E_T - E_1) + (K - K_1) + (\Delta W - \Delta W_1) + (\Delta S_{п} - \Delta S_{п_1}), \quad (2)$$

где I_1 — инфильтрация осадков до поверхности грунтовых вод в период до мелиорации; X и X_1 — атмосферные осадки соответственно при мелиорации и до нее (ниже элементы приводятся в таком же соответствии: без индекса — при мелиорации, с индексом «1» — до мелиорации); $R_{п.п}$ и $R_{п.п1}$ — приток поверхностных вод; $R_{п}$ и $R_{п1}$ — сток поверхностных вод; E_T и E_1 — суммарное испарение; K и K_1 — расход грунтовых вод в зону аэрации; ΔW и ΔW_1 — принятые запасы влаги в зоне аэрации; $\Delta S_{п}$ и $\Delta S_{п1}$ — аккумуляция воды на поверхности; $\Delta S_{г}$ и $\Delta S_{г1}$ — изменение запасов грунтовых вод; $R_{п.г}$ и $R_{п.г1}$ — приток грунтовых вод; $R_{г}$ и $R_{г1}$ — сток грунтовых вод.

Формулы (1) и (2) можно записать в более простом виде

$$I_d = I_1 + f(\Delta), \quad (3)$$

где

$$f(\Delta) = (\Delta S_{г} - \Delta S_{г1}) + (R_{п.г} - R_{п.г1}) - (R_{г} - R_{г1}) - (K - K_1) \quad (4)$$

или

$$f(\Delta) = (X - X_1) + (R_{п.п} - R_{п.п1}) - (R_{п} - R_{п1}) - (E_T - E_1) + (K - K_1) + (\Delta W - \Delta W_1) + (\Delta S_{п} - \Delta S_{п1}). \quad (4')$$

Инфильтрационное питание грунтовых вод немелиорированного поля определяется по формуле

$$I_1 = X - R_{п.п1} - R_{п1} + K_1 - E_1 - E_{в1} + \Delta W_1 + \Delta S_{пон1}, \quad (5)$$

где $E_{в}$ — испарение с воды, $\Delta S_{пон}$ — изменение запасов воды в понижениях микрорельефа.

В тех случаях, когда заболачивание происходит за счет притока напорных подземных вод, избытки влаги вычисляются по формуле (7).

Обозначим запасы грунтовых вод, соответствующие стоянию их уровня $H_{кр}$ (уровень, превышение которого связано с переувлажнением и ухудшением аэрации в корнеобитаемом слое) через $S_{г.кр}$, а запасы грунтовых вод на начало и конец расчетного периода через $S_{г.н}$, $S_{г.к}$. Тогда уравнение водного баланса водоносного слоя можно записать в виде

$$(S_{г.н} - S_{г.к}) + (S_{г.кр} - S_{г.к}) + I_1 - K + R_{п.г} - R_{г} + Q_1 - Q_2 = 0, \quad (6)$$

где Q_1 и Q_2 характеризуют подпитывание деятельного слоя почвы подпорными водами и просачивание грунтовых вод в глубокие слои.

При $S_{г.к} > S_{г.кр}$ член $(S_{г.кр} - S_{г.к})$ в уравнении (6) выражает избыток влаги в корнеобитаемом слое по сравнению с критическим запасом $S_{г.кр}$. В этом случае избыток влаги I_d при заболачивании напорными водами вычисляется по формуле

$$I_d = S_{г.кр} - S_{г.к} = -I_1 + K + (S_{г.кр} - S_{г.н}) - R_{п.г} + R_{г} - Q_1 + Q_2. \quad (7)$$

Разность $S_{г.кр} - S_{г.к}$ в формуле (7) можно приближенно вычислять по выражению

$$S_{г.к} - S_{г.н} = \mu (H_{кр} - H_n), \quad (8)$$

где μ — коэффициент недостатка насыщения; H_n — уровень грунтовых вод в начале расчетного периода.

Как показано в работе [6], в Нечерноземной зоне на фоне достаточного или даже избыточного увлажнения наблюдаются сравнительно продолжительные (пентада, декада и даже месяц) засушливые периоды вегетационного цикла (особенно на супесчаных и суглинистых хорошо дренированных почвах), характеризующиеся недостатком влаги для оптимального развития растений. При этом избытки, определяемые по формуле (3), равны нулю ($I_d = 0$). В таких случаях необходимо определять недостатки водопотребления¹ по формуле

$$d_E = E_T - (X - R_{п.п} - R_n + W_n - W_k + K - I + \Delta S_{пон}), \quad (9)$$

где W_n и W_k — влагозапасы в начале и конце расчетного периода.

В Нечерноземной зоне важное значение имеет теплообеспеченность территории, необходимая для получения высоких урожаев. Затраты тепла при оптимальном увлажнении почвы E_T вычисляются как произведение E_T и L , где L — удельная теплота испарения.

Количество тепла при фактическом испарении определяется как произведение EL . Разность $E_T L - EL = (E_T - E)L$ или произведения $d_E L = d_{\odot}$ и d_E , $L = d_{1\odot}$ дают представление о том, сколько тепла из-за недостатка влаги не использовано при выращивании сельскохозяйственных культур.

Экспериментальные и расчетные методы определения элементов водного баланса

Из формул, рекомендуемых для определения избытков влаги и недостатков водопотребления, видно, что для их расчета необходима информация об элементах водного и теплового балансов на немелиорируемых и мелиорируемых сельскохозяйственных полях.

При определении избытков влаги и недостатков водопотребления используются измеренные на метеостанциях значения осадков, в которые введены поправки, вычисляемые по данным измерения осадков наземными дождемерами, установленными непосредственно на сельскохозяйственных полях [6]. В случае отсутствия параллельных наблюдений за осадками по наземным дождемерам

¹ Под недостатком водопотребления сельскохозяйственной культуры понимается то количество влаги, которое надо добавить в почву, чтобы обеспечить оптимальное водопотребление при поддержании влажности в заданных оптимальных пределах.

и осадкомерам Третьякова или невозможности получения опытным путем поправочных коэффициентов последние определяются теоретическим путем.

Одновременно в расчетах используются данные о суммарном испарении, полученные с помощью испарителей и лизиметров или рассчитанные по тепловому балансу. При отсутствии измерений суммарное испарение можно определять тепловоднобалансовым методом, применяя формулу

$$E = \beta E_T \frac{W_n + W_k}{2\gamma_{\text{НВ}}}, \quad (10)$$

где $\gamma_{\text{НВ}}$ — воднофизический параметр, вычисляемый по выражению

$$\gamma_{\text{НВ}} = W_{\text{НВ}} - \text{мг.}$$

Расход грунтовых вод определяется по данным лизиметров или рассчитывается по формулам, приведенным в работе [6].

Аккумуляция влаги в верхнем слое зоны аэрации, а также в водоносном слое определяется, как правило, по данным измерений; в отдельных случаях для восстановления и интерполяции измеренных значений можно применять расчетный метод [5, 6]. Аккумуляция влаги в понижениях микрорельефа определяется приближенно, по данным измерений на немелиорируемых землях.

Поверхностный сток с сельскохозяйственных полей в Нечерноземной зоне имеет большое значение при формировании водного баланса, однако измерений этого элемента на полях практически не производилось. В связи с этим при расчете избытков влаги и недостатков водопотребления растений используют приближенные значения стока, полученные на малых водосборах, расположенных в аналогичных физико-географических условиях.

Для определения приближенных значений стока с сельскохозяйственных полей можно использовать формулу [5]

$$R = X - X \left(\frac{d_w}{\gamma} \right)^z - \Delta S_{\text{п}}, \quad (11)$$

где d_w — дефицит влажности почвы, вычисляемый по разности $W_{\text{ПВ}} - W$ ($W_{\text{ПВ}}$ — полная влагоемкость, W — фактическая влажность почвы в метровом слое); γ — действующая пористость, вычисляемая как разность $W_{\text{ПВ}} - W_{\text{ВЗ}}$ ($W_{\text{ВЗ}}$ — влажность завядания); z — параметр, зависящий от уклона поверхности поля и интенсивности осадков, для средних уклонов он равен двум; остальные обозначения прежние.

Для определения поправки $f(\Delta)$ в формуле (3) необходимо иметь наблюдения за элементами водного баланса на мелиорируемых и немелиорируемых полях. Однако в настоящее время систематические наблюдения за элементами водного и теплового балансов отсутствуют. В связи с этим ниже рассматриваются имеющиеся в литературе отрывочные данные об изменении водно-физических свойств почвы и некоторых элементов водного баланса под влиянием мелиорации.

Изменение водно-физических свойств почвы и элементов водного баланса под влиянием мелиорации

Под влиянием осушительных и осушительно-увлажнительных мелиораций изменяется интенсивность, а иногда и направление почвенных процессов, влияющих на переформирование водных и водно-физических свойств почвы, что обуславливает изменение некоторых элементов водного баланса: влагозапасов, испарения, расхода грунтовых вод в зону аэрации, стока и др. Под влиянием мелиорации плотность твердой фазы и минеральной почвы незначительно уменьшается, а торфяной почвы, наоборот, увеличивается. Последнее объясняется активизацией процесса минерализации органического вещества.

Изменение плотности минеральных почв зависит от их механического состава, расстояния от дрен, длительности осушения и составляет 5—10% (при этом супеси, легкие суглинки после мелиорации остаются практически неизменными). Изменения, происходящие в торфяной почве, зависят от органического состава и степени ее разложения. Наибольшему изменению подвергаются сфагновые торфа, наименьшему — пушицевые. Средняя плотность осушенных сфагновых торфов по сравнению с неосушенными увеличивается на 10% и более, травяных — на 30—45%.

Плотность твердой фазы в верхних слоях торфяной залежи при длительном осушении (>20 лет) колеблется в пределах 0,25—0,27 г/см³ (в неосушенном состоянии 0,11—0,04 г/см³). Максимальная плотность осушенной залежи примерно равна 0,30 г/см³.

Пористость почвы в зависимости от ее структуры и плотности при осушении меняется в широких пределах. Для минеральных почв эти изменения достигают 45—80%, а для болотных почв могут превышать 90%. Пористость минеральных почв вблизи дрен на 12—14% больше, чем на недренированном поле, на расстоянии 8 м от дрен это увеличение составляет 7—10%. Степень изменения пористости зависит также от продолжительности работы дренажа. Степень изменения пористости торфяников зависит от их вида, минерализации, интенсивности и продолжительности осушения; через 10 лет после устройства дренажа пористость торфяников может уменьшиться на 40—50% (по некоторым данным — на 20—30%) [3].

При осушении наименьшая и полная влагоемкость минеральных почв увеличивается на 14—16%, а торфяных уменьшается на 20—40%. Дренажное минеральной почвы приводит к увеличению, а торфяных — к уменьшению проницаемости и коэффициента фильтрации. На осушенных тяжелых минеральных дерново-карбонатных суглинистых почвах коэффициент фильтрации в 3—6 раз, а на легких — в 1—2 раза больше, чем на недренированных. Около дрен его значения в полтора—два раза выше, чем на середине между дренами. В глинистых и песчаных, оглеенных, подзолистых почвах осушение не оказывает заметного влияния на изменение

их фильтрационных свойств. Ф. Р. Зайдельман [2] указывает, что коэффициент фильтрации минеральных заболоченных почв после осушения увеличивается в 2—10 раз и более. При осушении низинных торфяных залежей Белоруссии значение этого коэффициента уменьшилось в 10—70 раз, а при осушении верховой сфагновой залежи торфа — почти в 100 раз [3]. При осушении Мещерской низменности и поймы р. Яхромы коэффициент уменьшился в 1,2—5 раз [4].

По данным К. П. Лундина, коэффициент фильтрации различных типов низинных болот Белоруссии после осушения в метровом слое стал меньше в 6—70 раз. К. П. Лундиным [3] предложена формула для расчета уменьшения коэффициента фильтрации K в зависимости от продолжительности c и глубины осушения h

$$K = K_0 e^{-ch}, \quad (12)$$

где K_0 — начальное значение коэффициента фильтрации. В первые годы после осушения коэффициент фильтрации быстро уменьшается, а затем асимптотически приближается к минимуму, достигая его через 12—15 лет.

Осушение приводит также к существенному изменению водоотдачи. На торфяной залежи она, например, уменьшается в 1—5 раз.

Согласно экспериментальным данным, влажность почвы на мелиорируемых минеральных и торфяных почвогрунтах существенно изменяется в сторону уменьшения. Степень изменения влажности определяется механическим составом почвогрунтов, водностью года, интенсивностью осушения. По данным М. А. Борисовского [1], в пахотном горизонте (0—20 см) различия в запасах продуктивной влаги на дренированных и недренированных почвах составляет 37—43 мм, в метровом слое 60—80 м (табл. 1). Из данных таблицы видно, что при максимальном запасае влаги в апреле (85% ПВ) на дренированном участке она была на 47—55% ниже, чем на недренированном, а в летний период (при 45% ПВ) — в 3—7 раз меньше. С приближением к дренам влажность почвы уменьшается. На мелиорируемых торфяных почвах она изме-

Таблица 1

Средние запасы продуктивной влаги в минеральной почве, мм

Слой почвы, см	Участок					
	дренированный			недренированный		
	18/IV 1972 г.	18/V 1971 г.	18/VI 1971 г.	18/IV 1972 г.	18/V 1971 г.	18/VI 1971 г.
0—20	38	13	3	59	35	21
0—50	90	39	9	132	82	46
0—100	172	106	37	—	166	116

няется еще больше — от полной до наименьшей влагоемкости, а в отдельные периоды (когда торф пересыхает) и до влажности разрыва капилляров.

Уменьшение влажности почвы приводит к уменьшению испарения и стока. Уменьшение этих элементов баланса легко определить по формулам (10) и (11), содержащим в качестве аргумента влажность почвы [6].

Результаты показывают, что поправка $f(\Delta)$, вычисляемая для среднего по увлажнению года по формуле (3), (4) или (4'), с учетом приведенных изменений элементов водного баланса за сезон может достигать 100 мм и более, или на 50—60% исходного избытка влаги или недостатка водопотребления [6]. При этом избытки влаги уменьшаются на 30—40%, а недостатки водопотребления на столько же увеличиваются.

Совершенно очевидно, что все указанное выше приводит к существенным изменениям условий, в которых проводятся осушительные и увлажнительные мероприятия по сравнению с проектными. Следовательно, при проектировании осушительно-увлажнительных мероприятий необходимо учитывать не только исходные, но и возможные изменения избытков влаги и недостатков водопотребления.

Для определения изменения величин I_d и d_E необходимо организовать параллельные исследования водного, теплового и солевого балансов на мелиорируемых и немелиорируемых землях.

Анализ результатов расчета избытков и недостатков водопотребления сельскохозяйственных культур

В настоящем разделе рассматриваются результаты расчетов избытков влаги и недостатков водопотребления сельскохозяйственных культур по формулам (1) и (2) с учетом поправки $f(\Delta)$, определенной по выражению (3).

Расчеты выполнены по трем агрометстанциям: Савелово (Калининская обл.), Кингисепп (Ленинградская обл.), Шуя (Ивановская обл.) — по данным наблюдений на полях, занятых зерновыми культурами на дерново-слабоподзолистых и супесчаных почвах.

Для расчета по указанным формулам были использованы следующие данные:

- 1) суточные и декадные суммы осадков, в которые предварительно были введены поправки на недоучет осадков осадкомерами;
- 2) продуктивные влагозапасы, измеренные на различных сельскохозяйственных полях до глубины 1 м;
- 3) значения поверхностного стока на малых водосборах;
- 4) данные метеорологических и теплобалансовых наблюдений;
- 5) измеренные и рассчитанные тепловоднобалансовым методом суммарное испарение и расход грунтовых вод в зону аэрации [5, 6].

Испаряемость вычислялась методом Будыко—Зубенок [6], оптимальное водопотребление — тепловодбалансовым методом [5], поверхностный сток определялся по аналогии со стоком с ближайших малых водосборов. Аккумуляция влаги на поверхности принималась в зависимости от количества выпадающих осадков. Точность расчета месячных недостатков водопотребления и избытков влаги составляет около 30%. Точность определения величин в целом достигает 40%, для отдельных станций 30%. Даты полива и отвода избыточной влаги определялись по интегральным кривым

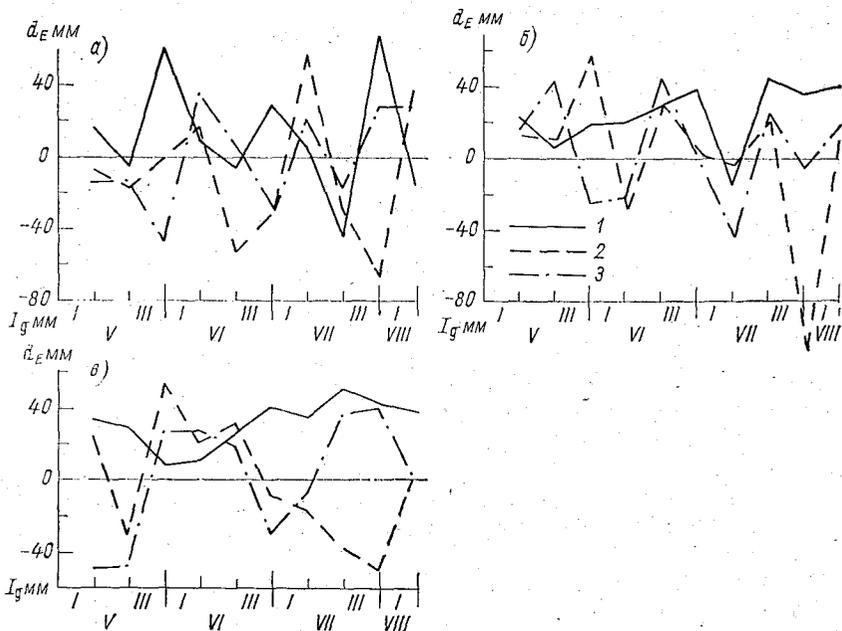


Рис. 1. Декадные избытки влаги I_d и недостатки водопотребления d_E на полях, занятых зерновыми культурами.

а — р. Кингисепп, б — Савелово, в — Шуя; 1 — сухой год, 2 — влажный, 3 — средний по увлажненности.

на основе суммирования декадных дефицитов водопотребления, в связи с чем ошибки определения дат не превышают 2—3 дней [6].

На рис. 1 представлены декадные избытки влаги и недостатки водопотребления растений на полях, занятых зерновыми культурами, в засушливые, средние и влажные годы. Как видно из этого графика, на протяжении всей вегетации периоды с избытком влаги во все годы чередуются с периодами недостатка водопотребления. Во влажный и средний годы избытки влаги преобладают над недостатками водопотребления. В засушливый год, напротив, периоды недостатков водопотребления продолжительнее, чем периоды избытков влаги. Это указывает на то, что для создания оптимальных условий для возделывания растений на

данных полях в течение одного вегетационного периода посева надо чередовать поливы и отводы с полей избытков влаги.

Статистические данные об избытках влаги и недостатках водопотребления за многолетний период по станции Кингисепп приведены в табл. 2. Эти данные показывают, что чередование избытков влаги и недостатков водопотребления наблюдается ежегодно и в течение всего вегетационного периода. Такие же явления в той или иной мере наблюдаются и в других областях Нечерноземной зоны. Поэтому повышение урожайности сельскохозяйственных культур в Нечерноземной зоне возможно только в результате комплексного регулирования условий жизни растений и в первую очередь путем отвода избытков влаги и полива растений, режим которого может успешно соблюдаться только на основе использования детальной информации об элементах водного, теплового и солевого балансов.

Таблица 2

Избытки влаги и недостатки водопотребления в почве при средней глубине залегания грунтовых вод 1,0 м по ст. Кингисепп в 1958—1975 гг., мм

Месяц	Декада	Избытки влаги I_d				Недостатки водопотребления d_E			
		средние за много-летний период	обеспеченностью, %			средние за много-летний период	обеспеченностью, %		
			25	50	75		25	50	75
V	1	9,6	12,7	9,0	5,4	10,5	13,3	9,8	6,7
	2	4,6	6,1	4,3	2,6	9,2	11,7	8,6	5,9
	3	12,2	16,1	11,5	6,8	10,6	13,5	9,8	6,8
VI	1	5,8	7,6	5,4	3,2	11,4	14,5	10,6	7,3
	2	8,9	11,7	8,4	5,0	8,6	10,9	8,0	5,5
	3	7,8	10,3	7,3	4,4	6,9	8,8	6,4	4,4
VII	1	5,7	7,5	5,4	3,2	13,6	17,3	12,6	8,7
	2	16,9	22,3	15,9	9,5	9,9	12,6	9,2	6,3
	3	13,1	17,3	12,3	7,3	21,5	27,3	20,0	13,8
V—VIII	1	6,4	8,4	6,0	3,6	15,5	19,7	14,4	9,9
		91,0	120,0	85,5	51,0	117,7	149,6	109,4	75,3

Избытки влаги и недостатки водопотребления на минеральных почвах существенно зависят от глубины залегания грунтовых вод H (табл. 3). Так, при $H=0,5$ м значение I_d больше в два раза, чем при $H=2,0$ м, а значение d_E при $H=0,5$ м в два раза меньше, чем при $H=2,0$ м.

Интегральные кривые декадных избытков влаги и недостатков водопотребления строились для трех характерных по водности лет — сухого, среднего и влажного года (рис. 2—4). Построение таких кривых позволяет определять режимы осушения либо орошения

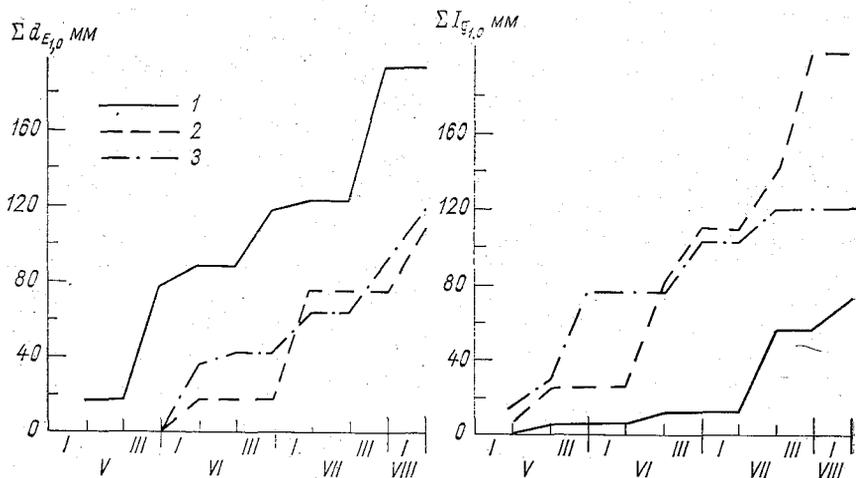


Рис. 2. Интегральные кривые декадных избытков влаги I_d и недостатков водопотребления d_E по ст. Кингисепп.
1 — сухой год; 2 — влажный; 3 — средний по увлажненности.

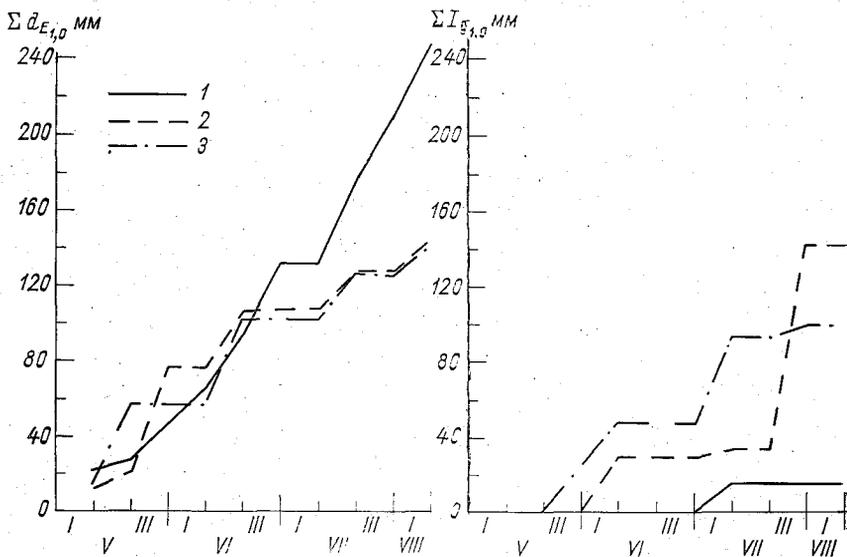


Рис. 3. Интегральные кривые декадных избытков влаги I_d и недостатков водопотребления d_E по ст. Савелово.
Усл. обозн. см. рис. 2.

почв [6]. Анализ кривых показывает, что не каждый год требуется отводить влагу или дополнительно подавать ее на поля.

В вегетационный период отводить излишнюю воду необходимо, как правило, перед началом уборочных работ. Однако не исключено, что в фазы активной вегетации также потребуется форсированный отвод избыточной влаги. Такие мероприятия обычно проводятся во влажные годы.

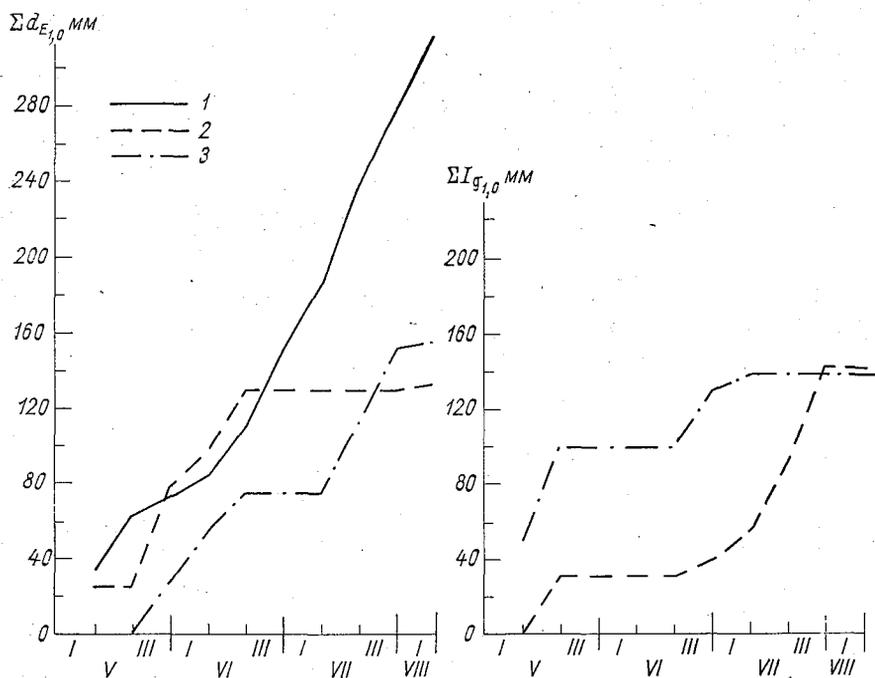


Рис. 4. Интегральные кривые декадных избытков влаги I_d и недостатков водопотребления d_E по ст. Шуя.

Усл. обозн. см. рис. 2.

Таблица 3

Средние многолетние избытки влаги и недостатки водопотребления при различной глубине залегания грунтовых вод в Нечерноземной зоне, мм

Станция	Период наблюдений, годы	Недостатки водопотребления			Избытки влаги		
		0,5 м	1,0 м	2,0 м	0,5 м	1,0 м	2,0 м
Кингисепп	1958—1975	73,3	117,6	164,2	132,4	91,0	67,1
Савелово	1959—1973	74,9	133,8	174,3	134,5	96,9	71,1
Шуя	1960—1976	92,3	147,9	200,8	104,9	77,0	63,2

Что касается дополнительного увлажнения почвы, то это мероприятие в период вегетации необходимо еще в большей степени. Необходим как минимум один полив, а в мало- и среднеувлажненные годы два, а иногда и три полива (в особо засушливые годы норма полива 70—80 мм).

Если не вводить поправку $f(\Delta)$ в формулу (3), то значения избытков влаги и недостатков водопотребления будут существенно отклоняться от фактических; в частности, избытки влаги на мелиорированных почвах будут больше на 30—40%, а недостатки водопотребления — меньше на 25—35%. Соответственно изменятся и сроки отвода избыточной влаги с полей и поливов сельскохозяйственных культур. Все это может привести к нарушениям работы устройств для осуществления осушительно-увлажнительных мероприятий и соответственно к снижению урожайности сельскохозяйственных культур.

В заключение необходимо отметить, что для обоснования сложных систем двухстороннего регулирования водного, теплового и питательного режима почв с целью значительного повышения урожайности сельскохозяйственных культур в Нечерноземной зоне необходимо дальнейшее расширение комплексных исследований, а также совершенствование методов гидрологического обоснования и мелиоративных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисовский М. А. Оценка влияния мелиорации на гидрометеорологический режим.— Юбилейное информ. письмо Рижской ГМО, 1972, № 4/66.— 25 с.
2. Зайдельман Ф. Р. Режим и условия мелиорации заболоченных почв.— М.: Колос, 1975.— 320 с.
3. Лундин К. П. Водные свойства торфяной залежи.— Минск: Урожай, 1964.— 211 с.
4. Маслов Б. С. Водный режим торфяных почв в летний период в условиях Мещерской низменности.— Почвоведение, 1961, № 3, с. 5.
5. Харченко С. И. Гидрология орошаемых земель.— Л.: Гидрометеоиздат, 1975.— 371 с.
6. Харченко С. И. Тепловоднобалансовый метод расчета водного режима (осушения и орошения почв) в Нечерноземной зоне.— Труды ГГИ, 1978, вып. 251, с. 3—25.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ

Значение данных об элементах водного баланса для изучения режима рек было понято более 300 лет тому назад, когда Пьер Перро [10] впервые сопоставил сток р. Сены с объемом осадков и пришел к выводу, что река в течение года выносит в море меньше воды по сравнению с количеством осадков, выпадающих на поверхность ее бассейна. Исследования и выводы Перро, подтвержденные впоследствии Э. Мариоттом и Д. Дальтоном, послужили основой изучения проблемы водного баланса. Эта проблема разрабатывалась на протяжении последних трех веков многими учеными.

Австрийским ученым А. Пенком [9] в 1896 г. было выполнено фундаментальное научное обобщение связи элементов водного баланса речных бассейнов, в основу которого были положены результаты исследований, производившихся в разных странах. Это позволило впервые в математической форме зафиксировать связь между осадками P , речным стоком Y и испарением E в виде трехчленного уравнения

$$P = Y + E. \quad (1)$$

В дальнейшем Е. В. Оппоков показал, что уравнение (1) справедливо лишь для среднего за многолетний период годового интервала времени. Применительно к конкретным периодам (год, сезон, месяц) отдельных лет его следует дополнить четвертым элементом ΔU , характеризующим изменение запасов воды в бассейне, т. е.

$$P = Y + E \pm \Delta U. \quad (2)$$

В результате использования уравнений (1) и (2) за ряд лет по отдельным речным бассейнам накапливались сведения об элементах водного баланса: осадках, стоке, испарении и общих изменениях запасов влаги в пределах изучаемой территории. Обобщение этих данных по отдельным речным бассейнам производилось

В. Уле, Р. Шрейбером, Х. Келлером и многими другими учеными. При этом, как правило, устанавливалась связь линейного или нелинейного вида между речным стоком и осадками, испарением и осадками. Указанные связи при недостаточном количестве пунктов гидрометрических наблюдений позволяли лишь косвенным путем определять сток и испарение по данным об осадках. Наиболее полное исследование вопроса о взаимосвязях стока, осадков и испарения было выполнено Э. М. Ольдекопом [3]. Им была предложена следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} E &= E_m \operatorname{th} \frac{P}{E_m}; \\ Y &= P - E_m \operatorname{th} \frac{P}{E_m}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где E_m — максимально возможное испарение (испаряемость).

Главной заслугой Ольдекопа явилось установление генетической формы зависимостей стока и испарения от осадков в нелинейном виде, а также введение нового параметра — максимально возможного испарения, регулирующего вид и положение конкретной кривой в их общей системе, описываемой выражением (3).

Э. М. Ольдекоп несколько преувеличивал возможности использования предложенных им уравнений для оценки испарения и стока с поверхности речных бассейнов за зимнее и летнее полугодия и отдельные месяцы, но тем не менее его разработки послужили основой для дальнейших исследований в области оценки зависимостей испарения и стока от осадков и некоторых других климатических факторов.

Эти исследования выполнялись в двух направлениях:

- 1) разработка схем оценки и подбор факторов, определяющих параметр E_m ;
- 2) совершенствование структуры системы уравнений связи стока и испарения с осадками и максимально возможным испарением.

В области первого направления к настоящему времени разработано несколько практических приемов по оценке параметра E_m [1, 4, 7 и др.]. Известно также несколько видов уравнений связи [1, 3, 7]. Однако следует отметить, что несмотря на ценность выполненных исследований до сих пор не разработана структура системы уравнений (3) и не получена схема расчета параметра E_m , что может существенно повысить точность расчета испарения и стока. Отдельные параметры уравнений связи, предложенных различными авторами, и сами уравнения физически недостаточно обоснованы. Кроме того, их трудно использовать для надежной оценки испарения и стока за короткие интервалы времени.

В настоящее время при наличии довольно густой сети гидрометрических пунктов наблюдений отпала необходимость в большинстве случаев определять сток по уравнению связи элементов водного баланса. Однако эти уравнения могут быть использованы

для решения ряда задач, а именно: 1) определения остальных элементов водного баланса; 2) оценки сработки влаги отдельных емкостей бассейна на сток и испарение; 3) моделирования значений элементов баланса и при оценке их ошибок; 4) оценки влияния агролесомелиоративных мероприятий на испарение и сток; 5) разработки теории воспроизводства и регулирования местных водных ресурсов в отдельных речных бассейнах.

Решение указанных задач может быть осуществлено лишь по теоретически обоснованным уравнениям связи, основывающимся на использовании полного уравнения водного баланса речного бассейна. Ниже излагаются исследования автора по данному вопросу, выполненные в 1975—1978 гг.

При построении указанных выше связей Э. М. Ольдекоп принял за основу уравнение водного баланса (1). Это уравнение справедливо для расчета средних многолетних годовых значений испарения или стока замкнутых речных бассейнов, но неприменимо для оценки испарения или стока за короткие интервалы времени, так как не учитывает изменения запасов воды в речном бассейне.

Для обоснования вида связи испарения или стока с осадками и максимально возможным испарением Ольдекоп дифференцировал уравнение (1) по переменной P :

$$\frac{\partial P}{\partial P} = \frac{\partial Y}{\partial P} + \frac{\partial E}{\partial P} = 1. \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что углы наклона касательных к кривым связи испарения (либо стока) и осадков $E=f(P)$ (либо $Y=f(P)$) имеют теоретические пределы изменения:

при $\frac{\partial E}{\partial P} = \operatorname{tg} \alpha_1 = 0 \quad \alpha_1 = 0^\circ,$

тогда

$$\frac{\partial Y}{\partial P} = \operatorname{tg} \alpha_2 = 1,0, \quad \alpha_2 = 45^\circ.$$

Наоборот, при

$$\frac{\partial E}{\partial P} = \operatorname{tg} \alpha_1 = 1,0 \quad \alpha_1 = 45^\circ, \quad \text{тогда} \quad \frac{\partial Y}{\partial P} = \operatorname{tg} \alpha_2 = 0, \quad \alpha_2 = 0^\circ.$$

Полученным предельным условиям, по мнению Ольдекопа, лучше всего удовлетворяет система кривых, описываемая выражением (3).

Исследования Ольдекопа, внесшие большой вклад в развитие гидрологической науки, имеют ряд недостатков:

а) система (3) основана на анализе водного баланса замкнутого речного бассейна, что справедливо лишь для среднего многолетнего годового периода. Она непригодна для оценки испарения и стока за конкретные интервалы времени отдельных лет;

б) параметр «максимально возможное испарение» E_m не обоснован с энергетической точки зрения. В рекомендациях по его

оценке Ольдекоп не опирался на молекулярно-кинетическую теорию [8 и др.]. Этот параметр был подобран эмпирически, исходя из наилучшего согласования результатов расчета по уравнению (3) с наблюдаемыми данными по режиму некоторых рек;

в) система уравнений (3), принятая Ольдекопом, при малых значениях отношения $\frac{P}{E_m}$ не переходит в уравнение (1). Действительно, при $\frac{P}{E_m} = 0,001 \div 0,15$

$$\frac{P}{E_m} = \text{th} \frac{P}{E_m}. \quad (5)$$

Тогда из уравнений (3) получим

$$E = P. \quad (6)$$

Таким образом, использование уравнений Ольдекопа без указанных дополнений может привести к систематическим ошибкам. Для устранения отмеченных недостатков, а также для применения уравнений (3) в гидрологической практике предлагается:

1. За основу интерпретации взаимосвязи элементов водного баланса принять детальное уравнение водного баланса, используемое в практике УГКС [2]. Это уравнение имеет следующий вид:

$$\underbrace{P_1 + \Delta M + \Delta U + \Delta S_c + \Delta S_p + \Delta S_{os} + \Delta S_6 + \eta}_{P} = Y + E. \quad (7)$$

Левая часть уравнения (7) характеризует общее накопление влаги (увлажнение) в бассейне (P), складывающееся из осадков P_1 , изменений запасов воды в почве (ΔM), водоносных слоях (ΔU), снеге (ΔS_c), русловой сети (ΔS_p), озерах и водохранилищах (ΔS_{os}), болотах (ΔS_6), невязки водного баланса η , состоящей из неучтенных элементов баланса и допущенных ошибок при определении его компонентов.

В зависимости от природных условий отдельных речных бассейнов общее увлажнение могут характеризовать не все элементы, входящие в формулу (7). В частности, в отсутствие на территории бассейна озер и водохранилищ, а также малых изменениях запасов воды в русловой сети и водоносных горизонтах за отдельные месяцы текущих лет значение P можно определять по выражению

$$P = P_1 + M_1 - M_2, \quad (8)$$

где M_1 и M_2 — запасы влаги в почве соответственно на начало и конец месяца.

В отсутствие осадков и поверхностного стока, а также при малых значениях рассмотренных выше элементов и больших значениях E_m за отдельные месяцы, значение P станет равным разности запасов влаги в почве на начало и конец месяца и фактически испарению с бассейна, т. е.

$$P \approx M_1 - M_2 = E. \quad (9)$$

На необходимость учета в уравнениях связи помимо осадков аккумуляционных составляющих водного баланса указали исследования А. А. Соколова [6], проанализировавшего зависимость стока текущих лет от осадков предшествующих им лет, а также исследования В. С. Мезенцева, И. В. Карнаевича и др.

2. В уравнения (3) необходимо ввести множителем параметр $\frac{P-Y}{P}$, с помощью которого при малых значениях отношения P/E_m предлагаемое уравнение взаимосвязи элементов водного баланса

$$E = \left(1 - \frac{Y}{P}\right) E_m \operatorname{th} \frac{P}{E_m} \quad (10)$$

сведется к уравнению (1).

3. Принять в качестве параметра E_m «максимальную скорость испарения», оцениваемую по формуле

$$E_m = \sqrt{\frac{RT}{6\pi\mu}} e^{-\left(2 + \frac{L\mu}{RT}\right)}, \quad (11)$$

где E_m — максимальная скорость испарения; R — универсальная газовая постоянная; μ — относительная молекулярная масса; T — температура испаряющей поверхности, в кельвинах; L — удельная теплота парообразования; $\pi = 3,14$. Формула (11) получена нами на основе применения молекулярно-кинетической теории [8] для оценки испарения воды.

Для оценки температуры испаряющей поверхности следует пользоваться рекомендациями М. И. Будыко (1971 г.).

Уравнение (10) при наличии измеренных или рассчитанных данных по радиационному балансу увлажненной поверхности, температуре и влажности воздуха, атмосферным осадкам, аккумуляционным элементам и стоку позволяет оценивать испарение с точностью, присущей методу водного баланса.

4. Для оценки испарения применительно к природным условиям СССР и получения зависимостей подземной и поверхностной составляющей речного стока от общей увлажненности бассейнов, а также для построения моделей, позволяющих определять роль отдельных элементов водного баланса в формировании стока и испарения, уравнения взаимосвязи между испарением, стоком и общей увлажненностью бассейна следует представить в виде

$$E = \left(1 - \frac{Y_{\Pi}}{P}\right) E_* \operatorname{th} \frac{P}{E_*}; \quad (12)$$

где Y_{Π} — поверхностная составляющая речного стока; E_* — отношение суммарной солнечной радиации к удельной теплоте испарения — параметр, приближенно характеризующий максимальную скорость испарения в реальных условиях. Параметр $\left(1 - \frac{Y_{\Pi}}{P}\right)$

Таблица 1

Испарение и невязки водного баланса для бассейна р. Дон — г. Георгиу-Деж за 1962 г., мм

Месяц	Автор расчетной схемы					По уравнениям (12)
	М. И. Будыко	Н. Н. Иванов	В. С. Мезенцев	А. И. Будаговский, В. Г. Андреев	Э. М. Ольдекоп	
Испарение						
V	85,0	94,5	91,0	86,5	93,0	101
VI	90,0	84,0	93,5	—	95,2	103
VII	74,0	71,0	75,0	73,0	77,0	80,5
VIII	75,0	71,0	80,0	74,6	82,5	88,4
Невязки						
V	16,5	7,0	10,5	15,0	8,5	0,5
VI	14,9	20,9	11,4	—	9,7	1,9
VII	6,7	9,7	5,7	7,7	3,7	0,2
VIII	16,1	20,1	11,1	16,5	8,6	2,7

Таблица 2

Водный баланс бассейна р. Сал — ст-ца Батлаевская за отдельные месяцы 1968 г., мм

Элемент	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
P_1	11,0	24,2	28,1	31,8	23,9	18,7	65,7	23,1
Y	1,5	1,6	1,4	1,4	1,6	1,4	1,4	0,7
Y_{II}	1,3	1,4	1,1	0,9	0,9	0,7	0,7	0,0
ΔM	-22	-31	-26	-14	0	-4	49	-2
ΔU	2,4	1,0	-3,6	-3,0	-2,8	-2,2	0,8	1,2
E_1	48	63	55	44	41	42	32	8
E_2	54	60	52	44	37	15	24	8
E_3	29,6	52,4	56,3	47,6	26,2	24,3	15,3	22,1
η_1	-18,9	-10,4	1,3	3,4	-15,9	-18,5	-17,5	15,2
η_2	-24,9	-7,4	4,3	3,4	-11,9	8,5	-9,5	15,2
η_3	-0,5	0,2	0,0	0,2	-1,1	-0,8	-0,8	1,1

Примечание. Здесь и в табл. 3 индексы при обозначениях E и η соответствуют следующим методам оценки испарения: 1 — А. Р. Константинова; 2 — испарителей ГГИ-500-100; 3 — уравнениям (12); 4 — теплового баланса; 5 — комплексному М. И. Будыко; 6 — испарителей ГГИ-Б-1000; 7 — испарителей ГГИ-3000.

для среднего многолетнего годового периода представляет собой, по существу, отношение «валового увлажнения» (по М. И. Львовичу) к общей увлажненности бассейна. Результаты оценки испарения и стока по уравнениям (12) несколько отличаются от значений, получаемых по уравнению (10). Однако эти различия очень невелики и существенно меньше по сравнению с аналогичными данными, получаемыми по уравнениям связи и различными известными методами оценки испарения. Сравнение значений испарения и невязок водных балансов, возникающих за счет оценки максимально-возможного испарения по расчетным схемам различных авторов и при использовании уравнений (12) приведены в табл. 1. В таблицы 2 и 3 помещены сведения о водных балансах двух реч-

Таблица 3

Водный баланс бассейна р. Гауя — г. Сигулда за отдельные месяцы 1974 г., мм

Элемент	V	VI	VII	VIII	IX	X
P_1	64	96	128	87	77	103
Y	17,5	9,95	20,8	20,4	9,80	29,7
Y_{II}	10,6	2,70	13,7	13,5	1,83	22,8
ΔM	-10	-41	7	25	1	36
ΔU	-6	-11	8	9	2	20
E_1	70	95	95	63	41	22
E_2	54	86	89	73	49	10
E_3	65,2	127,4	91,0	38,9	61,4	18,9
E_4	78,0	96,0	71,0	63,0	32,0	2,0
E_5	68,0	91,0	87,0	77,0	46,0	17
E_6	72,0	96,0	81,0	74,0	51,0	21,0
E_7	95,0	115	105	94	69	27,0
η_1	-7	43	-3	-30	23	-1
η_2	9	52	3	-20	15	11
η_3	-2,7	10,6	1,2	-6,3	2,8	-1,6
η_4	-15	42	21	-30	32	19
η_5	-5	47	5	-30	18	4
η_6	-9	42	11	-44	13	0
η_7	-32	23	-13	-61	5	-6

ных бассейнов за месячные интервалы времени отдельных лет, а также указаны невязки, возникающие за счет оценки испарения по современным расчетным схемам, используемым в гидрологической практике.

Данные таблиц 1—3 показывают, что для самых разных природных условий лучшую увязку водного баланса можно получить при оценке испарения по уравнениям (12).

Выше отмечалось, что уравнения взаимосвязи осадков, стока и испарения могут применяться для решения ряда гидрологических задач. При редкой сети гидрометрических пунктов наблюдений эти уравнения использовались ранее для оценки стока неизученных рек.

Для проверки точности определения стока по уравнениям (12) нами были оценены его значения для двух речных бассейнов:

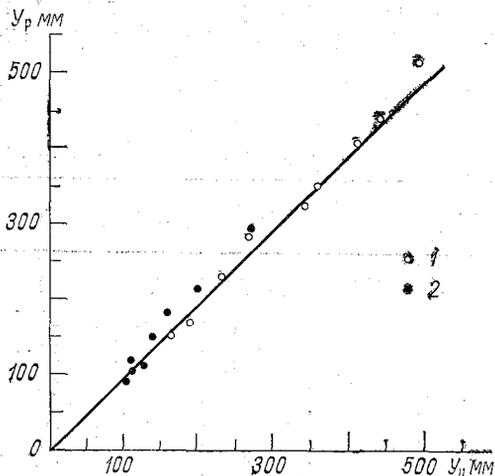


Рис. 1. Связи рассчитанных и измеренных значений стока.

1) р. Полометь — д. Дворец; 2) р. Ока — г. Кашира.

ного стока исходя из уравнений (12). При преобразовании уравнений (12) в степенной ряд получена формула для оценки подземной составляющей речного стока

$$Y_{\text{подз}} = Y - P + \frac{P - Y}{1 - 0,333 \frac{P^2}{E_*^2} + 0,133 \frac{P^4}{E_*^4} - 0,054 \frac{P^6}{E_*^6} + 0,022 \frac{P^8}{E_*^8}} \quad (13)$$

Числовые значения подземного стока, вычисленные по выражению (13), соответствуют значениям, полученным путем расчленения гидрографов методом К. П. Воскресенского.

Уравнения взаимосвязи элементов водного баланса, предложенные различными авторами, неоднократно представлялись графически. Одной из последних работ в этом направлении являются исследования, выполненные М. И. Львовичем, в которых даны

р. Полометь — д. Дворец за период с 1956 по 1967 г. и р. Ока — г. Кашира за период с 1966 по 1974 г. На рис. 1 приводится связь рассчитанных и измеренных значений стока. Полученная связь характеризуется коэффициентом корреляции, равным 0,95, что указывает на высокую надежность расчета стока.

Как известно, существует большое число схем расчленения гидрографов речного стока и его поверхностную и подземную составляющие [5]. Представляет большой интерес определение подземной составляющей речного стока

«структурные кривые» водного баланса для отдельных континентов.

Выполненные автором настоящей статьи исследования показывают, что для коротких интервалов времени отдельных лет графические зависимости элементов водного баланса носят более сложный характер. Нами построены кривые зависимости испарения и стока от осадков и максимально возможного испарения при значениях $\frac{Y_p}{P}$, равных соответственно 0,02; 0,05; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70; 0,80; 0,90 и 0,95.

На рис. 2 приводятся указанные системы кривых. Отношение $\frac{Y_p}{P}$ рассматривается как параметр, регулирующий распределение запасов влаги в отдельных емкостях бассейна на сток и испарение. Из рассмотрения указанных кривых следует, что для $\frac{Y_p}{P} = 0,10$ при $E_* = 200$ мм и $P = 150$ мм $E = 114$ мм, а $Y = 36$ мм.

При $\frac{Y_p}{P} = 0,30$ и указанных выше значениях E_* и P соответственно имеем: $E = 88,0$ мм, $Y = 62,0$ мм. Таким образом, увеличение отношения $\frac{Y_p}{P}$ в три раза приводит в данном случае к уменьшению испарения в 1,3 раза и к увеличению стока в 1,7 раза.

Системы кривых, показанных на рис. 2, могут быть использованы для оценки участия общего влагонакопления и испаряемости в формировании стока и испарения. Последнее обстоятельство позволяет производить приближенные оценки увеличения (уменьшения) стока под влиянием некоторых антропогенных факторов (искусственные осадки, регулирование температуры испаряющей поверхности, например путем затенения ее экраном от солнечной радиации и т. д.).

Система уравнений (12) может быть использована также для оценки влияния ошибок на точность расчета испарения. В указанную формулу следует подставлять наблюдаемые значения элементов, а также их значения с учетом задаваемых ошибок. В результате расчетов (моделирования) по этой формуле может быть определено испарение E при заданных ошибках. Полученные значения испарения следует сравнивать с его оценками E' , рассчитанными по исходным данным P , ΔM и ΔU . По разности значений E и E' можно найти ошибку оценки испарения (мм), которая обусловлена заданными ошибками. Результаты выполненных исследований по оценке влияния ошибок расчета элементов ΔM , ΔU и P на значение испарения на примере двух рек приводятся в табл. 4. Данные таблицы показывают примерное равенство ошибок в определении испарения и осадков за рассматриваемый интервал времени.

В отдельные месяцы весенне-летнего периода в ряде районов СССР наблюдается частичная сработка почвенных, грунтовых, озерных и болотных вод на сток и испарение. В том случае, когда

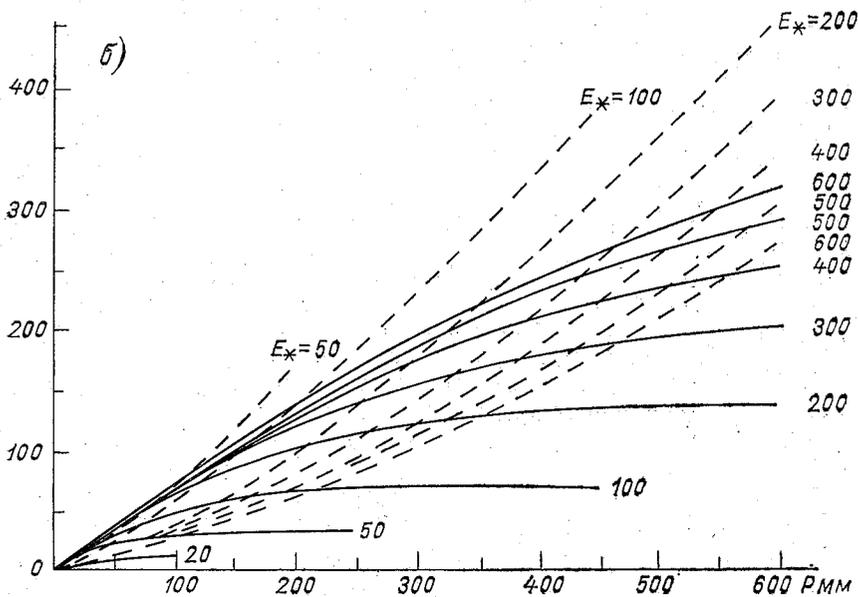
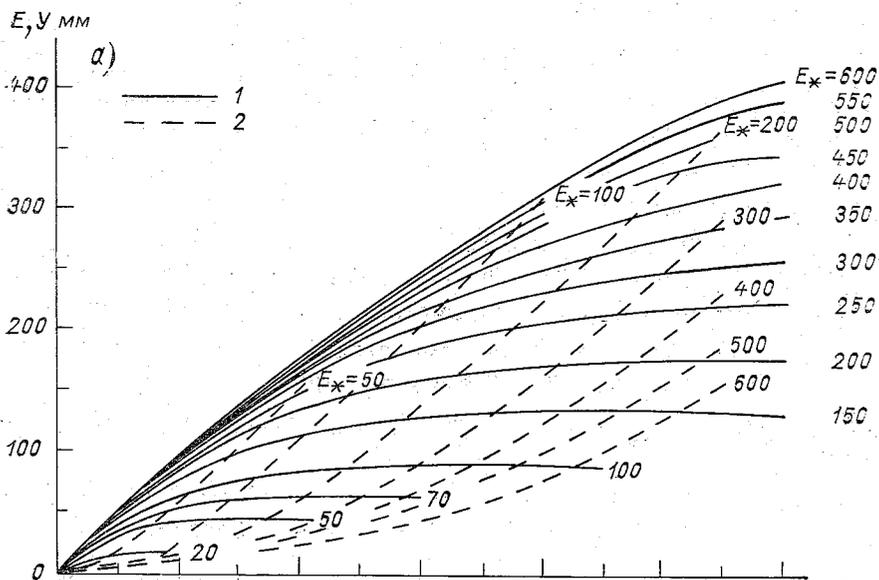


Рис. 2. Зависимости испарения E и стока Y от общего увлажнения бассейна P и максимально возможного испарения E_* .

а) $\frac{Y_{II}}{P} = 0,10$; б) $\frac{Y_{II}}{P} = 0,30$; 1 — система кривых испарения, 2 — система кривых стока.

Таблица 4

Ошибки определения элементов водного баланса P_1 , ΔM , ΔU , E за июнь 1974 г.

Характеристика	P_1	ΔM	ΔU	Ошибка рас- чета, E %
р. Днестр — г. Бендеры. $F=66\ 100\ \text{км}^2$				
Элемент, мм	87	-25	-25	
Ошибка определения элемента в сторону занижения, %	10	20	20	13,8
Ошибка определения элемента в сторону завышения, %	10	20	20	12,7
р. Гауя — г. Сигулда. $F=8510\ \text{км}^2$				
Элемент, мм	96	-41	-11	
Ошибка определения элемента в сторону занижения, %	5	10	10	5,5
Ошибка определения элемента в сторону завышения, %	5	10	10	4,8

знак указанных элементов отрицательный, их значения дополняют месячную сумму осадков до общего увлажнения, расходуемого на испарение и сток. Долю каждой аккумуляционной составляющей, а также месячной суммы осадков в формировании стока и испарения можно определить методом моделирования, используя систему (12). Для оценки расходования запасов влаги в почве, водоносных слоях и т. д., обозначаемых через ΔM , ΔU , $\Delta S_{\text{оз}}$, ΔS_6 на испарение значения указанных переменных поочередно исключаются из общего увлажнения бассейна P (см. формулу (7)). По уравнениям (12) каждый раз заново определяются испарение и сток. По разности сумм испарения, оцененных при использовании переменной, и ее значения, полученного при исключении отдельно взятого элемента, определяется его доля в формировании испаре-

Таблица 5

Участие атмосферных осадков P_1 , изменений запасов влаги в почве (ΔM) и водоносных слоях (ΔU) в формировании испарения E и стока Y для бассейна р. Гауя — г. Сигулда в 1974 г., мм

Месяц	В испарении			В стоке			Элемент баланса					
	P_1	ΔM	ΔU	P_1	ΔM	ΔU	P_1	Y	ΔM	ΔU	η	E
IV	7,0	7,4	6,6	0,0	19,6	8,4	7	29	-27	-15	-17	37
V	54,2	6,6	4,2	9,8	3,4	1,8	64	17	-10	-6	-7	70
VI	84,5	33,5	9,0	11,5	7,5	2,0	96	10	-41	-11	43	95

ния. Остальная часть запасов влаги идет на формирование стока. В табл. 5 на примере бассейна р. Гауя — г. Сигулда приводятся данные о доле отдельных элементов водного баланса в формировании стока и испарения.

Данные табл. 5 показывают, что за апрель—июнь доля осадков в формировании испарения колеблется от 85 до 100%, а в формировании стока — от 0 до 15%. Расход влаги из почвы на формирование испарения составляет 27—82% изменений их запасов, или 9—35% испарения. На формирование стока расходуется от 18 до 73% изменения запасов влаги в почве, что составляет 20—75% речного стока. Расход запасов подземных вод на испарение за указанные три месяца 1974 г. составил 44—88%, а на сток — 18—56% их изменений. Изменения запасов подземных вод, расходуемые на испарение, составляют 6—18% последнего. Расход запасов подземных вод на сток р. Гауи у г. Сигулды составил 10—23% речного стока. В тех случаях, когда аккумуляционные составляющие водного баланса имеют противоположные знаки, произвести отдельную оценку доли их расходования на сток и испарение затруднительно. В данном случае можно получить лишь доли суммарного значения аккумуляционных составляющих и осадков в формировании стока и испарения.

Анализ существующих уравнений взаимосвязи элементов водного баланса позволил вскрыть причины возможных ошибок в оценках испарения, определяемых по расчетным схемам различных авторов. В результате выполненных исследований получены усовершенствованные уравнения взаимосвязи элементов водного баланса типа уравнений Ольдекопа. Эти уравнения могут быть использованы для решения ряда научных и практических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будаговский А. И. Испарение почвенной влаги.— М.: Наука, 1964.— 243 с.
2. Методические указания ГГИ № 89.— Л.: Гидрометеоздат, 1974.— 96 с.
3. Ольдекоп Э. М. Испарение с поверхности речных бассейнов.— Юрьев: 1911.— 209 с.
4. Пенман Х. Л. Растение и влага.— Л.: Гидрометеоздат, 1964.— 112 с.
5. Попов О. В. Подземное питание рек.— Л.: Гидрометеоздат, 1968.— 291 с.
6. Соколов А. А. О типах речных бассейнов по характеру связи стока и испарения с осадками.— Сборник работ по гидрологии, 1959, № 1, с. 13—22.
7. Тюрк Л. Баланс почвенной влаги.— Л.: Гидрометеоздат, 1958.— 228 с.
8. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей.— Л.: Наука, 1975.— 592 с.
9. Penk A. Untersuchungen über Verdunstung und Abfluß von grösseren Landflächen.— Geogr. Abh., 1896, vol. 5, N 5.
10. Perrault P. De l'origine des fontaines.— Paris: Pirre de Petit, 1674.— 229 p.

В. Ф. Усачев

ПРИМЕНЕНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГИДРОЛОГИИ СУШИ

Аэрокосмические методы исследования в области земледельческих наук занимают особое положение; они применимы для решения ряда задач, стоящих перед гидрологией суши, и являются самостоятельной дисциплиной, имеющей свои специфические приемы исследования. Эти их особенности обуславливают принципиально новый подход к решению традиционных задач в области гидрологии суши.

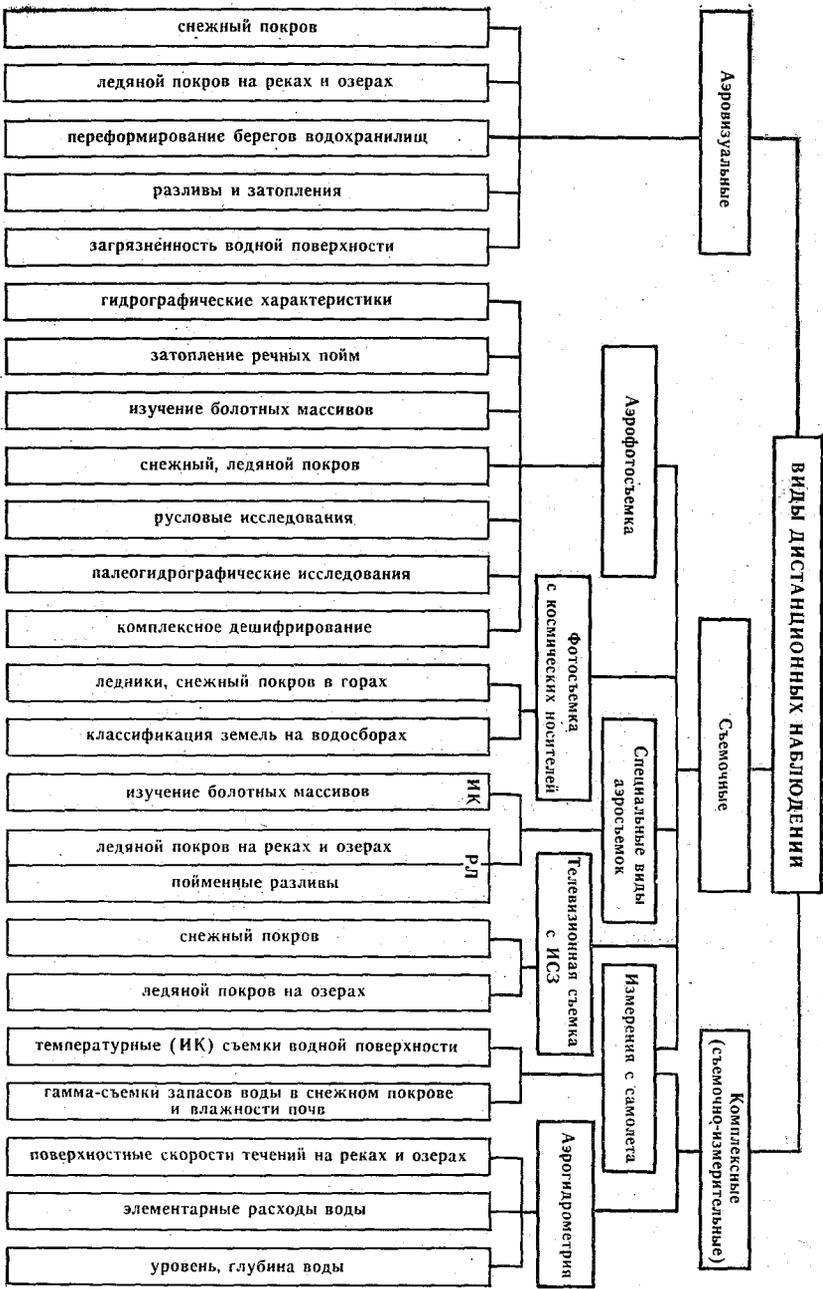
Довоенные годы можно считать временем начала использования аэрофотосъемочных и визуальных наблюдений с самолета для гидрологических целей. Тогда же выявились возможности использования авиации для специального целенаправленного изучения земной поверхности, в том числе и для географо-гидрологических исследований.

В последние 20 лет аэрометоды утвердились в смежных с гидрологией суши дисциплинах — геологии и гидрогеологии, геоботанике и почвоведении, океанологии и геокриологии. Одновременно с этим разрабатывались способы применения в гидрологии дистанционных средств. Основные направления разработок на каждом этапе развития были обусловлены потребностями текущей и хозяйственно-производственной деятельности.

Применяемые и разрабатываемые в настоящее время методы аэрокосмических исследований для гидрологических целей показаны на схеме. Можно выделить три основных вида дистанционных наблюдений: аэровизуальные, съемочные и комплексные, каждому из которых соответствует свой перечень определяемых или оцениваемых элементов гидрологического режима.

Перечислим кратко направления использования аэрометодов в гидрологических исследованиях:

- изучение гидрографических характеристик;
- изучение снежного покрова;
- оценка возможных потерь стока;



Современные направления использования самолетных и космических средств исследований для оценки гидрологических характеристик земной поверхности.

- определение по снимку направления и скорости течения воды в реках и на склонах водосбора по косвенным признакам;
- изучение деформаций речного русла;
- выявление по аэрофотоснимкам гидрологических свойств болот;
- изучение волнения водной поверхности;
- исследования переформирования берегов;
- количественная оценка гидрометрических данных (аэрогидрометрия);
- измерения с самолета температуры водной поверхности и запасов воды в снежном покрове;
- оценка затопления речных пойм по материалам последовательных аэрофотосъемок и аэрогидрометрии;
- определение толщины ледяного покрова;
- оценка шероховатости прирусловых образований по результатам анализа данных микрофотометрирования аэрофотоизображений;
- изучение наледей на основе материалов аэрофотосъемок;
- информация, получаемая с космических высот (также начинает внедряться в практику гидрологических исследований).

Научно-методическое обоснование и практическое применение указанных направлений весьма различны. Одни из них (ледовая авиаразведка, аэрогидрометрия) широко используются в практике наблюдений и оперативном обслуживании, другие (дешифрирование аэрофотоснимков с целью изучения русловых и пойменных процессов, для гидрологической оценки болот) обеспечивают получение исходного материала для научных исследований. Большая часть аэрокосмических методов исследований применительно к гидрологии находится в стадии методических разработок. Поэтому в данной работе рассмотрены лишь те из возможных направлений, которые могут найти практическое применение. В настоящее время пока нет ни одного полностью освоенного, изученного и разработанного направления использования аэрокосмической информации в гидрологических исследованиях. Исходя из этого могут быть выделены четыре основных пути развития аэрокосмических исследований для гидрологических целей:

- оперативные наблюдения, контроль и обслуживание (авиаразведка, аэрогидрометрия);
- стационарное и экспедиционное изучение малоисследованных территорий (например Казахстан, Курская магнитная аномалия, район трассы БАМ и др.);
- методические разработки, применение и оценка новых средств исследований;
- использование данных аэро- и космических наблюдений в фундаментальных гидрологических исследованиях (например, в изучении болот, русловых процессов и др.).

Современное использование аэро- и космической информации для решения задач гидрологии суши показано в табл. 1, которая может быть дополнена примерами практического использования

Основные направления современного использования аэрокосмических методов в гидрологических исследованиях

Вид фиксации	Аэрометоды	Космические методы
<p>Визуальные наблюдения</p> <p>Съемки в видимом диапазоне длин волн</p>	<p>Ледовая авиаразведка, картирование границ разливов, измерение высоты снега в горах по рейкам (с вертолета), дешифрирование аэрофотоснимков:</p> <p>а) определение скорости течения, глубин;</p> <p>б) изучение русловых процессов на реках, пойменных разливах, оценка состояния речных водосборов, сведения о режиме болот</p>	<p>Оценка состояния речных водосборов (снег, растительность, почвы), озер, рек, ледников, лавин</p>
<p>Инфракрасные съемки (1,8—5,3 и 7—14 мкм)</p>	<p>Оценка температурного режима болотных массивов и поверхностей речных водосборов</p>	<p>Установление температурных неоднородностей поверхностей</p>
<p>Приборное зондирование (микроволновая радиометрия и радарная индикация и т. п.)</p>	<p>Определение температуры водных поверхностей, запаса воды в снеге (гамма-съемки)</p>	<p>Определение температуры, влажности поверхностей</p>
<p>Сбор результатов наземных наблюдений</p>		<p>Осуществляется при оснащении наземной сети системами автоматического наблюдения и передачи результатов на спутник</p>

аэрокосмических средств для изучения основных элементов гидрологического режима.

Снежный покров. При изучении снежного покрова необходимо определить следующие характеристики: степень покрытия территории снегом, положение границы снежного покрова, высота снега, запасы воды в снежном покрове, загрязненность снега и фазовое состояние воды в снеге. Степень покрытия территории снегом и положение границы снежного покрова наиболее точно устанавливаются по материалам аэрофотосъемки. Более оперативно эти данные можно получить путем проведения аэровизуальных наблюдений. Для малозалесенных водосборов с площадями более 500 км² степень покрытия бассейна снегом и положение границы снежного покрова можно установить по материалам телевизионных съемок с ИСЗ «Метеор». Данные, получаемые по материалам аэрофотосъемки, оцениваются исходя из общих подходов к точности фотосхем и в основном определяются масштабом съемки, а также количеством и длиной маршрутов. Так как аэрофотосъемка обычно выполняется в масштабах от 1:25 000 до 1:100 000, а площадь водосбора может колебаться от 300 до 10 000 км², погрешность определения площади по материалам аэрофотосъемки будет находиться в пределах 5—15%.

На основании эмпирических оценок точности определения степени заснеженности водосборов по ТВ изображениям, получаемым с оперативной системы «Метеор», можно сделать следующие выводы:

— при использовании способов визуального дешифрирования и полуинструментального переноса результатов на карту для малозалесенного района при определении степени заснеженности речных водосборов (площадь 300—10 000 км²) можно ожидать погрешность 5—7% (относительно эталона, за который приняты данные аэрофотосъемки, перенесенные на карту масштаба 1:1 000 000);

— эквивалентная высота снеговой линии в горах может быть определена с точностью до 100—150 м.

Высота снежного покрова в настоящее время определяется аэровизуальным способом, путем снятия отсчета с заранее установленных снегомерных вех.

Запас воды в снежном покрове может быть определен по оценке ослабления естественного гамма-излучения Земли снегом (гамма-съемка с самолета). Этот способ применим только на равнине и дает средненное значение запасов воды в снеге по маршруту шириной до 100—250 м. Погрешность получаемых данных весьма различна: в устойчивые зимы без оттепелей — 15%, что составляет 10—12 мм, в период снеготаяния — 100% и более [2].

Для определения остальных характеристик снежного покрова дистанционными способами имеются только теоретические предположения.

Ледяной покров. Изучение ледяного покрова на реках и водоемах сводится к получению сведений о состоянии ледовой обстановки и распределении ледяных образований по площади, толщине

льда и высоте снега на нем. Для оценки ледовой обстановки на реках и озерах применяются аэровизуальные и аэрофотокосмические методы. Наибольшее применение в условиях оперативной работы УГКС нашел аэровизуальный метод картирования ледовой обстановки. Его точность вполне удовлетворяет запросам народнохозяйственных организаций. В последнее время разработаны приемы оценки ледовой обстановки по материалам съемок с метеорологических спутников «Метеор» [1], при этом может быть получена следующая ледовая информация:

— для малых озер в весенний период констатируется наличие или отсутствие льда;

— для средних озер и водохранилищ опознаются три состояния поверхности: ледяной покров, неполный ледостав, чисто;

— для больших озер возможна детализация состояния поверхности и картирование ледовой обстановки с выделением на ледяном покрове заснеженных и малозаснеженных участков, определение положения кромки припая и границы льдов, выделение участков с ледяными полями различной сплоченности.

Экспериментальные работы подтвердили правомерность сделанных выводов, в частности они позволяют рекомендовать информацию, полученную с ИСЗ «Метеор», для использования в оперативной работе УГКС. Анализ материалов подспутниковых съемок показал, что закономерности генерализации ТВ изображения по сравнению с мелкомасштабной аэрофотосъемкой таковы, что здесь проявляются структуры более высокого ранга. При этом на ТВ изображении нет заметных изменений фототона в изображении льда и можно проследить следующие текстурные и структурные особенности:

— заснеженный ледяной покров на аэрофото- и ТВ снимках изображается матовой белой текстурой;

— сплоченные ледяные поля (9—10 баллов) в зависимости от их цвета, формы и направленности трещин на аэрофотоснимках изображаются разнообразными структурами (как правило, неправильной геометрической формы), а на ТВ снимках — светлой матовой с более темными микрозернами (иногда определенной ориентировки) текстурой;

— ледяные поля (в смеси с битым льдом) сплоченностью 7—9 баллов придают ТВ изображению зернистую текстуру;

— большие ледяные поля сплоченностью 5—7 баллов изображаются на ТВ снимках в виде явно выраженной расплывчатой пятнистой структуры. Наиболее крупные из полей (размером более 2—3 элементов разложения) при соизмеримости их с разводами могут быть дешифрированы отдельно;

— малые ледяные поля и битый лед густотой (сплоченностью) 5—7 баллов придают ТВ изображению неопределенную размазанную пятнистость с соответствующим преобладанием темных или светлых текстур;

— чистая вода (большие полыньи, свободные ото льда участки озера) по ТВ снимку (особенно в зоне 0,8—1,0) опознаются легче,

чем по АФС. Здесь меньше сказывается влияние бликования;

— по ТВ изображению лучше, чем по аэрофотоснимку, дешифрируется генерализованный контур границы (кромки) льдов; на аэрофотоснимке множество деталей пограничной зоны затрудняет выделение основного контура.

Следующий вопрос, возникающий при изучении ледяного покрова,— это определение толщины льда. В настоящее время для ее измерения разрабатывается метод импульсного радиолокационного зондирования [6]. Возможность измерения толщины льда с самолета обуславливает чрезвычайно высокую производительность метода. Он основан на определении времени запаздывания радиоимпульсов, отраженных от нижней поверхности льда, по сравнению с импульсами, отраженными от его верхней поверхности. Возможность применения указанного метода основана на том, что диэлектрическая проницаемость пресноводного льда колеблется в сравнительно незначительных пределах. Поэтому толщина льда может быть определена непосредственно по разнице времени прохождения радиоимпульсов, отраженных от верхней и нижней его поверхности. При толщине ледяного покрова 0,50 м время запаздывания будет составлять 6 нс. Следовательно, прибор должен иметь такую разрешающую способность, чтобы измерять промежутки времени до 6 нс с необходимой точностью и оба импульса при минимальной толщине льда должны наблюдаться отдельно и отчетливо. Экспериментальные исследования показали, что точность единичного измерения толщины льда радиолокационным методом с самолета может быть не ниже ± 10 см.

Русловой процесс. При изучении русловых процессов необходимо использовать материалы аэрофотосъемки, аэрогидрометрии и космического фотографирования. Перечень вопросов, которые можно решать с привлечением аэрокосмической информации, весьма велик, поэтому назовем только основные из них: оценка плановых деформаций русла, определение типа руслового процесса, исследование русловых форм, получение морфометрических характеристик русел, исследование динамики затопления и опорожнения пойм, получение сведений о течении, его направлении и скоростях.

Оценка плановых деформаций русла проводится по материалам аэрофотосъемок, выполненных через определенный промежуток времени (несколько лет). Сопоставление аэрофотоснимков разных лет для больших по протяжению участков рек показало, что смещение бровок берегов в плане на средних и больших реках очень часто составляет 10—15 м/год [5]. Точность определения плановых смещений зависит от многих факторов: интервала времени между сопоставляемыми съемками, масштаба съемок, вида сопоставляемых материалов (фотоплан, фотоснимок, фотосхема), сроков выполненных аэрофотосъемок и их качества. Плановые смещения, определенные по одиночному нетрансформированному аэрофотоснимку, что наиболее часто имеет место в практической работе гидрологов, характеризуются низкой точностью при малых

плановых деформациях, определяемых за короткий период. Так, по материалам аэрофотосъемки масштаба 1 : 10 000 можно определять плановые смещения, характеризующиеся осредненным значением 5 м/год; при этом период сравнения должен быть не менее 50 лет, а максимальная ошибка в определении искомой величины будет не более 10%. Чем крупнее масштаб съемки и больше период сопоставления, тем можно точнее определить плановые деформации русла.

Тип руслового процесса целесообразнее определять по материалам средне- и мелкомасштабной аэрофотосъемки. Только наличие большого опыта позволяет объективно установить распространение тех или иных типов руслового процесса на исследуемом участке.

Использование аэрофотоснимков для морфометрических исследований руслового процесса помогло получить типичные количественные характеристики макроформ в русле; выявить разновидности меандрирования; создать расчетные формулы для определения предельных глубин размыва и намыва русла и значений смещения бровок подмываемых берегов; определить критериальные и осредненные гидроморфологические зависимости.

Исследование динамики затопления и опорожнения пойм имеет большое научное и практическое значение. Наиболее разработаны способы фиксации внешней картины разливов. Картирование последовательных стадий разливов при затоплении и опорожнении поймы может быть выполнено двумя способами. Сущность первого способа сводится к нанесению границ разливов на детальные топографические карты речной долины после выяснения гидрологических и гидравлических условий на конкретном участке и построения продольного профиля водной поверхности. Достаточно надежным и объективным способом учета всего многообразия факторов, влияющих на степень затопления поймы при прохождении волны половодья, является способ последовательных аэрофотосъемок затопленной поймы при паводках различной повторяемости [8]. Трудоемкость и большая стоимость производства площадных аэрофотосъемок затопленной поймы допускает применение этого способа лишь для небольших пойменных участков. Региональные исследования процесса затопления и опорожнения речных пойм на всем протяжении реки возможны лишь по материалам съемок с больших (космических) высот [7].

Современные ТВ и ИК изображения с ИСЗ «Метеор» мало пригодны для изучения пойменных разливов из-за низкой разрешающей способности. Повышение последней (до 20—50 м на местности) сделает их эффективным средством гидрологического изучения больших рек. Космофотоснимки пригодны для региональных исследований затопления речных пойм. Однако возможность получить серию таких снимков большой реки на всем ее протяжении в безоблачных условиях и в течение одного половодья маловероятна. Радиолокационные изображения речной долины с орбитальных высот — единственный надежный способ изучения

затопления речных пойм на всем протяжении реки. В настоящее время пока обоснована только принципиальная возможность получения таких изображений.

Сведения о течении воды получают аэрогидрометрическим способом [4]. Применительно к русловым исследованиям аэрогидрометрии позволяет изучать поле поверхностных скоростей течения как в русле, так и на пойме.

Изучение болот. Аэрофотосъемка — основной метод для производства типологического картирования болот и заболоченных земель. По этим материалам можно изучать индикационные свойства болотной растительности, растительный покров, структуру болотных массивов с различными формами обводненности поверхности, количественные гидроморфологические зависимости генезиса болотных массивов, гидрологические процессы в болотных массивах [3]. При изучении болот в основном использовались материалы массовой черно-белой аэрофотосъемки. По мнению Б. В. Виногорова, космические снимки (при использовании оптимальной методики и технологии) могут дать полезную информацию о структуре, составе, экологических условиях, обводненности, гидрографии, фенологии и картографии болотных массивов (масштаб съемки около 1 : 100 000), болотных систем (1 : 300 000), болотных ландшафтов (1 : 1 000 000) и болотных регионов (1 : 3 000 000).

Поверхностная скорость течения воды в реках и озерах может быть определена с самолета двумя способами. Наиболее широко применяется способ последовательного аэрофотографирования маркированной водной поверхности (уралиновые поплавки, льдины). Суть способа сводится к многократному фотографированию одного и того же участка реки или водоема, на поверхности которого имеются свободно плывущие поплавки. Они характеризуют скорость течения воды в слое, на который погружен поплавок. Обычно используются ураниновые поплавки, характеризующие скорость течения в десятисантиметровом поверхностном слое воды. Этот способ позволяет измерять с самолета скорости течения на реках шириной более 50 м. Погрешность определения поверхностных скоростей течения при соблюдении основных требований выполнения летно-съёмочных и камеральных работ составляет 5—7% при скоростях течения более 0,30 м/с и 10—15% при малых скоростях. Следует с особой осторожностью относиться к измеренным скоростям менее 0,10 м/с, так как применяемые на практике методы измерений и камеральной обработки не гарантируют требуемой точности.

Способ последовательного фотографирования ураниновых поплавков пока еще имеет ограничения при применении для условий турбулентных потоков с большими скоростями течения при съемке в мелком масштабе, для речных потоков, на которых отмечается большое количество пены на поверхности, а также для потоков с резкой косоструйностью течений. Однако несмотря на некоторые недостатки этот способ нашел широкое применение при работах на реках Севера СССР, Сибири и Дальнего Востока, особенно

в паводочные периоды. Он наиболее эффективен в условиях комплексного применения авиации в гидрологических исследованиях на заранее подобранных участках работ.

Существует также стереоскопический способ определения скорости течения. Суть его сводится к получению стереопары снимков маркированной водной поверхности. При восстановлении стереоскопической модели по паре аэрофотоснимков лучи, проектирующие эти смещенные детали, в зависимости от направления съемки пересекутся выше или ниже физической поверхности воды. Поэтому при стереоскопическом рассматривании видимая поверхность воды должна казаться выпуклой или вогнутой, причем это кажущееся отличие ее поверхности от плоскости будет пропорционально скорости течения. Этим способом теоретически можно определить скорость течения с погрешностью $\pm (1,5-2,0) \%$, но практически он применяется очень редко. Принципиально важное значение метода — в фиксировании мгновенного поля скоростей в пределах участка водотока, покрываемого стереоскопической парой снимков. Ни один из существующих методов не может обеспечить такой наглядной и богатой подробностями картины скоростного поля в виде пространственной эпюры поверхностных скоростей.

Расход воды. Интеграционный способ определения расхода воды аэрометодом был предложен Б. К. Малявским в 1960 г. Идея способа основана на известном в гидрометрии принципе поплавка-интегратора. Элементарный расход воды q можно получить, зная снос поплавка от вертикали s и его подъемную скорость v_n , по формуле

$$q = v_n s.$$

Если вдоль створа разместить несколько устройств, осуществляющих выпуск поплавков, и засекаать места выхода этих поплавков на поверхность воды, то можно получить в плане эпюру расходов в некотором масштабе.

Эти измерения несложно произвести с помощью аэрометодов, фотографируя места выхода жидких поплавков-интеграторов, поднимающихся со дна реки из гидробомб, предварительно сброшенных с самолета. Погрешность определения расходов воды этим способом, по мнению автора, не превышает $8-10\%$, однако экспериментальные работы, проведенные ГГИ под руководством В. А. Урываева, показали, что погрешности могут быть более значительными. В дальнейшем в ГГИ проводились разработки по совершенствованию данного способа. Наибольшая трудность состоит в отыскании наиболее удачного интегратора, который имел бы малую скорость всплытия, был компактным и хорошо дешифрировался на аэрофотоснимке. В последнем варианте, на котором закончились разработки ГГИ, использован принцип двойного интегрирования [9]. В качестве интегратора (от поверхности воды до дна) используется само устройство; после достижения им дна интегратором служит всплывающая смесь масла и солянки, выходящая из устройства. Съемочные работы включают двухкратную

аэрофотосъемку участка реки. Метод двойного интегрирования в основном применим для открытых русел больших рек. Погрешность метода (при одноразовом измерении на створе) в зависимости от параметров аэрофотосъемки составляет 5—10%. Однако данный метод не нашел широкого применения на сети управлений Госкомгидромета вследствие недоработок методического характера и несовершенства конструкции (каждое устройство снабжено 1 л смеси солянки с маслом, которые загрязняют воду).

Метод смешения, опробованный в ГГИ с самолета, подобен наземному, только все операции и измерения выполняются с воздуха. В качестве красителя можно использовать уранин. Фиксация концентрации красителя в воде производится с помощью специально сконструированного для этой цели (точнее для зоны максимальной спектральной яркости уранина) телефотометра. Экспериментальные проверки метода показали очень большие расхождения в данных, полученных авиационным методом смешения и наземными измерениями. Требуются дополнительные методические доработки этого метода с тем, чтобы его можно было рекомендовать для практических целей.

Остальные параметры водных объектов, такие, как глубина воды, профиль поперечного сечения русла, уровень воды, уклон водной поверхности, шероховатость прирусловых образований, температура воды на поверхности, определяются с применением аэрометодов пока еще в экспериментальном порядке.

Обобщив возможности аэрофотосъемки и аэрогидрометрии для изучения элементов режима вод суши, отметим, что к настоящему моменту можно получать и оценивать следующие параметры:

- скорость перемещения льда на реках с погрешностью 1—2%;
- поверхностные скорости течения воды в реках, озерах и водохранилищах с погрешностью 1,5—2%;
- глубину воды различными способами с погрешностью 3—10%;
- расход воды на реках интеграционными способами (с погрешностью до 10%) и по поверхностным поплавкам (с погрешностью 2—17%);
- температуру поверхности воды на больших озерах с точностью 0,2—0,4°C;
- линейные размеры переформирования берегов водохранилищ с точностью 1—3 м;
- степень покрытия территории снегом в равнинных районах с точностью 20%;
- запас воды в снежном покрове (гамма-съёмка) с погрешностью 15—100%.

Выяснено, что материалы космической телевизионной и фотосъемки пригодны для картирования границы снега на равнинных водосборах (с погрешностью ± 35 км); высоты снеговой линии в горах (по фотосъемкам с точностью до 80—100 м), ледового состояния крупных и средних озер и водохранилищ.

Следует сказать, что возможности использования в гидрологии даже существующей в настоящее время аэрокосмической информации еще полностью не реализованы. Поэтому на основании современной информации с учетом ее совершенствования можно наметить следующие направления исследований на ближайшие годы:

1) совершенствование существующих и разработка новых методов аэрогидрометрии (измерение скоростей течения воды, глубин, расходов воды);

2) исследования с целью повышения точности самолетных гамма-съемок снежного покрова и влажности почв;

3) освоение и дальнейшая разработка радиолокационного способа измерения толщины льда и мощности наледей с воздуха;

4) разработка дешифровочных признаков различных гидрологических элементов на материалах крупно- и мелкомасштабной аэрофотосъемки (наледи, снежный и ледяной покров, зоны загрязненности и мутности, косвенные признаки наличия подземных вод и пр.);

5) выявление возможностей многочастотной радиолокационной аэрофотосъемки для оценки шероховатости речных пойм и картирования пойменных разливов;

6) обнаружение индикационных признаков стоковоактивных, пассивных и нейтральных участков на поверхности речного водосбора по материалам самолетной и космической фотосъемки;

7) дешифрирование многозональной космической телевизионной и фотосъемки с целью определения:

а) глубин и зон мутности на крупных водных объектах;

б) количественных характеристик гидрографической сети и объемов ее пополнения в различные фазы режима для целей оценки водных ресурсов и прогноза их режима;

в) оценки состояния и изменения во времени поверхности водосборов, степени их увлаженности, термических условий, ландшафтных характеристик и результатов хозяйственной деятельности;

г) характеристик снежного покрова на водосборах и ледового режима водных объектов;

8) выявление возможностей использования в гидрологических целях результатов инфракрасной съемки, активной и пассивной радиолокации, микроволновых многочастотных съемок и измерений;

9) разработка аналоговых и цифровых устройств для анализа и преобразования видеoinформации, прикладное освоение техники микрофотометрирования;

10) наземные, самолетные и космические исследования водно-физических свойств земных покровов и их влияния на спектрально-отражательные характеристики с целью обеспечения надежного дешифрирования и решения обратных задач (по результатам съемок оценивать водно-физические свойства водосборов и их частей).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Временные методические рекомендации по использованию спутниковой информации в оперативной практике гидрометслужбы. Оценка ледовой обстановки озер и водохранилищ/Под ред. В. В. Куприянова.—Л.: Гидрометеоздат, 1978.—42 с.
2. Исследования методов, аппаратура и точности определения запасов воды в снежном покрове.—Л.: Гидрометеоздат, 1969.—180 с.—(Труды ГГИ. Вып. 178).
3. Кудрицкий Д. М. и др. Основы гидрографического дешифрирования аэроснимков/Д. М. Кудрицкий, И. В. Попов, Е. А. Романова.—Л.: Гидрометеоздат, 1956.—275 с.
4. Методические рекомендации по измерению расходов воды рек аэрометодами/Под ред. В. В. Куприянова.—Л.: Гидрометеоздат, 1974.—134 с.
5. Попов И. В. Исследование закономерностей развития руслового процесса по аэрофотоснимкам.—Труды ГГИ, 1977, вып. 232, с. 125—150.
6. Применение радиолокационного метода при измерении толщины ледяного покрова рек, озер и водохранилищ/А. Н. Чижов, В. Г. Глушнев, Б. Д. Слуцкер, В. В. Бородулин.—Труды ГГИ, 1977, вып. 245, с. 3—29.
7. Прокачева В. Г., Усачев В. Ф. Некоторые проблемы изучения затоплений речных пойм аэрокосмическими методами.—Труды ГГИ, 1975, вып. 205, с. 40—54.
8. Усачев В. Ф. Применение последовательных аэрофотосъемок для исследования процесса затопления пойм.—Труды ГГИ, 1972, вып. 190, с. 57—71.
9. Шариков Ю. Д., Васехина Н. А. Интеграционный способ измерения расходов воды на реках с самолета.—Труды ГГИ, 1977, вып. 232, с. 70—76.

В. В. Куприянов

ВОДНЫЙ БАЛАНС ГОРОДОВ И УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Одной из наименее разработанных проблем гидрологии является вопрос оценки влияния урбанизации и промышленного развития на гидрологический цикл, режим и качество вод. Вместе с тем убыстряющийся процесс урбанизации и развития промышленности все более нарушает природный влагооборот, что обуславливает частичное преобразование водных ресурсов. В связи с этим перед гидрологической наукой возникают новые задачи по развитию теории, раскрывающей закономерности гидрологических процессов, происходящих в городах и зонах их влияния, выдвигаются задачи разработки новых методических подходов к моделированию и расчетам происходящих изменений гидрологического цикла.

Основой гидрологических расчетов для урбанизованных территорий является метод водного баланса, структура и особенности которого рассматриваются в данной статье.

Структура водного баланса

Водный баланс территории, подвергшейся урбанизации, претерпевает большие структурные изменения как в расходной, так и в приходной части. На рисунке приведены схемы водного баланса территории до урбанизации и после застройки и создания системы водопользования, обеспечивающей коммунально-бытовые и хозяйственные потребности населения. Приведенный баланс урбанизованной территории в значительной мере схематизирован и не отражает всех возможностей изменений, связанных с конкретными природными условиями и системами водопользования.

При составлении многолетних балансов и расчете вероятных изменений водных ресурсов на перспективу следует учитывать, что увеличение осадков в районах расположения больших промышленных городов может достигать 5—10%; следовательно, примерно на эту же величину можно ожидать увеличения средних

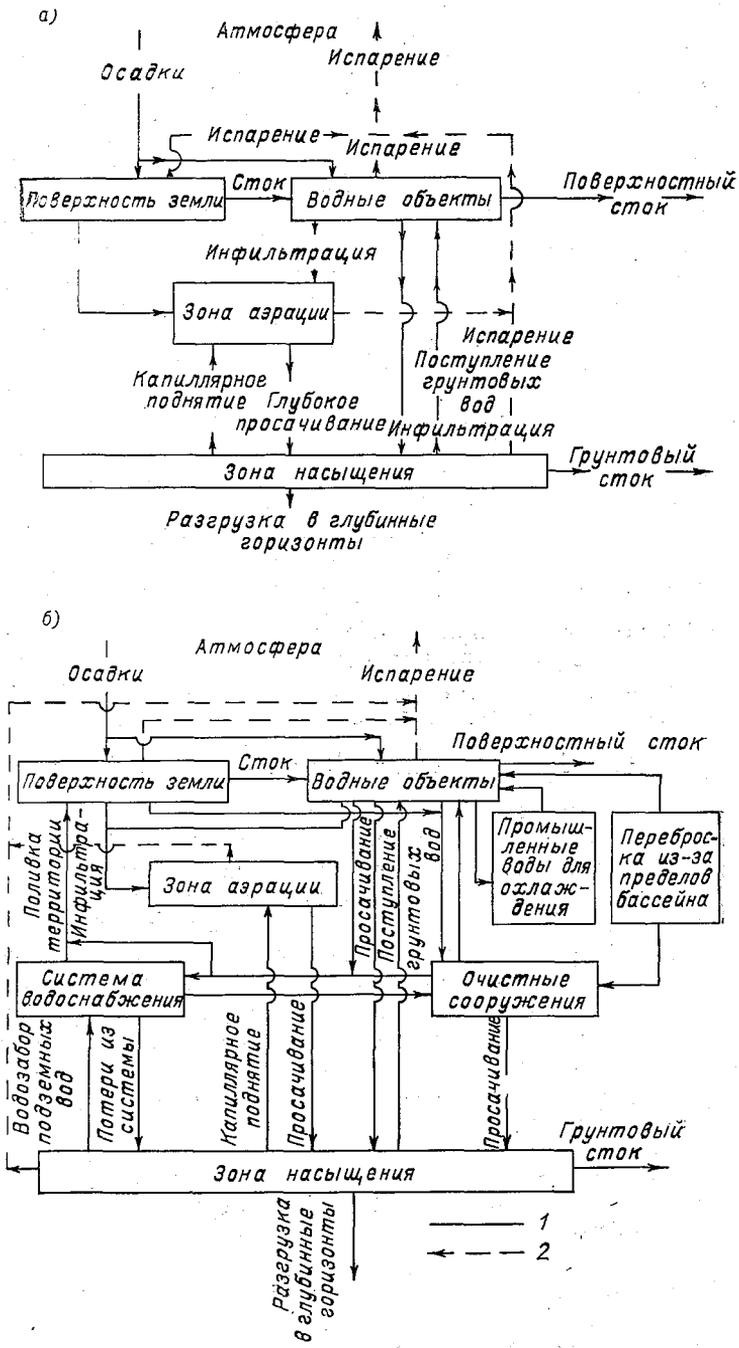


Схема водного баланса территории до урбанизации (а) и после нее (б).

1 — поступление воды; 2 — расход воды на испарение.

многолетних значений стока. Там, где преобладают твердые осадки, в данные водного баланса не следует вводить поправки, так как различия в количестве выпадающих осадков в городе и вне зоны его влияния не выявлены. Однако при расчетах водного баланса городов, расположенных в зоне тундры и степных районах, следует учитывать влияние метелевого переноса снега. За счет ветрового надувания общие снегозапасы в городах в зоне тундры на 50—80% больше, чем в открытой прилегающей к ним местности. Что касается суммарного испарения с урбанизированной территории, то имеющиеся данные исследований недостаточны для выявления количественных значений, которые могли бы быть включены в расчеты водного баланса. По-видимому, различия в суммарном испарении с урбанизированных и неурбанизированных территорий зоны избыточного увлажнения находятся в пределах точности расчета. В засушливой зоне недостаточного увлажнения испарение с городской территории в целом может быть значительно выше, чем с окружающей местности. Однако это предположение требует дальнейшей разработки и постановки экспериментальных исследований.

В общем виде водный баланс любой территории можно представить в виде равенства $\sum_{i=1}^n Q_i - \sum_{j=1}^m Q_j = \Delta$, в первой сумме которого складываются все приходные, а во второй — все расходные статьи баланса. Уравнение водного баланса реки, пересекающей урбанизированную территорию, для естественных условий упрощенно может быть записано в виде

$$Q_n + Q_{пр} + Q_{п} + Q_{ос} - Q_k - Q_{и} - Q_{ф} = \pm \Delta, \quad (1)$$

где Q_n — расход воды по основному руслу во входном створе; $Q_{пр}$ — расход притоков на расчетном участке; $Q_{п}$ — поступление воды в русло реки из подземных водоносных горизонтов; $Q_{ос}$ — жидкие и твердые осадки, выпадающие на поверхность основного русла и гидравлически связанных с ним водоемов; Q_k — расход воды в замыкающем створе; $Q_{и}$ — испарение и транспирация с русла и связанных с ним водоемов и затопляемых участков берегов; $Q_{ф}$ — фильтрация влаги в подземные водоносные горизонты.

Для урбанизированной территории в суммы Q_i и Q_j помимо указанных выше элементов входят составляющие, связанные с переброской вод в пределы бассейна и используемые для нужд населения и промышленности.

Часто уравнение баланса включает также такие элементы, как отвод отработанных вод за пределы урбанизированной территории, вывоз снега с городской территории, безвозвратные потери в водораспределительной и сбросной системах и другие элементы, связанные с особенностями системы водопользования. Перечень приходных и расходных элементов водного баланса урбанизированной территории приведен в табл. 1. Для удобства рассмотрения общих закономерностей процесса введена сквозная нумерация элементов баланса, по которой Q_1, Q_2, \dots, Q_8 — приходные элементы,

Основные элементы руслового водного баланса урбанизированной территории

Приходные	Расходные
Q_1 — расход в верхнем створе на границе урбанизированной территории	Q_9 — расход в нижнем створе реки на границе территории
Q_2 — расход притоков, впадающих на урбанизированной территории	Q_{10} — забор воды из водных объектов
Q_3 — сток поверхностных вод непосредственно в русло (не учитываемый притоками и дренажно-ливневой канализацией)	Q_{11} — забор подземных вод, гидравлически связанных с рекой
Q_4 — приток за счет руслового регулирования (для балансов за короткие промежутки времени)	Q_{12} — отвод сбросных вод за пределы территории
Q_5 — поступление вод в русло из подземных водоносных горизонтов (включая береговое регулирование и подрусловой сток)	Q_{13} — расход за счет руслового регулирования (для балансов за короткие промежутки времени)
Q_6 — переброска воды из-за пределов водосбора в реки, водоемы или непосредственно в системы водоснабжения	Q_{14} — фильтрация из русел и гидравлически связанных водоемов (включая береговое регулирование)
Q_7 — атмосферные осадки в русловую сеть и водоемы, гидравлически связанные с рекой	Q_{15} — потери на фильтрацию из системы водоснабжения
Q_8 — сброс отработанных вод	Q_{16} — испарение с русел и водоемов, гидравлически связанных с рекой
	Q_{17} — безвозвратные потери на испарение в системе водопользования

Примечание. В ряде случаев водный баланс можно более наглядно представлять не в расходах Q , а в объемных величинах W , что и имеет место в некоторых приведенных ниже расчетах. При этом нумерация приходных и расходных составляющих оставлена без изменений.

а $Q_9, Q_{10}, \dots, Q_{17}$ — расходные. Весьма важной чертой водного баланса урбанизированной территории (города) является присутствие в его расходной части элементов, характеризующих дополнительные потери в системе водопользования. Часть этих потерь является безвозвратными за счет появления новых источников испарения, другая часть расходуется на инфильтрацию и питание подземных вод и поступает в водные объекты за пределами рассматриваемой территории. Применительно к коротким промежуткам времени невязки баланса могут быть незначительными. Однако однонаправленность процесса приводит в конце концов к серьезным преобразованиям (часто отрицательным) гидрологического цикла. Например, включение в систему водопользования подземных вод с последующим сбросом отработанных стоков в реки может существенно не сказаться на их суммарном стоке. Однако постоянный забор подземных вод часто полностью не компенсируется естественным процессом влагообмена, что приводит к образованию все увеличивающейся депрессионной воронки, просадке грунта, нарушению системы водоснабжения и канализации и к другим

отрицательным последствиям. Представленные в табл. 1 основные элементы водного баланса не являются исчерпывающими и в зависимости от системы водопользования и природных особенностей могут выступать в различных комбинациях и исключаться или дополняться.

В ряде случаев существенную роль в балансе и перераспределении его элементов играет вывоз снега за пределы города на участки, с которых вода не поступает на рассматриваемые отрезки реки. В районах многолетней мерзлоты в структуре баланса большое значение имеют процессы наледообразования, протаивания грунтов, использования межмерзлотных вод. В некоторых случаях осязаемую роль в балансе играют процессы конденсации влаги из воздуха. В пустынных районах опреснение засоленных грунтовых вод с последующим использованием их для водоснабжения определяет специфические черты водного баланса города и его влияния на окружающую среду. Процессы захоронения поверхностных вод с последующим их использованием, опреснение морских вод и сбросы использованных вод непосредственно в море придают свои особенности приходным и расходным элементам баланса, их соотношениям, а также объему и изменению во времени безвозвратных потерь. Специфичной является динамическая структура водного баланса городов на пойменных землях, связанная со сложной системой водопользования и мелиорацией земель, меняющих свои водно-физические свойства во времени. Можно привести еще много примеров особенностей водного баланса и входящих в него элементов для отдельных городов, однако приведенный в таблице перечень основных приходных и расходных составляющих баланса позволяет судить о его общей структуре. Применительно к конкретным условиям эта структура будет изменяться за счет уменьшения входящих в нее членов или добавления элементов, отражающих приходные составляющие баланса.

В зависимости от наличия водных источников, объема и режима водопотребления можно выделить несколько основных структур водного баланса урбанизированной территории.

1. Водозабор осуществляется из источника поверхностных вод (река, озеро, водохранилище), а отработанные воды сбрасываются в этот же водный объект в пределах урбанизированной территории. Тогда применительно к реке в приходной части баланса будет отсутствовать член Q_6 , а в расходной — Q_{12} .

В этом случае расход воды в замыкающем створе будет меньше на потери на испарение, главным образом в системе очистных сооружений, и на ту часть потерь на инфильтрацию в водораспределительной и канализационной системах, которая не поступает обратно в реку на рассматриваемом водосборе.

Следует заметить, что различия в расходах воды во входном и выходном створах часто находятся в пределах точности определения их современными гидрометрическими методами. Тем не менее, как указывалось выше, учет возможных измерений является

крайне необходимым ввиду однонаправленности процесса изменений отдельных элементов водного баланса.

2. Водозабор осуществляется за счет подземных вод, сброс отработанных вод происходит в реку (наиболее распространенный вид водопользования). В этом случае приходная часть баланса остается без изменений, а в расходной не будут участвовать члены Q_{10} и Q_{12} . Баланс в замыкающем створе увеличится на значение водозабора Q_{11} за вычетом безвозвратных потерь в системе водопользования.

Увеличение стока в водоприемнике (реке) представляет собой в данном случае явление отрицательное. Забор подземных вод на водоснабжение, особенно в больших городах, полностью не компенсируется, образуется депрессионная воронка, приводящая к истощению запасов вод, оседанию грунтов, разрушению зданий, коммуникаций и нарушениям системы водоснабжения. Как правило, доля безвозвратных потерь, связанных с инфильтрацией (Q_{14} и Q_{15}), в данной системе водного баланса имеет большее значение, чем в рассмотренном выше примере забора подземных вод.

3. Водоснабжение производится за счет переброски воды из-за пределов местных источников, осуществляемой по каналам в реки или водохранилища (наиболее распространенный вид) либо по трубопроводам. Отработанные воды сбрасываются в водные объекты на урбанизированной территории или отводятся за ее пределы.

По сравнению с предыдущими схемами баланса вводятся дополнительные члены, учитывающие потери, связанные с переброской и отведением вод (испарение с водной поверхности и русловые потери на инфильтрацию).

4. Смешанные системы: а) местные источники водоснабжения (использование подземных и поверхностных вод в различных соотношениях); сброс в реки или водоемы в пределах урбанизированной территории или за ее пределами; б) различное соотношение местных источников водоснабжения с переброской стока из-за пределов урбанизированной территории. То же относится и к сбросам вод, которые могут осуществляться в местные водные объекты или отводиться за границы урбанизированной территории. Примером смешанной системы водопользования является г. Минск, для которого расчеты водного баланса приведены ниже.

Основой для составления водных балансов являются данные: а) гидрометрических измерений на водных объектах; б) наблюдений или расчета изменений запаса подземных вод; в) учета количества забираемой и сбрасываемой воды из разных источников водоснабжения водопользователями. Кроме того, в зависимости от типа водного объекта, особенностей долины и поймы используются данные специальных воднобалансовых наблюдений. При отсутствии воднобалансовых и гидрологических наблюдений соответствующие элементы водного баланса могут быть определены расчетными методами. Для точного расчета водного баланса необходимы материалы непосредственных измерений составляющих его

элементов. Особенно это касается гидрометрических измерений в русле водоприемника, заборов и сбросов вод. Однако не всегда можно получить достаточные и точные данные измерений, и тогда для примерных расчетов пользуются косвенными методами определения, позволяющими оценить в первом приближении значения отдельных элементов, их соотношение и изменение во времени.

Не касаясь изложения обычных методов определения стока во входном, выходном створах и на впадающих притоках, ниже рассмотрим примеры определения некоторых составляющих водного баланса, по которым наиболее сложно получить данные непосредственных измерений.

Сток непосредственно в русле основной реки, не перехватываемый притоками и не учтенный в дренажно-канализационной системе. Поверхностный сток дождевых вод в руслах рек или отдельных дренах в ряде городов представляет собой существенный элемент водного баланса. Для количественного определения объема стекаемой воды необходимо выделить и определить площади стока с различными покрытиями поверхности. Суммарный коэффициент стока со всей территории, примыкающей к реке, даже при высоком проценте застройки и наличии водонепроницаемых покрытий составляет примерно 0,4—0,6 объема жидких осадков. Такой низкий коэффициент поверхностного стока объясняется тем, что значительная часть стекающих дождевых вод перехватывается газонами, прибрежной полосой реки и другими участками, перемежающимися со строениями и водонепроницаемыми покрытиями.

Русловое регулирование заключается в накоплении воды в русле, на пойме и в водохранилищах при подъеме уровня и отдаче ее при спаде. Учет этого фактора имеет значение при расчетах баланса за сезоны и более короткие отрезки времени. С удлинением расчетного периода до года, когда цикл «наполнение—опорожнение» русловой емкости обычно завершается, русловое регулирование приближается к нулю. Расчет расходов воды ($\text{м}^3/\text{с}$) при русловом регулировании в общем виде производится по формуле

$$Q_{p.p} = \frac{\Delta W}{86\,400T}, \quad (2)$$

где $\Delta W = W_n - W_k$ — изменение объема (м^3) на участке реки за расчетный интервал времени T (сут).

Приближенный расчет может быть также произведен по формуле

$$Q_{p.p} = \frac{0,5 (\Delta H_v - \Delta H_n)}{86\,400T} A_v, \quad (3)$$

где ΔH_v и ΔH_n — изменение уровней воды (м) соответственно в верхнем и нижнем створах участка за расчетный интервал времени T ; A_v — площадь водной поверхности (м^2) на участке, соответствующая среднему уровню H_{cp} или среднему расходу воды Q_{cp} на рассматриваемом участке реки.

Водообмен между рекой и водоносными горизонтами. Основными видами водообмена между рекой и водоносными пластами, учитываемыми в уравнениях баланса членами Q_4 , Q_5 , Q_{13} , Q_{14} , являются приток подземных вод в реку, потери русловых вод на фильтрацию и подрусловой сток. Необходимость введения в уравнение баланса той или иной составляющей определяется типом взаимосвязи речных и подземных вод на изучаемом участке реки или речной системы.

По взаимодействию реки с водоносными пластами могут быть выделены следующие четыре типа участков рек:

- 1) участки с постоянным притоком подземных вод в течение года;
- 2) участки с постоянным оттоком русловых вод в течение года;
- 3) участки с чередованием периодов притока подземных вод в реку с периодами потерь русловых вод. Такое чередование может отмечаться во время половодья и паводков (так называемое явление берегового регулирования), а также в другие периоды, когда соотношение уровней речных и подземных вод обуславливает изменение направления водообмена (например, падение уровня грунтовых вод в приречной зоне в межень ниже отметки уровня воды в реке);
- 4) участки с подрусловым стоком.

Выделение воднобалансовых участков с соблюдением требования однородности каждого из них по типу взаимодействия речных и подземных вод позволяет подойти к расчету баланса за отдельные промежутки времени и год в целом.

Характер водообмена между рекой и водоносными горизонтами определяется гидрогеологическими условиями, трансформированными системой водопользования и застройкой территории, вносящими коренные изменения во взаимодействие поверхностных и подземных вод, их режим и количественные соотношения.

Полная количественная оценка водообмена между рекой и водоносными пластами является весьма сложной задачей, требующей проведения специальных гидрогеологических работ.

Потери на фильтрацию в водораспределительной и канализационных системах могут быть весьма значительными, представляющими существенную величину в водном балансе. Потери зависят от объема водопотребления, технического совершенства системы распределения и сброса вод.

На основании анализа материалов по 91 городу США подсчитано, что потери в городских водораспределительных системах составляют в среднем 12% общего объема забираемой воды. Крайние значения потерь могут сильно различаться и для некоторых городов достигают 30%. Известно, что потери в 36 распределительных системах г. Чикаго достигают 850 млн. м³/сут, или 20% общего объема воды, забираемой для коммунальных нужд.

Следует заметить, что в водном балансе территории города эти потери практически полностью могут быть отнесены к безвозвратным. Применительно к большой территории, например речному

бассейну, эти воды уже не могут быть полностью отнесены к безвозвратным потерям, так как только часть их будет расходоваться на испарение, а значительный объем пойдет на питание грунтовых вод с последующим поступлением в реки.

Осадки. Расход воды, сформировавшийся за счет выпадения осадков на поверхность речных русел, поймы и водохранилищ, гидравлически связанных с рекой, может представлять собой существенную часть руслового водного баланса, которую необходимо учитывать при расчетах. Слой осадков определяется по данным наблюдений на близрасположенных метеостанциях в специально организованных пунктах измерения осадков.

Средний за расчетный интервал времени расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$), сформировавшийся от поступления осадков, вычисляется по формуле

$$Q_{\text{ос}} = \frac{\bar{x} A_{\text{в}}}{86,4T}, \quad (4)$$

где \bar{x} — средняя по площади сумма осадков (мм) за расчетный период; T — продолжительность последнего, сут; $A_{\text{в}}$ — максимальная в данном году площадь водной поверхности (км^2) на участке реки и гидравлически связанных с ней водоемов.

Испарение с поверхности воды. Расход воды на беспойменных участках рек, являющихся наиболее типичными для городской территории, обычно менее 1% расхода воды в реке и поэтому при расчетах водного баланса может не учитываться, если нет дополнительных испаряющих площадей, гидравлически связанных с рекой. При наличии водохранилищ объем испаряющейся воды может быть значительным и его необходимо учитывать при расчетах. Расход воды на испарение с водной поверхности ($\text{м}^3/\text{с}$) вычисляется по формуле

$$Q_{\text{и}} = \frac{EA}{86,4T}, \quad (5)$$

где E — испарение (мм) с водной поверхности за расчетный период; T — продолжительность последнего, сут; A — площадь испаряющей поверхности, км^2 .

Испарение при наличии испарителей определяется по данным измерений, а при отсутствии их рассчитывается по одной из известных формул [3].

Примеры расчета водного баланса

Государственным гидрологическим институтом в 1974 и 1975 гг. в ряде районов страны производились экспедиционные исследования, целью которых было определение потерь воды в системе хозяйственного водопользования и выявление влияния заборов и сбросов вод на водный баланс рек.

Одним из характерных примеров является р. Урал в районе г. Орска, на которой производились эпизодические гидрометрические съемки выше и ниже города, а также в местах всех крупных водозаборов и сбросов. Река в этом районе имеет площадь водосбора 46 1000 км², средний годовой расход воды 40 м³/с, летний межень — 12 м³/с. Общий водозабор для нужд города и промышленности составляет около 200 тыс. м³/сут. Примерно половина этого количества забирается из подземных вод, гидравлически связанных с рекой, и используется населением для бытовых потребностей, остальная часть изымается из реки. В пределах городской черты расположено около десяти временных водозаборов из р. Урал, обеспечивающих полив коллективных садов и огородов (около 2 тыс. м³/сутки).

В бездождный период, с 21 по 25/VIII 1974 г., при практически неизменных уровнях производилась гидрометрическая съемка на реке и ее притоках в границах города, данные которой легли в основу расчета водного баланса по уравнению

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_9 - Q_{11} \pm \Delta Q = 0. \quad (6)$$

Ввиду незначительности величин в уравнение не были включены потери с водной поверхности, приток и отток воды за счет руслового регулирования. Значения элементов баланса, полученные при непосредственном измерении, помещены в табл. 2. Из приведенных данных видно, что водозаборы и р. Урал (Q_3) и сбросы в нее (Q_6) представляют собой заметную часть меженьного стока реки (около 13%).

Таблица 2

Элементы водного баланса р. Урала (по данным измерений в августе 1974 г.)

Число	Приходная часть				Расходная часть			ΔQ		Суммарная средняя квадратическая ошибка определения, м ³ /с
	Q _н	Q _п	ΣQ	всего	Q _к	Q _з	всего	м ³ /с	%	
21	18,2	0,81	2,41	21,42	17,6	2,45	20,05	1,37	6,4	1,29
22	18,8	0,99	2,76	22,55	17,1	2,39	19,49	3,16	14,0	1,29
24	18,1	0,72	2,01	20,83	17,3	2,39	19,69	1,14	5,5	1,29
25	17,5	0,95	2,04	20,49	18,1	2,22	20,32	0,17	0,8	1,29
Среднее за период	18,2	0,87	2,30	21,32	17,5	2,35	19,90	1,46	6,8	1,30

Несмотря на большой забор воды русловой водный баланс в среднем не претерпел существенных изменений, хотя во всех случаях измерений наблюдалось превышение забора над сбросом,

что по отношению к меженному стоку реки составляет 0,8—14% (в среднем около 7%). Очевидно, здесь имеют место постоянные потери в системе водопользования.

Разработки, выполненные применительно к некоторым промышленным городам страны на основе аналогичных гидрометрических съемок, показали, что путем расчетов руслового водного баланса не всегда можно уловить изменения стока рек в результате изъятия из них воды для промышленного производства и бытового потребления. Особенно это относится к большим рекам, расход воды которых несоизмерим с объемом забираемой и сбрасываемой воды. В то же время анализ и сопоставление значений отдельных элементов водного баланса позволяет определить направленность процесса и количественно оценить возможные изменения в гидравлическом цикле на длительную перспективу. Для определения суммарных потерь в системе водопользования большой интерес представляет сопоставление забора воды на хозяйственно-бытовые нужды и сброса части их с учетом режима этих процессов

$$W_3 - W_c - W_k = 0, \quad (7)$$

где W_3 — объем забираемой воды; W_c — объем сбрасываемой воды после использования; W_k — объем воды внутри исследуемого контура.

Расчет можно производить как для города в целом, так и для различных участков промышленных и хозяйственных комплексов. Многочисленные измерения показывают, что сброс промышленных и бытовых вод в летнее время на 20—30% меньше забора. Можно предположить, что в зимнее время это различие будет меньше (за счет уменьшения потерь на испарение).

Постоянство и однонаправленность различий в объеме забираемой и сбрасываемой воды указывают на систематический характер потерь в системе водопользования, что необходимо учитывать при проектировании и освоении водных ресурсов. Следует, однако, заметить, что если суммарные потери города в системе водного хозяйства можно определить на основании хорошо организованного учета вод, то раскрытие их природы представляет исключительно сложную задачу.

Потери в системе городского водопользования состоят из двух частей: 1) безвозвратные потери непосредственно из системы подачи, хранения, использования и отвода вод; 2) потери, идущие на инфильтрацию, часть которых возвращается в реку в пределах города или за его пределами. Соотношения между безвозвратными потерями, связанными с испарением, и потерями на инфильтрацию и питание подземных вод совершенно не изучены. Весьма часто допускается ошибка, когда за безвозвратные потери в целом для больших территорий принимается разность между объемами забираемой и сбрасываемой воды отдельных городов и промышлен-

ных комплексов. Более правильно считать, что 50% определяемых таким образом потерь являются безвозвратными, а остальные относятся к потерям лишь для территории в месте водопользования (в конечном счете эти воды поступают в реки вне пределов изучаемого района).

Конечно, рассмотренная схема может иметь отклонения, которые необходимо учитывать при конкретных расчетах. Имеется ряд производств и систем водопользования, где потери воды сведены до минимума или, наоборот, значительно превышают указанные выше средние их значения. Ниже приводится пример расчета водного баланса г. Минска. Точность и полнота приводимых расчетов по отдельным элементам баланса неравноценны из-за разнородности и подчас низкого качества исходной информации. Особенно это относится к учету водопользования, система которого требует совершенствования в части полноты охвата учета заборов и сбросов и точности измерений расходов воды. Тем не менее представляется, что даже при отмеченных недостатках исходной информации можно сделать расчеты водного баланса городов, необходимые для оценки изменений, вносимых в результате урбанизации в гидрологический цикл, и решать отдельные задачи, связанные с охраной внешней среды.

Водный баланс г. Минска

Водный баланс г. Минска рассчитывался для 46-километрового участка р. Свислочь между гидрологическими постами у селений Дрозды и Королишевичи. Площадь водосбора участка 329 км², площадь урбанизированной территории 156 км². На постах имеются данные гидрометрических наблюдений за период 1974—1977 гг. Водообеспечение города относится к смешанному типу. Для хозяйственно-бытовых нужд используются воды глубоких подземных горизонтов, гидравлически не связанные с поверхностными водными объектами, а для промышленных предприятий водозабор осуществляется из р. Свислочь с притоками и частично из запасов подземных вод.

С 1976 г. в водоснабжении г. Минска большую роль играют воды р. Вилии, подаваемые в бассейн р. Свислочь из Вилейско-Минской системы в объемах, превышающих естественный годовой сток р. Свислочь. В 1976 г. впервые собраны сведения об использовании вод по единой государственной системе вод, которые позволили осуществить нижеприведенный анализ водного баланса города и сделать оценку полноты и надежности сведений по учету использования вод.

Система водоснабжения г. Минска имеет специфические особенности, отражающиеся в структуре уравнения водного баланса.

Переброска вод р. Вилии в р. Свислочь осуществляется через Заславское водохранилище, расположенное выше входного створа,

у с. Дрозды. Сброс вод из водохранилища в р. Свислочь фиксируется измерениями на верхнем и нижнем постах на участке.

Поступление вод в русла р. Свислочь и ее притоков из подземных водоносных горизонтов, гидравлически связанных с реками, весьма незначительно из-за малых эрозионных врезов речных русел, и поэтому величиной W_5 можно пренебречь (здесь и в дальнейшем обозначение компонентов баланса приведено в соответствии с табл. 1). В пределах рассматриваемого участка отсутствует сколь-либо значительный забор подземных вод, гидравлически связанных с реками (W_{11}), также не осуществляется отвод использованных вод за пределы водосбора (W_{12}).

С учетом изложенного для расчета годового водного баланса г. Минска было принято уравнение

$$W_1 + W_2 + W_3 + W_7 + W_8 = W_9 + W_{10} + W_{15} + W_{16} \pm \Delta W. \quad (8)$$

Составляющие водного баланса определялись по: а) гидрометрическим данным наблюдений на постах у селений Дрозды и Королишевичи; б) метеорологическим данным метеостанций в г. Минске и с. Русиновичи; в) данным ГМО г. Минска; г) данным Геолого-гидрогеологического управления о заборах подземных вод; д) сведениям об использовании вод по материалам Минводхоза БССР.

Годовой сток на посту у с. Дрозды (W_1) за период 1975—1977 гг. определялся по данным наблюдений, опубликованным в гидрологических ежегодниках; за 1974 г. (когда отсутствовали измерения) — по зональному модулю стока, равному $5,6 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$; по посту у с. Королишевичи (W_9) сток получен за весь период по данным ежегодников.

Боковая приточность (W_2) на участке рассчитывалась для частей водосборов притоков, расположенных за городской чертой ($A=68 \text{ км}^2$), по значению зонального модуля стока с учетом водности каждого года. Сток с водосборов притоков, расположенных в пределах города ($A=156 \text{ км}^2$), принят на 10% выше зонального, что связано с увеличением коэффициента стока в городе за счет застроенных и асфальтированных территорий.

Сток поверхностных вод непосредственно в русло р. Свислочь (W_3), не учитываемый притоками и дренажно-ливневой канализацией, рассчитывался для участков, прилегающих к руслу р. Свислочь, шириной 100 м.

Осадки (W_7), выпадающие на водную поверхность русловой сети и водоемов, гидравлически связанных с рекой (их общая площадь $5,5 \text{ км}^2$), рассчитывались по данным метеостанций Минск и Русиновичи.

Испарение (W_{16}) с русел и гидравлически связанных водоемов ($A=5,5 \text{ км}^2$) рассчитывалось по среднему годовому значению испарения, определенному на метеостанции Минск для испарителя площадью 20 м^2 .

Потери на фильтрацию из русел и водоемов и фильтрационные потери в системе водоснабжения (W_{15}) определялись для суммарной площади притоков, равной 224 км². За основу был принят модуль фильтрационных потерь 3,76 л/(с·км²), рассчитанный непосредственно по данным измерений за 1974 г. Для остальных лет потери на фильтрацию рассчитывались по полученному модулю с учетом водности года.

Заборы речных вод (W_{10}) и сбросы речных и подземных вод (W_8) определялись по данным учета и непосредственным измерениям по основным водопользователям на рассматриваемом участке. За 1977 г. данные учета забракованы, при расчете приняты средние значения из данных предшествующих лет.

В табл. 3 представлен годовой водный баланс г. Минска за 1974—1977 гг. Проведенное исследование годового водного баланса г. Минска позволяет сделать следующие выводы.

Таблица 3

Водный баланс г. Минска (по отчетным сведениям об использовании вод)

Составляющая баланса	Обозначение	Год			
		1974	1975	1976	1977

Приходная часть, млн. м³

Сток у с. Дрозды	W_1	125,2	157,7	244,7	305,2
Боковая приточность	W_2	62,1	69,8	49,8	66,4
Сток поверхностных вод	W_3	8,3	8,1	7,8	9,9
Осадки	W_7	3,7	3,6	3,5	4,4
Сброс речных и подземных вод	W_8	140,0	164,0	145,2	(150)
Итого		339,3	403,2	451,0	(536)

Расходная часть, млн. м³

Сток у с. Королищевичи	W_9	281,6	324,8	398,6	478,1
Забор речных вод	W_{10}	55,0	20,0	23,1	(33,0)
Потери на фильтрацию	W_{15}	27,3	32,4	43,7	53,5
Испарение	W_{16}	2,4	2,6	2,2	1,9
Итого		366,3	379,8	467,6	(566)
Невязка, млн. м ³		-27,0	+23,4	-16,6	(-30)
Невязка, %		6,9	5,8	3,7	(5,5)

1. В водообеспечении г. Минска использование поверхностных вод играет относительно небольшую роль несмотря на увеличение годового стока р. Свислочь за счет переброски вод из бассейна р. Неман. Доминирующую роль в водоснабжении города продолжают играть подземные воды, объем использования которых сравним с годовым стоком р. Свислочь.

2. Общие потери вод на испарение и фильтрацию в руслах, водоемах и водопроводящих сетях города составили в среднем за рассматриваемый период 50 млн. м³/год, или 1,6 м³/с. Из них потери подземных вод от мест их забора до сброса в р. Свислочь составили в среднем 25 млн. м³, или 0,8 м³/с.

3. Сведения по использованию вод, получаемые государственной системой учета вод, несмотря на неполноту и несовершенство или даже отсутствие в ряде случаев измерительной техники, при охвате основных водопользователей позволяют осуществлять расчеты водного баланса города.

Рассчитанный водный баланс города или его отдельных участков в свою очередь является средством контроля полноты и качества учета использования вод.

4. Система водообеспечения и использования вод г. Минска оказывает положительное влияние на годовой сток р. Свислочь, увеличивая его более чем в два раза, главным образом за счет использования больших объемов подземных вод из глубоких водоносных горизонтов и переброски вод из бассейна р. Немана. Данные расчета являются приближенными и указывают прежде всего на недостатки системы учета водопользования.

Особый интерес представляет определение потерь в системе водопользования для территории г. Минска, которые колеблются в пределах 30—55 млн. м³/год, или 0,9—1,7 м³/с.

Для сравнения приведем данные по некоторым городам Франции. Так, например, в Париже и его окрестностях инфильтрация загрязненных вод вследствие потерь в системе канализации, просачивания загрязненных поверхностных вод, поступлений из метро и других видов подземных строений достигает 8 м³/с, в Лионе — 0,8 м³/с, в Марселе — 10 м³/с [5].

В заключение следует отметить, что практика градостроительства и охраны природной среды ставит перед гидрологией задачи, значительно опережающие развитие теории гидрологических расчетов, моделирования процессов антропогенного вмешательства в естественный гидрологический цикл. Оценка изменений, происходящих в гидрологическом цикле в результате урбанизации, возможна только на основании воднобалансовых исследований, применительно к различным системам водопользования и в первую очередь в больших городах с сопутствующими им промышленными комплексами.

Дальнейшее совершенствование методики расчета водного баланса городов является необходимым для решения вопросов оценки влияния урбанизации на водные ресурсы и разработку рациональной системы их комплексного народнохозяйственного использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куприянов В. В. Гидрологические аспекты урбанизации.— Л.: Гидрометеоиздат, 1977.— 184 с.
2. Львович М. И., Черногаева Г. М. Преобразование водного баланса территории г. Москвы.— Известия АН СССР. Сер. геогр., 1976, № 3, с. 52—60.
3. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов.— Л.: Гидрометеоиздат, 1969.— 83 с.
4. Устюжанин Б. С. Оценка изменений стока рек центральной части Московского артезианского бассейна под влиянием интенсивной эксплуатации крупных водозаборов подземных вод.— Труды ГГИ, 1974, вып. 213, с. 86—113.
5. Monition L. Effects de l'urbanization sur les conx sonterroines.— Proc. Amsterdam Symposium of Urbonization, October 1977, GAHS—AGSH Publication N 123, p. 162—166.

СОДЕРЖАНИЕ

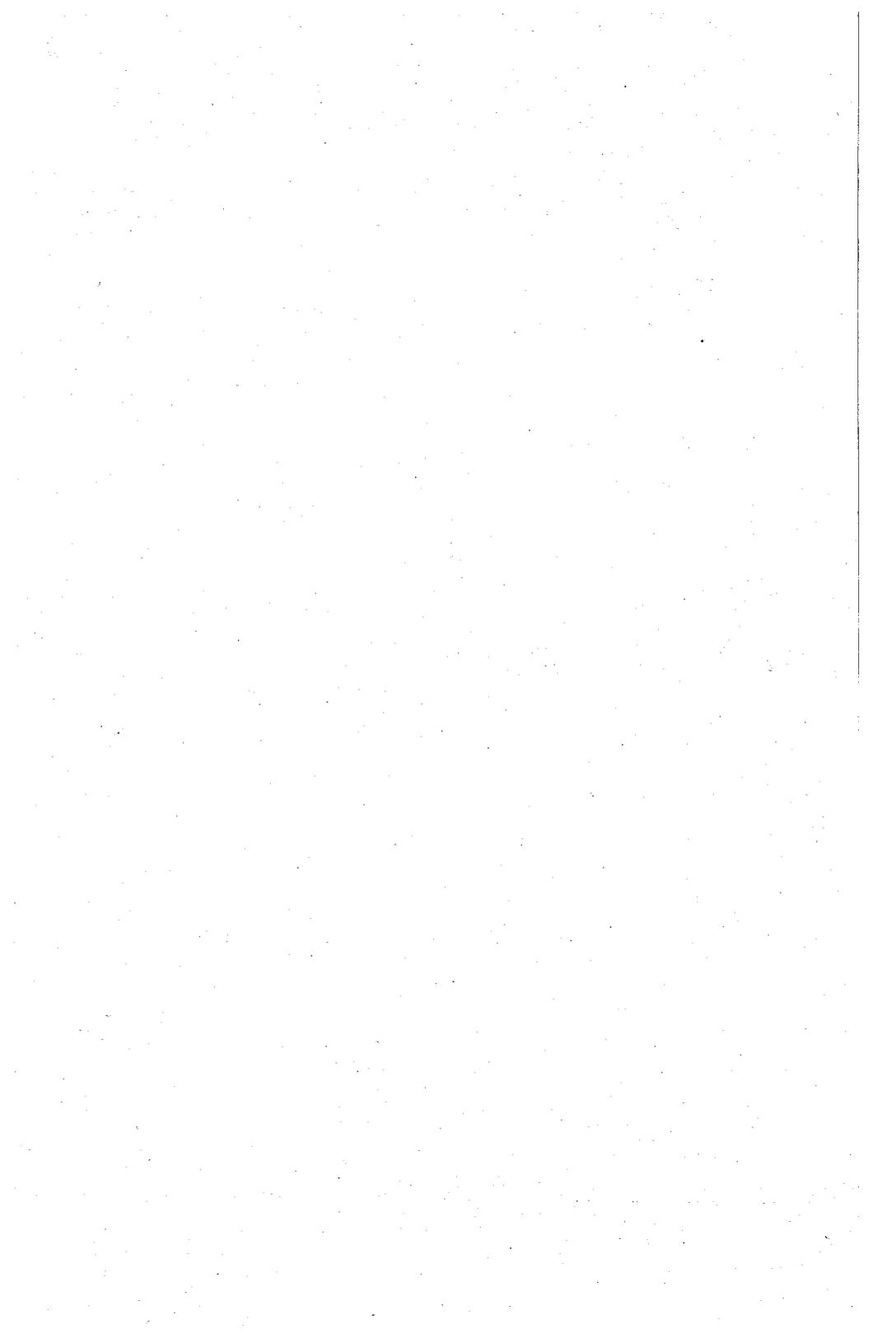
Предисловие (А. А. Соколов)	3
А. А. Соколов. Государственный гидрологический институт — народному хозяйству	5
И. Ф. Карасев. Новые методы речной гидрометрии	20
Р. Д. Курдин. Государственный учет вод и водный кадастр	48
А. В. Караушев, Б. Г. Скакальский. Оценка и моделиро- вание качества воды в водоемах	59
В. А. Знаменский. Процессы водообмена и их роль в формиро- вании качества воды в водоемах	76
А. В. Караушев, Б. Г. Скакальский. Проблемы монито- ринга качества поверхностных вод суши	94
Н. М. Алюшинская, И. Б. Вольфцун, О. Л. Маркова, Р. А. Нежиховский, И. А. Шикломанов. Изменение водного режима северных рек СССР при изъятии части их стока	106
Б. Ф. Снищенко. Прогноз русловых деформаций в крупных ка- налах	126
С. И. Харченко. Гидрологическое обоснование регулирования водного и теплового режима мелиорируемых земель Нечерноземной зоны РСФСР	148
В. И. Бабкин. Исследования взаимосвязей элементов водного баланса речных бассейнов	161
В. Ф. Усачев. Применение аэрокосмических методов исследова- ний для решения задач гидрологии суши	173
В. В. Куприянов. Водный баланс городов и урбанизированных территорий	186

ПРОБЛЕМЫ
СОВРЕМЕННОЙ
ГИДРОЛОГИИ

Редактор Т. С. Шмидт. Худож. редактор В. В. Быков. Техн. редактор Г. В. Ивкова
Корректор Г. С. Макарова. ИБ № 869. Сдано в набор 13.06.79. Подписано в печать 17.09.79.
М-26456. Формат 60×90¹/₁₆, бум. тип. № 1. Лит. гарн. Печать высокая. Печ. л. 13,5.
Уч.-изд. л. 14,68. Тираж 1000 экз. Индекс. ГЛ-63. Заказ № 240. Цена 1 р. 40 к.

Гидрометеиздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, д. 23

Ленинградская типография № 8 ЛПО «Техническая книга» Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
190000, Ленинград, Прачечный пер., 6.



Государственный гидрологический институт — народному хозяйству. Соколов А. А. Сборник «Проблемы современной гидрологии», 1979, с. 5—19.

Из небольшого научного учреждения Государственный гидрологический институт превратился в крупный научный центр гидрологической науки. За последние 10—15 лет учеными ГГИ выполнены многие фундаментальные исследования по водным ресурсам СССР и всего мира; разработаны методические основы единой системы государственного учета вод и ведения водного кадастра СССР; выполнены большие работы по изучению влияния антропогенных факторов на режим водных объектов, разработанные методы позволяют оценивать изменения, происходящие с речным стоком, и давать прогноз состояния водных ресурсов на перспективу. В результате исследований по проблеме переброски стока из северных районов в засушливые южные области СССР получены выводы по определению оптимальных отъемов воды; составлены нормативные документы по расчетам элементов гидрологического режима.

ГГИ ведет большую работу по научно-прикладному гидрологическому обеспечению народного хозяйства (водоснабжение, мелиорация, энергетика, строительство водных и ж.-д. путей, в том числе БАМ, освоение целинных и залежных земель, развитие Нечерноземной зоны РСФСР и др.).

УДК 556.535.3.08+556.532.04+556.18

Новые методы речной гидрометрии. Карасев И. Ф. Сборник «Проблемы современной гидрологии», 1979, с. 20—47.

Рассматриваются принципы оптимизации гидрологической сети пунктов наблюдений, а также частоты и точности гидрометрических измерений. Освещены наиболее эффективные методы речной гидрометрии в целях повышения оперативности и надежности учета стока. Особое внимание уделено повышению точности измерения расходов воды. Приведена усовершенствованная модель расхода воды и рассматривается возможность оптимизации процессов измерения речного стока.

Описаны математические модели гидрометрического учета стока с применением ЭВМ. Дано принципиально новое освещение методики оперативного учета стока. Излагаются новые аспекты речной гидрометрии, связанные с системой государственного учета вод и ведения водного кадастра и, в частности, методы составления русловых и учетных водных балансов для гидрометрического контроля и использования водных ресурсов.

Табл. 3. Илл. 5. Библ. 11.

УДК 556.18+556.043 : 681.3

Государственный учет вод и водный кадастр. Курдин Р. Д. Сборник «Проблемы современной гидрологии», 1979, с. 48—58.

Государственный учет вод и водный кадастр (ГВК) в общей государственной системе учета и использования водных ресурсов играет огромную роль. В ГГИ разработаны научно-методические основы ГВК. От водного кадастра прежних лет он отличается рядом принципиальных особенностей.

Автоматизированная информационная система ведения ГВК (АИС ГВК) будет состоять из трех отраслевых и пяти функциональных подсистем. Основной системы явятся ежегодно обновляемый фонд данных на технических носителях и банки данных на ЭВМ, осуществляющие систематизацию, поиск, обработку и обобщение исходных данных и выдачу потребителям необходимой информации. В результате создания в рамках АИС ГВК мощных вычислительных центров и банков данных появятся принципиально новые возможности для пространственно-временного обобщения информации о водных ресурсах и их использовании, научных исследований в области гидрологии, гидрогеологии и водного хозяйства.

Библ. 12.

Оценка и моделирование качества воды в водоемах. Караушев А. В., Скакальский Б. Г. Сборник «Проблемы современной гидрологии», 1979, с. 59—75.

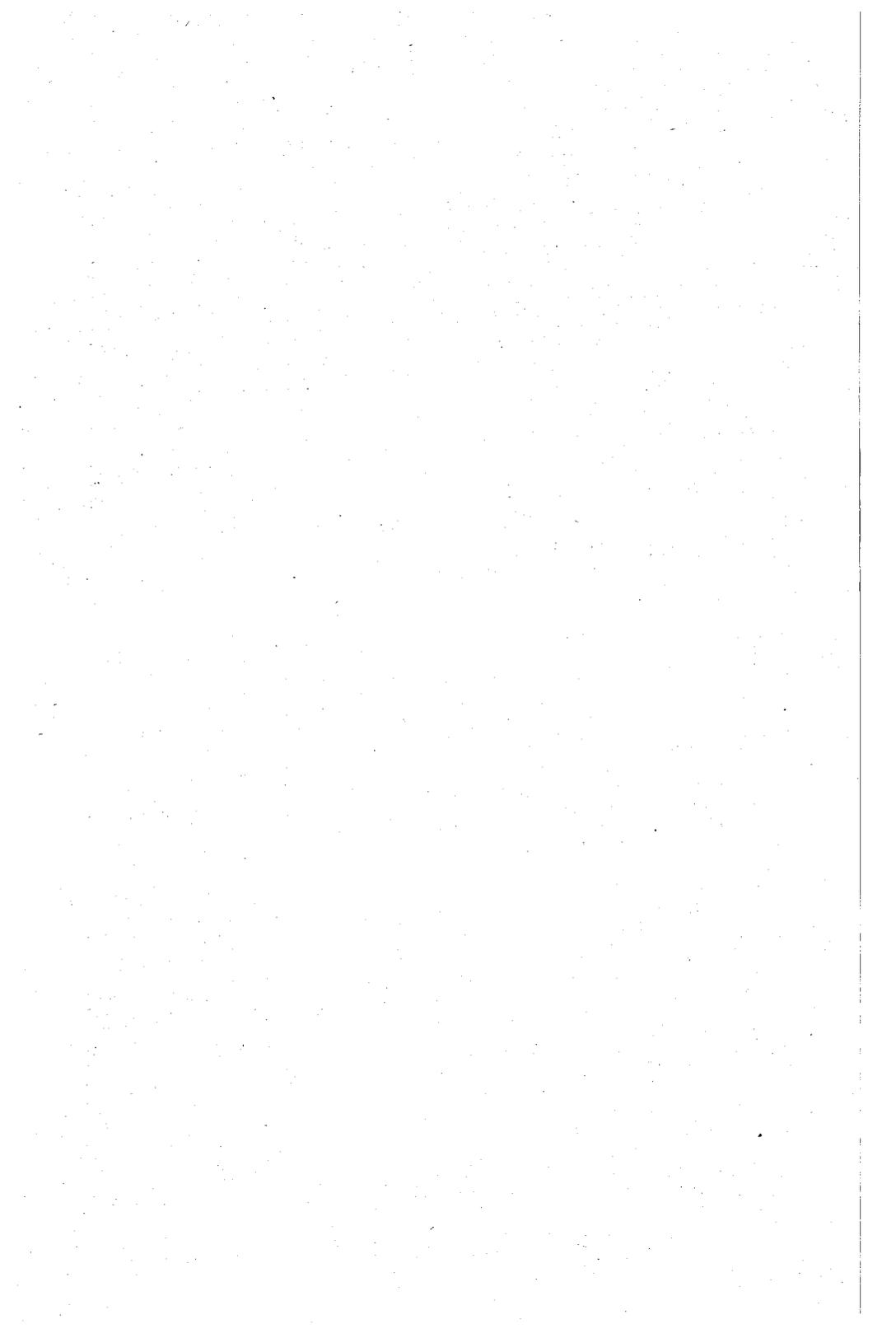
Приводимая методика оценки качества вод в водоемах основана на разработанных в ГГИ интегральных показателях состояния загрязненности водных объектов суши. Рассматриваются теоретические модели гидродинамических процессов формирования качества водных масс в водоеме в целом и в пределах его локальных зон, непосредственно подвергающихся воздействию сбросов сточных вод. Целью работы является выяснение влияния гидрологических и гидродинамических факторов на процессы загрязнения и самоочищения в водоемах. Использован метод математического моделирования переноса и разбавления растворенных неконсервативных веществ в водоемах. Проанализированы и обобщены некоторые данные натурных наблюдений на Ладожском озере и предварительно оценены (по показателю общей минерализации) последствия переброски из его бассейна некоторой части стока. Приведена зависимость для вычисления фоновых концентраций изучаемого ингредиента в водоеме. Дан вывод уравнения турбулентной диффузии в цилиндрических координатах для неконсервативного вещества. Приведены выражения для интегральной оценки загрязненности водных масс в водоемах. Результаты работы могут применяться при проектировании различных видов водопользования, разработке водоохраных мер и обобщении материалов в рамках мониторинга качества поверхностных вод суши.

Табл. 2. Илл. 2. Библ. 16.

Процессы водообмена и их роль в формировании качества воды в водоемах. Знаменский В. А. Сборник «Проблемы современной гидрологии», 1979, с. 76—93.

Процессы водообмена с внешней средой, определяемые составляющими водного баланса, и процессы внутреннего водообмена, обусловленные динамикой водных масс, приводят к перемещению значительных объемов воды и меняют содержание растворенных веществ в водоемах. Движение водных масс в проточных водоемах сопровождается образованием транзитных потоков. Механизм передачи энергии от них к окружающей водным массам определяет развитие водоворотных или циркуляционных зон. Подобные динамические структуры оказывают влияние на пространственное перераспределение растворенных веществ. Процессы турбулентного обмена, зависящие от гидравлических характеристик и рассеивания энергии движения в придонном слое, также сказываются на распределении растворенных веществ. Влияние указанных процессов может быть учтено с помощью показателей водообмена, которые одновременно могут определять потребность в воде различных отраслей народного хозяйства. Это открывает возможность составления комплексных схем рационального использования водных ресурсов крупных водоемов при соблюдении необходимых условий для их охраны от загрязнения.

Табл. 1. Библ. 16.



Проблемы мониторинга качества поверхностных вод суши. Караушев А. В., Скакальский Б. Г. Сборник «Проблемы современной гидрологии», 1979, с. 94—105.

Целью работы является рассмотрение в гидрологическом и гидрохимическом аспектах вопросов планирования сети наблюдательных пунктов и способов сравнительной оценки антропогенного влияния на водные объекты. При разработке структуры сети необходимо учитывать закономерности формирования речного стока и качества воды в различных природных зонах. Необходимо включить в систему мониторинга наблюдения на незагрязненных водных объектах, что позволит получать объективные характеристики фона, на котором развиваются антропогенные процессы. Даются рекомендации по составу и объему стационарных наблюдений. Пункты гидрохимических наблюдений должны быть обеспечены данными гидрологических измерений. В целях обобщения данных наблюдений на отдельных объектах предлагается использовать систему интегральных показателей качества поверхностных вод. В основе этой системы лежит концепция ПДК. Она учитывает также возможность применения экологических или других нормативов, отвечающих тем или иным требованиям охраны окружающей среды. Результаты работы могут применяться при организации сетевых наблюдений и для обобщения данных в рамках глобального мониторинга.

Библ. 10.

Изменение водного режима северных рек СССР при изъятии части их стока. Алюшинская Н. М., Вольфцун И. Б., Маркова О. Л., Нежиловский Р. А., Шикломанов И. А. Сборник «Проблемы современной гидрологии», 1979, с. 106—129.

Рассматриваются методические основы оценки возможных изменений водного режима и водного баланса районов проектируемого изъятия части стока. Приводятся результаты прогностических оценок последствий территориального перераспределения стока с учетом влияния местной хозяйственной деятельности. Проектируемая в объеме 50—130 км³/год переброска вод из северных районов СССР не повлечет за собой крупномасштабных негативных последствий. Суммарные водные ресурсы северных рек-доноров в результате изъятия воды на переброску уменьшатся на 10—20%. Непосредственно ниже водозабора водоносность некоторых рек снизится на 50—80%. Изменится режим уровней воды и условия затопления поймы.

На Нижней Оби снижение уровня воды приведет к некоторому улучшению условий дренирования земель приречных районов, на Средней Оби, Печоре, Северной Двине будет наблюдаться осушение и остепнение пойменных массивов. Возможно ухудшение качества воды, особенно в Невской губе. Изменения водного баланса будут невелики. Для бассейна р. Оби при отъеме 25—60 км³/год изменение местного стока и испарения не превысит 5—10 км³/год (1% применительно к естественным условиям). Потери на испарение с поймы изменятся всего на 0,1—0,2 км³/год. Прогнозируемое улучшение условий дренирования приречных территорий не отразится на общей заболоченности территории Западной Сибири.

Табл. 6. Илл. 8. Библ. 11.

Прогноз русловых деформаций в крупных каналах. С нищенко Б. Ф. Сборник «Проблемы современной гидрологии», 1979, с. 130—148.

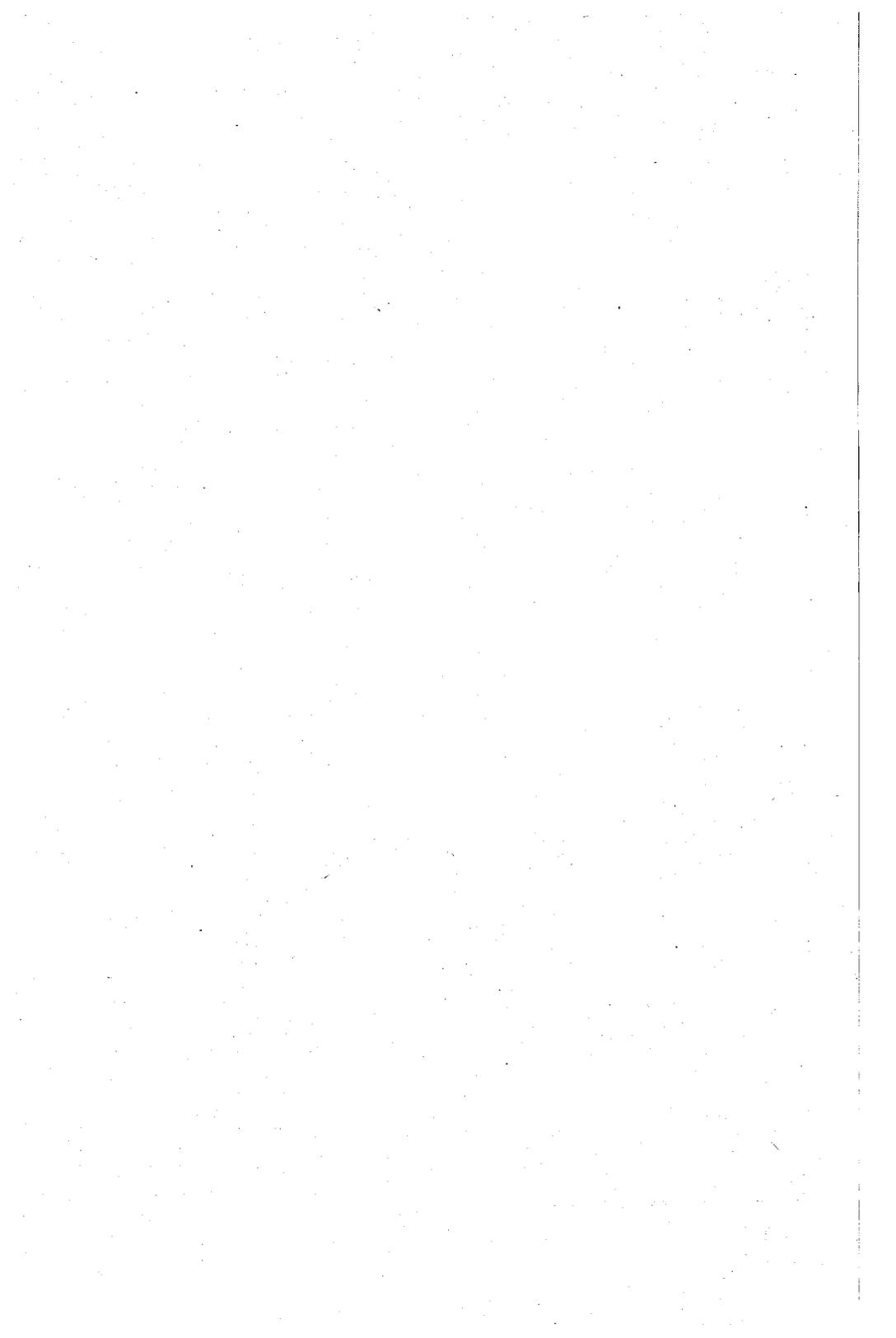
Получены новые зависимости для расчета деформаций в русле каналов. Формы проявления руслового процесса в реках и каналах имеют много общего, однако есть и различия. В каналах развиваются лишь три вида руслового процесса — ленточногрядовый, побочный и осередковый. Для прогноза руслового режима каналов необходимо иметь сведения о стоке воды и наносов и об условиях, ограничивающих свободное развитие руслового процесса. Каналам, как и рекам, присущи необратимые и обратимые деформации. Естественное изменение русла канала происходит в два этапа. На первом наблюдается однонаправленное, необратимое уширение поперечного сечения канала, на втором — стабилизация средних размеров сечения сечения канала. Состояние динамического равновесия определяется критерием устойчивости. Крупные каналы, параметры которых не соответствуют критерию $M=1,0$, будут испытывать необратимые деформации. С целью уменьшения капиталовложений следует применять критерий $M>1$ и в результате проработки нескольких технико-экономических вариантов можно найти такое оптимальное значение $M>1$, при котором суммарные расходы по устройству и содержанию канала будут наименьшими.

Табл. 3. Илл. 5. Библ. 10.

Гидрологическое обоснование регулирования водного и теплового режима мелиорируемых земель Нечерноземной зоны РСФСР. Харченко С. И. Сборник «Проблемы современной гидрологии», 1979, с. 149—161.

Для гидрологического обоснования проектирования осушительно-увлажнительных и осушительных систем недостаточно учитывать одну «норму осушения». Необходимо определять непрерывные характеристики водного режима почвы в период вегетации сельскохозяйственных культур. При проектировании осушительных систем расчеты выполняются по гидрологическим характеристикам, полученным до осуществления мелиорации. Мелиорация земель существенно изменяет водно-физические свойства почв, а также оказывает влияние на элементы водного и теплового баланса; это приводит к изменениям гидрометеорологических условий сельскохозяйственных полей, причем режим работы при эксплуатации гидротехнических сооружений, дрен и каналов существенно отличается от проектного. Это обуславливает возникновение неблагоприятных явлений на осушительных системах. Предлагаемая методика расчета избытка влаги в почве и недостатка водопотребления сельскохозяйственных культур позволяет обоснованно осуществлять проведение осушительно-увлажнительных и осушительных мелиораций.

Табл. 3. Илл. 4. Библ. 6.



Исследования взаимосвязей элементов водного баланса речных бассейнов.
Бабкин В. И. Сборник «Проблемы современной гидрологии», 1979, с. 162—173.

В основу исследований взаимосвязей элементов водного баланса речных бассейнов положено детальное уравнение водного баланса речного бассейна, применимое для коротких интервалов времени. В результате применения молекулярно-кинетической теории получена формула по оценке максимальной скорости испарения воды. Для производства массовых расчетов водных балансов речных бассейнов параметр, описывающий максимальную скорость испарения воды, заменен переменной, равной отношению суммарной солнечной радиации и удельной теплоте парообразования. Детальное уравнение преобразовано в систему из двух уравнений гиперболического вида, которую рекомендуется использовать для оценки испарения и стока, а также для моделирования ошибок определения элементов водного баланса. Путем разложения уравнения взаимосвязи в степенной ряд получено выражение для оценки подземной составляющей речного стока.

Табл. 5. Илл. 2. Библ. 10.

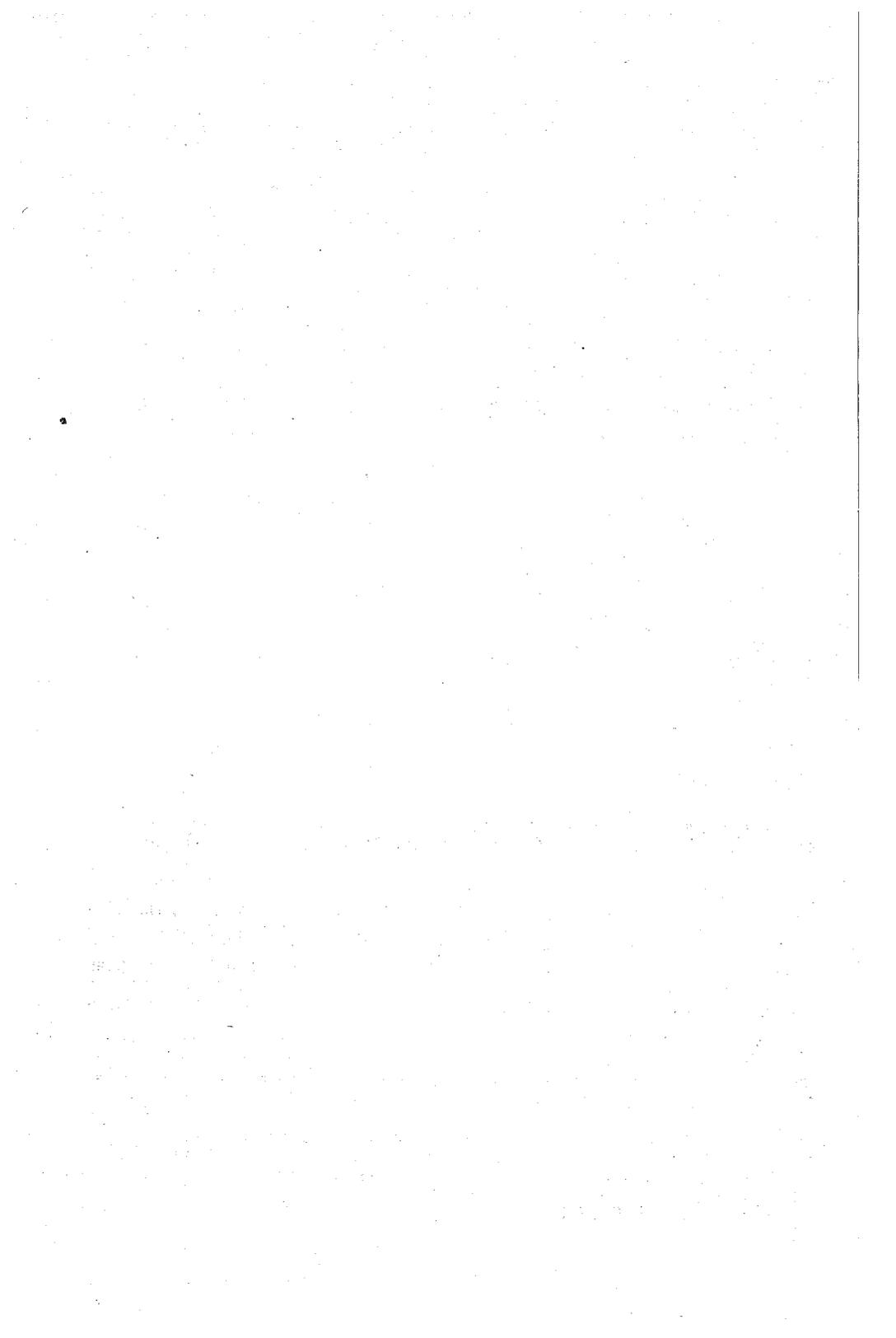
Применение аэрокосмических методов исследований для решения задач гидрологии суши. Усачев В. Ф. Сборник «Проблемы современной гидрологии», 1979, с. 174—186.

Анализ использования аэрокосмических средств для решения задач гидрологии суши позволил выделить четыре основных направления их развития: 1) оперативные наблюдения, контроль и обслуживание; 2) стационарное и экспедиционное изучение малоисследованных территорий; 3) методические разработки, применение и оценка новых средств исследований; 4) использование данных аэро- и космических наблюдений в фундаментальных гидрологических исследованиях.

Аэрокосмические методы исследований применительно к гидрологии в основном находятся еще в стадии разработок. Основные направления их применения на практике: ледовые авиаразведки, картирование границ разливов, измерение высоты снега в горах по рейкам, дешифрирование аэрофотоснимков, определение скоростей течения воды и глубины водоемов, изучение русловых и пойменных процессов, оценка состояния речных водосборов, сведения о режиме болот, изучение температурных неоднородностей водоемов, оценка запаса воды в снеге.

Приведен перечень первоочередных исследований и разработок на ближайшие годы.

Табл. 1. Илл. 1. Библ. 9.



Водный баланс городов и урбанизированных территорий. Куприянов В. В. Сборник «Проблемы современной гидрологии», 1979, с. 187—201.

Основой гидрологических расчетов для урбанизированных территорий является метод водного баланса. Водный баланс территории, подвергшейся урбанизации, претерпевает большие изменения в его приходной и расходной частях. В районах расположения больших промышленных городов можно ожидать увеличения осадков и стока примерно на 5—10%. При расчетах водного баланса для городов, расположенных в зоне тундры или в пределах степных районов, следует учитывать влияние метелевого переноса снега. Приводятся уравнения водного баланса урбанизированных территорий и даются определения и характеристики их составляющих. Составленные водные балансы показали, что расчеты можно производить для города в целом и для отдельных его частей. Сбросы промышленных и бытовых вод в летнее время на 20—30% меньше водозабора. Приводится подробный расчет водного баланса г. Минска. Поставлены первоочередные задачи по совершенствованию метода расчета водного баланса урбанизированных территорий.

Табл. 3. Илл. 1. Библ. 5.

