М. И. ЛЬВОВИЧ

ВОДА И ЖИЗНЬ

М. И. ЛЬВОВИЧ

ВОДА И ЖИЗНЬ

(Водные ресурсы,
их преобразование
и охрана)



МОСКВА
«МЫСЛЬ»
1986

ББК 26.22
Л89

РЕДАКЦИИ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

M. I. Lvovich

WATER and LIFE

«MYSL»
MOSCOW, 1986

Рецензент доктор географических наук И. В. Разумихин

Л $\frac{1905010000\text{-}017}{004(01)\text{-}86}$ 55-86

© Издательство «Мысль». 1986

ОТ АВТОРА

Для обеспечения жизни люди не только пьют воду, но уже в течение многих тысячелетий изменяют водный баланс территории. Первые существенные шаги в этом направлении были сделаны под влиянием земледелия. Вырубался лес для подсечного земледелия, распахивалась целина. При примитивных методах земледелия почва утрачивала свою высокую инфильтрационную способность, в результате чего изменялось соотношение элементов водного баланса. Таким образом, люди, обеспечивая себя пищей, не ощущали, что их деятельность как землепашцев оказывает существенное влияние на круговорот воды. Особенно ярко гидрологическая роль почвы проявилась в последние века, когда пахотные земли стали занимать во многих странах большую площадь, когда Человек перешел от подсечного земледелия к стационарному, что способствовало уничтожению лесов на значительных пространствах и замене их пашней.

С появлением орошаемого земледелия, а в засушливых районах оно практикуется уже тысячелетия, потребовался водозабор из рек, и здесь хозяйственное влияние на водный баланс и режим рек приобрело еще больший масштаб.

Сельский житель в некоторых развивающихся странах для своих личных потребностей расходует мало воды — до 20—30 л/сут. Для большей части населения это было характерно в течение многих веков. Но появились города с централизованными водопроводами, которые снабжают население водой, — расход стал превышать 400—500 л/сут на одного человека. Крупным потребителем воды явилась и промышленность. Характерная черта водоемких отраслей промышленного производства и городского хозяйства — относительно малый безвозвратный расход — до 10—20% общего водозабора из рек и водоемов. А остальная отработанная вода оказывается загрязненной, иногда чрезвычайно сильно. С появлением централизованной канализации бытовые и промышленные сточные воды стали сбрасываться в реки и водоемы, и поэтому возникла проблема их загрязненности. Благодаря большим усилиям, направленным на устранение или хотя бы ослабление этого неблагоприятного явления, на земном шаре распространение загрязнений рек и водоемов сточными водами заторможено, но в некоторых районах мира все-таки продолжает расти.

Для текущего века характерны другие глобальные преобразования гидрологического режима — под воздействием больших водохранилищ, создаваемых главным образом в связи с сооружением гидроэлектростанций, отчасти обеспечивающих нужды орошаемо-

го земледелия и водоснабжения населения городов и промышленности.

Охватить все стороны жизни, связанные с водой, — задача не только сложная, но и неосуществимая в рамках одной книги. В этой книге рассматриваются не физиологические аспекты роли воды в жизни, а в основном хозяйственные, социальные, освещены те стороны жизненной роли воды, над изучением которых автор работал в течение многих лет.

При работе над книгой автор применял методы конструктивной географии, особенно при комплексном анализе естественных изменений и антропогенных преобразований круговорота воды и его отдельных частей. В этом заключается суть содержания гидрологической науки, которую мы определяем как науку о круговороте воды и связанным с ним обмене веществ. В основе этой книги лежит не инженерное, а географическое направление в гидрологии, которое в последние годы находит все большее развитие и открывает возможности для решения некоторых новых задач.

Автор выражает искреннюю благодарность всему коллективу ученых, работавших под его руководством в течение последних трех десятилетий, благодаря участию которых часть задач гидрологической науки удалось осветить и решить в данной книге.

ВВЕДЕНИЕ

Охарактеризованное в книге направление охраны водных ресурсов прежде всего исходит из теоретических предпосылок — естественного круговорота воды и обмена биогенных элементов, а также предусматривает систему мер, которая в конце концов обеспечит всемерное постепенное отделение естественного круговорота воды от хозяйственного, в процессе которого происходит загрязнение воды. Загрязнение — это страшное зло — приобрело глобальные масштабы. Чистые пресные воды ныне сохранились более или менее полно в районах с редким населением и слаборазвитой маловодоемкой промышленностью. Здесь сосредоточено более 80% мировых ресурсов пресных вод. На остальных 20% площади суши проживает почти 90% населения и размещена почти вся водоемкая промышленность, а водные ресурсы ограничены; бо́льшая часть отходов попадает в отработанную в городе и на производстве воду, которая становится сточной водой, а содержащиеся в ней отходы — загрязнителями. Поэтому повышение уровня борьбы с загрязнением вод на основе применения более совершенных принципов, вытекающих из сути самих явлений формирования водных ресурсов в процессе круговорота воды, призвано обеспечить мир чистой пресной водой. Сохранение такого процесса несомненно является важнейшей задачей человечества. По этой причине вопросы преобразования и охраны вод, вернее сказать вопросы их защиты от загрязнения главным образом и составляют содержание этой книги.

Однако нельзя решать проблему качества воды изолированно от формирования водных ресурсов в процессе естественного круговорота воды, без анализа условий и характера их преобразований, изменений в результате деятельности людей. Эти вопросы взаимосвязаны, и им автор уделяет соответствующее внимание.

Основное направление книги — освещение путей наиболее полного удовлетворения потребностей человека в чистой воде во всех проявлениях его жизнедеятельности, включая обеспечение водой его быта, производства и отдыха. В результате прежних исследований появились представления о географических закономерностях мирового речного стока, были составлены первые мировые карты речного стока и типологии водного режима рек (Львович, 1945). За истекшие годы эта тема выросла в учение о географической зональности водного баланса территории земного шара (Львович, 1971, 1974; Водный баланс СССР и его преобразование, 1969[1]).

[1] Редактор и соавтор.

Далее были начаты исследования гидрологических преобразований путем сельскохозяйственных воздействий на почву. В итоге развития этих исследований был разработан балансовый метод расчетов и предвычисления ожидаемых антропогенных изменений элементов водного баланса территории, включая и речной сток. Для этой цели были специально разработаны программа и методика полевых экспериментальных исследований, которые проводились в основных географических зонах европейской части СССР (Львович, 1952, 1960, 1963).

Углублением методологии гидрологических исследований является применение шестикомпонентного метода, в основе которого лежит система уравнений водного баланса территории (Львович, 1950а, 1950б). Этот метод позволил в значительной мере приблизить воднобалансовые исследования к происходящему в природе естественному водообмену — круговороту воды. Почти 300 лет гидрология развивалась на основе трехкомпонентного уравнения водного баланса, и лишь 30 лет применяется шестикомпонентная система уравнений. Новый метод в сочетании с раскрытыми зональными географическими закономерностями водного баланса послужил основой для балансовой оценки водных ресурсов неизученных или слабоизученных в гидрологическом отношении районов мира, которые в настоящее время занимают более $^1/_3$ суши.

Другой принципиальный результат исследований в гидрологии — почвенное направление в науке о воде, основы которого заложены в книге «Человек и воды» (Львович, 1963) и успешно развиваются Г. В. Назаровым (1970, 1981) и другими гидрологами-географами. Формула А. И. Воейкова (1884) «реки есть продукт климата», господствовавшая несколько десятилетий, подвела итог вековым представлениям о том, что гидрологический режим рек является прямым отражением климата. Доказано, что такого определения недостаточно: гидрологический режим отражает совокупность природных компонентов, в том числе климата и почвы, как главнейших, наиболее ярких гидрологических факторов. Без почвы, ее учета в качестве гидрологического фактора не существовала бы гидрологическая наука. Наряду с отмеченным известным положением А. И. Воейкова в практической работе, при анализе причин происхождения речного стока, подразумевается и роль других факторов, особенно почвы. Сам А. И. Воейков через несколько лет после выступления с формулой «реки есть продукт климата» в труде, посвященном гидрологическим преобразованиям под воздействием человека на природу (Воейков, 1894), признал гидрологическую роль почвы.

Если выдающийся гидролог В. Г. Глушков в написанной в 30-х годах статье (Глушков, 1961) впервые высказал мысль о том, что в формировании гидрологических явлений и процессов участвуют почти все природные факторы, то через 20—30 лет после выхода в свет этой статьи уже сложилось почвенно-географическое направление в гидрологии. За эти десятилетия почвенный фактор в

гидрологии изучен не хуже климатического. Более того, появление представлений о почве как одном из важнейших факторов в гидрологии потребовало также пересмотра некоторых особенностей влияния климата на воды. Оно сыграло немалую роль в методологическом обогащении гидрологической науки. Предвидение В. Г. Глушкова полностью оправдалось.

Преобразования природы настолько разнообразны и зашли так далеко, что в настоящее время приобрели глобальные масштабы. Вода находится в числе тех компонентов природы, сознательные преобразования или попутные изменения которых наиболее существенны. Этой важной проблеме посвящена II часть книги, поэтому здесь мы ограничимся рассмотрением одного принципиального вопроса. Этот вопрос нередко считают дискуссионным, но, с моей точки зрения, он является решенным в такой степени, которая позволяет оценить положительные и отрицательные стороны преобразований и изменений и основные направления, в которых они должны осуществляться с наибольшим эффектом, а также дать соответствующие рекомендации специалистам, осуществляющим такие преобразования на практике.

Помимо целенаправленных гидрологических преобразований, воздействующих непосредственно на элементы гидросферы, существуют преобразования или изменения как бы вторичного характера. Примером может служить развитие земледелия: распашка земель, сведение лесов, которые помимо достижения прямой цели оказывают существенное влияние на водный баланс и вещественный обмен, связанный с круговоротом воды. Этот процесс происходит уже в течение многих веков. Целенаправленное управление гидрологическим режимом приобрело широкие масштабы сравнительно недавно — в последние десятилетия, когда в гидрологии появились навыки объективной оценки преобразований и изменений водного баланса и были созданы основы теории для эффективного разрешения этой проблемы.

В чем заключаются главные задачи науки в деле преобразований и изменений природы?

Во-первых, понимание того, что положительные преобразования одних элементов природы часто сказываются в большей или меньшей степени отрицательно на других ее элементах. Например, тысячелетиями применялись разные системы земледелия, сыгравшие в основном отрицательную роль в формировании водного баланса территории и речного стока. Но отсюда не следует делать вывод, что для избежания отрицательных влияний на гидрологический режим не следовало бы осваивать земельные ресурсы. Исторически такой подход был бы неверным, так как земледелие сыграло решающую роль в развитии цивилизации, а об отрицательных последствиях стало известно через века. Главное требование для современной науки — научно обоснованный географический прогноз, который позволяет заблаговременно выявить побочные отрицательные последствия преобразований природы.

Во-вторых, необходимо иметь в виду, что хозяйственные меры в зависимости от способов их осуществления, уровня техники и культуры, социальных условий оказывают разное влияние на гидрологический режим. Так, современное механизированное земледелие играет иную роль в формировании водного баланса и гидрологического режима, чем играло в прошлом при примитивном земледелии: поверхностный (паводочный) сток уменьшается; несколько возрастает, хотя и не всегда, питание рек подземными водами; в степной, частично в лесостепной зонах ослабевают эрозионные процессы. Таким образом, мы видим, что более высокая форма земледелия оказывает положительное влияние на гидрологический режим.

В-третьих, сельскохозяйственные мелиорации, в значительной мере направленные на управление водным режимом почвы и водным питанием растений, являясь одним из наиболее эффективных и хозяйственно важных гидрологических преобразований, нередко осуществляются с некоторыми недостатками. В орошении избыток воды стимулирует чрезмерно щедрые поливы, часто приводящие к повышению уровня грунтовых вод, засолению почв, которые нужно промывать, и для этой цели, а также для понижения уровня грунтовых вод необходимо создавать густую дренажную сеть на орошаемых полях. С другой стороны, осушаемые земли часто переосушиваются, и поэтому они в итоге оказываются малоурожайными. Здесь наиболее правильно применять создаваемые ныне в умеренном поясе мелиоративные системы двойного действия: при избыточном естественном увлажнении действует осушительная часть системы, при недостатке влаги — оросительная.

В-четвертых, при строительстве гидротехнических сооружений в прошлом имели место слишком большие отрицательные последствия. На водохранилищах создавались обширные мелководья, играющие незначительную роль для эксплуатации самих водохранилищ. Вместе с тем большие участки плодородных земель выпадали из сельскохозяйственного фонда.

В-пятых, загрязнение вод отходами городов, промышленности и сельского хозяйства, как уже было отмечено, — страшный бич современной экономики, который необходимо устранять не полумерами, такими, как установление предельных норм концентрации загрязнений (ПДК). Система ПДК в какой-то мере тормозит распространение загрязнения вод, но кардинально не устраняет отрицательных последствий, так как не учитывает обмена элементов, особенно биогенных, связанных с круговоротом воды, в том числе с его хозяйственной частью. Для эффективной борьбы с загрязнением вод необходимо устранить его причины, что возможно, если ввести систему действий, начинающихся еще до появления загрязнений, т. е. основанных на профилактических принципах. Никакие ограничительные меры не помогут, если загрязненные воды будут выпускаться в реки и водоемы; борьба с их последствиями равноценна попыткам вернуть джинна обратно в бутылку. Борьба с

причинами, а не с последствиями загрязнений — вот кардинальный путь предохранения вод от загрязнений. Именно этот путь наиболее эффективен для решения проблемы чистоты вод во всех звеньях их круговорота, в том числе и хозяйственного. Особенно это важно для рек, превращенных в каскады водохранилищ. При ослаблении проточности водохранилищ органические вещества сточных вод как бы удобряют водоемы, что в конце концов приводит к их эвтрофированию — крайне неблагоприятному и опасному явлению, связанному с анаэробным обменом, завершающимся отравлением воды. В мировой практике имеют место такие случаи. Печальным примером может служить оз. Эри — одно из крупных в системе Великих озер Северной Америки.

Антропогенные преобразования вод уже достигли глобальных масштабов. По этой причине ведущиеся иногда разговоры о том, допустимы в принципе или недопустимы какие-либо преобразования и изменения вод, лишены смысла. Необходимо считаться с фактом уже происшедших преобразований, многие из которых были осуществлены вполне удачно, «вписались» в естественную природу и в некоторых случаях даже улучшили отдельные ее компоненты. Например, упомянутый выше факт улучшения водного баланса территории, а следовательно, и рек под влиянием современного механизированного земледелия с глубокой вспашкой, зяблевой пахотой и т. д. Но в ряде случаев преобразования оказались менее удачны.

Необходимо подчеркнуть, что все преобразования преследуют решение определенной практической задачи и чаще всего удовлетворительно выполняют возложенную на них функцию. Примером могут служить те же водохранилища, которые создаются в первую очередь для регулирования речного стока. Вместе с тем при удовлетворительном решении основной задачи допускается немало просчетов: неблагоприятные влияния на смежные явления и процессы иногда столь значительны, что превосходят целенаправленные преобразования.

Еще сравнительно недавно наука была недостаточно подготовлена, чтобы выступить с определенными рекомендациями по поводу направлений эффективных преобразований природы. В последние годы дело меняется в лучшую сторону: наука теперь более подготовлена для анализа последствий преобразований природы, а проектные организации более внимательно прислушиваются к рекомендациям науки. Однако не всегда принимается во внимание тот факт, что ликвидация побочных отрицательных явлений в ряде случаев требует некоторых затрат, т. е. удорожания строительства. Без разрешения этого вопроса любые достижения науки и проектных работ будут встречать затруднения при реализации мер по преобразованию природы. Нередко не принимается во внимание тот факт, что почти любые преобразования природы не могут быть осуществлены без последствий. Постановка вопроса о том, что преобразования допустимы только при условии полного отсутствия

отрицательных явлений, означала бы фактически отказ от каких-либо преобразований.

В свете сказанного далеко не всегда бывают обоснованны мнения о том, что «трогать» (преобразовывать) природу нельзя, а если допускать преобразования, то без малейших издержек. Такой подход далек от того, что происходит в мире: преобразования огромны, хотим мы этого или не хотим, их требует жизнь, а преобразования без каких-либо издержек не реалистичны. Издержки неизбежны, но задача науки и проектных работ заключается в том, чтобы они были *минимальны,* а эффективность планируемого мероприятия была бы наибольшей. На решение этих двух вопросов должно быть направлено внимание соответствующих отраслей науки и практики.

С преобразованием вод связан ряд биологических, экологических проблем, которые решаются на стыке нескольких наук. Еще многое необходимо сделать, чтобы получить больше уверенности при решении вопросов экологии, связанных с преобразованием вод. Вместе с тем в этом направлении немало уже сделано. В тех случаях, когда это возможно, вопросы экологии решаются уже сейчас, при оценках и прогнозах ожидаемых гидрологических преобразований, которые, как известно, происходят в процессе круговорота воды и во многих его звеньях приобретают характер биологических и, конечно, не могут быть обойдены географическими прогнозами. Не говоря о больших работах, проводимых в этом направлении биологической наукой, приведу несколько примеров из практики.

Один из серьезнейших вопросов возник в связи с проектом сооружения Нижневолжской гидроэлектростанции. Эта станция должна была завершить каскад волжских ГЭС и значительно уменьшить оставшийся свободным участок Нижней Волги от устья до Волгоградской плотины. На этом участке происходил нерест осетровых и его нарушение несомненно сыграло бы отрицательную роль в рыбоводстве, которое в 60-х годах находилось в большом упадке. Анализ, сделанный совместными усилиями гидрологов и ихтиологов, показал, что сооружение Нижневолжской ГЭС нанесло бы непоправимый ущерб рыбному хозяйству Нижней Волги и Северного Каспия, тем более что тогда искусственное рыборазведение только начинало развиваться. Несколько месяцев продолжалась горячая дискуссия в Государственной экспертной комиссии Госплана СССР. Но в конце концов было доказано, что Нижневолжскую ГЭС с целью сохранения осетровых рыб, а в перспективе в целях их интенсивного расширенного воспроизводства строить нельзя. При содействии президиума АН СССР было вынесено решение об отсрочке строительства, пока сооружением нескольких рыбных заводов не будут гарантированы расширенное воспроизводство осетровых и высокий уровень развития рыбного хозяйства. Автор этих строк приложил много усилий для решения изложенной проблемы в пользу экологии и поэтому весьма удов-

летворен таким результатом. В дальнейшем ихтиологи разработали и осуществили ряд мероприятий по расширенному воспроизводству осетровых рыб. В результате за 50 лет ежегодный вылов осетровых рыб увеличился: с 8,5 тыс. т в 1931—1935 гг. до 25,6 тыс. т в 1976—1978 гг. При этом дальнейшие возможности расширенного воспроизводства осетровых рыб не исчерпаны, хотя возникли и новые трудности в деле рыборазведения.

Опыт решения научных задач на грани гидрологии и экологии может быть продолжен. Он касается следующих принципов:

— размещения системы полезащитных лесных полос для повышения эффективности их гидрометеорологического и сельскохозяйственного действия, уменьшения оросительных норм путем усовершенствования техники поливов в степной зоне и в предгорных равнинах Средней Азии;

— расходования, продуктивного и непродуктивного, воды зерновыми культурами с целью увеличения доли первого за счет второго и снижения потребления воды на единицу урожая;

— суммарного расходования воды на урожай в СССР;

— управления водным балансом и соленостью Аральского моря (его отдельных частей) для создания оптимальных условий рыборазведения;

— прекращения сброса сточных вод в реки и водоемы для предотвращения неблагоприятного процесса эвтрофирования озер и водохранилищ, который по сути является следствием процессов вещественного обмена, связанных с жизнью людей и биологическими явлениями.

Перечисленные вопросы и ряд других, подобных им, относятся к актуальным проблемам экологии. Как видно, вопросы экологии решаются, и не безуспешно. Впрочем, это не исключает необходимости развития теории и практики экологии как одного из важных явлений в процессах гидрологических преобразований. Экология и связанные с ней проблемы — реальность текущего времени, мобилизующая гидрологическую науку на решение очень сложных вопросов, которых от науки ждет жизнь.

Ни один аспект мирового опыта преобразования природы не может учитываться в отрыве от вопросов биологии и экологии. Человек обладает колоссальными средствами, чтобы противостоять неблагоприятным явлениям и процессам в природе, происхождение которых связано с его деятельностью. Но на протяжении почти всей истории человечества оно стремилось удовлетворить свои ближайшие потребности. Природа была очень слабо затронута деятельностью человека, проблема антропогенных изменений природы, влияния окружающей среды на людей не стояла. Но в последнее время, особенно в период научно-технической революции, обострения социальных и классовых проблем в капиталистическом мире, проблема окружающей среды приобретает все большую остроту. Во многих странах Запада эта проблема обострена особенно.

Чтобы наша современная хозяйственная деятельность принесла минимум отрицательных последствий, необходимо производить их оценку применительно к условиям будущего. Для этого требуется прогноз, своего рода долгосрочное планирование, по менее конкретное, чем, например, пятилетний план или план на ближайшие пятилетия. Метод такого прогноза был впервые применен в СССР при разработке ленинского плана ГОЭЛРО. Смысл этого метода заключается в следующем: не планируя всех деталей развития, что практически невозможно на большие сроки, определить ведущий показатель, реализация которого позволила бы все остальные плановые показатели предусматривать с меньшей заблаговременностью. В качестве такого ведущего показателя в плане ГОЭЛРО в соответствии с его названием явилась *электрификация России*. Именно цель и уровень электрификации определяют конкретные показатели экономического развития.

Следуя ленинской плодотворной идее, автор для каждого из освещенных в книге перспективных прогнозов пытается найти ведущий показатель, достижение которого в основном решает проблему в целом. Так, в основе прогноза мирового количества воды, которое потребуется использовать для орошения в отдаленной перспективе, лежит идея уменьшения количества расходуемой воды на производство единицы продукции орошаемого земледелия, например тонны зерна, кормовых или технических культур. О реальности такого направления говорят успехи, достигнутые в развитии техники орошения и позволяющие уменьшать поливную и оросительную нормы. Для прогноза мирового расходования воды на хозяйственно-бытовое водоснабжение в качестве ведущих показателей приняты: 1) обеспеченность всего населения питьевой водой необходимого качества; 2) использование содержащихся в сточных водах биогенных элементов для удобрения, что наиболее близко соответствует их обмену в естественных условиях (достижение этих целей одновременно решает задачи прогрессивного развития других показателей этой отрасли водного хозяйства); 3) постепенное прекращение сброса даже очищенных сточных вод в реки и водоемы.

Эти прогнозы на отдаленную перспективу характеризуют «конечную» цель, к достижению которой необходимо стремиться, для того чтобы последовательно обеспечивать развитие какой-либо отрасли хозяйства. Конечно, такие прогнозы не могут претендовать на высокую точность. Но такая задача и не ставится. Автор считает, что их назначение ограничивается определением тенденции развития прогнозируемых мер. Численные показатели не лишены условности и служат для иллюстрации этой тенденции. Ориентируясь на нее, можно уже в настоящее время предпринимать меры, нацеленные на решение задач будущего. По существу они уже частично предпринимаются, но недостает еще должной целенаправленности в этом деле. В современной мировой практике охраны водных ресурсов еще слишком большое место занимают меры временного характера, направленные на борьбу с последствиями загрязнений. Отсюда следуют всевозможные ограничения, которые часто находятся в противоречии с производством. Им на смену должны постепенно прийти меры долговременного характера, в основе которых, как сказано выше, лежит совсем иной принцип: *не борьба с последствиями загрязнений*, как часто еще практикуется, а *ликвидация причин* этого неблагоприятного явления. Такой профилактический принцип позволяет решать задачу более кардинально.

Крупным событием на пути развития водного хозяйства СССР, особенно его гидромелиоративного направления, явился октябрьский (1984 г.) Пленум ЦК КПСС, предусмотревший увеличение к 2000 г. площади орошаемых земель до 30—32 млн. га, осушенных — до 19—21 млн. га, а также ряд других мер по повышению эффективности использования мелиорированных земель в целях устойчивого наращивания продовольственного фонда страны (Материалы Пленума Центрального Комитета КПСС (23 октября 1984 г.). М., 1984, с. 29).

Часть I

Водные ресурсы мира и процессы их формирования

Глава 1
КРУГОВОРОТ ВОДЫ И МИРОВОЙ ВОДНЫЙ БАЛАНС

Несколько миллиардов лет назад Земля была лишена свободной воды. Позже — 4 млрд. лет назад — объем гидросферы составлял лишь 20 млн. км³, т. е. был в 7000 раз меньше современного (Клиге, 1982). Процесс формирования гидросферы был длительным. Происходил он за счет дегазации мантии Земли. И в настоящее время этот процесс продолжается. Весь объем воды мантии, служащий источником формирования воды на Земле, оценивается в 20 млрд. км³ (Виноградов, 1963), или в 15 раз больше общего объема гидросферы. По некоторым представлениям, ежегодный прирост объема гидросферы за счет дегазации мантии составляет около 1 км³.

Общий объем гидросферы в настоящее время составляет немного менее 1,5 млрд. км³. 94% этого объема и 72% поверхности земного шара занимает океан; из общего объема гидросферы 60 000 км³ (4%) приходится на подземные воды, большую часть которых представляют глубинные рассолы, а около 4000 км³ — пресные подземные воды зоны активного водообмена. Третьей крупной частью гидросферы являются полярные ледники — 24 млн. м³ (1,6%). Хотя они как бы законсервированы в виде огромных масс льда, их участие в круговороте воды довольно активно. На долю поверхностных пресных вод в гидросфере приходится совсем небольшой объем — около 360 000 км³, или 0,25% ее общего объема, в том числе 278 000 км³ составляют озера, а 83 000 км³ — почвенная влага. Когда впервые был определен объем всех русловых речных вод Земли — около 1200 км³, или менее одной десятитысячной процента всего объема гидросферы, удивительным казалось, что столь малый объем служит началом формирования почти всех источников пресных вод, доступных для использования (Львович, 1945). Однако это явление оказалось вполне закономерным в связи с тем, что водообмен в речных руслах обладает исключительно высокой активностью (см. ниже табл. 2). Сравнительно невелик также объем паров атмосферы — 14 000 км³, или 0,001% [1].

[1] Существуют различные толкования термина «гидросфера». Так, высказывается мнение о том, что к гидросфере относятся только континуально связанные между собой воды, т. е. практически океан. Но если исходить из такого представления, то спрашивается: что представляют собой другие воды Земли, кроме океана? Понятие о гидросфере подчеркивает единство водной сферы Земли. Воды Земли едины и исторически (Вернадский, 1933). Мнение о том, что к гидросфере относится лишь какая-то ее часть, вызвано односторонним и неточным представлением о дискретности отдельных частей гидросферы. Оно не учитывает, что континуальность всей гидросферы обеспечивается процессом круговорота воды. Каждая капля воды в процессе круговорота может быть соединена с другой: в данном случае дискретность невозможна.

Среди многообразия различных черт и особенностей гидросферы следует особо подчеркнуть движение. Гидросфера весьма динамична. Она основа круговорота воды — грандиозного процесса, с которым связано естественное опреснение водных ресурсов, распределение воды на суше, обеспеченность пресной водой растений, животных, человека. С круговоротом воды связано формирование эрозионных процессов и рельефа Земли.

Круговорот воды — процесс, который является предметом изучения гидрологической науки. Поэтому имеется полное основание определить гидрологию как *науку о круговороте воды и связанном с ним вещественном обмене*.

Процесс круговорота воды был подробно охарактеризован в книге «Мировые водные ресурсы...» (Львович, 1974). Здесь уместно подчеркнуть некоторые из тех сторон процесса, которые наиболее близко стоят к теме данной книги.

Суть его заключается в следующем. Вода, испаряясь с поверхности океана и суши, пополняет атмосферу влагой. Водяной пар атмосферы конденсируется и дает атмосферные осадки, выпадающие в виде дождя или снега. Дождевые и снеговые воды частично впитываются в почву, а вода, не успевающая просочиться, образует поверхностный сток. Она стекает со склонов, собирается в оврагах и балках в ручьи, по разветвленной сети которых попадает в реки. Но это лишь часть речного стока — поверхностный, паводочный. Реки питаются также и подземными водами, которые восполняются в результате просачивания вглубь почвенной воды. Часть наиболее активных подземных вод выходит на поверхность в виде источников или дренируется реками. Реки чаще всего получают постоянный приток воды именно благодаря устойчивому питанию подземными водами. Воды озер и морей, также как океана в целом, пополняются не только атмосферными осадками, но и речными водами; таким образом происходит непрерывное восполнение воды, испаряющейся с акватории океана и бессточных озер. Почвенная влага расходуется на испарение и на транспирацию растений и обогащает атмосферу водяным паром, а также питает подземные воды. Такова схема круговорота воды.

Чрезвычайно важное свойство круговорота воды заключается в том, что он, взаимодействуя с литосферой, атмосферой и биосферой, связывает воедино все части гидросферы: океан, реки, почвенную влагу, подземные воды, атмосферную влагу. Благодаря круго-

вороту утрачивается дискретный, прерывистый характер гидросферы, о чем было уже сказано. Все воды Земли едины не только по происхождению, но и под влиянием постоянно действующего круговорота.

Подчеркнем, что использование водных ресурсов для разнообразных хозяйственных и культурных целей также происходит в процессе круговорота воды.

Движущие силы круговорота воды — солнечная энергия и сила тяжести. Под влиянием тепла происходят испарение, конденсация водяных паров и другие процессы. Сила тяжести служит причиной падения капель дождя, течения рек, движения почвенных и подземных вод. Часто эти две причины действуют совместно; например, на атмосферную циркуляцию одновременно влияют как тепловые процессы, так и сила тяжести.

Из сказанного видно, что круговорот воды подвергается влиянию двух независимых процессов. Первый из них — дегазация вод мантии — источник пополнения гидросферы. Он протекает весьма медленно и продолжается уже миллиарды лет. Об изменениях интенсивности этого процесса известно еще мало, а изучение его должно явиться предметом дальнейших палеогидрологических исследований. Другой процесс круговорота воды, охарактеризованный выше и проявляющийся в настоящее время, протекает на несколько порядков интенсивнее первого; его цикл ограничивается сменой сезонов, т. е. одним годом. Современным интенсивным круговоротом воды связаны почти все современные гидрологические процессы, в том числе и те, которые чрезвычайно важны для естественного возобновления и опреснения ресурсов пресных вод.

Автор не ставит перед собой задачу осветить все многообразное значение гидросферы. Но было бы неправильно не сказать о воде как элементе жизни. Вода — важнейший элемент всего живого. Известный английский ученый Д. Бернал (1969), следуя теории А. И. Опарина (1941), совершенно исключает сухие участки из числа мест, где возможно было зарождение живой клетки, рассматривает жизнь как явление, присущее гидросфере, и подчеркивает, что жизнь в сущности есть производное воды. Эти слова относятся не только к происхождению жизни, но и ко всем ее проявлениям. Во всех живых организмах вода наряду с пищей является основой жизнедеятельности. Вода участвует в процессе фотосинтеза органического вещества — основы всего живого, а также и почвообразования. При этом выделяется кислород, обогащающий атмосферу; им дышат люди и животные, он является элементом, распространяющим в природе важные для обмена веществ окислительные процессы. В жизнедеятельности растений большая роль принадлежит транспирации, которая относится к биологическому звену круговорота воды.

Водный баланс — количественное воплощение круговорота воды, его отдельных частей. Для характеристики водного баланса Земли в целом и ее крупных частей уже несколько десятилетий

Таблица 1

Годовой водный баланс Земли

Элементы водного баланса	Объем, км³	Слой, мм
Периферийная часть суши (116 800 тыс. км²)		
Осадки	106 000	910
Речной сток	44 230*	380*
Испарение	61 770	530
Замкнутая («бессточная») часть суши (32 100 тыс. км²)		
Осадки	7 500**	238**
Испарение	7 500	238
Мировой океан (361 100 тыс. км²)		
Осадки	411 600	1 140
Приток речных вод	44 230*	120
Испарение	455 830	1 260
Земной шар (510 000 тыс. км²)		
Осадки	525 100	1 030
Испарение	525 100	1 030

* Включая 2400 км³, или 20 мм (Зекцер и др., 1984), стока подземных вод в океан, минуя реки, а также 300 км³ стока воды и льда с полярных ледников (Котляков, 1977).

** В том числе 830 км³, или 26 мм, речного стока.

применяется система уравнений, на основании которой получены данные, приведенные в табл. 1.

В первой части табл. 1 приведены итоговые значения водного баланса (круговорота воды) периферийной части суши, реки которой впадают в океан; затем следуют данные о водообмене замкнутой, или «бессточной», части суши, реки которой заканчивают свой путь в бессточных озерах — Каспии, Аральском море и др. Замкнутая часть суши в 3,5 раза беднее осадками (в мм слоя) и в 14 раз беднее стоком, чем периферийная часть суши. Из 32 млн. км² этой части суши почти половина занята пустынями, лишенными рек. Приток воды в Мировой океан кроме атмосферных осадков обусловлен еще речным стоком с периферийной части суши, а испарение с его поверхности достигает 1260 мм при годовом объеме 455,2 тыс. км³. Для всего земного шара в целом существует один источник притока воды — атмосферные осадки и один источник ее расходования — испарение, составляющее 1030 мм, или 525 тыс. км³.

Автор ввел понятие активности водообмена (A), происходящего в процессе круговорота воды. Она определяется по соотношению объема части гидросферы (W) к приходному или расходному элементам ее баланса, формируемого в процессе круговорота воды (γ):

$$A = \frac{W}{\gamma},$$

где A — выражается числом лет, необходимых для полного возобновления объема (W) (Львович, 1969).

Таблица 2

Активность водообмена

Часть гидросферы	Объем (с округлением), тыс. км³	Элемент баланса, тыс. км³ год	Активность водообмена, число лет
Океан	1 370 000	452	3 000
Подземные воды	60 000	12	5 000*
В том числе зоны активного водообмена	4 000	12	300**
Полярные ледники	24 000	3	8 000
Поверхностные воды суши	280	40	7
Реки	1,2	40	0,030
Почвенная влага	80	80	1
Пары атмосферы	14	525	0,027
Вся гидросфера	1 454 000	525	2 800

Примечание. С учетом подземного стока в океан, минуя реки:
* 4200 лет;
** 280 лет.

Как видно из данных табл. 2, активность обмена вод океана составляет 3000 лет. Обмен подземных вод еще более замедлен, что происходит за счет глубинных рассолов, отличающихся весьма слабой активностью, но в зоне активного водообмена подземные воды сменяются приблизительно каждые 300 лет. Наиболее замедленна активность полярных ледников, что является следствием медленного движения ледников и таяния льда. Речные водные ресурсы после атмосферной влаги обладают наибольшей активностью. Русловые воды сменяются в среднем каждые 11 дней, т. е. на шесть порядков интенсивнее вод океана и подземных вод. Следует особо подчеркнуть высокую активность речных вод. Это говорит о быстрой их возобновляемости: на основе одной с лишним тысячи кубических километров русловых вод в течение года получается в 40 раз больший объем. Вот почему речная вода в естественных условиях всегда практически пресна и служит одним из основных источников водных ресурсов. Чем менее активен водообмен, тем выше минерализация воды (см. табл. 2). Особенно ярко это проявляется на глубинных подземных водах — тупиковом звене круговорота воды, которые обогащаются растворенными веществами, но их обессоливания не происходит. В противовес этому при активном водообмене вода пресна. Это происходит потому, что основная часть речных вод формируется почти сразу же после конденсации испарившейся воды в атмосферные осадки, которые всегда практически пресны. Минерализация речных вод обусловлена подземными водами, питающими реки. Отчасти это явление вызвано стеканием воды по поверхности почвы. Во всех этих случаях проточная соленая вода в реках — редкое исключение. Особо следует

сказать о бессточных соленых озерах, которые аналогично океану и глубинным подземным водам являются тупиковым звеном круговорота воды замкнутой («бессточной») части суши.

Подводя итог сказанному о круговороте воды, следует подчеркнуть наиболее интересующие нас в этой книге закономерности.

Это, во-первых, чрезвычайно высокая возобновимость основных источников пресных вод. Во-вторых, в процессе круговорота воды происходит опреснение водных ресурсов; круговорот воды — это по существу глобальный опреснитель вод. Значение этой второй закономерности не менее важно, чем первой. Они являются фундаментом для развития многих других гидрологических процессов и служат также теоретической основой для выбора научно обоснованных эффективных путей гидрологических преобразований и защиты вод от загрязнения.

Глава 2
ШЕСТИКОМПОНЕНТНЫЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ ВОДНОГО БАЛАНСА ТЕРРИТОРИИ

Для практических целей, для решения задач использования и охраны водных ресурсов, а также в целях обеспечения водой запросов сельского хозяйства, промышленности и транспорта, необходимо прежде всего знать водные ресурсы вблизи населенных мест. Уже давно стала ощущаться необходимость подробного знания водных ресурсов в связи с задачами их охраны. В мировой науке особую остроту этот вопрос приобрел в последние десятилетия — в годы научно-технической революции.

Специалистов интересует ряд конкретных вопросов водных ресурсов, в основном приемы их оценки и их количественные характеристики. Особенно надежным средством для решения этого вопроса служит метод картографирования. Хотя он используется в гидрологии почти столетие и за это время накоплен большой опыт его применения, ряд вопросов еще требует своего решения.

Советская гидрологическая наука на протяжении десятилетий занимает передовое место в изучении водных ресурсов. Важно подчеркнуть, что первые мировые гидрологические карты были созданы советскими учеными.

В последние годы автор вместе со своими коллегами много внимания уделял развитию метода картографирования и других приемов анализа мирового водного баланса. В этом направлении получен ряд новых методических приемов.

Афоризм А. И. Герцена «метод есть эмбриология истины» неоднократно повторялся в моих публикациях. Действительно, метод является едва ли не главным в решении поставленной научной задачи, он должен обеспечивать надежное ее решение. Но для того чтобы метод играл решающую роль в науке, необходимо, чтобы он опирался на ее теорию; метод должен наиболее полно соответст-

вовать протекающим в природе процессам формирования изучаемого явления. Он не должен быть чем-то произвольным, оторванным от происхождения элементов гидрологического режима. Хорошо, если при этом все или почти все факторы учтены, но более важно знание ведущих факторов, т. е. тех из них, роль которых в формировании гидрологических процессов имеет наибольшее значение и во многих случаях на 80—90% раскрывает их сущность. А очередь изучения остальных, иногда многочисленных, факторов возникнет, когда будет изучено главное, когда потребуется дальнейшее развитие знаний, их дальнейшее углубление. Нередко это обстоятельство научной работы не учитывается и исследование начинается с второстепенных факторов.

Современный опыт гидрологического картографирования выработал некоторые приемы, к которым относятся:

— выражение величин годового речного стока в виде модулей или в миллиметрах слоя;

— отнесение величины стока к геометрическому центру водосбора;

— различные способы интерполяции при недостатке исходных данных. К числу наиболее надежных и теоретически обоснованных относятся зональные комплексные зависимости водного баланса, в том числе и стока, а в горах также зависимости стока от средней высоты бассейна над уровнем моря;

— при проведении изолиний стока учет основных физико-географических факторов, в основном макроформ рельефа, почв, растительности;

— отсеивание неоднородных данных, например исключение из карты малых бассейнов, неполно дренирующих подземные воды;

— использование больших бассейнов для контроля: соответствует ли сток по изолиниям стоку, наблюдавшемуся в створе большой реки. Следует заметить, что для больших рек результаты такого соответствия часто оказываются недостаточно надежными, так как не представляется трудным изменить направление изолиний так, чтобы получилось близкое соответствие измеренному стоку большой реки; существенного уточнения карт стока этим способом достигнуть невозможно.

В основе развития большей части гидрологической науки на протяжении 300 лет лежало трехкомпонентное выражение водного баланса: $P=R+E$ (осадки равны стоку плюс испарение). Впервые оно было применено французом Пьером Перо, инженером, которому в 70-х годах XVII столетия было поручено соорудить водопровод в Лувре. Для этой цели потребовалось знание расхода воды Сены. Определив количество осадков в бассейне Сены, П. Перо вычел из него приближенно оцененное количество испаряющейся влаги и получил расход воды этой реки. Решая частную задачу, ее автор, конечно, не знал, что им было сделано крупное научное открытие, на основе которого гидрологическая наука будет развиваться почти 300 лет. Это уравнение впоследствии подвергалось

некоторым необходимым дополнениям. Во всяком случае, над этим вопросом в конце прошлого столетия — начале текущего работали известные гидрологи из ряда стран — А. Пенк, П. Шрейбер, В. Уле, Е. В. Оппоков, Г. Гейнц, Г. Келлер, Э. Ольдекоп и другие, внесшие существенный вклад в развитие гидрологической науки, в развитие представлений о водном балансе и стоке.

Отечественный ученый В. Г. Глушков впервые выдвинул идею разделения полного речного стока на две составляющие — поверхностный (паводочного) и подземный сток. Сначала это было предложено для Амударьи (1908), а впоследствии для Зерафшана (1924). Позже Б. И. Куделин (1960) предложил несколько схем взаимодействия речных и подземных вод в зависимости от гидрологических условий. Но мои исследования показали, что превалирующая часть этих схем относится не к различным гидрологическим условиям, а к разным фазам водного режима одной и той же реки. Суть заключается в том, что характер питания рек подземными водами изменяется в разные фазы режима рек. Во время формирования стока на фазе подъема паводка русловые воды питают подземные воды, а во время спада половодья происходит обратный процесс: подземные воды, сформированные за счет русловых, почти в полном объеме возвращаются в реку. Такая взаимосвязь между речными и подземными водами наиболее распространена и является типичной (Львович, 1969, 1974). Исключения бывают в случаях аномалий гидрогеологического строения речных бассейнов, например при наличии карста и при некоторых особенностях гидрогеологических структур.

Понятие «подземный сток в реки» явилось известным шагом к дальнейшей дифференциации основного уравнения водного баланса в гидрологии, идею которого автор использовал при разработке шестикомпонентной системы уравнений водного баланса (Львович, 1950а, 1963, 1974).

Предложенная система состоит из следующих уравнений:

$$P = S + U + E;\ S + U = R;\ W = P - S = U + E;$$

$$K_U = \frac{U}{W};\quad K_E = 1 - K_U = \frac{E}{W},$$

где P — атмосферные осадки;
R — полный речной сток;
S — поверхностный (паводочный) сток;
U — подземный сток в реки (устойчивая часть речного стока);
E — испарение;
W — валовое увлажнение территории;
K_U и K_E — коэффициенты питания рек подземными водами и испарения, показывающие, какие части годовой инфильтрации формируют подземный сток и расходуются на испарение.

Эта система уравнений отвечает современным представлениям о формировании водного баланса территории. В ней выделены различные составляющие речного стока, установленные на основе теории и имеющие практическое значение.

Так, поверхностный (паводочный) сток следует в значительной степени рассматривать как потенциальные водные ресурсы. Для того чтобы выявить эту особенность обычными расчетными приемами, практикуемыми в гидрологических и водохозяйственных расчетах, применяются стохастические методы, учитывающие вероятность и обеспеченность стока за различные периоды. Эти способы, конечно, необходимы при проектировании конкретных водохранилищ, но для оценки речных водных ресурсов различных категорий, а также для планирования их использования и охраны удобнее располагать такими простыми характеристиками, как подземный (устойчивый) и поверхностный (паводочный) сток.

Лишь в отдельных случаях паводочный сток используется непосредственно без предварительного регулирования. Примером может служить использование для орошения районов, прилегающих к горам, стока горных рек, образующегося от ледникового и высокогорного снегового питания во время паводков, совпадающих по времени с вегетационным периодом. Но и в подобных случаях не исключается необходимость регулирования стока для того, чтобы орошаемое земледелие не зависело от стихийного хода паводков, и для умножения ресурсов вегетационного периода за счет аккумуляции стока холодной части года или очень высоких паводков.

Подземный сток в реки и поверхностный (паводочный) различаются не только при использовании в практических целях, но и по своему происхождению. Раньше полный сток не делили на две генетические составляющие, хотя было известно разное происхождение отдельных частей речного стока, но реализовать это знание в практической работе не удавалось по методическим причинам: не существовало вполне надежного способа разделения стока на подземный и поверхностный.

Чрезвычайно важно появление в шестикомпонентном методе общей характеристики почвенной влаги (валового увлажнения территории). Этот элемент водного баланса почти не рассматривался в гидрологии и в основном был предметом изучения в агрометеорологии. Между тем нельзя ограничивать значение почвенной влаги только как одного из компонентов природной среды. Это, конечно, источник водных ресурсов, один из главных факторов в агрономии, но почвенная влага является также и компонентом водного баланса, важным элементом круговорота воды, от которого зависят другие его элементы, например ресурсы подземных вод.

Одним словом, шестикомпонентная система водного баланса устраняет некоторые ограничения, которые были присущи науке в связи с тем, что подземные воды изучались и обобщались одной системой организаций, почвенная влага — другой, а речной сток и

испарение — еще двумя другими. В настоящее время в научной и иногда практической работе учитывается шесть элементов водного баланса. Все они связаны единой системой круговорота воды, а водный баланс является его количественным выражением. Таким образом метод исследования водного баланса и балансовой оценки водных ресурсов еще в большей мере был приближен к естественному круговороту воды. Кроме того, коэффициенты K_U и K_E, особенно первый, служат весьма важным дополнением для характеристики и анализа водного баланса территории, значительно углубляющим представления, которые дает коэффициент речного стока.

Система дифференцированных уравнений водного баланса позволяет по внутригодовому ходу стока (гидрографу) в створе реки и по ходу осадков, наблюдаемых в ее бассейне, раскрывать, количественно оценивать подземный сток в реки. Не всегда, однако, водный баланс замыкается в пределах одного речного бассейна. В отдельных случаях границы поверхностного водосбора реки не совпадают с границами ее подземного бассейна.

Сущность метода определения питания рек подземными водами заключается в следующем. Прежде всего на гидрографе выделяются периоды, когда реки питаются только подземными водами. Это бывает во время устойчивой зимней межени при отсутствии оттепелей, а также в период летней межени после продолжительного отсутствия дождей. При выделении таких моментов можно примерно ориентироваться на время добегания речного стока. Если продолжительность периода после зимней оттепели или после летних дождей до наступления новой оттепели зимой или до новых дождей летом превышает продолжительность добегания речного стока, то можно считать, что в последующее время река питается только подземными водами. Более отчетливо эта задача решается для рек с устойчивой зимой и с продолжительными засушливыми летними периодами или для рек с перерывами между выпадением паводкообразующих осадков.

Охарактеризованный процесс отражается на форме линии (рис. 1), отделяющей сток подземных вод, гидравлически связанных с рекой, от поверхностного стока в период половодья. Эта линия, следовательно, представляет собой циклическую кривую, первая часть которой показывает снижение, а вторая — повышение притока подземных вод в реки. Основанием циклической кривой служит прямая, обычно наклонная линия, соединяющая точки на гидрографе, соответствующие моментам питания реки только подземными водами до и после половодья. Отсюда следует, что, принимая в качестве границы между поверхностным и подземным стоком указанную прямую линию, мы получаем средний результат, довольно строго отражающий размеры притока в реки подземных вод, гидравлически связанных с русловыми водами в период половодья.

Однако подземный сток в реки происходит не только за счет

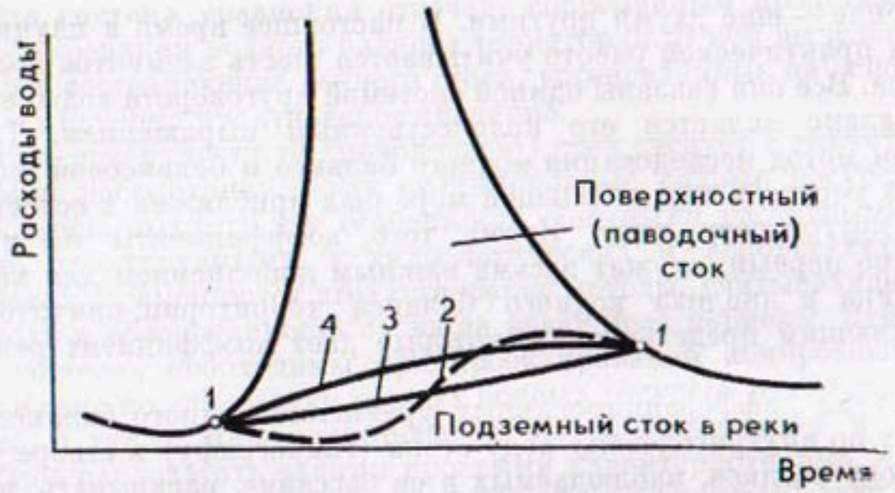


Рис. 1. **Схема определения подземной составляющей речного стока в период половодья (расчленения гидрографов):**

1 — точки, соответствующие питанию рек подземными водами до и после половодья; 2 — естественный ход притока в реки подземных вод, гидравлически связанных с водой речных русел; 3 — линия, примерно характеризующая средний приток подземных вод, гидравлически связанных с водой речных русел (осредненная кривая — 2); 4 — граница подземного и поверхностного стока с учетом питания рек подземными водами, гидравлически не связанными с русловыми

подземных вод, гидравлически связанных с русловыми водами. Реки питаются также подземными водами, гидравлически не связанными с русловыми. Во время половодья приток их в реки возрастает. Общий же приток подземных вод как гидравлически связанных с русловыми, так и гидравлически не связанных достигает максимума на спаде половодья. Учитывая это, можно приближенно установить границу между поверхностным речным стоком и общим притоком всех видов подземных вод в реки (см. линию 4 на рис. 1).

Если имеются данные о колебаниях дебита одного или нескольких источников подземных вод, то, пользуясь методом Ф. А. Макаренко при наличии данных о дебите подземных источников, можно уточнить указанную границу между поверхностным и подземным стоком в реки. При этом, однако, следует убедиться в репрезентативности выбранных источников подземных вод, т. е. в соответствии показаний их дебита условиям питания подземных вод данного речного бассейна в целом. Иначе при использовании данных о дебите случайных, нерепрезентативных источников могут быть допущены существенные ошибки в определении питания рек подземными водами.

Шестикомпонентный метод изучения водного баланса территории применен для СССР, для ряда зарубежных стран и для земного шара в целом. Эта работа выполнена в течение двух десятилетий, и в процессе ее вносились некоторые усовершенствования. Совершенствованию этого метода способствовал метод интерполяции, разработанный для случаев недостаточной гидрологической изученности или для случаев полного отсутствия гидрологической

информации. В настоящее время шестикомпонентный метод позволяет даже для слабоизученных территорий получать вполне достоверные карты элементов водного баланса.

Применение шестикомпонентной системы для изучения водного баланса территории, составления карт, конечно, сложнее, чем применять трехкомпонентную систему, когда из гидрологических элементов по существу дело ограничивается составлением лишь одной карты речного стока. Карту же испарения, несомненно, более целесообразно и достоверно строить по разности между осадками и стоком. Особой тщательности требует определение подземного стока, а изложенный выше метод и ряд практических приемов позволяют получить достоверные результаты и по валовому увлажнению территории.

Можно полагать, что в будущем число компонентов водного баланса будет расти и метод еще в большей мере будет отражать теорию круговорота воды. Интересные попытки в этом направлении уже сделаны (Коронкевич, 1973; Коронкевич, Юревич, 1975).

Работа по шестикомпонентному методу в значительной мере усложняется увязкой изолиний шести карт. Эта работа не проста при согласовании карт осадков, стока и испарения, но в несколько раз становится более трудоемкой и кропотливой при согласовании изолиний на шести картах так, чтобы в любой точке карты можно было получить результат, соответствующий уравнениям шестикомпонентной системы. При глазомерной работе положительного результата можно достигнуть путем множественных приближений, но в последнее время получен метод, решающий эту задачу автоматически. Для этой цели в Институте географии АН СССР был разработан метод составления водобалансовых карт на ЭВМ (Беляев, 1978).

В публикациях Н. Н. Дрейер (1978), Г. Я. Карасик (1970, 1974), Г. М. Николаевой и др. (1977) и в монографии Львовича (1974) в интерполяционных целях, для восполнения данных по неизученным и малоизученным районам, использовались зависимости элементов водного баланса от осадков. Отличительная черта этих зависимостей заключается в том, что в их основе лежит принцип географической зональности. Они устанавливаются для каждой географической зоны в отдельности и, таким образом, учитывают не только атмосферные осадки как фактор водного баланса, но и влияние на его элементы совокупности всех других водобалансовых факторов географической зональности. Такие зависимости строятся эмпирически, а значения элементов водного баланса распространяются на неизученные или малоизученные районы этой же зоны.

Обобщенные структурные зависимости водного баланса: $U, E = f(W)$,

где U — подземный сток в реки;

E — испарение;

W — валовое увлажнение территории, —

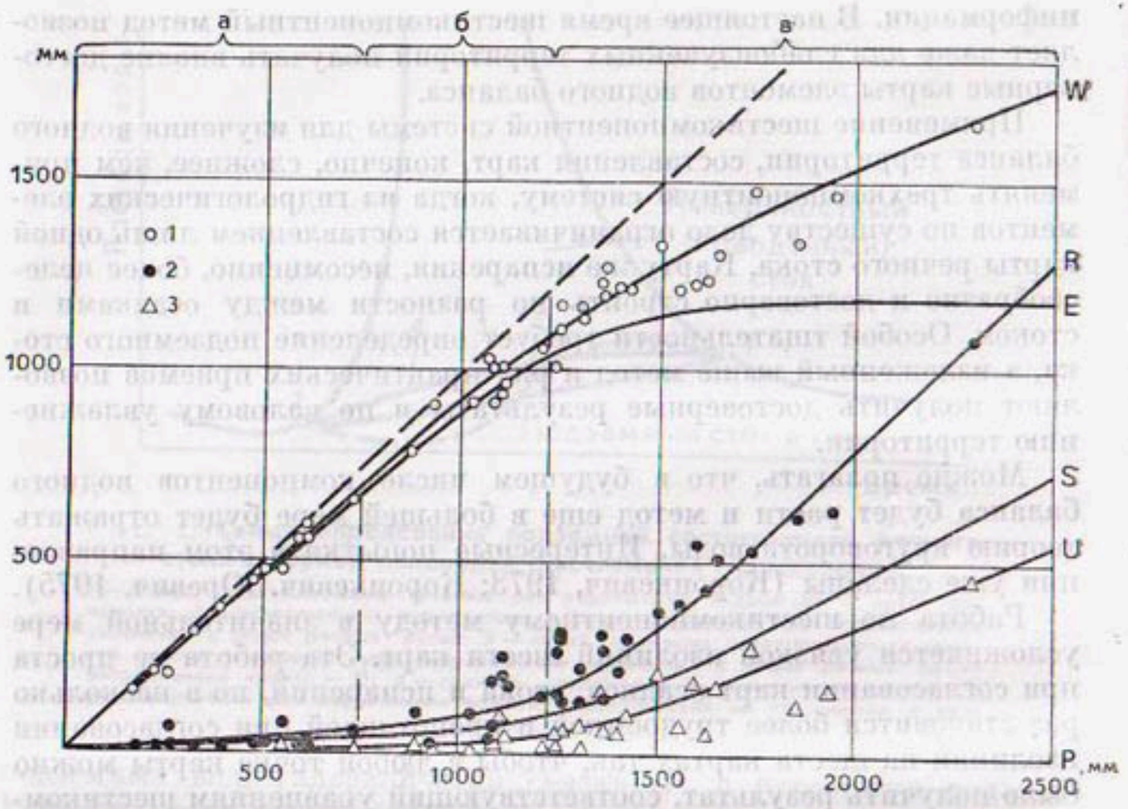


Рис. 2. Комплексные интерполяционные зависимости для саванны Африки:

а — опустыненной саванны, б — сухой саванны, в — влажной саванны. Точки и кривые: 1 — валовое увлажнение территории (W); 2 — полный речной сток (R); 3 — подземный сток в реки (U); S — поверхностный (паводочный) сток, E — испарение

были установлены для основных географических зон земного шара. Для отдельных континентов они были построены при исследованиях водного баланса Африки и Южной Америки (Карасик, 1970, 1974), Азии (Николаева и др., 1977), Северной Америки (Дрейер, 1978), а также для СССР (Львович, 1962). С теоретической точки зрения такие структурные зависимости более строго раскрывают географические закономерности водного баланса. Поэтому их было бы заманчиво использовать для интерполяционных целей, но степень изученности валового увлажнения (W) не превосходит степени изученности полного речного стока (R), поэтому воспользоваться ими для интерполяции невозможно. В упомянутой работе А. В. Беляева интерполяционные зависимости получили дальнейшее теоретическое обоснование и для них был установлен ряд параметров, позволивших дать математическое выражение этих зависимостей. Кроме того, они были обобщены для земного шара в целом — по межматериковым зонам, для которых мною были установлены структурные зависимости водного баланса (см. главу 3).

На рис. 2 приведен пример составления комплексных (интерполяционных) зависимостей для африканской саванны (Карасик, 1970). Большое рассеяние точек на кривых такого типа не может

служить свидетельством их малой точности. Это связано с тем, что отклонение точек от кривых лишь частично связано со случайными ошибками. В значительной мере оно обусловлено разнохарактерностью отдельных речных бассейнов в пределах одной географической зоны. Далеко не всегда бывает так, что весь бассейн строго ограничивается одной географической зоной. Часто отдельные участки данного речного бассейна относятся к другой подзоне или даже зоне. Особенно ярко это проявляется, если часть речного бассейна занята горами, в пределах которых, например, саванна более увлажнена. Такое сочетание ландшафтов влияет на положение точек и обусловливает то или иное их закономерное отклонение.

Комплексные зависимости служат для восполнения отсутствующих данных, которых недостает по многим районам мира. 100% гидрологической изученности, обеспечивающей составление карт речного стока и других элементов водного баланса с достаточно высокой точностью, охвачено на земном шаре не так уж много территорий. Исходные данные, обеспечивающие такой процент гидрологической изученности и позволяющие строить водобалансовые карты по шестикомпонентному методу без применения интерполяционных зависимостей, имеются в лучшем случае для $^1/_4$—$^1/_5$ территории суши. К ней относится часть Европы, больше половины Северной Америки. Что же касается Африки, Южной Америки и зарубежной Азии, то в их пределах почти отсутствуют территории, более или менее полно изученные в гидрологическом отношении.

Углубленное изучение комплексных зональных зависимостей послужило основой для построения карт элементов водного баланса на ЭВМ. Математическое описание комплексных зависимостей и соответствующим образом запрограммированных атмосферных осадков позволили с применением графопостроителя составить карты изолиний. На рис. 3 показан пример карты валового увлажнения территории Африки, полученной с помощью графопостроителя, а рис. 4 представляет собой откорректированную машинную карту. Корректировка карт, составленных графопостроителем, заключается в следующем:

— в переводе сетки географических координат карты, поскольку ЭВМ и графопостроитель работают в прямоугольных координатах;

— в исправлении изолиний на стыках перехода от одной географической зоны (комплексной зависимости) к другой.

Выше было уже сказано о согласовании между собой карт отдельных элементов водного баланса так, чтобы в любой точке суши их количественные характеристики соответствовали уравнениям баланса, но при работе на ЭВМ по понятной причине этот вопрос отпадает, что говорит о немаловажном преимуществе использования ЭВМ, так как такое визуальное согласование довольно громоздко при работе по трехкомпонентному методу, а при

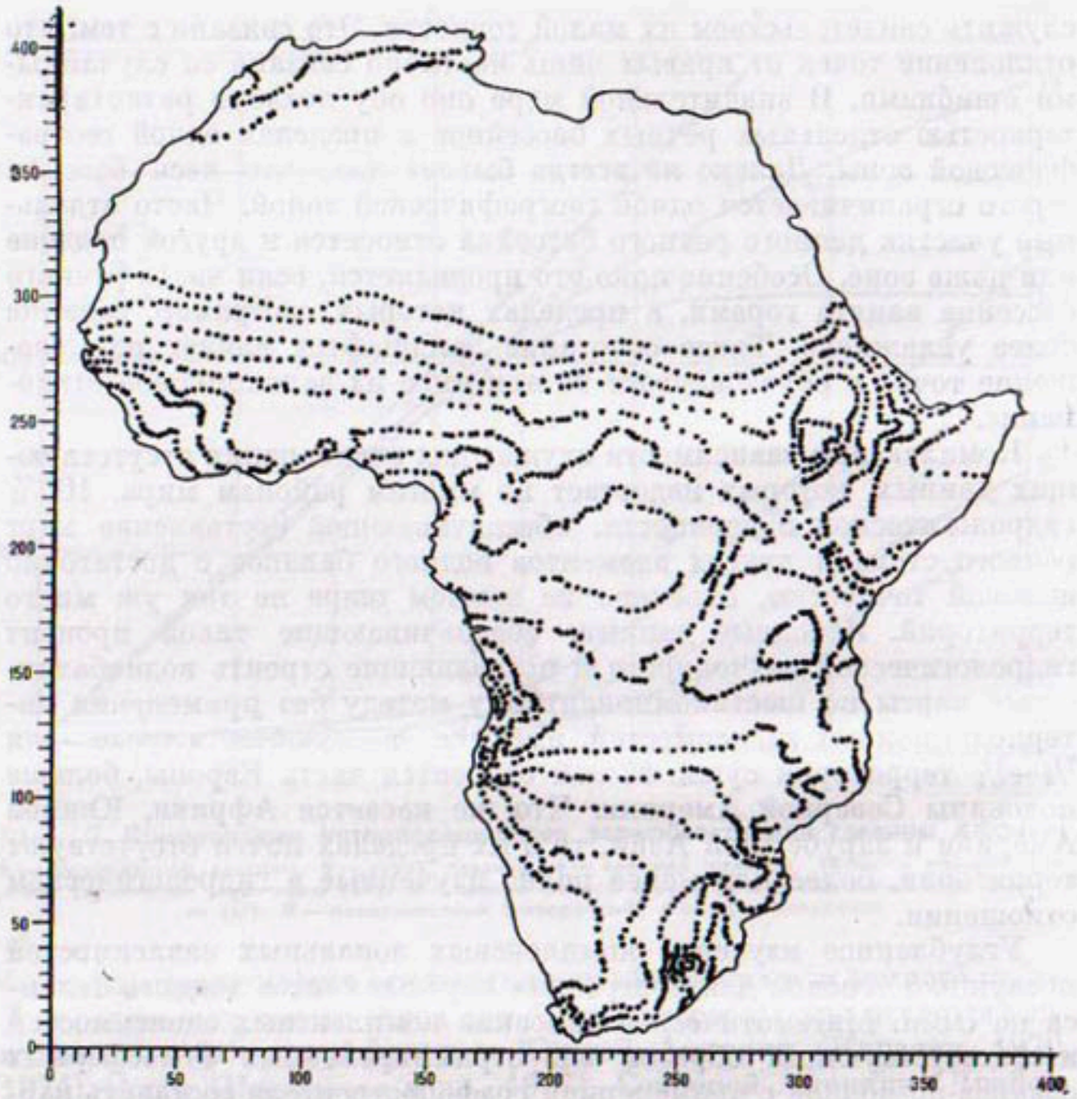


Рис. 3. Пример карты валового увлажнения территории Африки, построенной на графопостроителе (уменьшена более чем в 2 раза)

использовании шестикомпонентного трудоемкость еще более возрастает.

Основное же преимущество карт элементов водного баланса, построенных на ЭВМ, заключается в том, что для малоизученных или не изученных в воднобалансовом отношении территорий точность карт при том же объеме исходных данных значительно выше, чем при построении карт традиционным методом.

Об этом можно уверенно судить на основании оценки точности гидрологических карт, которую получил А. В. Беляев (1980) на модельном уровне. Проверка этой точности на конкретных материалах подтвердила достоверность модельного решения.

Вопрос о точности карт речного стока, как и других элементов водного баланса, чрезвычайно важен, но до недавнего времени не получил сколько-нибудь обоснованного решения, хотя гидрологи-

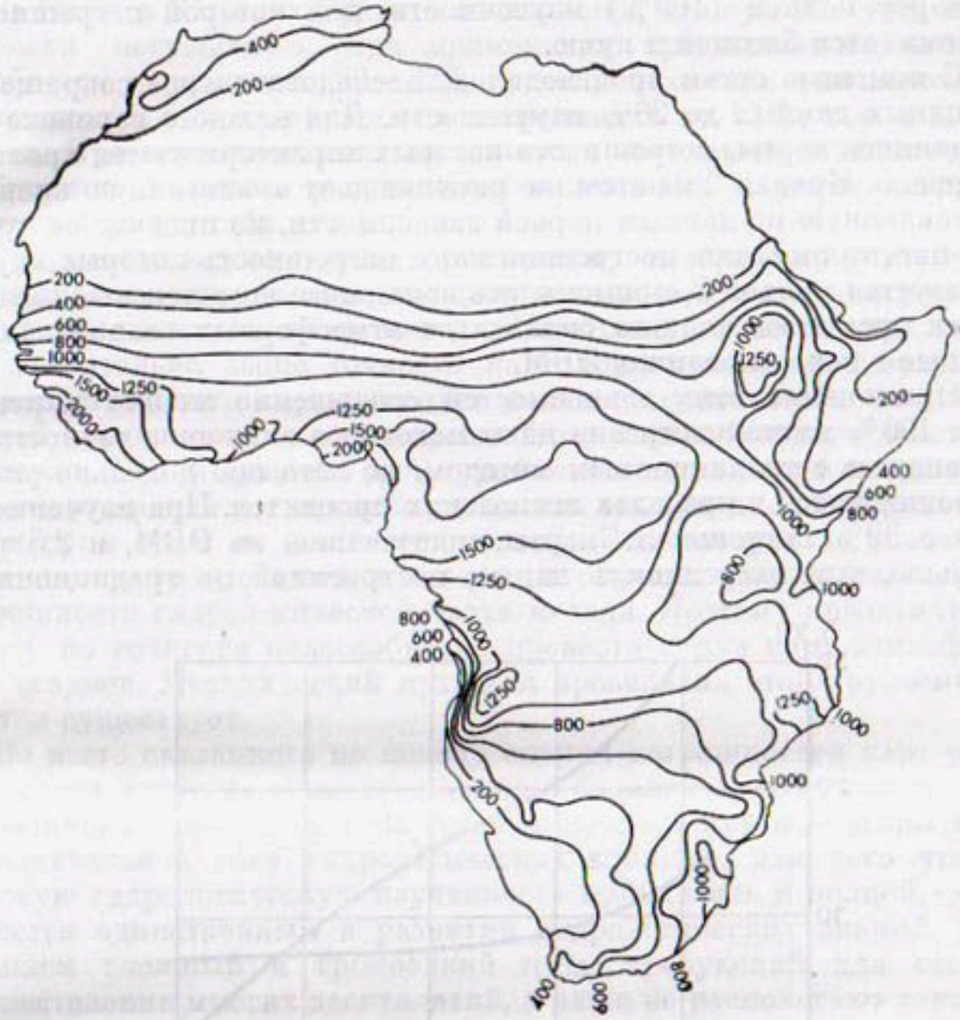


Рис. 4. Пример карты валового увлажнения территории Африки, откорректированной после графопостроителя

ческое картографирование, как уже отмечалось, имеет уже почти вековой опыт. Такое положение связано с тем, что проверка точности проводится на основании того самого материала, который служит для составления карты. Выше уже было сказано, что для этой цели используется такой недостаточно обоснованный критерий, как сравнение среднего стока по изолиниям со средним стоком реки, к бассейну которой относятся эти изолинии. Практически же чаще всего точность гидрологических карт оценивается «на глаз», по существу без достаточного обоснования.

На рис. 5 показаны две кривые. Первая из них относится к традиционному картографированию, когда точность карты всецело зависит от объема имеющихся исходных данных. 100% изученности означает такое насыщение исходными данными, которое позволяет отразить на карте все детали элементов водного баланса в масштабе зональных карт. Такая карта строилась и принималась

за карту полной (100%) изученности, для которой погрешность принимается близкой к нулю.

С помощью сетки производилось последовательное сокращение исходных данных до 20% изученности. Для каждого варианта составлялись карты, погрешности которых характеризуются кривой 1 на рис. 5. Кривая 2 на этом же рисунке дает аналогичную кривую, составленную по данным первой зависимости, но отличие ее существенно, так как при построении карт, погрешность которых характеризуется кривой 2, применялись зональные комплексные зависимости элементов водного баланса от атмосферных осадков, полученные с использованием ЭВМ.

Применение этих зависимостей совершенно меняет картину. При 100% изученности они дают некоторое снижение точности по сравнению с традиционным методом, но зато оно довольно устойчиво держится в пределах нескольких процентов. При изученности менее 30% погрешность карты, построенной на ЭВМ, в 2,5 раза меньше, чем погрешность карты, построенной по традиционному

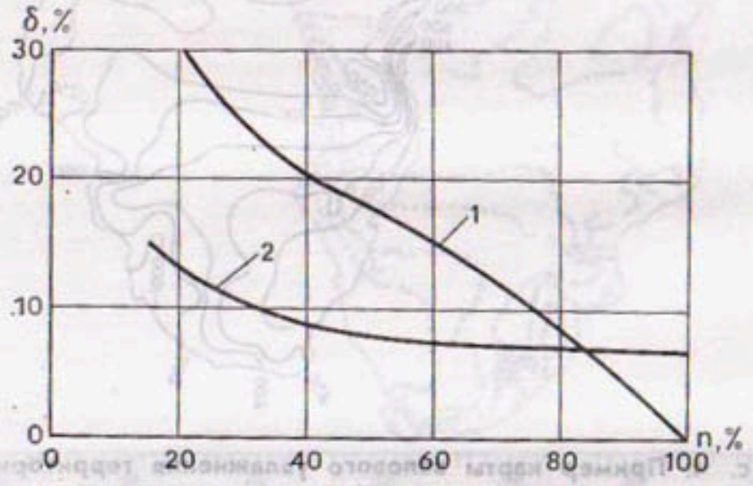


Рис. 5. Зависимости погрешности воднобалансовых карт [δ, %] от степени гидрологической изученности (n, %):

1 — при картографировании традиционным методом; 2 — при картографировании с использованием комплексных зависимостей

методу. В общем две кривые изображают «ножницы», из которых 1-я, характеризующая погрешность при составлении карт традиционным методом, т. е. без применения комплексных зависимостей, оказывается очень чувствительной к объему исходных материалов, и погрешности существенно возрастают по мере снижения количества исходных материалов. 2-я же кривая, построенная с использованием комплексных зависимостей, мало чувствительна к объему исходных данных. Начиная примерно с 80% изученности и меньше значительно повышается точность составления карт. Напомню, что эти цифры получены на модели, поэтому их соотношение может меняться, но принцип твердо установлен. Их соотношение подтверждается опытной проработкой, сделанной для бассейна Камы и Южного Урала и показавшей, что при 20—40% изученности погрешность при применении традиционного метода колеблется в пределах 20—22%, а использование комплексных зависимостей позволяет снизить погрешность до 12%, т. е. в 1,5—2 раза. При использовании комплексных зональных зависимостей необходимо, конечно, располагать надежными картами осадков зонального масштаба.

Разумеется в дополнение к сказанному необходимо учитывать погрешности карт осадков, которые накладываются на погрешности гидрологической части метода. Поскольку точность карт осадков значительно выше точности карт других элементов баланса, мы допустили, что карты осадков зонального масштаба близки к полной изученности, а мелкомасштабные карты близки к действительности. Это допущение для крупномасштабных карт осадков не лишено условности, так как изученность осадков для значительной территории суши не является полной. Это говорит о том, что погрешности карт осадков в некоторых случаях накладываются на погрешности гидрологической части метода. Поэтому аналогичную работу по точности целесообразно провести и для карт атмосферных осадков. Методический путь для проведения этой трудоемкой работы существует.

Из всего сказанного по поводу оценки погрешностей карт речного стока и других элементов водного баланса следует вывод, что восполнение недостающих материалов прямым путем — открытием дополнительной сети гидрологических станций, для того чтобы мировую гидрологическую изученность приблизить к полной, — не является единственным в развитии гидрологических знаний. Это слишком сложный и громоздкий путь, требующий для своего осуществления многих десятилетий, а люди не располагают такими сроками для решения насущных задач использования и охраны водных ресурсов. Поэтому, не отказываясь, конечно, от развития гидрологических стационарных наблюдений, особенно если они связаны со строительством, необходимо широко использовать методы, позволяющие при минимуме исходных данных получить максимум точности. Век традиционного картографирования в гидрологии, исходящий только из предпосылки увеличения объема исходных данных, уже миновал. Достигнутые новые методические приемы позволяют идти к намеченной цели при меньших усилиях и более быстрыми темпами.

Конечно, теоретический метод не может в полной мере заменить данные стационарных наблюдений. Но применение достигнутого в этом направлении и дальнейшее развитие теоретического метода представляют собой реальное средство построения гидрологических карт при недостатке или при отсутствии гидрологических данных. Необходимо подчеркнуть это положение в связи с тем, что во многих зарубежных странах приступают к построению карт стока, только располагая многочисленными и многолетними данными гидрологических наблюдений.

Здесь целесообразно отметить значение теоретической работы американских ученых, поставивших задачу построить с помощью ЭВМ мировые карты атмосферных осадков, почвенной влажности и речного стока на основании климатообразующей мировой системы циркуляции атмосферы и модели круговорота воды. С первой работой по этой проблеме (Manabe и др., 1971) я ознакомился в начале 70-х годов и по этому поводу писал (Львович, 1974, с. 116): «Прежде чем подойти к совмещенному решению водного и теплового баланса поверхности суши, авторы этого интересного исследования проследили весь ход циркуляции атмосферы, переноса атмосферной влаги, а также солнечной радиации, которые позволили им получить вычисленные по модели несколько вариантов карт осадков мира. Их сходство с действительным распределением осадков на земном шаре дает обнадеживающие результаты, но они далеки еще от той точности, которая требуется для расчетов элементов водного баланса суши».

Спустя несколько лет эти же авторы выступили в печати с результатами своих дальнейших исследований (Manabe и др., 1975), с помощью которых на основании модели круговорота воды помимо разработки сезонного аспекта этой проблемы получено последующее приближение карты мирового речного стока. В этой работе американских авторов сделан дальнейший шаг на пути уточнения карты мирового стока, полученной по модели круговорота воды. Авторы дают вполне обоснованный анализ своей карты в сравнении с картой, составленной мною при участии С. Овчинниковой и опубликованной в Физико-географическом атласе мира (М., 1964). Конечно, расхождений еще много, тем более что на смену моей прежней карте пришла новая серия водобалансовых карт мира, в числе которых получила уточнение и карта речного стока. Поскольку авторы проведенного эксперимента по моделированию круговорота воды не претендуют на использование теоретически предвычисленных карт для справочных и расчетных целей, постольку и требования к их точности могут быть снижены. Во всяком случае, проведенный эксперимент представляет большой интерес, если учесть, что его авторы исходят в своих расчетах из первичных климато-гидрологических процессов. При этом ставится задача приблизить результаты к исходным данным наблюдений.

Метод составления карт на ЭВМ на основе зональных комплексных зависимостей, конечно, менее сложен, поскольку в качестве исходных принимаются факторы более близкие к изучаемому процессу. Следует иметь ясное представление о том, что от осадков (с учетом географической зональности) легче перейти к элементам водного баланса, чем от общей циркуляции атмосферы, но, как сказано выше, этим более простым способом достигнут важный практический результат — повышается точность справочных и даже расчетных водобалансовых карт.

При составлении водобалансовых карт высокогорных районов

чаще всего применяется другой метод: в основу принимаются зависимости стока и других элементов водного баланса от высоты над уровнем моря. Этот метод дает хорошие практические результаты.

Так, Л. А. Владимиров (1970) построил подробную карту речного стока Кавказа на основании весьма дифференцированной сети высотных зависимостей, достигающих ста. Первую схематическую карту подземного стока в реки Кавказа составила Н. Н. Дрейер (1966), а подробную карту этого элемента водного баланса разработал Л. А. Владимиров в указанной работе. Для южного склона Восточного Кавказа получена структурная зависимость подземного стока в реки и испарения от валового увлажнения (Кашкай, 1973) с выделением этих зависимостей для высотных поясов: альпийских лугов, лесного, лесостепного и степного. Эта зависимость заслуживает внимания в методическом отношении, так как в принципе показывает возможность решения задачи тем же методом, что и для равнинных районов.

Аналогичны работы по Средней Азии И. Д. Цигельной и по Уралу автора этих строк (Водный баланс СССР..., 1969), по Центральной Азии (Кузнецов, 1968), по Андам (Wilgat и др., 1971), по горам мира (Dreyer и др., 1983; Карасик и др., 1983), а также ряд других исследований речного стока и его подземной составляющей в других районах земного шара. Весьма подробные исследования такого направления проведены для Румынии (Ujvari, 1959, 1972; Д. Лэзереску и И. Папаит (Monografia geografica, 1960) и для Болгарии (География на България, 1966).

Однако применение комплексных зависимостей в высокогорье, как отмечено выше, обычно затрудняется недостатком данных об атмосферных осадках.

Метод высотных зависимостей в большей степени носит эмпирический характер и нуждается в дальнейшей теоретической разработке. Связано это с тем, что географическая поясность в горах распределяется по территории гораздо более пестро, чем аналогичная ей широтная зональность в равнинных и полугорных районах. Вопрос усложняется еще тем, что разные склоны одной горной долины в зависимости от их экспозиции и экранирования атмосферных осадков служат причиной локализации высотных зависимостей — частого ограничения их небольшими горными участками. Кроме того, по высокогорным районам, как правило, мало сведений об атмосферных осадках. Поэтому принцип комплексных зональных зависимостей к высокогорным районам менее применим. Данные по стоку высокогорных частей речных бассейнов, в пределах которых коэффициенты стока достигают 0,9 и приближаются к единице, часто используются в качестве своеобразных гигантских дождемеров, которые нередко дают более надежные данные об атмосферных осадках, чем стационарные дождемеры.

В этом отношении заслуживает внимания метод А. Н. Крепке и В. Г. Ходакова (1966; Кренке, 1982), которые предложили определять атмосферные осадки и сток на высокогорных ледниковых

водосборах по абляции на высоте снеговой линии, определенной эмпирически по средней летней температуре воздуха. При ряде допущений, близких к действительности, балансируются процессы испарения и абляции на всей площади ледника. С учетом того, что в высокогорном поясе происходит компенсация испарения и конденсации, имеются основания принимать, что абляция и аккумуляция на высоте границы питания соответствуют ледниковому стоку. Но последний зависит от морфологии ледника, которая влияет на неравномерность распределения снежных осадков или их концентрацию. С этой целью В. Г. Ходаковым (1962) введено понятие коэффициента концентрации, который характеризует отношение всех видов аккумуляции снега, включая снежные лавины и ветровой перенос снега на границе питания, к местным снегозапасам.

А. Н. Кренке установил, что для долинных ледников средних размеров, к которым относятся ледники площадью 1,5—12 км², может быть принят единый коэффициент концентрации величиной 1,4. Поделив абляцию на этот коэффициент или на другое подобранное его значение, получаем количество твердых осадков. Жидкие осадки на высоте снеговой линии обычно незначительны, но при необходимости они могут быть приближенно оценены по зависимости их доли от высоты с использованием данных нескольких снего-дождемерных постов. Таким образом устанавливаются осадки на границе питания, для которой данных непосредственных наблюдений очень мало, что говорит о большой роли этого метода для высокогорных гидрологических исследований. Для пересчета годовых осадков в ледниковый сток авторы метода принимают коэффициент стока, равный 0,85. Ценность метода подтверждается результатами сравнения расчетных данных с фактическими наблюдениями. Так, из сделанных разными авторами и обобщенных А. Н. Кренке 15 сравнений размеров аккумуляции на высоте границы питания с данными снегомерных съемок на ледниках в 13 случаях установлены ошибки в 15% и менее и лишь в двух случаях они превышают этот уровень. Средняя квадратическая ошибка составляет 14%. При оценке стока шести ледников ошибка колеблется от 6 до 14%, а средняя квадратическая ошибка равна 11% (Кренке, 1982, с. 107).

Из сказанного следует вывод о том, что метод указанных авторов дает вполне достоверные результаты. Таким образом, мы имеем основание отметить, что изложенный метод открыл путь для теоретического определения стока горных ледников, которые пока изучены недостаточно на Кавказе, в Альпах, в Средней Азии и Скалистых горах. Еще большее значение он имеет для горных систем Гималаев, Анд и других, почти совершенно неизученных в гидрологическом отношении. По существу охарактеризованный метод позволяет определить седьмой компонент водного баланса территории — ледниковый сток нивального горного пояса. Так, по расчетам А. Н. Кренке (1982), годовой ледниковый сток в СССР

при стационарном состоянии ледниковых систем — 52,8 км³, в том числе 41,9 км³ — ледниковый жидкий сток, 5,8 — расход льда в море и 5,1 км³ — сток дождевых осадков с ледников.

Глава 3
КАРТЫ ВОДНОГО БАЛАНСА

1. Мировые карты зонального масштаба

Метод гидрологического картографирования играет большую роль в развитии мировой гидрологической науки. Еще до конца прошлого столетия данные по речному стоку были единичны. К этому времени по данным непосредственных наблюдений более или менее полно был охарактеризован лишь сток рек Западной Европы и США. Однако по этим данным была составлена первая карта речного стока для США (Newell, 1892—1893). В европейской части СССР, на Кавказе и в Средней Азии данные по речному стоку стали появляться в начале текущего столетия. В связи с составлением ленинского плана ГОЭЛРО данные по стоку в начале 20-х годов были систематизированы. Массовым измерениям расходов воды на реках было положено начало в 30-х годах. Несколько позже на основании этих данных с дополнениями была составлена Д. И. Кочериным (1932) первая карта стока рек европейской части СССР. Эта карта сыграла большую роль в развитии водохозяйственного строительства в те годы. Но по Сибири и особенно по Дальнему Востоку гидрологические данные были и в эти годы единичны.

Первая довольно полная карта речного стока для всей территории СССР была составлена Б. Д. Зайковым (1946). В основу этой карты были положены многочисленные данные, причем многие из них за период 30—50 лет и более. Это объясняется тем, что к 1940 г. кривые зависимости расходов воды от уровней были получены по данным многих гидрометрических станций, на которых уже с начала 80-х годов прошлого столетия существовали водомерные посты для обслуживания судоходства: производились наблюдения за колебаниями уровней, а также замерзанием и вскрытием рек ото льда. На реках с устойчивым руслом, к которым относится большая часть равнинных рек, такое сочетание данных позволило восстановить расходы воды с начала уровенных водомерных наблюдений.

Первая мировая карта речного стока была составлена автором этих строк в 1940 г., но в связи с Великой Отечественной войной ее публикация была задержана (Львович, 1945). Тогда выполнить эту задачу было чрезвычайно сложно: только по $^1/_3$ площади континентов были более или менее полные гидрологические данные.

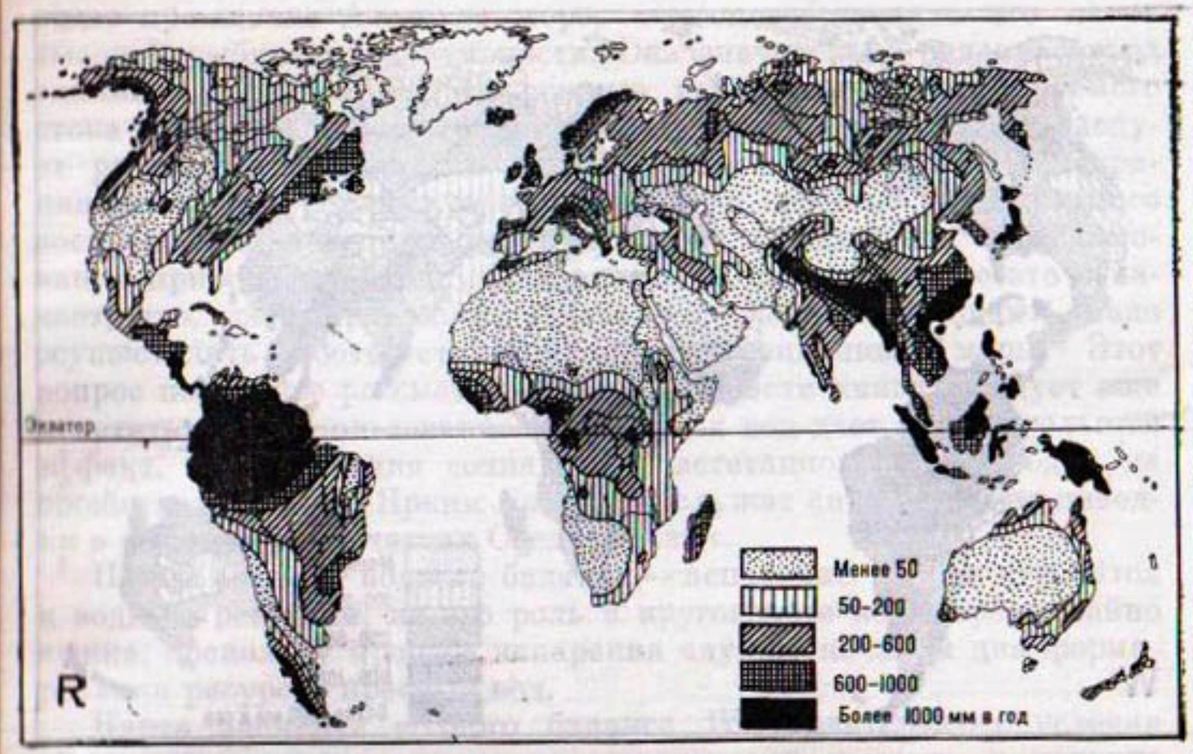
Сотни зарубежных гидротехнических и гидромелиоративных проектов начинались с этой карты; она послужила основой для

мировой карты гидроэнергоресурсов, составленной международной гидроэнергетической организацией; во многих советских и зарубежных изданиях она цитировалась для научных и учебных целей. Публикация уточненного ее варианта состоялась в Физико-географическом атласе мира (1964). Другая карта стока, составленная примерно на такой же трехкомпонентной методической основе и преимущественно с применением традиционных приемов ее построения, обобщает, вероятно, наиболее многочисленные исходные гидрологические данные; обобщены также ранее составленные в разных странах карты стока, относящиеся к довольно обширным районам суши (Мировой водный баланс..., 1974).

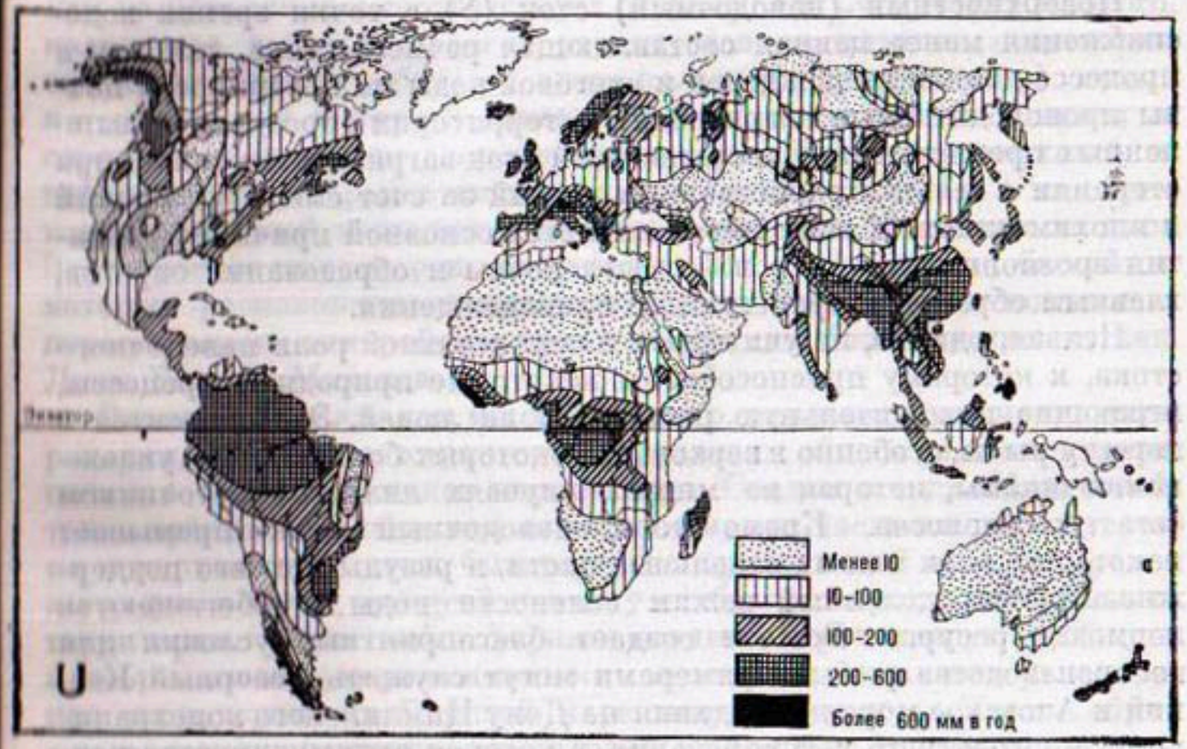
Перелом в построении карт речного стока произошел после появления освещенной в предыдущей главе шестикомпонентной системы уравнений водного баланса, в которой сток рассматривается как один из элементов водного баланса. Практическая важность его выше, чем других элементов водного баланса территории, но необходимо считаться с природой, круговоротом воды, в котором все элементы баланса взаимосвязаны и независимо от практической значимости являются неотъемлемой частью водного баланса. Одни из элементов важны как отдельные составляющие процесса круговорота воды в целом, другие, например полный речной сток, подземный сток в реки, ресурсы почвенной влаги, к тому же еще имеют значение для решения практических задач. Круговорот воды — важнейший гидрологический процесс.

Карты элементов водного баланса, составленные по шестикомпонентному методу, опубликованы в печати в довольно мелком масштабе (1 : 75 000 000) и к настоящему времени не претерпели каких-либо существенных изменений и дополнений. Поэтому в данной работе они даются в еще меньшем масштабе, и притом не всех элементов, а только трех: полного речного стока (R), подземного стока в реки (U) и валового увлажнения территории (W) (рис. 6—8), и представляют собой схемы, иллюстрирующие общие черты распределения по территории указанных элементов водного баланса.

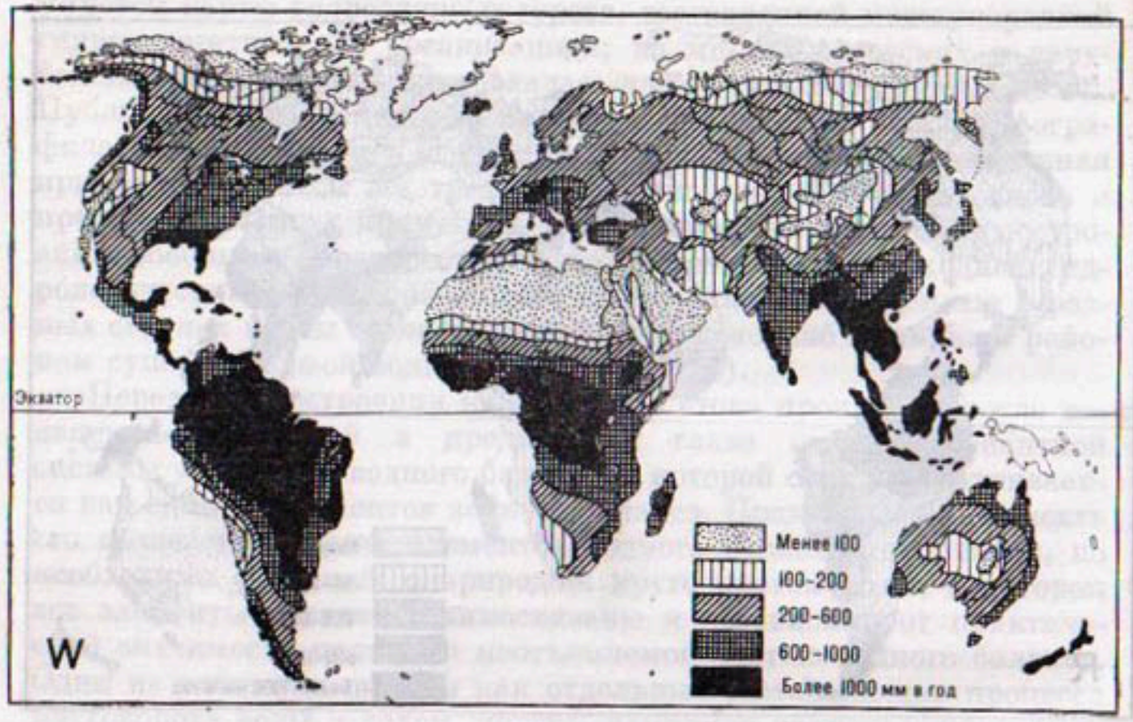
Эти три карты элементов водного баланса, так же как и карта поверхностного (паводочного) речного стока (S), характеризуют не только часть круговорота воды, но и различные источники ресурсов пресных вод. Полный речной сток (R) — это ресурсы речного стока, которые в практике водного хозяйства используются наиболее широко. Подземный сток в реки (U) — наиболее ценный источник ресурсов пресных вод зоны активного водообмена. Он широко используется путем непосредственного отъема воды из подземных горизонтов и является важнейшим источником пресных вод, особенно для целей питьевого и бытового водоснабжения, поскольку в наименьшей степени подвергается загрязнениям. Вместе с тем подземные воды зоны активного водообмена дренируются реками и представляют собой не менее ценную составляющую полного речного стока, главным образом потому, что служат наиболее



Р и с. 6. Полный речной сток, мм



Р и с. 7. Подземный сток в реки, мм



Р и с. 8. **Валовое увлажнение территории, мм**

постоянным источником питания рек и устойчивой составляющей речного стока.

Поверхностный (паводочный) сток (S) с точки зрения водоснабжения менее ценная составляющая речного стока, так как в процессе движения дождевой и снеговой воды по поверхности почвы происходит смыв загрязнений с территории городов, промышленных предприятий. Поверхностный сток загрязняется также при стекании с сельскохозяйственных угодий за счет смыва удобрений и ядохимикатов. К тому же он является основной причиной развития эрозионных процессов — смыва почвы и образования оврагов, главным образом антропогенного происхождения.

Нельзя, однако, не учитывать положительной роли паводочного стока, к которому приспособлены некоторые природные процессы, играющие положительную роль в жизни людей. Это относится к нересту рыбы, особенно в верховьях некоторых больших рек, увлажнению поймы, которая во многих случаях является источником богатых сенокосов. Кроме того, паводочный сток промывает некоторые моря или их отдельные части, в результате чего поддерживается определенный режим солености воды и обогащаются кормовые ресурсы. Все это создает благоприятные условия для воспроизводства рыбы. Примерами могут служить Северный Каспий и Азовское море до создания на Дону Цимлянского водохранилища многолетнего регулирования, в котором аккумулируется почти весь паводочный сток. В естественных условиях весеннее половодье промывало Азовское море, что способствовало его очень высокой рыбной продуктивности. Она значительно снизилась под влиянием неблагоприятного режима искусственно регулируемого стока в указанном водохранилище. Однако такой вывод не следует рассматривать как мое отрицательное отношение к водохранилищам. Они, конечно, необходимы как средство расширенного воспроизводства водных ресурсов, но за каждый шаг преобразования природы необходимо «платить». В данном случае это означает, что, регулируя паводочный сток водохранилищами, надо осуществлять соответствующие компенсационные меры. Этот вопрос подробнее рассматривается во II части книги. Следует еще отметить, что использование паводочных вод дает положительный эффект, когда паводки совпадают с вегетационным периодом на орошаемых землях. Ярким примером служат снего-ледовые паводки в высокогорных частях Средней Азии.

Пятый элемент водного баланса — испарение (E) не относится к водным ресурсам, но его роль в круговороте воды чрезвычайно важна, поскольку процесс испарения служит началом для формирования ресурсов пресных вод.

Карта элемента водного баланса W характеризует условия общего увлажнения территории — воду, усваиваемую в течение года почвой и расходуемую на питание подземных вод и на испарение — и является обобщенной характеристикой ресурсов почвенной влаги. Интересно, что в Сахаре и на северных окраинах Сибири и Северной Америки валовое увлажнение территории самое низкое — менее 100 мм, причем в пустыне оно расходуется целиком на испарение и соответствует осадкам, а в Субарктике из этого количества небольшая часть расходуется на питание подземных вод. Это главным образом аллювиальные (подрусловые) воды, которые зимой быстро иссякают. В наиболее суровых районах к середине зимы реки «перемерзают», фактически пересыхают, и вода в руслах сохраняется подо льдом только в плесах, а на перекатах проточной воды нет и образовавшийся лед ложится на дно. Этот процесс характерен, разумеется, для местных рек, бассейны которых расположены в пределах Субарктики, и не относится к пересекающим эти районы транзитом таким большим рекам, как Лена, Енисей, Макензи.

Элемент W, или, как мы назвали его, валовое увлажнение территории, в основном характеризует условия общей увлажненности почвы в более или менее чистом виде. Осадки с воднобалансовой точки зрения обладают тем недостатком, что часть их расходуется на поверхностный сток, быстро транспортирующий воду за пределы данного места, который поэтому слабо участвует в увлажнении территории. Если атмосферные осадки характеризуют общую метеорологическую увлажненность местности, то валовое увлажнение территории — в большей мере гидрологическую. Таким образом, валовое увлажнение территории играет большую роль как географо-гидрологическая характеристика, служащая основой для

построения довольно строго теоретически обоснованных структурных зависимостей водного баланса, наиболее полно отражающих гидрологические закономерности географических зон. Эти закономерности будут освещены в главе 4. Здесь же, прежде чем перейти к описанию местных карт элементов водного баланса, следует подчеркнуть, что мировые воднобалансовые карты носят генерализованный характер, отражая в основном географические зональные черты водного баланса и гидрологические особенности подзон. Это же относится к тем горным, особенно высокогорным и среднегорным, условиям, которые по аналогии с закономерностями широтной географической зональности дают представление о закономерностях высотной поясности.

2. Карты местного водного баланса

Карты местного водного баланса отличаются большей детализацией, чем карты зонального масштаба, и включают его внутризональные черты. На таких картах находят отражение и гидрологические факторы меньшего масштаба, которые в силу большей генерализации могут не найти места на зональных картах. Зональные карты, как правило, укладываются в масштаб от 1 : 10 000 000 до 1 : 100 000 000. Для карт местного баланса необходим более крупный масштаб, приблизительно в пределах от 1 : 200 000 до 1:5 000 000. Большой диапазон масштаба для воднобалансовых карт как зонального, так и местного типа связан главным образом с разнообразием факторов, влияющих на водный баланс. При однообразном рельефе, почвах и других факторах масштаб, разумеется, может быть более мелким, но для района с их большим разнообразием и значительной пестротой природных условий может потребоваться более крупный масштаб.

Следовательно, масштаб воднобалансовых карт не является чем-то произвольным, а зависит от ряда факторов:

— природных условий, а также антропогенных факторов, о значении которых будет сказано во II части книги;

— степени детализации распределения по территории элементов водного баланса, которую необходимо достигнуть;

— полноты гидрологической изученности;

— падежности интерполяционных зависимостей элементов водного баланса и атмосферных осадков.

Что касается изученности самих атмосферных осадков, то она чаще всего бывает достаточной для составления довольно подробных и достоверных карт.

Хотя, как видно из сказанного, установить точный масштаб воднобалансовых карт невозможно, но и произвольный выбор масштаба, независимо от природных условий, полноты исходных данных и назначения карты, нельзя признать допустимым.

Наш пример относится к экономически развивающейся стране — Кении. Исследование водных ресурсов этой страны послужило темой диссертации В. Онианго Огембо (1980), которая разрабатывалась под моим руководством и при участии Г. Я. Карасик. Площадь Кении — 583 тыс. км². В гидрологическом отношении была изучена, причем довольно подробно, наиболее населенная часть страны, занимающая около 1/3 ее территории. Остальная территория в воднобалансовом отношении практически оставалась неизученной. В связи с этим одна из главных задач работы заключалась в определении водных ресурсов и распределении их элементов по территории. Для этой цели прежде всего потребовалась разработка интерполяционных зависимостей для элементов водного баланса. Одна из таких зависимостей для поверхностного (паводочного) стока, построенная по данным изученной части страны, представлена на рис. 9. Наиболее ярко выделены два типа географической

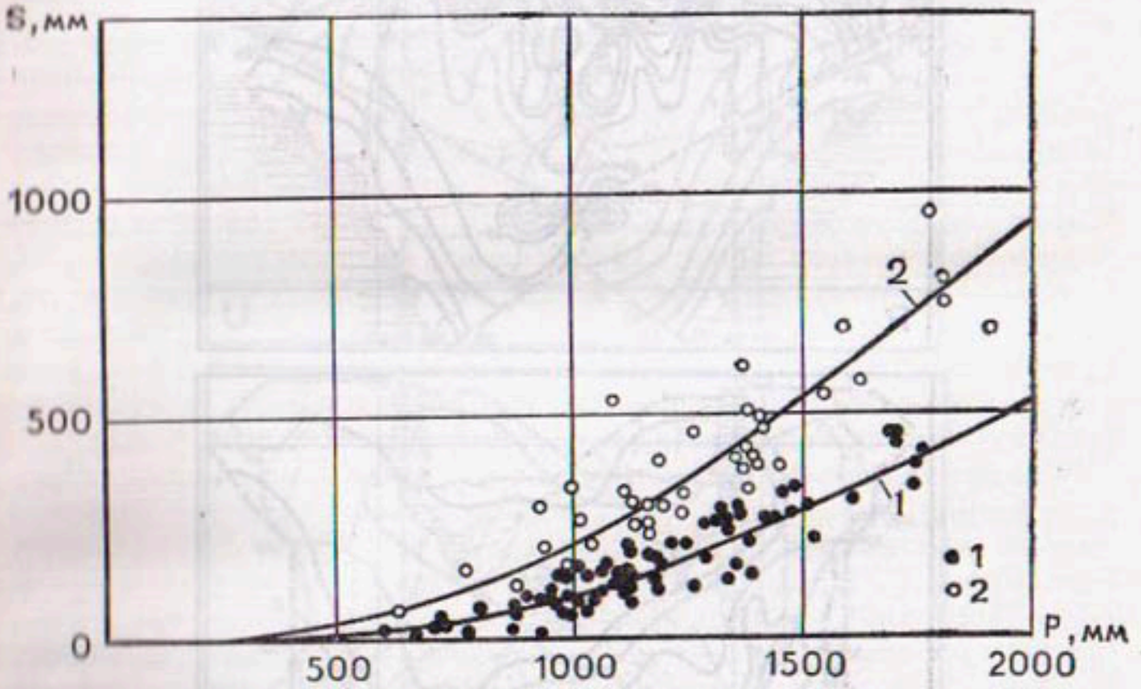
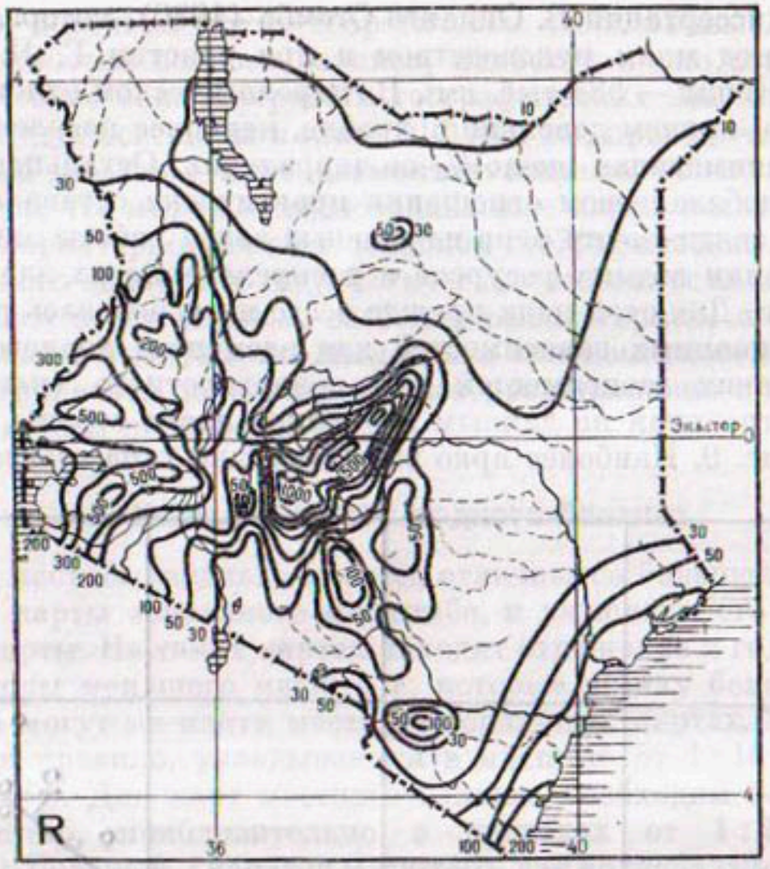
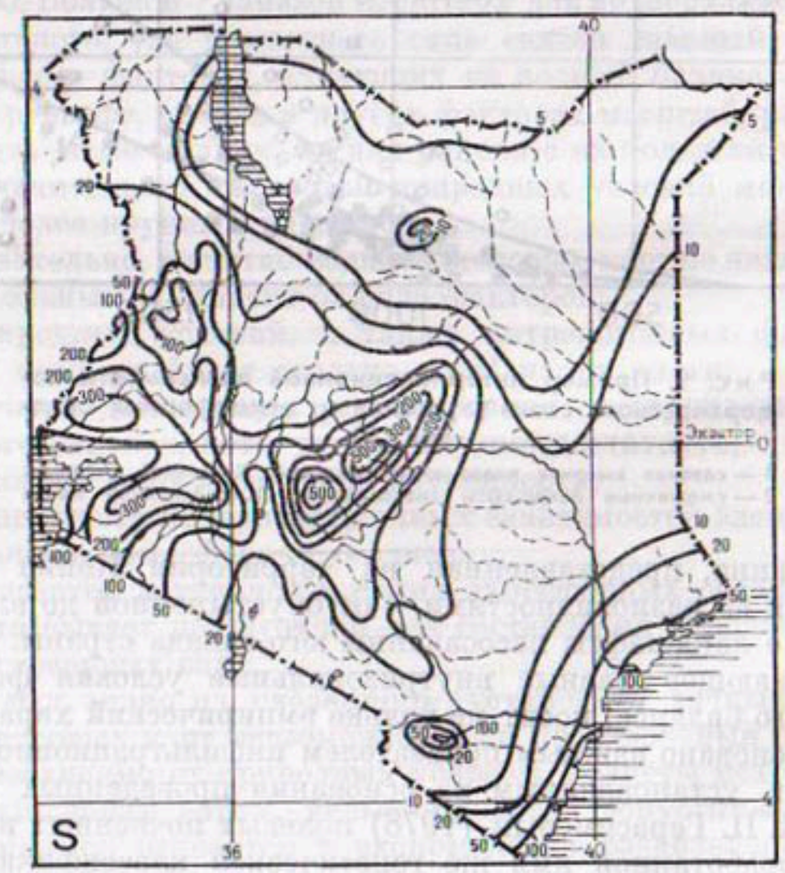


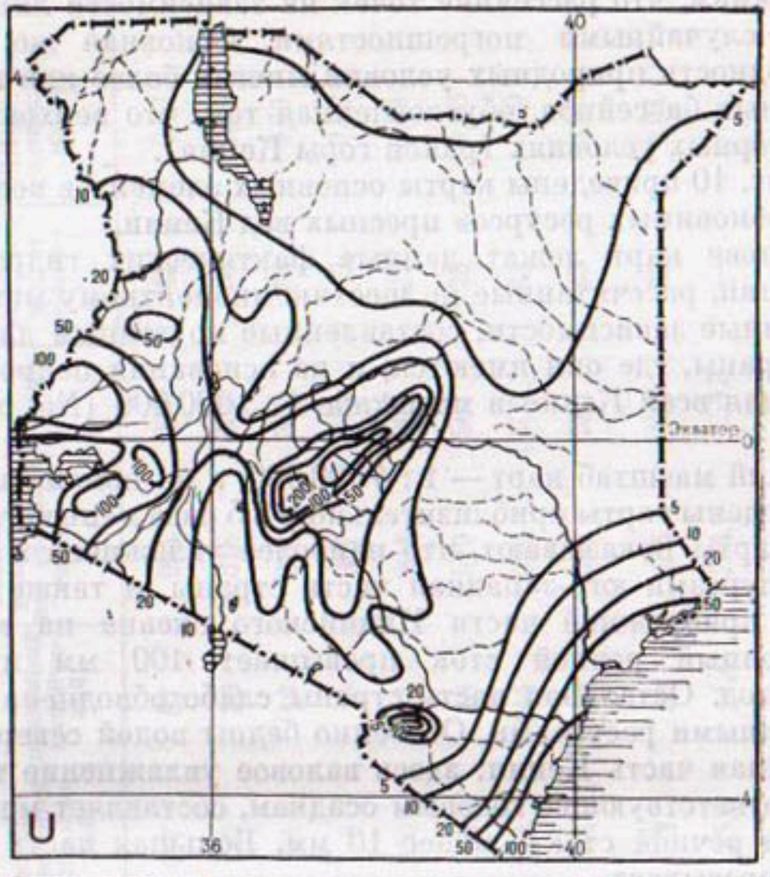
Рис. 9. **Пример интерполяционной зависимости поверхностного стока (S) Кении от атмосферных осадков (P):**

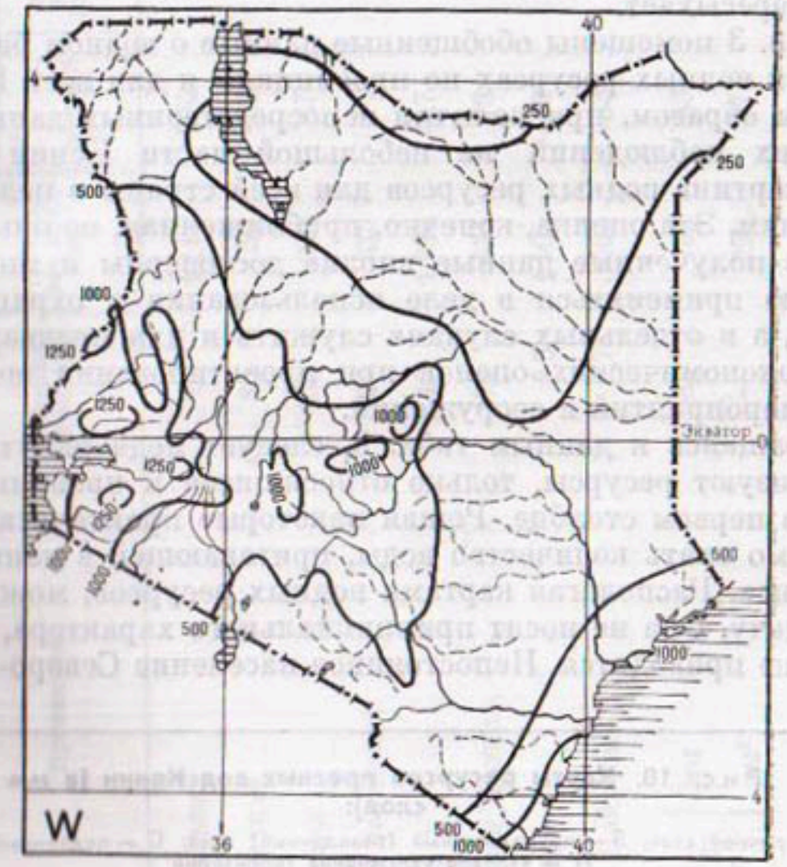
1 — саванна высоких плато экваториальной Восточной Африки; 2 — смешанные ландшафты (лесосаванна) Юго-Западной Кении

зоны: саванна, представленная на территории Кении наиболее типичными ее разновидностями — от опустыненной до влажной, и смешанные ландшафты лесосаванны юго-запада страны. Это деление, отражающее главные внутризональные условия формирования водного баланса, носит не только эмпирический характер; оно также обосновано важным показателем инфильтрационной способности почв, установленным на основании проведенных Р. П. Зиминой и И. П. Герасимовым (1978) полевых почвенных исследований и разработанной ими же генетической классификации почв Кении.


R
Экватор
40
36
4


S
Экватор
40
36
4


U
Экватор
40
36
4


W
Экватор
40
36
4

Напомним, что рассеяние точек на зависимости лишь частично вызвано случайными погрешностями. Основная же причина — неоднородность природных условий многих более или менее крупных речных бассейнов, обусловленная тем, что верховья их находятся в горных условиях (район горы Кения).

На рис. 10 приведены карты основных элементов водного баланса и возобновимых ресурсов пресных вод Кении.

В основе карт лежат данные фактических гидрологических наблюдений, рассчитанные по шестикомпонентному методу, интерполяционные зависимости, составленные по данным для $^1/_3$ территории страны, где они имеются, и на основании подробной карты осадков для всей Кении в масштабе 1 : 3 000 000 (National Atlas..., 1970).

Рабочий масштаб карт — 1 : 4 000 000, а на помещенных рисунках приведены карты приблизительно в 2,5 раза меньшего масштаба.

Все карты показывают, что наиболее увлажнена и богата водными ресурсами юго-западная часть страны, а также неширокая полоса в прибрежной части Индийского океана на юго-востоке. Здесь полный речной сток превышает 100 мм и достигает 1000 мм/год. Остальная часть страны слабо обводнена и в общем бедна водными ресурсами. Особенно бедны водой северная и северо-восточная часть Кении: здесь валовое увлажнение территории, почти соответствующее годовым осадкам, составляет менее 250 мм, а полный речной сток — менее 10 мм. Большая часть рек в этом районе пересыхает.

В табл. 3 помещены обобщенные данные о водном балансе территории и водных ресурсах по провинциям и для всей Кении.

Таким образом, при наличии непосредственных данных гидрологических наблюдений на небольшой части Кении получена полная картина водных ресурсов для всей страны в целом и по ее провинциям. Эта оценка, конечно, приближенная, но опыт показывает, что полученные данные вполне достоверны и могут с уверенностью применяться в деле использования и охраны водных ресурсов, а в отдельных случаях служить и для предварительных технико-экономических оценок при проектировании водохозяйственных мероприятий и сооружений.

Возвращаясь к данным табл. 3, следует подчеркнуть, что они характеризуют ресурсы, только относящиеся к провинциям, указанным в первом столбце. Решая некоторые практические задачи, необходимо знать количество воды, притекающей в данный район из смежных. Располагая картами водных ресурсов, можно решить и эту задачу. Она не носит принципиального характера, поэтому в таблице не приводится. Непостоянное население Северо-Восточной

Рис. 10. **Карты ресурсов пресных вод Кении (в мм слоя):**

R — полный речной сток; S — поверхностный (паводочный) сток; U — подземный сток в реки; W — валовое увлажнение территории

Таблица 3

Балансовая оценка ресурсов пресных вод Кении (в мм)

Провинция	Площадь, тыс. км²	Атмосферные осадки	Речной сток: полный	Речной сток: поверхностный (паводочный)	Речной сток: подземный (устойчивый)	Валовое увлажнение территории	Испарение	Подземный сток в % от полного	Коэффициент питания рек подземными водами
Центральная	13	1 111	204	117	87	994	907	43	0,09
Прибрежная	84	550	52	32	20	518	408	38	0,04
Восточная	160	309	47	31	16	278	262	34	0,06
Северо-Восточная	127	325	14	8	6	317	314	43	0,02
Ньяпза	16	1 224	317	230	87	994	907	27	0,09
Рифтовая Долина	174	634	73	55	18	579	561	25	0,03
Западная	8,3	1 505	400	286	114	1 219	1 105	28	0,09
Округ Найроби	0,7	663	83	64	19	599	580	23	0,03
Всего по Кении, мм	583	498	63	43	20	455	435	32	0,04
Всего по Кении, км³	—	290,3	37,0	25,6	11,4	264,7	253,3	—	—

провинции сравнительно невелико (около 400 тыс. человек), поэтому на одного человека здесь приходится 2 тыс. м³/год подземного стока в реки — в 3 раза больше, чем для всей Кении. Рифтовая Долина несколько лучше обеспечена водными ресурсами: здесь дождевой сезон продолжительнее. Отгонным животноводством здесь занимается почти 3,5 млн. человек, но на душу населения приходится подземного стока менее 1000 м³/год. Еще меньше этот показатель в провинциях Центральная и Ньянза (около 500 м³/год на душу населения), хотя они относятся к числу наиболее многоводных. Площадь их составляет 29 тыс. км², а население — около 5 млн. человек, т. е. $^1/_3$ населения Кении. Проблема обеспечения водой населения и хозяйства (главным образом животноводства и растениеводства) этих районов является одной из актуальных задач для страны.

Глава 4
РЕСУРСЫ ПРЕСНЫХ ВОД МИРА

1. Количество пресных вод

Единовременный объем русловых вод в 1200 км³ благодаря круговороту ежегодно воспроизводит около 40 000 км³, или в 33 раза большее количество воды, чем содержащееся в руслах рек. Если бы лет сто тому назад стало известно это соотношение, то можно представить, что на первых порах этому просто не поверили бы. Но теперь, когда хорошо представляем основу этого процесса, мы знаем, что он служит источником ресурсов пресных вод для всего человечества, сухопутных и пресноводных животных и всего растительного мира, ресурсов почвенной влаги. Несмотря на физическую сложность этого процесса, если рассматривать его в деталях, он по своей сути удивительно прост и логичен.

Иногда сравнивают объем крупных пресноводных водоемов с объемом речного стока, который относится к другой категории процессов, поэтому нет достаточных оснований для такого сравнения. Например, объем Ладожского озера составляет 930 км³, а сток Невы — 80 км³/год, или объем крупнейшего пресноводного водоема — оз. Байкал достигает 21 700 км³, а сток Ангары, дренирующей Байкал, — 61 км³/год. Однако весь объем этих, как и любых проточных озер, не может рассматриваться как источник водных ресурсов, так как нельзя отбирать из этих озер воды больше, чем из них вытекает. Иначе Ладожское озеро, Байкал, любое другое озеро при такой ситуации прекратили бы свое существование как проточные и в течение более или менее длительного срока превратились бы в бессточные, такие, как Каспийское море, Арал и другие подобные «тупиковые» водоемы. Таким образом, проточные озера представляют своего рода банк, в котором оборот капитала можно сравнить с транзитным стоком через озеро. В Ладожском озере «оборотный капитал» составляет 8,6%, а в Байкале — всего 0,28%. Но благодаря такому водообмену озера всегда остаются проточными и пресными. Использование самого «капитала» — водной массы, заполняющей озеро, возможно лишь непосредственно в озере, без изъятия воды из него сверх речного стока, в основном для рыбного хозяйства, судоходства, туризма.

«Стационарный» объем гидросферы чрезвычайно важен как источник круговорота воды, но несравненно большей ценностью обладает пресная вода, непрерывно возобновляемая в процессе ее круговорота. Именно элементы водного баланса являются непосредственными источниками жизни, и именно эту воду учитывают и считают ее объем при решении задач экономики. Поэтому в настоящей книге уделяется наибольшее внимание не вообще воде, включая гидросферу, а главным образом тем ее частям, которые возобновляются в процессе круговорота.

Охарактеризовать количество пресных вод в рамках этой книги мы можем по материкам, делая исключение для крупных островов, как, например, Новая Зеландия (см. табл. 4), хотя ранее были опубликованы данные о водном балансе и водных ресурсах 128 стран мира (Львович, 1974).

Данные о водном балансе материков получены путем планиметрирования карт элементов водного балансе в масштабе 1 : 60 000 000, т. е. в 4 раза большем, чем масштаб схематических карт, приведенных на рисунках 6—8. Расчеты такого типа можно назвать балансовой оценкой водных ресурсов. При этом следует иметь в виду, что испарение — элемент водного баланса, который можно считать началом водообмена, — не является ресурсной характеристикой. То же замечание относится к относительным величинам в таблице: они являются только показателями некоторых особенностей соотношения отдельных элементов баланса и ресурсов.

Как уже отмечалось, карты, послужившие для выводов о водном балансе частей света, носят генерализованный характер. Для составления существенно более подробных карт мира крупного масштаба по шестикомпонентному методу сейчас нет достаточных исходных данных. Охарактеризовать с большей подробностью один из материков, что возможно, например, для Европы, и более схематично такие слабо освещенные в гидрологическом отношении континенты, как Южная Америка, Африка, или зарубежную часть Азии, вряд ли было бы правомерно. Поэтому генерализация карт принята более или менее однородной для всех частей света.

Наиболее богата водными ресурсами на единицу площади (по слою стока) Южная Америка. Полный и подземный сток этого материка почти в 2 раза больше, чем в Европе, занимающей второе место по водным ресурсам. Затем следуют Азия, Северная Америка и Африка. Самая низкая обеспеченность речным стоком в Австралии. По объему стока, полного и подземного, который зависит от площади данной части света, первое место занимают водные

Таблица 4

Балансовая оценка ресурсов пресных вод частей света и континентов, СССР и суши в целом

Элементы водного баланса		Европа	Азия	Африка	Северная Америка*	Южная Америка	Австралия**	Вся суша***	В том числе СССР
Площадь, млн. км²		9,8	45,0	30,3	20,7	18,4	8,7	132,3	22,4
Осадки, P	в мм	734	726	686	670	1 648	736	834	500
Речной сток полный, R	в мм	319	293	139	287	583	226	294	198
подземный, U	в мм	109	76	48	84	210	54	90	46
поверхностный, S	в мм	210	217	91	203	373	172	204	152
Валовое увлажнение территории, W	в мм	524	509	595	467	1 275	564	630	348
Испарение, E	в мм	415	433	547	383	1 065	510	540	300
Осадки, P	в км³	7 165	32 690	20 780	13 910	29 355	6 405	110 305	10 960
Речной сток полный, R	в км³	3 110	13 190	4 225	5 960	10 380	1 965	38 830	4 350****
подземный, U	в км³	1 065	3 410	1 465	1 740	3 740	465	11 885	1 020
поверхностный, S	в км³	2 045	9 780	2 760	3 720	7 140	1 500	26 945	3 330
Валовое увлажнение территории, W	в км³	5 120	22 910	18 020	9 690	22 715	4 905	83 360	7 630
Испарение, E	в км³	4 055	19 500	16 555	7 950	18 975	4 440	71 475	6 610
Относительные величины									
Подземный сток в реки в % от полного		34	26	35	32	36	24	31	25
Коэффициент питания рек подземными водами, K_U		0,21	0,15	0,08	0,18	0,20	0,10	0,14	0,13
Коэффициент стока, K_R		0,43	0,40	0,23	0,31	0,35	0,31	0,36	0,40

* Исключая Канадский Архипелаг и включая Центральную Америку.
** Включая Тасманию, Новую Гвинею и Новую Зеландию; только на этом континенте P=440 мм, R=47 мм, U=7 мм, S=40 мм, W=400 мм, E=393 мм.
*** Исключая полярные ледники (R=3000 км³) и сток подземных вод, минуя реки (U=2400 км³).
**** Не считая 300 км³ транзитного стока.

ресурсы Азии. Ей уступает Южная Америка, затем следуют Северная Америка, Африка, Европа и Австралия с Океанией.

Следует напомнить, что для полного представления о водном балансе суши к данным табл. 4 необходимо добавить осадки и сток с покровных полярных ледников Гренландии, Канадского архипелага и Антарктиды. Но подходы к изучению водного баланса этих

пространств суши, занимающих значительную ее часть (более 16 млн. км², или около 11% площади суши), должны быть другими. Если в качестве главных элементов, характеризующих водный баланс и его структуру, принимаются валовое увлажнение территории, генетические составляющие речного стока, особенно сток подземного происхождения, то для покровных ледников такой подход в силу их особенностей лишен смысла.

Для полного представления о количестве воды, поступающей с суши в океан, необходимо кроме речного стока учесть сток с полярных ледников, наибольшую часть которого составляет сток с ледников Антарктиды и Гренландии. По последним расчетам, общий сток льда и воды с полярных ледников В. М. Котляков (1977) оценивает в 3000 км³/год. Кроме того, происходит приток подземных вод в океан, минуя реки; он оценивается тоже примерно в 2400 км³/год (Зекцер и др., 1984), что с небольшим изменением (на 60 км³ меньше) характеризует этот элемент мирового водного баланса по ранее сделанным расчетам этих же авторов (Джамалов, Зекцер и др., 1977). Таким образом, общий речной сток в океан, составляющий 38 830 км³/год, за счет указанных двух факторов должен быть увеличен на 4800 км³, благодаря чему общий приток воды в океан достигает 44 230 км³/год, а вместе со стоком внутренних («бессточных») областей — 45 060 км³/год.

Что касается СССР, по которому обобщенные данные приведены в последней колонке таблицы, то следует отметить, что полный речной сток составляет 11% мирового. Если учесть, что площадь СССР составляет 14% общей площади суши, исключая полярные ледники, то видно, что СССР обеспечен водными ресурсами относительно меньше всей суши в целом. Кроме того, на огромной территории СССР водные ресурсы распределены крайне неравномерно и в ряде случаев невыгодно в хозяйственном отношении. Прежде всего следует отметить, что 80% хозяйства СССР размещено в районах, в которых сосредоточено менее 20% ресурсов пресных вод. Соотношение этих цифр говорит о трудностях, связанных с относительной маловодностью развитых в экономическом отношении и густонаселенных районов. Особенно неблагоприятно это соотношение сложилось для сельского хозяйства. Территории многих районов, хорошо обеспеченных водой, нельзя использовать для сельского хозяйства из-за недостатка тепловых ресурсов (значительная часть Сибири, север европейской части СССР), а там, где тепловые ресурсы достаточны, мало воды (Средняя Азия, юг европейской части СССР). Это сказывается на урожайности и требует развития орошаемого земледелия.

Октябрьский (1984 г.) Пленум ЦК КПСС принял развернутую программу развития мелиорации с расчетом, что к 2000 г. на мелиорированных землях будет собрано зерна до 55—60 млн. т и не менее 115—125 млн. т кормов в пересчете на кормовые единицы, т. е. в 3 раза больше, чем в настоящее время (Материалы Пленума Центрального Комитета КПСС, 23 октября 1984 г., с. 20).

Естественные речные воды, не затронутые хозяйственной деятельностью, почти всегда хороши и отвечают самым высоким требованиям. Лишь в отдельных случаях в воде содержится много взвешенных частиц — наносов, но далеко не всегда это происходит по естественным причинам. Вырубка лесов, особенно в горах, примитивное земледелие часто являются причинами обогащения воды наносами.

Помимо механических взвесей речная вода содержит растворенные вещества. Формирование ионного стока начинается с дождя. Капля дождя еще в процессе падения, не достигнув поверхности земли, обогащается азотом и кислородом воздуха. Но в основном химический состав речной воды формируется в процессе движения воды по поверхности почвы и в горных породах. Соприкасаясь с почвой и горными породами, вода обогащается солями и органическими веществами.

Обогащение воды растворенными веществами не ограничивается естественными процессами. Речная вода используется для удаления и обезвреживания сточных вод городов, промышленных и сельскохозяйственных предприятий. Поэтому ее минерализация возрастает и вода обогащается биогенными элементами.

2. Обеспеченность населения стран мира ресурсами пресных вод

Оценка обеспеченности страны водными ресурсами — дело многогранное и сложное. Единого критерия не существует, поскольку степень обеспеченности зависит от многих факторов: природных условий, численности городского и сельского населения, развития промышленности и особенно от масштабов орошаемого земледелия, которое является самой водоемкой отраслью хозяйства.

Что касается природных условий водности, то из сказанного выше и приведенных карт элементов водного баланса, главным образом полного и подземного стока в реки, мы видим, что в разных местах суши они колеблются практически от нуля (в пустыне) до нескольких тысяч миллиметров в год. Например, полный сток небольших рек тихоокеанского побережья в Колумбии достигает 8000 мм при атмосферных осадках 7000—10 000 мм/год. Но подобные сравнения абсолютных величин водных ресурсов разных рек, стран или районов не могут служить для сравнительной характеристики обеспеченности. В миллиметрах слоя они дают представление об обеспеченности водными ресурсами территории, на которой они формируются, но при этом остаются неучтенными социальные факторы. Поэтому в качестве одного из критериев обеспеченности принимается объем речного стока на душу населения страны или района. Первая такая характеристика для стран мира была опубликована ранее (Львович, 1974) по данным о численности населения на конец 60-х годов. Здесь, в табл. 5, приводятся эти данные по странам света с учетом численности населения на середину 1979 г.

Таблица 5

Обеспеченность ресурсами речного стока частей света, континентов и мира в целом, на душу населения

Страны света	Площадь, тыс. км²	Население, млн. человек*	Речной сток, км³		Ресурсы речного стока на душу населения, тыс. м³/год	
			полный (R)	подземный (U)	полный	подземный
Европа	9 770	653	3 110	1 065	4,76	1,63
Азия	45 200	2 554	13 190	3 410	5,16	1,34
Африка	30 290	454	4 225	1 465	9,30	3,22
Северная Америка **	20 830	358	5 960	1 740	16,6	4,85
Южная Америка	17 810	234	10 380	3 740	44,3	16,0
Австралия с Океанией	8 400	21	1 965	465	93,5	22,7
Мир ***	132 300	4 274	38 830	11 885	9,10	2,70

* По: Demographic yearbook, 1979. N. Y., 1980.
** С Центральной Америкой и Западной Индией.
*** Исключая Антарктиду и Гренландию.

Последние два столбца в табл. 5 показывают, что даже для таких больших территорий, которые занимают отдельные материки, обеспеченность водными ресурсами колеблется в больших пределах: для полного речного стока — от 4,76 тыс. м³/год в Европе до 44,3 тыс. м³/год в Южной Америке и даже до 94 тыс. м³/год в Австралии с Океанией (в основном за счет высокой водности и относительно малой населенности Новой Зеландии и островов Океании); для подземного стока, который характеризует водность рек в засушливые сезоны, — соответственно 1,34 тыс. м³/год до 22,7 тыс. м³/год. Наиболее трудное положение в Азии, в которой в настоящее время (1979 г.) проживает свыше 2,5 млрд. человек, а реки огромных пространств Центральной и Юго-Западной частей материка характеризуются малой водностью и, что особенно важно, слабой естественной зарегулированностью. По этому показателю Азия занимает последнее место: обеспеченность ресурсами подземного стока составляет 1,34 тыс. м³/год, что, правда, немногим меньше этого же показателя для Европы (1,63 тыс. м³/год), где естественная и искусственная зарегулированность речного стока несколько выше, чем в Азии. Так, подземный сток в реки достигает в Европе 34% от полного, в Азии — 26%.

Обеспеченность водными ресурсами отдельных стран, разумеется, колеблется в гораздо большем диапазоне, чем обобщенные показатели для материков. Это подтверждается картосхемами на рисунках 11 и 12. Они отличаются от аналогичных картосхем (Львович, 1974) тем, что численность населения, лежащая в их основе,

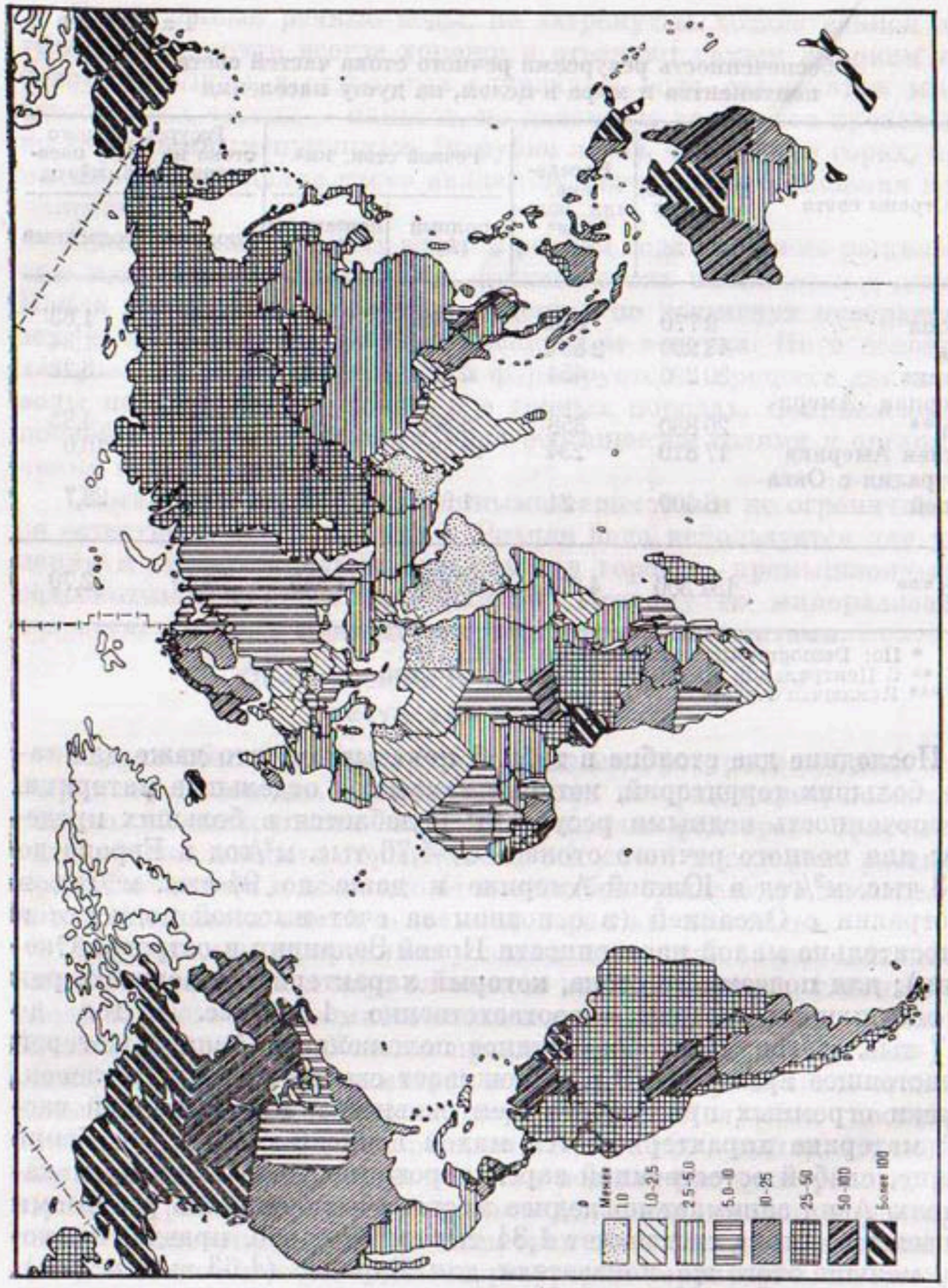


Рис. 11. Обеспеченность ресурсами полного речного стока (R) стран мира, тыс. м³/год на душу населения

принята по новым данным на середину 1979 г. (источник указан в примечаниях к табл. 5). В целом картина осталась прежней, но в связи с ростом населения по обеспеченности ресурсами пресной воды на одного человека часть стран перешла из одной категории шкалы карт в другую, а для всех стран мира обеспеченность уменьшилась в среднем на 21%. Такое уменьшение следует признать весьма существенным. Эволюция этого процесса будет рассмотрена

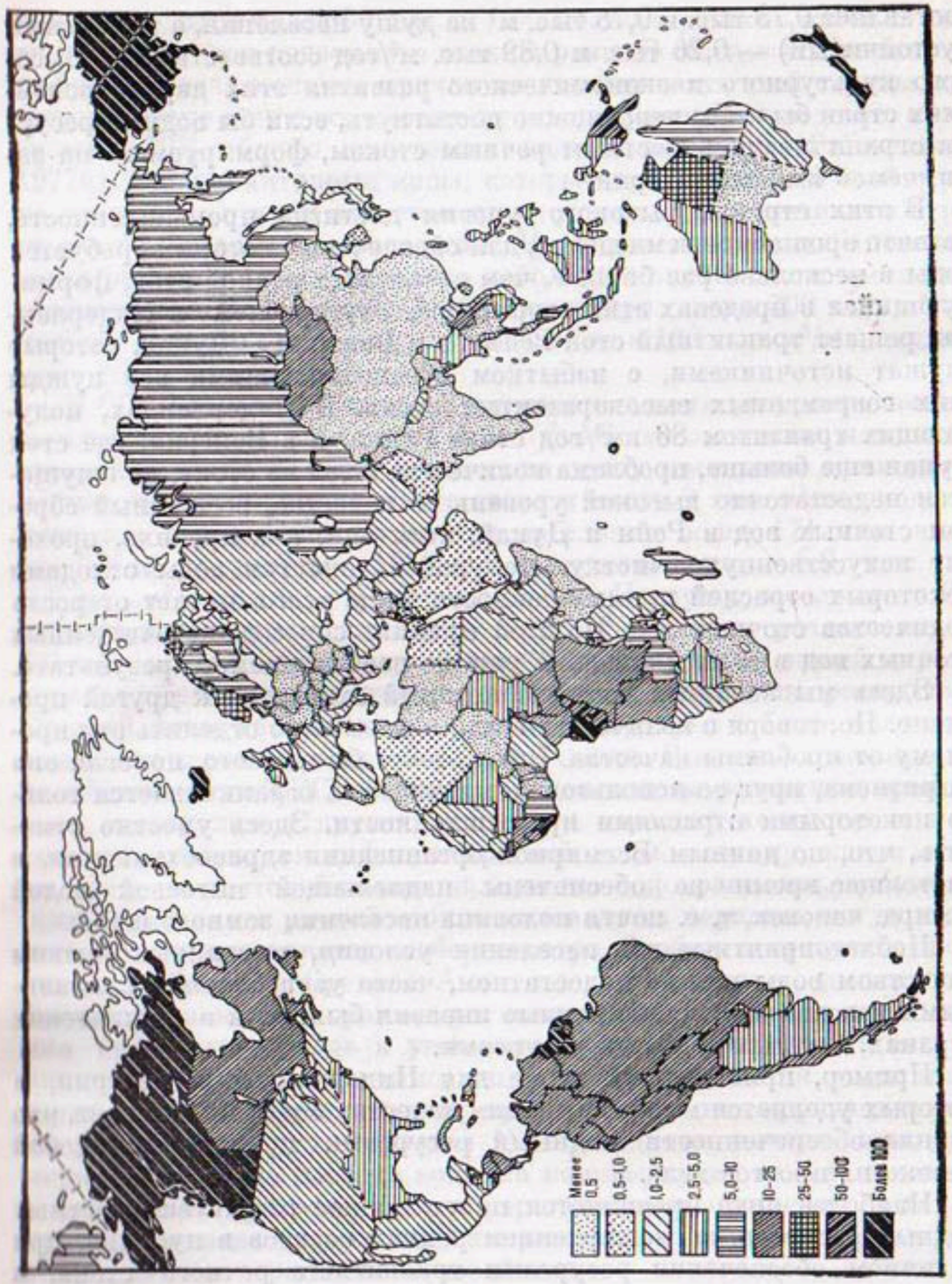


Рис. 12. Обеспеченность ресурсами подземного стока в реки (U) стран мира, тыс. м³/год на душу населения

ниже (табл. 6), а сейчас мы кратко охарактеризуем основные особенности этих картосхем.

Прежде всего следует подчеркнуть, что на картосхемах приведены сведения о водных ресурсах, сформировавшихся в пределах территории отдельных стран, и поэтому они не учитывают стока транзитных для данной страны рек. Так, например, полный речной сток, формирующийся на территории Нидерландов и Венгрии,

составляет 0,73 тыс. и 0,78 тыс. м³ на душу населения, а подземный (устойчивый) — 0,26 тыс. и 0,39 тыс. м³/год соответственно. Высокого культурного и экономического развития этих двух европейских стран было бы невозможно достигнуть, если бы водные ресурсы ограничивались местным речным стоком, формируемым на занимаемой ими территории.

В этих странах высокого уровня достигла промышленность, развито орошаемое земледелие, для обеспечения которых требуется воды в несколько раз больше, чем составляет речной сток, формирующийся в пределах этих территорий. Эту проблему в Нидерландах решает транзитный сток Рейна, а в Венгрии — Дуная, которые служат источниками, с избытком обеспечивающими все нужды этих современных высокоразвитых стран. В Нидерландах, получающих транзитом 80 км³/год стока Рейна, и в Венгрии, где сток Дуная еще больше, проблема количества воды не стоит, но ощущается недостаточно высокий уровень ее качества, вызванный сбросом сточных вод в Рейн и Дунай, хотя они, как правило, проходят искусственную очистку. Но уровень очистки воды отходами некоторых отраслей промышленности чаще всего отстает от роста количества сточных вод. По этой причине сброс даже очищенных сточных вод в реки и водоемы уже не дает желаемого результата.

Здесь мы касаемся вопроса, который относится к другой проблеме. Но, говоря о количестве воды, невозможно отделить эту проблему от проблемы качества. Воды может быть много, но, если она загрязнена, круг ее использования сужается, ограничивается только некоторыми отраслями промышленности. Здесь уместно отметить, что, по данным Всемирной организации здравоохранения, в настоящее время не обеспечены надлежащей питьевой водой 2 млрд. человек, т. е. почти половина населения земного шара.

Неблагоприятные для населения условия, вызванные низким качеством воды или ее недостатком, часто усугубляются социальными условиями. Однако водные инвазии бывают и в тропических странах, богатых водными ресурсами.

Пример, приведенный выше для Нидерландов и Венгрии, в которых уделяется много внимания качеству воды, показывает, что оценка обеспеченности водными ресурсами представляет собой далеко не простое дело.

Наиболее ярко проявляется почти полное отсутствие местных водных ресурсов, за исключением редких оазисов в пустыне, при отличном обеспечении ресурсами транзитного речного стока, в Египте, занимающем около 1 млн. км² почти сплошной пустыни. Однако пресная вода Нила (более 90 км³/год) обеспечила хозяйство и культуру Древнего Египта и теперь служит почти неисчерпаемым источником современного развития культуры и экономики.

Вместе с тем существует много стран, в которых местные ресурсы пресной воды формируются в большом количестве и нередко с избытком обеспечивают потребности населения и хозяйства. В Европе это прежде всего Норвегия, в которой на душу населения приходится более 90 тыс. м³/год полного речного стока и почти 30 тыс. м³/год подземного стока в реки. В соседней Швеции эти цифры в 4 раза меньше, причем на южную часть этой страны, где сосредоточено почти все население и водоемкое производство, падает всего 20% общего количества водных ресурсов (Falkenmark, 1977б). Однако активные меры, которые принимаются в этой стране для защиты рек и водоемов от загрязнения, обеспечивают страну местными водными ресурсами. Исландия с ее весьма многоводными реками при относительно небольшой численности населения обеспечена водными ресурсами очень щедро: почти 300 тыс. м³/год полного речного стока на душу населения и 100 тыс. м³/год подземного стока в реки.

В СССР азиатская часть обеспечена водными ресурсами намного лучше, чем европейская. При общей численности населения азиатской части 91 млн. человек на душу населения приходится 37 тыс. м³/год полного речного стока и около 8 тыс. м³/год подземного, а в европейской части при населении более 171 млн. человек (по переписи 1979 г.) — соответственно 5,9 тыс. и 1,7 тыс. м³/год, т. е. в 5—6 раз меньше. На душу населения в Советском Союзе приходится 16,6 тыс. м³/год всех речных вод и 3,9 тыс. м³/год подземного стока. Бóльшая часть нашей страны хорошо обеспечена водными ресурсами, исключая республики Средней Азии, где основная часть вод Сырдарьи и более половины стока Амударьи расходуются на орошение. В южной половине европейской части СССР в связи с интенсивным развитием орошаемого земледелия и других водоемких отраслей хозяйства в перспективе ожидается дефицит пресной воды, поэтому, как известно, здесь создается большое количество водохранилищ, позволяющих увеличивать речной сток в маловодные периоды, когда недостаток воды проявляется особенно остро. Особую остроту эта проблема приобрела в Средней Азии, где в последние десятилетия быстро развивалось орошаемое земледелие. Здесь для восполнения недостатка в воде и умножения водных ресурсов в вегетационный период необходимо, как мне представляется, создание в горах системы водохранилищ преимущественно ирригационного направления (см. гл. 6, раздел 1), ликвидация потерь воды, всемерное снижение расхода воды на поливы путем их механизации и постепенного перевода на внутрипочвенное орошение, а также проведение ряда других мер, направленных на дальнейшую интенсификацию орошаемого хозяйства.

Из стран, «богатых» водными ресурсами, в Азии можно отметить Лаос, в котором каждый человек из 3 630 тыс. населения обеспечен 63 тыс. м³/год полного речного стока и 14 тыс. м³/год подземного, в Африке — Конго (120 тыс. и 45 тыс. м³/год соответственно), в Северной Америке—Канаду (115 тыс. и 30 тыс. м³/год), в Центральной Америке — Никарагуа (54 тыс. и 22 тыс. м³/год) и Панаму (43 тыс. и 22 тыс. м³/год), в Южной Америке из больших стран — Бразилию (48 тыс. и 16 тыс. м³/год) и Венесуэлу (56 тыс.

и 17 тыс. м³/год), в Океании—Новую Зеландию (128 тыс. и 64 тыс. м³/год), особенно Южный остров (326 тыс. и 162 тыс. м³ на одного человека в год), и т. д.

Отмеченное выше снижение обеспеченности водными ресурсами по мере роста населения за истекшие 30 лет можно проследить с 1850 г. по настоящее время и дать приближенный прогноз на начало будущего столетия (табл. 6).

На основании имеющихся данных мы допускаем, что за период 150—170 лет суммарный естественный полный сток и подземный сток в реки остались примерно на одном уровне. В связи с ростом населения в течение века с 1850 г. обеспеченность водными ресурсами на душу населения уменьшилась в 2,1 раза. Вместе с тем за 30 лет, начиная с 1950 г., т. е. за срок, меньший в 3 раза, обеспеченность ресурсами полного речного и подземного стока в реки на душу населения уменьшилась в 1,7 раза. Таким образом, если за столетие (с 1850 по 1950 г.) интенсивность снижения обеспеченности водными ресурсами в течение каждого десятилетия в среднем уменьшалась в 0,2 раза, то за последние три десятилетия — в 0,6 раза. Следовательно, в течение каждого из трех последних десятилетий обеспеченность водными ресурсами населения земного шара уменьшалось в 3 раза быстрее, чем в течение столетия до 1950 г. Этот процесс связан с интенсивным ростом населения в течение трех истекших десятилетий. За два десятилетия до 2000 г. снижение обеспеченности населения водными ресурсами будет происходить еще быстрее, чем в течение 100 лет до 1950 г. В указанных показателях интенсивность падения к началу будущего века возрастет лишь немного, а в сравнении с периодом 1950—1980 гг. снизится в 2,4 раза.

В последней строке табл. 6 дан приближенный прогноз обеспеченности населения мира водными ресурсами на начало будущего столетия. Этот срок не является безусловным, так как проблема прогнозов экономики на десятилетия, тем более в глобальном масштабе, представляет собой дело сложное. По этой причине прогнозы, приведенный в табл. 6, как и другие мною разработанные аналогичные прогнозы, следует рассматривать как цель, к достижению которой необходимо стремиться.

Чего же можно ожидать в более отдаленном будущем? Во-первых, исследования демографов показывают, что численность населения мира должна постепенно стабилизироваться. Нельзя предвидеть, когда произойдет такая стабилизация или существенное замедление роста населения. Вряд ли этот процесс наступит ранее 2050 г. Во-вторых, следует иметь в виду водохранилища, которые сооружаются во многих странах и регулирующая емкость которых быстро возрастает. Водохранилищам принадлежит большая роль в подтормаживании падения обеспеченности водными ресурсами населения мира.

Сток, зарегулированный после 1980 г. водохранилищами в объеме свыше 5 тыс. км³, отражает перемещение основного объема

Таблица 6

Эволюция годовой обеспеченности населения мира ресурсами речного стока *

	Время	Население, млн. человек	Речной сток (естественный), км³/год		Суммарный устойчивый речной сток вместе с зарегулированными водохранилищами, км³/год	Обеспеченность речными водными ресурсами на душу населения, тыс. м³/год			
			полный	подземный (устойчивый)		естественными		суммарными устойчивыми водными ресурсами	эффект водохранилищ
						полным стоком	подземным (устойчивым) стоком		
	1850 г.	1 170			11 900	33,3	10,0	10,0	0
	1950 г.	2 510			12 600	15,5	4,8	5,0	0,2
	1970 г.	3 580			14 000	10,1	3,4	3,9	0,5
	1980 г.	4 275	39 000	11 900	14 600	9,1	2,7	3,4	0,7
Прогнозы	1990 г.	5 240			17 500	7,4	2,3	3,3	1,0
Прогнозы	Начало XXI столетия	6 200			20 000	6,9	1,9	3,2	1,3

* Округленные величины с учетом современного объема водохранилищ мира объемом более 100 млн. м³ каждое, по А. Б. Авакяну и др. (1979).

наземных водохранилищ в развивающиеся страны. Вместе с тем в странах, где земельные ресурсы не позволяют сооружать наземные водохранилища, затопляющие территорию, необходимо создавать подземные водохранилища, под которыми следует понимать искусственное питание в больших масштабах подземных вод речной паводочной водой. Такие подземные водохранилища будут служить резервом водных ресурсов, которые можно использовать в засушливые периоды — сезоны и годы. Этот резерв водных ресурсов вместе с наземными водохранилищами должен обеспечить население мира устойчивыми водными ресурсами в среднем приблизительно в объеме около 3,2 тыс. м³/год на душу населения, т. е. сохранить их в тех же масштабах, что и в 80-х годах.

Об эффекте сооружения водохранилищ указанного типа и объема можно судить, если отнести объем современных устойчивых ресурсов к 2000 г., когда население Земли достигнет приблизительно 6,2 млрд. человек. При таком варианте обеспеченность населения мира на душу подземным (устойчивым) стоком в реки ограничится приблизительно 2 тыс. м³/год, что почти в 1,5 раза ниже современной обеспеченности. Это может создать критическое положение, особенно в тех странах, где уже сейчас в маловодные сезоны и годы ощущается недостаток даже в питьевой воде.

Стабилизирующее влияние водохранилищ на обеспеченность населения устойчивыми водными ресурсами (напомним, что они складываются из естественного питания рек подземными водами и регулирования стока водохранилищами) за полтора столетия можно проследить по двум последним столбцам табл. 6. Так, в середине прошлого столетия больших водохранилищ, объемом более 100 млн. м³, не существовало. По этой причине подземный сток в реки был практически единственным источником устойчивых водных ресурсов. Век спустя, т. е. в 1950 г., обеспеченность естественными устойчивыми водными ресурсами на душу населения мира составляла 4,8 тыс. м³/год, а суммарными водными ресурсами — 5 тыс. м³/год. Проведенная в последнем столбце таблицы разница в 0,2 тыс. м³/год связана с регулирующим эффектом водохранилищ. В 1970 г. она достигала уже 0,5 тыс. м³/год, в 1980 г. — 0,7 тыс., а в начале XXI столетия достигнет приблизительно 1,3 тыс. м³/год. При этом относительный эффект водохранилищ ожидается больший, чем за предыдущие полтора столетия.

Из всего сказанного видно, что хотя обеспеченность ресурсами пресных вод на душу населения мира уменьшается, но человечество имеет мощное средство регулирования речных и подземных вод наземными и подземными водохранилищами, с помощью которых постепенно стабилизируется обеспеченность ресурсами пресных вод на душу населения. Этот фактор имеет чрезвычайно большое значение при оценке ресурсов пресных вод, обеспеченности ими населения мира. Приведенные результаты анализа обеспеченности населения водными ресурсами показывают огромную эффективность их расширенного воспроизводства как средства умножения наиболее доступных для использования частей водных ресурсов.

Кроме того, большие возможности для стабилизации водопотребления открывает уменьшение расходования воды на единицу сельскохозяйственного и промышленного производства.

3. Географические закономерности водного баланса

В книге «Мировые водные ресурсы и их будущее» много внимания было уделено географическим закономерностям водного баланса территории и одному из его основных элементов — речному стоку. Для этой цели были установлены принципы анализа этих закономерностей, структурные зависимости водного баланса с серией конкретных зависимостей для разных географических зон, источники питания и внутригодовое (сезонное) распределение стока в виде соответствующей типологической карты, первый вариант которой был опубликован в книге «Элементы режима рек земного шара» (Львович, 1945). Таким путем была создана первая

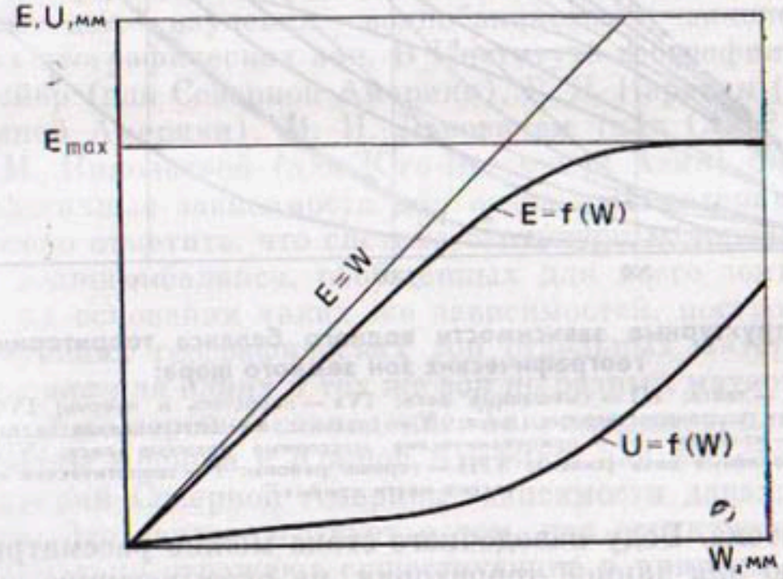


Рис. 13. **Теоретическая схема структурных зависимостей водного баланса:**

E (испарение) и *U* (питание рек подземными водами) от *W* (валового увлажнения территории); E_{max} (испаряемость)

географическая характеристика мирового водного баланса суши.

Структурные зависимости водного баланса территории, теоретической основой которых является схема на рис. 13, отражают комплекс наиболее важных факторов формирования водного баланса — климата, почвы и растительности, в целом зональные закономерности водного баланса.

Влияние указанных основных факторов сочетается в элементе *W* — валовом увлажнении территории, который, напомню, включает атмосферные осадки за вычетом поверхностного (паво-

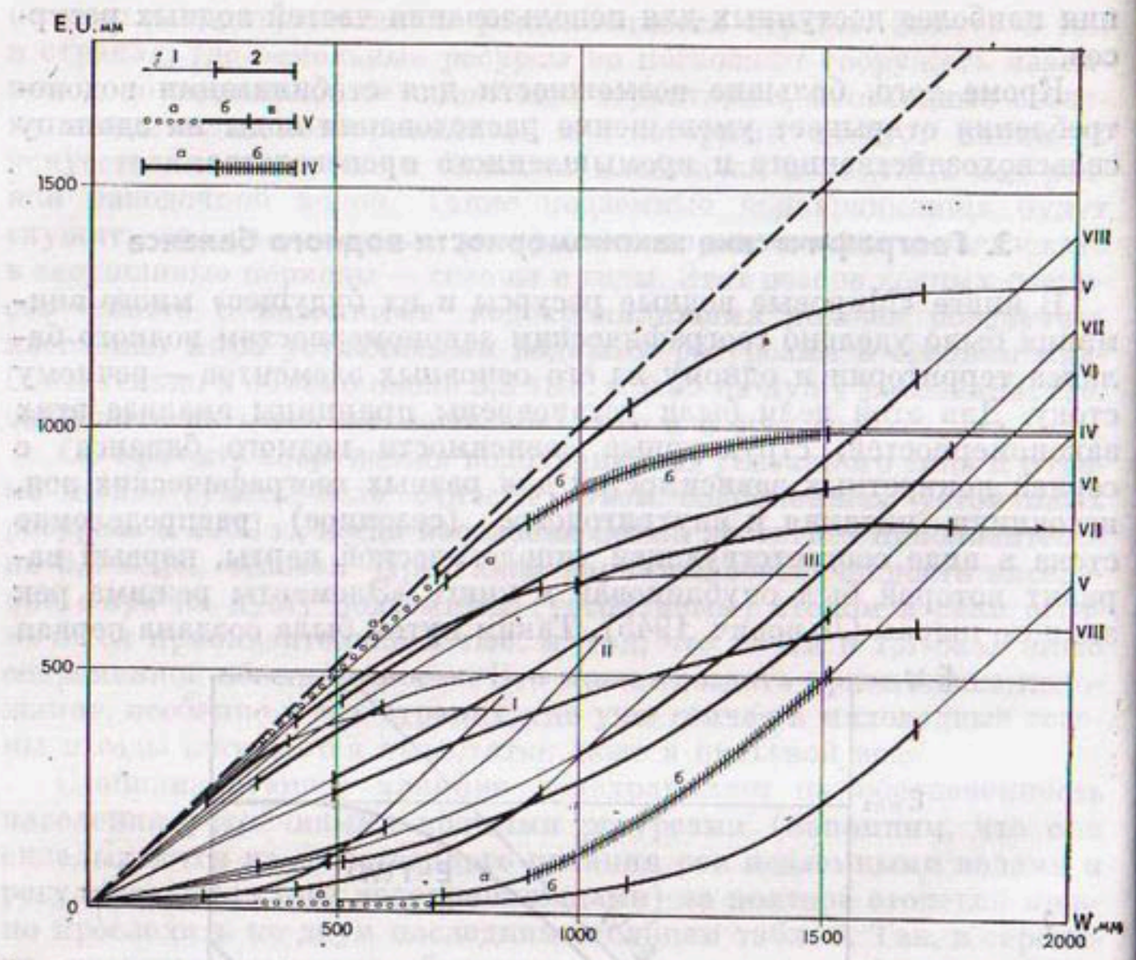


Рис. 14. Структурные зависимости водного баланса территории основных географических зон земного шара:

I — тундра; II — тайга; III — смешанные леса; IVа — лесостепь и прерии; IVб — восточные приокеанические широколиственные леса; V — саванна: а — опустыненная саванна и степь; б — сухая; в — влажная; VI — приокеанические муссонные влажные леса; VII — постоянно влажные вечнозеленые леса (гилеи); VIII — горные районы: 1 — теоретические и 2 — эмпирические части кривых

дочного) стока. Воду паводочного стока можно рассматривать как транзитную для данной территории, не оказывающую существенного влияния на ее увлажнение и продуктивность фитомассы. Валовое увлажнение почвы (W) зависит от интенсивности дождей, снеготаяния и инфильтрационной способности почвы. В то же время элемент W — вода, питающая реки подземными водами (U), а E — испарение. В относительных величинах сумма U и E в структурных зависимостях равна единице, т. е. относительному значению W. Соотношение U и E служит показателем свойств водного баланса в целом. При большом U мало́ испарение. Эти соотношения различны при разных значениях W. Важно, что эти зависимости изменяются по географическим зонам. Следовательно, зональность, как комплексный фактор, отражает влияние тех факторов, которые не полностью входят в соотношения U, E и W.

Структурные зависимости для основных географических зон мира приведены на рис. 14. Каждая пара кривых в соответствии с физико-географическими условиями формирования водного баланса территории меняет свое положение, подчиняясь зональным закономерностям. Если в ранее полученных аналогичных зависимостях (например, в незональных зависимостях, построенных Э. М. Ольдекопом и В. Вундтом) переход от одной кривой к другой производился на основании частных климатических показателей, то в структурных зависимостях он обусловлен изменением всего комплекса физико-географических условий, характерных для данной зоны и влияющих на водный баланс, включая и почву, которая является вторым после климата важным гидрологическим фактором. Необходимо отметить, что в пределе испарение (E) переходит в испаряемость (E_{max}), или потенциальное испарение, которое могло бы быть в данной географической зоне при условии круглогодичной увлажненности, обеспечивающей непрерывное испарение необходимым количеством воды.

Первоначально зависимости такого типа использовались в качестве временны́х зависимостей для определения изменений элементов водного баланса под влиянием обработки почвы и полезащитного лесоразведения (Львович, 1950, 1963). Затем они были применены для изучения воднобалансовых закономерностей различных географических зон. В Институте географии АН СССР Н. Н. Дрейер (для Северной Америки), Г. Я. Карасик (для Африки и Южной Америки), М. И. Львовичем (для СССР и Австралии), Г. М. Николаевой (для Юго-Восточной Азии) были составлены аналогичные зависимости для отдельных материков.

Интересно отметить, что система структурных зональных зависимостей водного баланса, обобщенных для всего земного шара, получена на основании таких же зависимостей, построенных для соответствующих географических зон отдельных материков. При их совмещении для одних и тех же зон по разным материкам получалось довольно хорошее совпадение. Так, например, для трех подтипов саванны Африки и Южной Америки, для лесостепной зоны СССР и прерий Северной Америки зависимости давали хорошую сходимость. Это свидетельствует о том, что структурные зависимости объективно отражают существующие в природе закономерности водного баланса, свойственные отдельным географическим зонам. Имеющиеся эмпирические данные, к сожалению, позволили охватить не все географические зоны земного шара, а лишь основные из них, занимающие приблизительно $^2/_3$ суши.

Система структурных зависимостей $U=f(W)$, приведенных на рис. 14, соответствует выражению:

$$U=\begin{cases} W\left(1-\dfrac{2E_{max}}{a+b}\right) \ldots\ldots \text{ при } W<a; \\ W-\dfrac{E_{max}}{b^2-a^2}\,(2bW-W^2-a^2) \ldots\ldots \text{ при } a\leqslant W\leqslant b; \\ W-E_{max} \ldots\ldots \text{ при } W>b, \end{cases}$$

где a и b — параметры, значения которых приведены в табл. 7.

Таблица 7

Типологические характеристики зональных структурных зависимостей водного баланса мира

Индекс по рис. 14	Пояс	Зона	Атмосферные осадки (P), мм	Речной сток, мм			Валовое увлажнение территории (W), мм	Испарение (E), мм	Коэффициент питания рек подземными водами (K_U)	Испаряемость (E_{max}), мм	Параметры аналитического выражения зависимостей		Годовой прирост фитомассы*, т/га
				полный (R)	подземный (U)	поверхностный (S)					a	b	
I	Субарктический	Тундра	370	110	40	70	300	260	0,13	400	300	575	1—2
II	Умеренный	Тайга	700	300	140	160	540	400	0,26	500	360	940	10—15
III	То же	Смешанные леса	750	250	100	150	600	500	0,17	700	400	1 160	10—15
IV, а	» »	Лесостепь, прерии	650	120	30	90	560	530	0,05	900	600	1 480	8—12
V, а	» »	Степь	500	50	10	40	460	450	0,02	1 300	900	1 770	4—8
IV, б	Субтропический и тропический	Восточные приокеанические широколиственные влажные леса	1 300	420	120	300	1 000	880	0,12	1 000	600	1 480	10—15
V, а	То же	Саванна опустыненная	300	20	2	18	282	280	0,007	1 300	900	1 770	2—6
V, б	» »	Саванна сухая	1 000	130	30	100	900	870	0,03	1 300	900	1 770	6—12
V	» »	Саванна влажная	1 860	600	240	360	1 500	1 260	0,16	1 300	900	1 770	10—20
VI	» »	Приокеанические муссонные влажные леса	1 600	820	320	500	1 100	780	0,30	900	530	1 680	15—30
VII	Экваториальный	Постоянно влажные вечнозеленые леса (гилеи)	2 000	1 200	600	600	1 400	800	0,43	800	460	1 620	30—50
VIII	Горный	Горные приокеанические муссонные влажные леса	2 200	1 700	700	1 000	1 200	500	0,58	600	750	1 750	15—30

* По: Родину и Базилевич, 1965.

В этой таблице даны такие наиболее характерные значения элементов водного баланса для каждой географической зоны.

С точки зрения практических задач использования и охраны водных ресурсов наиболее выгодна структура стока, при которой кривая $U=f(W)$ находится выше кривой $E=f(W)$. Примером такого ярко выраженного случая на рис. 14 может служить пара кривых под номером VIII. Она характеризует структуру водного баланса горных районов, где в таких условиях загрязнение рек менее опасно, чем при балансе типа структурной кривой номер V.

Вообще этот признак принципиально важен, так как кривая VIII обеспечивает наилучшие условия для самоочищающей способности рек, даже небольших. Именно поэтому во многих случаях загрязнение рек не достигает неблагоприятного порога. Однако в наш век гигантских городов и промышленных предприятий роль самоочищающей способности рек настолько уменьшается, что можно с уверенностью сказать: этому процессу, как благоприятствующему фактору охраны вод, во многих районах мира ныне принадлежит второстепенное значение. Известны, например, случаи, когда залповые сбросы в реку сточных вод при незамкнутом оборотном водоснабжении, т. е. при многократном усилении загрязнения воды после каждого производственного цикла, наносят огромный урон экологии реки. Самоочищающая способность реки, даже при самых выгодных условиях, например на горных реках, дает положительный эффект только в тех случаях, когда расход воды в реке намного (в десятки раз) превышает объем и степень загрязненности сбрасываемых в нее сточных вод.

В последней колонке табл. 7 приведены приближенные данные о продуктивности фитомассы (по Родину и Базилевич, 1965) в пределах зон, к которым относятся структурные зависимости водного баланса. Продуктивность фитомассы — хороший показатель степени благоприятности водного баланса в сочетании с тепловыми ресурсами. Годовой прирост фитомассы вполне удовлетворительно коррелируется с валовым увлажнением территории (W), особенно в пределах субарктического и умеренного поясов, а также субтропического и тропического.

Часть II
Антропогенные воздействия на воды

Глава 5
НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИХ ИЗУЧЕНИЯ (РАСШИРЕННОЕ ВОСПРОИЗВОДСТВО ВОДНЫХ РЕСУРСОВ)

Антропогенные воздействия на воды в текущем столетии осуществляются в огромных масштабах и приобрели глобальное распространение. Начало этого процесса относится к весьма давнему времени. Первые крупномасштабные нарушения естественного режима вод, преобразования водного баланса начались с переходом людей на оседлое земледелие. Как известно, в лесной зоне его развитие происходило в основном за счет уничтожения лесов, их выжигания и использования удобренной золой почвы для посевов. Через несколько лет такое подсечное земледелие приводило к истощению земельных участков, что требовало выжигания лесов на других участках. Но на брошенных участках восстанавливался лес, почва снова приобретала высокую инфильтрационную способность. Эти ее свойства способствовали постепенному восстановлению лесного биогеоценоза как регулятора водного баланса. В таких условиях распространение земледелия как антропогенного гидрологического фактора происходило медленно. Потребовалось много веков, чтобы этот фактор приобрел глобальное значение.

Таким образом, в принципе начало антропогенным воздействиям на воды было положено уже весьма давно, но в течение тысячелетий оно носило преимущественно местный характер и не достигало больших размеров. Этот вывод относится не только к культуре земледелия, но и к другим видам преобразований.

Наиболее ярким примером может служить орошаемое земледелие, которое в настоящее время относится к наиболее водоемкой отрасли хозяйства: более 70% всего мирового водопотребления приходится на орошение.

Существенное антропогенное влияние на воды оказал активный период развития капитализма.

В табл. 8 приведен перечень основных антропогенных гидрологических факторов. Здесь речь идет преимущественно о тех факторах, которые в конечном счете влияют на окружающую среду. Приведу пример: среди гидротехнических сооружений судоходные шлюзы начиная с XVIII в. получили весьма большое распространение и создавались при всех плотинах на судоходных реках. Вместе с тем они не оказывают существенного влияния на окружающую среду, так как ограничиваются местными, чаще всего небольшими подпорами.

Таблица 8

Основные антропогенные гидрологические факторы преобразований и изменений

Гидротехнические воздействия на русловый сток	Почвенно-мелиоративные воздействия на водный баланс и сток в начальной стадии его развития — на территории	Водоснабжение и водоотведение
Регулирование речного стока водохранилищами	Сельское хозяйство	Водозабор из водных объектов
Аккумуляция наносов в водохранилищах	Земледелие	Межрайонные водопроводы
Эвтрофирование водоемов	Полезащитное лесоразведение	Водоотведение и его последствия
Вода и землетрясения	Осушение	Охрана водного компонента окружающей среды
Регулирование речных русел	Орошение	
Каналы судоходные	Борьба с эрозией	
Каналы для транспортирования воды	Смыв удобрений и ядохимикатов с сельскохозяйственных полей	
Преобразование бессточных озер	Водоохранные леса и лесное хозяйство	
	Водоохранная роль леса	
	Рубка леса	
	Возобновление лесов	
	Нарушение инфильтрационной способности лесных почв выпасом скота	
	Гидрологическая роль городов	
	Стекание снеговых и дождевых вод с территории городов	
	Смыв загрязнений поверхностным стоком	
	Канализационные воды и их очистка (см. следующий столбец)	

Как видно из таблицы, все виды антропогенных изменений вод можно разделить на три группы.

Приведенный перечень различных видов антропогенных преобразований не претендует на исчерпывающую полноту. Некоторые виды преобразований и изменений, воздействующие в наибольшей степени на преобразование природы, включены в таблицу. В то же время в ней отсутствуют весьма распространенные и играющие большую роль в хозяйстве гидроэлектростанции. Но преобразующим элементом этих сооружений является не столько собственно гидростанция, влияние которой в нижнем бьефе сказывается под воздействием зависящих от выработки гидроэлектроэнергии турбинных расходов воды, сколько плотина и созданное с ее помощью водохранилище. Что же касается высоконапорных деривационных гидростанций, то их влияние на природу ограничивается местным перераспределением водных ресурсов и в этом отношении является гораздо менее мощным антропогенным фактором, чем водохранилища.

Оригинальным способом воздействия на водность горных рек, ее увеличение в маловодные периоды является ускорение таяния ледников путем зачернения их поверхности (Авсюк, 1962; Авсюк, Котляков, 1976).

Применение в табл. 8 терминов *преобразование* и *изменение* необходимо пояснить. Целенаправленные изменения вод или окружающей среды в целом мы называем преобразованиями. Например, водохранилища создаются непосредственно для получения напора гидроэлектростанции и регулирования стока — это относится к преобразованиям. Другой случай: нецеленаправленные меры, такие, например, как загрязнение вод, относятся к побочным, не предусмотренным заранее явлениям, для определения которых не подходит термин «преобразование», поэтому они относятся к изменениям.

Четко разграничить эти два понятия невозможно. Например, земледелие направлено на получение пищи, но одновременно оно воздействует на инфильтрационную способность почвы, влияющую на водный баланс территории. Это случай антропогенных изменений. Вместе с тем в засушливых зонах изменения водного баланса, способствующие дополнительному увлажнению почвы, приобретают целенаправленный гидролого-агрономический характер и могут быть отнесены к категории преобразований. С преобразованиями этого направления связаны изменения в чистом виде; ими являются эрозионные процессы, как правило вызванные антропогенными последствиями в результате низкой культуры земледелия или уничтожения лесов при тех способах и методах хозяйствования, которыми характеризуются производственные отношения и производительные силы в разных социальных условиях.

Мировая площадь орошаемых земель в настоящее время достигает 240 млн. га и дает около половины общего объема сельскохозяйственной продукции. Площадь же, занятая под орошение, составляет всего 16% от всей площади пахотных земель. Чрезвычайно интересно, что в последние годы эта отрасль хозяйства стала развиваться не только в засушливых странах, но и на Севере, где орошение до недавнего времени еще не планировалось.

Осушение болот и заболоченных земель, вероятно, начало развиваться значительно позже, чем орошение. Вместе с тем в настоящее время осушенные площади растут быстрыми темпами. В СССР площадь осушенных земель увеличивается почти такими же темпами, как и орошаемых.

В последние годы получил развитие новый способ водной мелиорации — мелиоративные системы двойного действия. Они работают как оросительные системы во время засух, как осушительные — в периоды избытка почвенной влаги. Этот способ несомненно прогрессивен, так как по существу представляет собой управляемое снабжение водой растений.

Весьма существенна гидрологическая роль неорошаемого земледелия, полезащитного лесоразведения и лесного хозяйства

(Львович, 1950а, б, 1952, 1960, 1963). Дискуссия о гидрологической роли леса, влиянии его вырубок на перераспределение режима речного стока по сезонам была начата уже в первой трети прошлого столетия. Но до недавнего времени она опиралась на чисто эмпирический подход, приводивший к недостаточно обоснованным противоречивым выводам. Теперь же в основе аргументации гидрологической роли леса, как и земледелия, лежит теория формирования гидрологических явлений и процессов под влиянием искусственных и биогенных воздействий на почву, что позволило получить более объективные выводы. Однако и в настоящее время не исключены чисто эмпирические подходы, но при их применении важно следовать теории. При нарушении этого условия упрощается решение задачи, но выводы нередко оказываются ложными (см., например, Львович, 1955).

Крупные преобразования режима рек происходят под влиянием водохранилищ, воздействие которых на водный режим рек мира впервые было освещено автором в конце 60-х годов (Львович, 1974). Особенно интенсивно подобные преобразования развивались в течение истекших трех десятилетий. За эти годы Советский Союз вышел на одно из первых мест по объему зарегулированного водохранилищами речного стока. Водохранилища, как и другие гидротехнические сооружения (плотины, каналы и т. п.), приносят, конечно, большую пользу человечеству. Примером может служить гидроэнергетика, вырабатывающая в огромном количестве, притом дешевую, электроэнергию без расходования топливных ресурсов, которые быстро истощаются. Но едва ли не главное значение гидроэлектростанций заключается в том, что они позволяют получать электроэнергию, не загрязняя воздух отходами, что характерно для тепловых электростанций. Вместе с тем нельзя игнорировать и некоторое отрицательное влияние на окружающую среду гидроэлектростанций (в особенности плотинных): при создании водохранилищ затопляются нередко весьма плодородные земли и лесные массивы, которым, как правило, нет замены.

Однако, если объективно проанализировать последствия подобных гидрологических преобразований, то мы приходим к выводу о том, что те или иные отрицательные последствия в природе и окружающей среде неизбежны. Важно, чтобы таких последствий было как можно меньше и их оценка не носила субъективного характера. Важно также, чтобы неблагоприятные последствия в максимальной мере перекрывались пользой, которую приносят людям такие преобразования [1].

[1] Когда с этой идеей о последствиях преобразований гидротехническими средствами, иллюстрированной практическими примерами, автор выступил в печати (Львович, 1977), она нашла отражение в двух противоположных взглядах. Некоторые специалисты восприняли ее как «зеленую улицу» для гидротехнического строительства, не принимая во внимание интересов охраны природы и окружающей среды, вычеркнув из моей формулировки мысль о том, что отрицательные последствия должны быть в минимуме при

Самые высокие требования к ограничениям отрицательных влияний на окружающую среду должны отражаться в проектах и при осуществлении гидротехнического строительства. Абсолютно необходимо подчеркнуть, что при решении этой задачи целесообразно обеспечивать гарантию минимуму отрицательных воздействий на природу, ответственность за которые должна взять на себя наука. В первую очередь это относится к системе географических наук, вполне подготовленной к решению таких ответственных задач на основе фундаментальных теоретических предпосылок и практического опыта.

Сказанное о минимуме отрицательных влияний на природу представляет собой первый принцип подхода к изучению и решению вопросов влияния водохозяйственного строительства на окружающую среду. На основании сказанного выше это положение можно кратко сформулировать так. Полностью избежать отрицательных влияний водохозяйственных мероприятий на окружающую среду практически невозможно, но наука должна взять на себя решение задачи об определении минимума таких воздействий при максимальной общественной отдаче (Львович, 1977). Этот принцип был принят в исследованиях влияния гидротехнических сооружений и водохозяйственных мероприятий на окружающую среду и в последние годы находит все большее применение при решении подобных задач. Однако эта проблема настолько сложна, что ее решение не может быть ограничено рамками одного принципа.

В последующем были выдвинуты и другие принципы.

Второй из принципов заключается в комплексном характере водных преобразований, которые часто воздействуют на всю цепь элементов природы. Это говорит о том, что проект водохозяйственных мероприятий не должен ограничиваться изучением и оценкой прямых воздействий, которые являются целью или входят в задачи водных преобразований. Необходимо иметь в виду последствия второго, третьего и последующих порядков, которые могут явиться результатом косвенных воздействий, связанных с достижением основной цели водохозяйственного проекта. Выявление таких непрямых последствий, как правило, представляет собой сложную задачу, поэтому требует тщательного учета природных, социальных условий, а также характера водохозяйственного мероприятия.

Третий принцип представляет собой комплекс компенсационных мер, требующих дальнейшего развития, главным образом в связи с тем, что иногда он применяется недостаточно полно. Например, затопление под водохранилище весьма продуктивных для

максимальной пользе проектируемого водохозяйственного мероприятия. Другие специалисты сочли это условие слишком жестким для гидротехнического строительства. По моему глубокому убеждению, эти обе точки врения неверны, так как не позволяют решать проблему конструктивно.

сельского хозяйства приречных террас компенсируется выделением земельных участков на лесных вырубках, где почвы с точки зрения сельского хозяйства непродуктивны. Окультуривание таких почв на подзолах продолжается 10—12 лет. Поэтому такая компенсация неправомерна, так как в течение многих лет наносит ущерб сельскому хозяйству. В таких случаях окультуривание земель, выделяемых в компенсацию затопляемых плодородных участков, должно быть начато заблаговременно, с тем чтобы к моменту их затопления на компенсируемых участках почва была уже окультурена. Практически это осуществимо, так как времени, необходимого на проектирование и строительство сооружений, в общем хватает для окультуривания почвы. Другой пример — затопление лесов. В этих случаях чаще всего в качестве компенсации принимается вырубка леса на затопляемой территории и вывозка его для использования в хозяйстве. Тем не менее такую компенсацию нельзя признать полной, так как часто вырубается хвойный лес, иногда даже такой ценный, как кедровый. Кроме того, вывозка леса за пределы будущей акватории часто неэффективна в связи с отсутствием дорог к месту складирования вырубленного леса. В таких условиях много лесоматериала остается неиспользованным. Отсюда целесообразно применение более глубоких компенсационных мер. При затоплении лесных угодий вывоз древесины даже с использованием ее в хозяйстве не может считаться достаточно полной компенсацией, поскольку затопленное лесное угодье будет служить народному хозяйству лишь одноразово. В то же время лес в вековой перспективе может дать несколько «урожаев». Нельзя забывать и роль леса и вообще растительности как источника восстановления кислорода в атмосфере. В этих условиях требования к компенсации должны быть более высокими. Например, более полноценной компенсацией в дополнение к сведению леса и использованию древесины могло бы явиться искусственное лесовозобновление—посадка леса на свежих плановых вырубках где-то в районе создаваемого водохранилища. Смысл этой меры заключается в том, что при естественном возобновлении на месте вырубленного более ценного хвойного леса вырастает лиственный — береза, ольха и другие лиственные породы. Лишь под пологом лиственных пород вырастает хвойный лес. Поэтому посадка саженцев хвойного леса может дать 60—80-летнюю экономию времени для непрерывного возобновления хвойных лесов. При этом можно допустить, что площадь искусственных посадок леса полностью не компенсируют площадь, выделенную для затопления, а покрывают ее какую-то часть, например на половину или $^1/_3$. В практике водного хозяйства уже имеются случаи применения подобных компенсаций, но на небольших площадях. Требуется их более широкое применение.

Четвертый принцип — профилактика возможных неблагоприятных последствий водохозяйственных мер. Этот принцип относится к любым мероприятиям. Необходимо, чтобы проектируемое соору-

жение правильно «вписывалось» в природу района, реку или водоем, на которых оно создается. Но особенно важен профилактический принцип в деле защиты вод от загрязнения. Противоестественно сбрасывать сточные воды городов и промышленных предприятий в реки и водоемы. Даже после очистки в них сохраняется немало остаточных загрязнений. Каждый кубический метр даже очищенных сточных вод портит до 12 м^3, а в некоторых случаях и гораздо больше чистой речной воды. От таких остаточных загрязнений трудно освобождать питьевую воду или воду для некоторых предприятий, технология которых требует особо чистой воды.

В числе перечисленных основных принципов этот принцип имеет большое практическое значение. Среди современных водохозяйственных мер улучшение качества воды, защита вод от загрязнения имеют не меньшее, а часто большее значение, чем увеличение количества доступной для использования пресной воды.

Искусственные воздействия на водный баланс и речной сток нельзя рассматривать изолированно от естественных факторов. Для правильной оценки изменений речного стока, ожидаемых в результате тех или иных хозяйственных мероприятий, необходимо знать, как сочетаются между собой в конкретных условиях естественные и искусственные факторы формирования стока.

Отличительная черта естественных, т. е. физико-географических факторов — их относительная устойчивость. Гораздо менее устойчивы антропогенные изменения. Их непостоянство связано не только с меняющимся объемом, но и с качественной перестройкой хозяйства. Например, в результате распашки степей и уничтожения лесов почва утратила высокую инфильтрационную способность, снеговые и дождевые воды стали плохо усваиваться почвой, увеличился поверхностный сток, возросла эрозия.

Все эти изменения не могли не сказаться на режиме речного стока: усилились паводки, уменьшился сток в период межени. При общем возрастании объема речного стока (за счет паводков) режим рек ухудшился, стал более контрастным, паводки более опустошительными, а меженный сток, когда вода представляет наибольшую ценность, менее обильным. Все эти последствия — результат примитивного ведения хозяйства на обширных территориях.

Совершенно иной, противоположный характер носят изменения речного стока под влиянием более рационального, более продуктивного земледелия в условиях социалистического хозяйства. В самом общем виде характер этих перемен заключается в более совершенной механизированной обработке земли, в ликвидации мелкополосицы, присущей земледелию царской России, в введении новых приемов обработки, среди которых большую роль играет механизированная глубокая зяблевая пахота, а в сухой степи — безотвальная пахота. Одна лишь зябь, резко повысившая инфильтрационную способность почвенного покрова весной, послужила

причиной резкого уменьшения поверхностного стока и за счет этого повышения влажности почвы. Улучшение обработки почвы, правильный севооборот, снегозадержание, наконец, полезащитное лесоразведение, внесение удобрений и другие мероприятия не только позволили повысить урожайность, но и преобразовали водный баланс территории. Этим путем была повышена обеспеченность культурных растений почвенной влагой, а вместе с тем достигнуто повышение урожаев. Паводки на реках ряда районов стали уменьшаться, а за счет этого при увеличении меженного стока снизился общий речной сток; часть воды, раньше бесполезно сбрасывавшаяся во время паводков в реки, стала расходоваться на транспирацию и испарение.

Примерно такой же характер носит общая направленность изменений водного режима под влиянием лесного хозяйства, в зависимости от его уровня. Хищническое уничтожение лесов изменяет речной сток, так же как и земледелие, ведущееся на низком уровне. Рациональное лесное хозяйство по характеру изменений речного стока дает эффект, аналогичный эффекту высокого уровня земледелия.

Общий характер и направленность изменений природы зависят от социальных условий: они отражают производственные отношения человека к природе, интенсивность использования природных ресурсов. Плановым социалистическим хозяйством созданы необходимые предпосылки для рационального, комплексного использования природных ресурсов с учетом последствий, на которые непосредственно и не направлены хозяйственные мероприятия.

Изменения природы, в том числе водного баланса и гидрологического режима, вызваны хозяйственными условиями. Но нельзя не учитывать влияния на них естественных природных условий, в частности и географической зональности.

По этой причине нельзя ожидать одинаковых результатов от осуществления одних и тех же хозяйственных мероприятий в разных географических условиях. Различный эффект одного мероприятия иногда расценивается как противоречие, вызванное разными методами исследований, различными подходами или взглядами. Действительно, результаты исследования существенно зависят от примененной методики, но нельзя не учитывать и значительную роль географических и социальных особенностей в изменениях природы, вызванных хозяйственной деятельностью.

Вместе с тем антропогенные преобразования, исключая еще пока редкие случаи полного использования потенциальных возможностей многолетнего регулирования речного стока, осуществление которого вполне реально в горах, например, Средней Азии (см. главу 7), чаще всего не нарушают циклических колебаний, но меняют их средний уровень. Изменения среднего уровня вуалируются циклическими колебаниями, поэтому такие изменения чаще всего не удается выявить в результате внешнего ознакомления с динамикой речного стока за многолетний период. Для этой цели

требуется применение тонкого комплексного анализа, элиминирующего колебания климатического происхождения. Методику этого анализа и другие приемы оценки изменений речного стока мы осветим в следующих главах.

Оценка изменений речного стока, как и вообще оценка изменений природы, приобретает все большее практическое значение. Человек живет и развивает производство в условиях в той или иной мере преобразованной им природы. При этом степень преобразованности непрерывно меняется, и однажды оцененные изменения не могут долго служить практическим целям.

В условиях интенсивного использования природных ресурсов особенно важно правильно понимать и трезво оценивать как происшедшие, так и ожидаемые изменения гидрологического режима. Проектируя водохозяйственные мероприятия, специалисты рассчитывают, что связанные с ними сооружения будут существовать в течение многих лет. Например, современные крупные гидротехнические сооружения высокого класса должны работать приблизительно 200—300 лет. В течение этого срока водный режим будет преобразован не только под влиянием данного сооружения, но и в результате других антропогенных воздействий. Это особенно важно знать, но бывает трудно предвидеть.

В бассейне реки, на которой сейчас создается гидротехническое сооружение, в течение времени его существования вода используется и для других целей, например в интересах развития городов, промышленности, сельского или лесного хозяйства. По мере роста продуктивности этих отраслей растет и потребление воды на их нужды, причем рост не остается постоянным, а прогрессирует и иногда развивается скачкообразно. Все эти изменения в водном балансе и в водном режиме рек нужно знать заранее, их нужно предвидеть. Такой прогноз представляет собой важную предпосылку для рационального использования водных ресурсов страны. Поэтому данные о речном стоке за прошлое время далеко не всегда можно безоговорочно относить на будущее. В настоящее время для этих целей часто используются данные за вековой период, в течение которого происходили те или иные преобразования природы и водных ресурсов. Такие преобразования будут сочетаться с теми, которые произойдут за века существования гидротехнических сооружений высоких классов. Именно поэтому чрезвычайно важно знать антропогенные влияния на речной сток в прошлом и будущем.

Из сказанного видно, насколько велико значение проблемы правильной качественной и количественной оценки происшедших в прошлом и ожидаемых в будущем изменений речного стока. Формальное перенесение с помощью вероятностной статистики данных гидрометрических наблюдений за прошлое время на будущее уже не может удовлетворить запросы практики. На этой основе нельзя планировать использование водных ресурсов и проектировать водохозяйственные мероприятия. Для этих целей требуется оценка тех

изменений водного баланса и речного стока, которые произошли в прошлом, в течение периода, освещенного гидрометрическими данными. Требуется также прогноз ожидаемых изменений гидрологического режима. Планы и проекты, не учитывающие изменений водного баланса и речного стока, для многих районов страны не могут быть жизненными и в некоторых случаях не выдержат испытания временем.

Современная гидрологическая наука подготовлена для широкого развертывания исследований по этой актуальной, но сложной проблеме и для приближенного решения ряда практических задач. За последнее десятилетие конкретные знания по проблеме преобразований и изменений гидрологического режима несоизмеримо выросли. Созданы теоретические основы решения этой проблемы, разработаны методы соответствующих экспериментальных исследований, обобщений и расчетов изменений стока. Получены приближенные расчетные данные происшедших, а в некоторых случаях и ожидаемых изменений стока. Однако если оценить все достигнутое по этой проблеме и сравнить с тем, что требуется знать для решения практических вопросов, то становится очевидным дальнейшее более интенсивное развитие научных исследований в этом направлении.

В настоящее время в проектных водохозяйственных работах уделяется гораздо большее внимание комплексному подходу в решении задач антропогенных преобразований и изменений, а также вопросам окружающей среды. Вместе с тем работы такого направления целесообразно расширять в методическом отношении.

Между тем при осуществлении конкретных водохозяйственных проектов принимается во внимание использование преимущественно одного из источников водных ресурсов, независимо от других. Учитывается связь режима озер с питающими их реками. Но при планировании использования подземных вод, как правило, забывают, что они питают реки. Что же касается почвенной влаги, то меньше всего учитывается существующая в природе тесная зависимость речного стока и питания подземных вод от этого источника водных ресурсов. Среди источников водных ресурсов почвенной влаге принадлежит едва ли не самое важное место. Вода, участвующая в таких важных для жизнедеятельности растений функциях, как фотосинтез и транспирация, пока не имеет замены и представляет собой один из важнейших источников производства растительной массы.

Как бы выражая пренебрежение к хозяйственной роли почвенной влаги, гидрологи в отношении расходования воды на инфильтрацию и испарение с транспирацией ввели термин «потери». Воду, не попадающую в реки, таким образом, относят к потерям, не считаясь с тем, что эти «потери» составляют важнейшую выгоду для народного хозяйства. На самом деле с народнохозяйственной, т. е. с объективной, точки зрения к действительным потерям воды следует отнести поверхностный сток, а не почвенную влагу. Вода, не

усвоенная почвой, т. е. поверхностный сток, особенно в зонах недостаточного увлажнения, безвозвратно теряется для производства растительной массы; кроме того, она является основной причиной эрозии, т. е. причиной потерь почвы и земельных ресурсов, и формирует паводки на реках. Характерно, что известный специалист по эрозии почв Х. Беннет (1958) под потерями воды понимает именно поверхностный сток.

Все элементы и явления природы настолько тесно взаимосвязаны, что хозяйственное использование одного из видов природных ресурсов не может ограничиться только преобразованием этого ресурса и очень часто распространяется на другие элементы или явления природы. Именно такой характер свойствен антропогенным преобразованиям и изменениям водного режима и речного стока.

Система географических наук в последние десятилетия получила существенное развитие и способна решать задачи антропогенных преобразований и изменений, а также вопросы влияний хозяйственной деятельности на природу и окружающую среду. Этому прогрессу весьма способствовало конструктивное направление в географической науке, положенное И. П. Герасимовым (1976; см. также: Преображенский и Абрамов, 1976) в основу деятельности Института географии АН СССР. В этом же направлении начинают работать и другие географические учреждения СССР, отчасти и за рубежом, особенно в социалистических странах.

Заслуживает внимания постановка И. П. Герасимовым (1968, 1976) проблемы преобразования природы. Этот ученый рассматривает принципиальные подходы к преобразованиям природы гидротехническим строительством, сельским хозяйством и ставит задачу научных географических прогнозов последствий преобразований. В этом заключается важный принцип конструктивной географии, одно из назначений которой — снизить до минимума неблагоприятные последствия осуществляемых мероприятий.

Глава 6
ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВОД ГИДРОТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

В одной небольшой главе невозможно в полной мере осветить все многообразие преобразования вод гидротехническими средствами. По существу, гидротехника служит различным видам использования вод, поэтому любое гидротехническое сооружение вносит те или иные изменения в их режим. Но мы не ставим перед собой задачу осветить все, что происходит с водами под влиянием гидротехнических сооружений и ограничиваемся характеристикой наиболее ярких проявлений этого вида хозяйственной деятельности.

1. Гидрологическая роль водохранилищ

Выше была охарактеризована эффективность водохранилищ в связи с проблемой обеспечения водой на душу населения в мире (см. табл. 6). Приведенные цифры в табл. 6 свидетельствуют о

чрезвычайно высокой водоресурсной эффективности водохранилищ.

В табл. 9 приведены данные о водохранилищах мира объемом более 100 млн. м³ каждое (Авакян и др., 1979). Точное датирование этих данных, как мне представляется, встречает некоторые затруднения. В указанном источнике отмечено, что при составлении этой таблицы учтены все издания Мирового регистра плотин в том числе и за 1976 г. Вместе с тем в таблицу после 1974 г. в указанном источнике включено свыше 300 строящихся плотин с общим объемом водохранилищ более 1000 км³. С учетом того, что сравнительно крупные плотины, данные о которых приведены в таблице, строятся не менее 3—5 лет, их можно отнести примерно к 1980 г.

Заслуживает внимания тот факт, что почти 90% всех крупных водохранилищ мира было создано в течение трех десятилетий после 1950 г. В СССР в течение этого же срока создано 94% всех водохранилищ. В настоящее время водохранилища СССР по количеству составляют 9%, а по объему 22% всех водохранилищ мира. Эти данные говорят о том, что средний объем водохранилищ СССР (5,6 км³) почти в 3 раза больше, чем объем зарубежных водохранилищ (2 км³).

Современные данные о водохранилищах мира, которые, как отмечено выше, отнесены к 1980 г., интересно сравнить с ранее приведенными в книге автора (Львович, 1974). В ней по прежним данным А. Б. Авакяна и др. (1971) было учтено 1370 водохранилищ общим объемом 4000 км³. Следовательно, за последнее десятилетие их число увеличилось на 887, а общий объем — на 1132 км³. Эти данные о развитии водохранилищ за последнее десятилетие носят, конечно, приближенный характер, так как датировка общего числа водохранилищ, как уже сказано, не лишена некоторой условности в связи с неизвестностью сроков начала эксплуатации той их части, которая строится после определенной даты.

Для расчетов глобального регулирующего действия водохранилищ необходимо определить их полезный объем. Это можно сделать только приближенно, так как такие данные имеются лишь для отдельных стран. В моих прежних работах доля полезного объема принималась около половины полного. Полезный объем всех водохранилищ СССР составляет 541 км³, или 47% полного. Но в США это соотношение резко отличается: полезный объем всех водохранилищ достигает 443 км³ при полном объеме 500 км³, что составляет 88% полного объема (Авакян и др., 1979), т. е. на 40% выше соответствующего показателя в СССР.

Изменения уровня ряда водохранилищ мира превышают 100 м в течение года, а некоторые опорожняются полностью. Это относится главным образом к водохранилищам ирригационного типа, график использования воды которых строится в интересах ирригации и не обеспечивает постоянного напора, необходимого для гидроэлектростанции. В засушливых районах СССР, где распро-

странено орошаемое земледелие, водохранилища решают комплекс задач, но в целом в стране преобладают водохранилища гидроэнергетического назначения, обеспечивающие необходимый напор для работы гидротурбин. Кроме того, водохранилища с большой амплитудой изменения уровней создают неблагоприятные условия и для других отраслей водного хозяйства — судоходства, водоснабжения, а также для окружающей среды. В этом заключаются причины больших различий в относительных полезных объемах водохранилищ в СССР и США.

Что касается данных табл. 9, то может возникнуть вопрос, достигает ли необходимой достоверности оценка регулирования стока, если учесть только водохранилища объемом более 100 млн. м³ каждое. Статистика водохранилищ меньшего объема отсутствует. Поэтому важно хотя бы приближенно оценить размеры возможной ошибки в результате недоучета относительно малых водохранилищ. Если допустить, что средний объем каждого водохранилища, не учтенного табл. 9, составляет 10 млн. м³, а это несомненно преувеличено, и общее количество их в настоящее время достигает 10—20 тыс., то общий объем всех таких водохранилищ составит 100—200 км³, а их полезный объем вряд ли превысит 120 км³, т. е. составит не более 3% от общего полезного объема всех водохранилищ объемом более 100 млн. м³ каждое. Таким образом, отсутствие учета малых водохранилищ не влияет заметно на результаты расчетов глобального регулирующего эффекта больших водохранилищ.

С учетом возможности изменения полезного объема водохранилищ в зависимости от их назначения в табл. 9 приведены дифференцированные показатели искусственного регулирования стока. Принятый полезный объем водохранилищ в процентах от полного отличается от их объема в моих прежних расчетах, так как он дифференцирован по частям света и в целом для земного шара стал значительно выше (62%), чем по прежним расчетам (45%). Это различие лишь отчасти связано с ростом количества и общего объема водохранилищ за последнее десятилетие. В большей мере оно зависит от метода расчетов.

Как видно из табл. 9, общий полезный объем водохранилищ мира составляет 3195 км³. Если допустить, что он используется для наполнения паводочным стоком один раз в год, то мы таким путем получим представление об объеме искусственно регулируемого стока.

Следует учесть, что полученные результаты нельзя считать преувеличенными. Для зон с несколькими дождевыми паводками в течение года, прерываемыми более или менее значительными междупаводочными периодами, полезный объем водохранилищ может быть использован для регулирования стока неоднократно в течение года. Однако реки с паводочным режимом такого характера встречаются реже, чем с более или менее продолжительным половодьем. В умеренном поясе происхождение такого половодья свя-

Таблица 9

Регулирование речного стока водохранилищами мира
(объемом более 100 млн. м³ каждое)

Часть света	Современные водохранилища мира		Полезный объем водохранилищ		Естественный устойчивый сток подземного происхождения, км³	Современный устойчивый сток, включая регулируемый водохранилищами, км³	Увеличение современного устойчивого стока в % к естественному
	Количество	Полный объем, км³	в % от полного объема	км³			
Европа	482	570,3	53	300	1 065	1 365	28
Азия	554	1 463,1	55	800	3 410	4 210	24
Африка	96	864,9	60	520	1 465	1 985	35
Северная Америка	868	1 606,4	75	1 200	1 490	2 690	80
Южная Америка	187	551,5	60	330	3 990	4 320	8
Австралия и Океания	70	75,7	60	45	465	510	10
Всего . . .	2 257	5 131,9	62	3 195	11 885	15 080	27
В том числе СССР	202	1 137,3	47	535	1 020	1 555	54

зано с весенним снеготаянием, на горных реках — с высокогорным снеголедниковым питанием рек, в тропическом поясе и в экваториальном — со многими дождевыми паводками, например муссонного происхождения, сливающимися летом или осенью в одну волну половодья.

Данные табл. 9 показывают, что при принятых допущениях объем речного стока, регулируемого водохранилищами, увеличивает мировые ресурсы устойчивого подземного стока в реки на 3200 км³/год, или на 27%. Относительное увеличение такого же порядка характерно для Европы и Азии; в Африке оно несколько возрастает (35%), в Северной Америке по причинам, отмеченным выше, достигает 80%, а в Южной Америке и Австралии с Океанией падает до 8%. В СССР устойчивый сток подземного происхождения увеличивается на 54%, т. е. возрастает в 1,5 раза, а в Болгарии — почти в 2 раза.

В целом такой результат является огромным достижением человечества, поскольку искусственное регулирование речного стока позволило более чем на 1/4 увеличить ресурсы мирового устойчивого стока — самого ценного источника ресурсов пресных вод.

Высоко оценивая значение водохранилищ как важного водохозяйственного фактора, нельзя не учитывать некоторые их отрица-

тельные свойства. К числу первых и наиболее серьезных из них относится умножение водных ресурсов за счет земельных.

Акватория всех крупных (объемом более 100 млн. м³) водохранилищ составляет 590 тыс. км², а исключая площадь подпертых озер, т. е. земельных ресурсов в чистом виде, — 350 тыс. км² (Авакян и др., 1979, с. 28, с округлением). Эта площадь соизмерима с территорией Франции, но составляет только 0,3% суши, и затопление такой площади позволяет на 1 тыс. км² земельных ресурсов получить дополнительно почти 9 км³ устойчивого стока, что соответствует реке с постоянным расходом воды почти 300 м³/с. Трудно сказать, насколько велики такие издержки. В связи с тем что в равнинных районах больше распространены сельскохозяйственные угодья, эти издержки выше, чем в горах, где под водохранилища затопляются склоны менее ценные для использования, хотя нельзя забывать ценность затопляемых в горах лесов. Необходимо учитывать, что регулирование стока водохранилищами уменьшает ущерб от наводнений на реке ниже водохранилища. Что касается туристических целей, то горные водохранилища в этом отношении бывают привлекательнее, чем незатопленные участки речных долин. Водохранилища занимают всего 0,3% земельных ресурсов мира, но они увеличивают устойчивый речной сток на 27%. Это свидетельствует о высокой эффективности водохранилищ.

Вместе с тем не только проектирование, но и эксплуатация водохранилищ далеко не всегда носит комплексный характер и не в полной мере удовлетворяет требования всех заинтересованных отраслей хозяйства. Режим попуска воды из водохранилищ целесообразно в первую очередь подчинять задачам экологии — водоснабжению, орошаемому земледелию, рыбному хозяйству, спорту и туризму, борьбе с наводнениями, в целом улучшению водной компоненты среды. Все эти вопросы можно решать только с помощью водохранилищ путем компенсационных мер, без существенных издержек для гидроэнергетики.

По всей вероятности, перспективны приливные гидроэлектростанции, которые не требуют существенных затоплений территории. Водохранилища должны занимать минимальную площадь, для этого необходимо применять строительство для ограждения наиболее ценных земель. Но, кроме того, необходимо стремиться, чтобы биологическая продуктивность акватории водохранилищ в результате рыборазведения была выше биологической продуктивности (урожай, продуктивность лесов) территории до ее затопления. Таким путем можно в какой-то мере восполнять ущерб, который наносится хозяйству затоплением земель.

Соотношение между ценностью затопленной под водохранилище территории и пользой от водохранилища зависит от экономических и природных условий, но чаще, если не создаются большие мелководные акватории, чаша весов, как правило, склоняется в пользу водохранилищ. Однако при наличии большого количества

водохранилищ в равнинных районах создание каждого нового крупного водохранилища связано со все большими издержками. В бассейнах Волги, Днепра, где функционируют крупные каскады водохранилищ общей площадью 27 тыс. км², в будущем, по всей вероятности, предпочтительнее создавать средние и малые водохранилища на их притоках.

Потери воды на испарение с акватории водохранилищ мира составляют около 130 км³/год, или 4% от объема регулируемого стока. Такие потери следует признать незначительными относительно той пользы, которую приносят водохранилища. Таким образом, преобразование вод является весьма полезной мерой расширенного воспроизводства водных ресурсов, а связанные с ним отрицательные явления хотя и происходят, но носят подчиненный характер.

Потенциальные возможности дальнейшего роста водохранилищ далеко не исчерпаны, хотя назревает необходимость усиления внимания к созданию подземных водохранилищ, преимущество которых по сравнению с поверхностными не вызывает сомнений.

Во-первых, подземные водохранилища при нагнетании паводочных вод через буровые скважины не требуют затопления земли или, во всяком случае, позволяют ограничиться меньшими затоплениями. Следует, однако, учитывать обнаруженное в последние годы явление возбуждения в некоторых случаях землетрясений подобными буровыми скважинами (см. раздел 2 настоящей главы). Во-вторых, вода подземных водохранилищ в большей степени сохраняется от загрязнений. В-третьих, вода не теряется на испарение, хотя коэффициент полезного действия подземных водохранилищ в зависимости от геологического строения должен колебаться в значительных пределах и может быть ниже, чем поверхностных.

Выше речь шла о глобальных масштабах воздействий водохранилищ на круговорот воды, способствующих умножению ресурсов устойчивого речного стока. Теперь будет охарактеризован путь практического использования потенциальных возможностей полного многолетнего регулирования речного стока на конкретном примере рек Средней Азии. Пример разработан мною совместно с Цигельной (1980).

Этот район играет весьма большую роль в хозяйстве СССР, так как является самым крупным в стране, богатым тепловыми ресурсами оазисом, на орошаемых землях которого выращивается хлопчатник, лучшие сорта фруктов и другие ценные теплолюбивые культуры. Земельные ресурсы здесь намного превосходят используемые под орошение из-за недостатка водных ресурсов.

В связи с этим регулирование речного стока водохранилищами приобретает все большее значение. Часть зарегулированного стока уже используется для орошения, однако значительный резерв остается еще не использованным.

С этой целью в условиях Средней Азии целесообразно прежде всего установить приоритет в использовании водных ресурсов для

наиболее водоемкого производства — орошаемого земледелия. Ни в одном другом районе Советского Союза нельзя получить столь эффективного сочетания тепловых и водных ресурсов. Районов более богатых водными ресурсами, чем Средняя Азия, в стране много, но в данном случае они в сочетании с тепловыми ресурсами создают совершенно уникальные условия для выращивания субтропических культур особенно таких, как хлопок.

Расходование воды на производство продуктов растениеводства, вообще растительной массы — наиболее высокая форма использования водных ресурсов. Но особенно большое значение такой вывод приобретает для Средней Азии, где в основном вода лимитирует дальнейшее развитие орошаемого земледелия. Потребности орошаемого земледелия в воде могут быть удовлетворены без сколько-нибудь существенного противоречия с обеспечением задач хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения, поскольку последнее требует приблизительно в 10 раз меньше воды, чем орошение.

В то же время использование речных вод для гидроэнергетических целей нередко оказывается в противоречии с орошаемым земледелием. Во-первых, так называемые мертвые объемы воды гидроэнергетических водохранилищ, необходимые для создания напора в целях обеспечения работы гидротурбин, в общем велики, но, что особенно важно, в критические периоды маловодья недоступны для использования. Во-вторых, в периоды многоводья, когда необходимо аккумулировать воду в водохранилищах, слишком мало емкостей для создания в это время резерва водных ресурсов, которые могут быть использованы для орошения в маловодные периоды. В-третьих, для создания единой системы ирригационных водохранилищ требуется их соответствующее размещение, причем в некоторых случаях местоположение водохранилищ целесообразно устанавливать, не считаясь с возможностями получения максимального напора, в котором заинтересована гидроэнергетика, хотя, как можно полагать, интересы ирригации и гидроэнергетики можно частично совместить. В-четвертых, в сочетании с гидроэнергетикой, если не учитывать в полной мере приоритета в использовании водных ресурсов для орошаемого земледелия, страдает орошение, так как во вневегетационный период, когда воду необходимо аккумулировать в водохранилищах, она срабатывается турбинами гидроэлектростанций. Одним словом, подчиняя размещение и режим работы водохранилищ задачам орошаемого земледелия и во вторую очередь учитывая задачи гидроэнергетики, можно более полно использовать водные ресурсы для целей орошения. В данном случае водохранилища должны служить для орошения.

В свете сказанного к одному из важных, но еще недостаточно используемых резервов местных водных ресурсов относится полное многолетнее регулирование речного стока в горном поясе Средней Азии, где происходит формирование водных ресурсов. Для этого целесообразно создать единую систему водохранилищ в го-

рах, работающих в основном по графику, обеспечивающему нужды орошаемого земледелия. Преимущества горных водохранилищ в сравнении с теми, которые создаются в зоне орошаемого земледелия, вполне очевидны: потери воды на испарение на горных водохранилищах гораздо ниже, чем в зоне рассеивания стока. В горах создаются водохранилища при относительно малых затоплениях территории. В результате такого подхода в минимальной степени теряются земельные ресурсы на затопление и на единицу площади акватории водохранилищ можно получить большие объемы для регулирования речного стока.

Для оценки потенциальных возможностей многолетнего регулирования стока рек Средней Азии необходимо было получить хронологический ряд годового стока, сформировавшегося в горах. В расчетах были использованы материалы наблюдений за стоком более чем на 300 реках. Средний многолетний сток за период с 1930 по 1975 г., сформировавшийся в горных районах бассейна Аральского моря в пределах территории Советского Союза, оценен по восстановленному хронологическому ряду в 112 км³. Это на 10 км³ меньше среднего многолетнего стока для той же территории, полученного по карте среднего многолетнего стока (Цигельная, 1976).

На основании хронологических данных о стоке, формирующемся в горах, за период с 1930 по 1975 г. методом последовательного приближения произведен расчет потенциальных возможностей многолетнего регулирования стока в бассейнах рек Амударьи, Сырдарьи, Чу, Таласа, Зеравшана и Кашкадарьи. На основании этих расчетов установлено, что для полного регулирования стока в горах наиболее целесообразно располагать водохранилищами общим объемом 108 км³, в том числе в бассейнах Сырдарьи и Амударьи — 50 км³ для каждой из этих рек, а в бассейнах остальных рек — 8 км³ (Львович, Цигельная, 1980).

При этом можно использовать и существующие водохранилища. Целесообразно также создание системы новых водохранилищ на всех реках, питающих прилегающие к горам равнины зоны «рассеивания» стока, на которых распространено орошаемое земледелие.

Рис. 15 показывает, что сток Сырдарьи при выходе из гор и полезном объеме водохранилищ 50 км³ уже после первых десяти маловодных лет может быть выравнен и его колебания будут исключены. Аналогичное решение относится и к Амударье (рис. 16).

В табл. 10 помещены результаты расчетов. Они показывают, что потенциальные возможности многолетнего регулирования стока в горах Средней Азии могут увеличить речные водные ресурсы в маловодные годы на 32,8 км³, а учитывая, что коэффициент полезного действия водохранилищ вряд ли будет выше 0,8, можно предположить, что сток в наиболее маловодные годы увеличится на 26,2 км³.

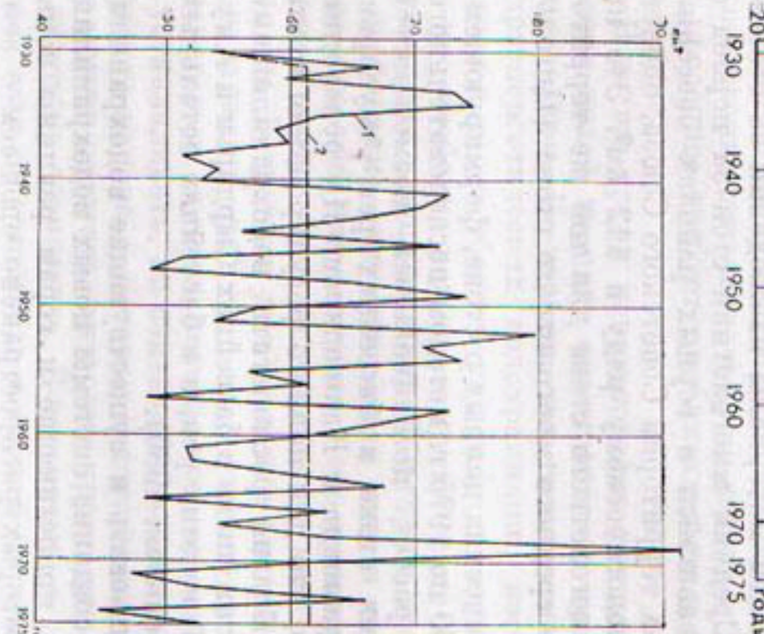


Рис. 15. Хронологический график естественного (1) и зарегулированного (2) стока горной части Сырдарьи при объеме системы ирригационных водохранилищ 50 км³

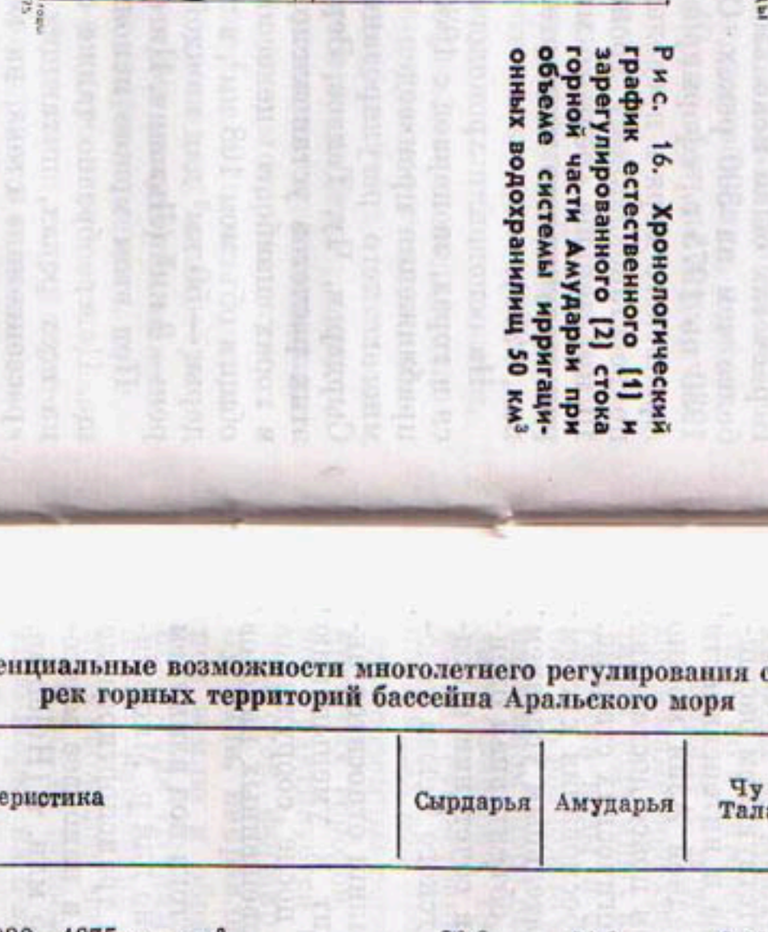


Рис. 16. Хронологический график естественного (1) и зарегулированного (2) стока горной части Амударьи при объеме системы ирригационных водохранилищ 50 км³

Для того чтобы решить эту задачу, требуется, как отмечено выше, особое размещение водохранилищ. В ряде случаев они должны быть рассредоточены так, чтобы сток с горного пояса Средней Азии не мог попасть в зону рассеивания, минуя водохранилище.

Вместе с тем существующие водохранилища частично соответствуют задачам ирригационных водохранилищ, если их перевести на режим, необходимый для решения поставленной задачи. Но для этой цели донные водоспуски, которые создаются в связи с требованиями техники строительства, необходимо сохранять, снабдив их затворами. Такая мера не нарушит работу гидроэлектростанций в многоводные годы, но в необходимых случаях позволит использовать для орошения и мертвый объем водохранилищ. Часть резер-

Таблица 10

Потенциальные возможности многолетнего регулирования стока рек горных территорий бассейна Аральского моря

№ п/п	Характеристика	Сырдарья	Амударья	Чу и Талас	Зеравшан	Кашкадарья	Всего*
1	Средний годовой сток за 1930—1975 гг., км³	38,8	61,3	8,46	2,56	0,62	112
2	Годовой минимальный сток за 1930—1975 гг., км³	24,2	44,3	6,23	1,76	0,16	76
3	Потенциальный сток при регулировании без учета потерь на испарение, км³	38,5	61,2	8,29	2,51	0,61	111
4	Разность между потенциальным стоком и годовым минимальным, км³	14,3	16,9	2,06	0,75	0,46	34,5
5	Объем ирригационных водохранилищ, км³	50	50	5	2	1	108
6	Испарение с поверхности водохранилищ, км³	0,8	0,8	0,06	0,03	0,01	1,7
7	Потенциальная возможность приращения стока в маловодные годы (при КПД=1), км³	13,5	16,1	2,00	0,72	0,45	32,8
8	Потенциальная возможность приращения стока в маловодные годы (при КПД=0,8), км³	10,8	12,9	1,6	0,58	0,36	26,2
9	C_v естественного ряда	0,20	0,17	0,14	0,20	0,47	
10	C_v ряда с зарегулированным стоком	0,01	0,014	0,046	0,05	0,03	

* С округлением.

ва регулирующей способности водохранилищ уже используется или намечается к использованию до конца столетия. Наше предложение, конечно, требует технико-экономического обоснования с учетом особо высокой ценности для орошения водных ресурсов Средней Азии.

Большую роль играют также гидрологические прогнозы, которые служат основой для планирования использования водных ресурсов. Их значение возрастает в связи с необходимостью планирования работы водохранилищ многолетнего регулирования. Это, конечно, не простая задача, особенно если учесть недостаточность гидрометеорологической информации с высокогорных районов Средней Азии.

Экспериментальные исследования на одной из высокогорных рек бассейна Амударьи показали, что при соответствующем расширении информации об осадках, снежном покрове и интенсивности его таяния точность прогнозов в условиях Средней Азии можно значительно повысить созданием в высокогорном поясе достаточно густой сети автоматизированных гидрометеорологических станций.

Что же касается технико-экономического обоснования систем горных водохранилищ в Средней Азии, то обязательным условием для экономических расчетов должна послужить объективная оценка тепловых ресурсов Средней Азии, которые в сочетании с водными ресурсами создают уникальные для Советского Союза условия для выращивания субтропических культур.

К числу положительных влияний водохранилищ относится аккумуляция в них речных наносов, что приводит к уменьшению мутности речных вод и твердого стока. Так, после сооружения Куйбышевского водохранилища годовой сток взвешенных наносов Волги в его нижнем бьефе уменьшился в 3 раза.

Аналогичное явление уменьшения твердого стока под влиянием строительства каскада водохранилищ установлено для р. Миссисипи. Если до 1952 г. эта река в многоводные годы транспортировала 450 млн. т наносов в год, то после этого срока в наиболее многоводные годы твердый сток не превышал 295 млн. т (Holeman, 1968).

На мутности воды и твердом стоке таких больших рек меньше отражаются меры по борьбе с эрозией сельскохозяйственных угодий и усиление эрозии при строительстве городов и промышленных предприятий. Объясняется это тем, что продукт склоновых эрозионных процессов часто аккумулируется, не достигая больших рек.

Что касается воспроизводства проходных рыб, то, отдавая себе отчет в том, что плотины явно нарушают экологические условия, никто, однако, не предлагает отказаться от их строительства. Но строительство плотин должно сопровождаться сооружением рыбных заводов, мелиорацией нерестилищ и другими мерами, задача которых — приспособить рыбное хозяйство к новым условиям, создаваемым плотинами и водохранилищами. Сейчас это практикуется,

но рыбные заводы целесообразно строить заблаговременно, и начало их действия должно опережать строительство плотин, что вполне осуществимо в условиях планового хозяйства.

В нижних бьефах плотин следует поддерживать водный режим, наиболее благоприятствующий нересту рыб. Иллюстрируем это на примере Нижней Волги. Так, для нереста нужно, чтобы дельта Волги была залита водой примерно с 20 июня в течение 20—30 суток, а для поддержания необходимого уровня воды требуется расход воды в реке в это время не ниже 25 тыс. м^3/с. Через турбины Волгоградской ГЭС им. В. И. Ленина при полной их нагрузке проходит только 12 тыс. м^3/с. Следовательно, недостающие 13 тыс. м^3/с нужно сбрасывать дополнительно из водохранилища. Такие попуски воды из водохранилищ наносят, конечно, ущерб гидроэнергетике, но в интересах рыбного хозяйства они необходимы.

Наряду с поверхностными все большее значение приобретают подземные водохранилища, создаваемые путем искусственного питания подземных вод, позволяющего усилить литогенное звено круговорота воды и черпать из подземных горизонтов больше воды, чем это возможно в естественных условиях. Еще 25 лет тому назад на земном шаре было учтено несколько сот подземных водохранилищ (Фаворин, 1961). К настоящему времени их количество, конечно, существенно возросло. В СССР искусственное питание подземных вод производится в нескольких десятках мест, причем эти подземные водохранилища служат источниками водоснабжения крупных городов. Замечательно, что магазинирование подземных вод практикуется издавна туркменами в Каракумах. Поверхностный сток, формируемый на такырах (глинистых участках) этой пустыни, направляется в колодцы, через которые вода поступает под землю и образует линзы пресной воды, предохраняемой от испарения (Купин и др., 1960). Они служат источником водоснабжения населения и водопоя овец, а в некоторых случаях и для водоснабжения небольших промышленных предприятий.

Одно из подобных подземных водохранилищ создано в районе Нью-Йорка на о-ве Лонг-Айленд (Купин, 1972).

В будущем подземные водохранилища, по-видимому, станут весьма распространенными источниками водоснабжения, что особенно важно, так как подземные воды менее подвержены загрязнению. Отсюда вполне очевидна необходимость нагнетания в подземные горизонты возможно более чистой воды, хотя мы исходим из предпосылки прекратить в будущем сброс каких-либо сточных вод в реки и водоемы. Однако полностью исключить загрязнение поверхностных вод вряд ли будет возможно, так как эффективные способы обезвреживания ливневых и снеговых вод, стекающих с территории городов, и предотвращения их попадания в реки и водоемы пока еще не найдены (см. главу 10). Да и в сельской местности, учитывая растущую химизацию сельского хозяйства, трудно будет уберечь поверхностные воды от попадания в них ядохимикатов.

Свойства подземных водохранилищ соответствуют этим требованиям. Подземные воды можно магазинировать в многоводные сезоны или в многоводные годы, а использовать их в маловодные периоды. Вследствие медленного движения подземных вод они должны обладать очень высокой регулирующей способностью. Подземные водохранилища не требуют выделения для них значительных территорий, следовательно, существенно не затрагивают интересов землепользования. Наконец, вода из подземных водохранилищ почти не теряется на испарение, которое составляет часть полезной емкости обычных водохранилищ.

Что касается коэффициента полезного действия подземных водохранилищ, то он должен быть очевидно менее единицы. Однако вода из подземных водохранилищ, израсходованная на питание рек, будет способствовать увеличению подземного, устойчивого стока, что, как было показано выше, служит целям расширенного воспроизводства водных ресурсов. Возможно, что в некоторых случаях целесообразно будет создание подземных водохранилищ, предназначенных для питания реки и умножения устойчивого речного стока.

Препятствием на пути развития этого метода расширенного воспроизводства служит тот факт, что в некоторых условиях нагнетание воды в скважины на большую глубину, где распространены рассолы, как сказано выше, вызывает землетрясения. Подземные же водохранилища необходимо создавать на сравнительно небольших глубинах, в пределах распространения пресных подземных вод.

2. Вода и землетрясения

Около четырех десятилетий тому назад было обнаружено влияние воды на землетрясения. В некоторых условиях под влиянием водохранилищ и закачивания воды в недра через скважины возникают землетрясения. Эта проблема изучается сейсмологами и гидротехниками. В гидрологической литературе она кратко освещалась в книге, посвященной водохранилищам мира (Авакян и др., 1979). Вместе с тем эта проблема несомненно интересна для гидрологов и поэтому заслуживает более подробного освещения.

Землетрясение, вызванное водохранилищем, было впервые обнаружено после сооружения плотины Гувер (высота 221 м) на р. Колорадо. Наполнение водохранилища Мид, образованного этой плотиной, началось в 1935 г. До этого времени в районе водохранилища проявлялась сейсмичность небольшой активности, но после 1937 г., когда напор воды на плотине достиг 100 м, землетрясения стали гораздо более частыми. Наибольшее землетрясение с магнитудой 5 по шкале Рихтера произошло после полного заполнения водохранилища в 1939 г. Затем сейсмичность стала падать. Очаги землетрясения группировались вдоль крупных разломов на

восточной части водохранилища и располагались на глубине 8 км. В дальнейшем в течение десяти лет в районе площадью около 8000 км^2 вокруг водохранилища было зарегистрировано более 600 толчков с амплитудой колебаний менее 2 мм. В августе и сентябре 1942 г. землетрясения достигали магнитуды 4.

Чрезвычайно интересно, что в период 12-летних наблюдений, с 1939 по 1951 г., была обнаружена хорошая корреляция показаний сейсмографа, установленного на плотине, с уровнями воды в водохранилище. Эта зависимость, осредненная за указанное время наблюдений, показана на рис. 17. При наивысших уровнях воды в

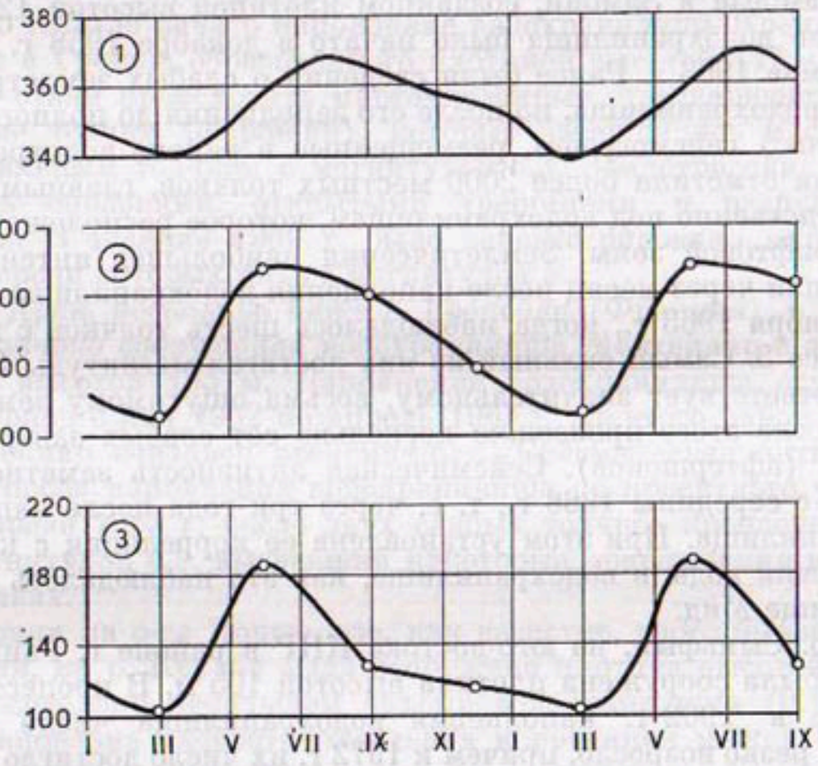


Рис. 17. Зависимость сейсмической активности от колебаний уровня водохранилища Мид на р. Колорадо в среднем за 1939—1951 гг.:

1 — средние месячные уровни воды; 2 — количество всех землетрясений (3-месячные суммы); 3 — в том числе ощущавшиеся

июне—августе сейсмическая активность, выраженная в виде средней многолетней суммы толчков за три месяца, резко возрастала, а при низких уровнях падала. На графике 2 приведен ход трехмесячных сумм всех землетрясений, которых в течение 12 лет было зарегистрировано 5981, а на графике 3 выделены наиболее существенные, т. е. ощущавшиеся, землетрясения, число которых за указанный период достигло 535. После создания на р. Колорадо выше по течению от водохранилища Мид еще двух водохранилищ — Глен-Кеньон и Флеминг-Гордж — колебания сейсмичности прекра-

тились, а среднее число землетрясений уменьшилось почти в 2 раза. Это явление связано с тем, что два новых водохранилища зарегулировали приток воды в водохранилище Мид (Тиздель, 1972). В дополнение к этому возникает предположение, что, поскольку корреляция между сейсмической активностью и колебаниями уровня воды была определена по сейсмографу, установленному на плотине, не исключена возможность того, что этот сейсмограф регистрировал не только землетрясения, но также и деформации самой плотины, которые происходили под влиянием изменений напора воды.

Аналогичное явление наблюдалось на водохранилище Кариба на р. Замбези в Замбии, созданном плотиной высотой 125 м. Наполнение водохранилища было начато в декабре 1958 г. и закончено в мае 1963 г. Ранее были сведения о слабых землетрясениях вблизи водохранилища, но после его заполнения до полного объема (160,4 км^3) сейсмографы, размещенные в районе водохранилища, за 3 года отметили более 2000 местных толчков, главным образом непосредственно под водохранилищем, которое расположено в пределах рифтовой зоны. Землетрясения наибольшей интенсивности произошли через месяц после наполнения водохранилища — в конце сентября 1963 г., когда наблюдалось шесть толчков с магнитудой более 5. Самый сильный из них достигал магнитуды 5,8, а это уже соответствует значительному, весьма ощутимому землетрясению. После этого произошло несколько сот слабых завершающих толчков (афтершоков). Сейсмическая активность заметно уменьшилась с середины 1966 г., т. е. через три года после наполнения водохранилища. При этом установлена ее корреляция с колебаниями уровня воды в водохранилище, как это наблюдалось на водохранилище Мид.

На р. Сыньфын, на юго-востоке КНР в районе г. Ганьчжоу, в 1959 г. была сооружена плотина высотой 105 м. В процессе завершенного в 1962 г. наполнения водохранилища число местных толчков резко возросло, причем к 1972 г. их число достигло 250 тыс. В основном это были слабые толчки, но 19 марта 1962 г. произошло сильное землетрясение с магнитудой 6,1, во время которого была повреждена плотина. Очаги большей части землетрясений находились под наиболее глубокой частью водохранилища, на 10 км ниже поверхности.

Катастрофическое землетрясение связывают с сооружением плотины высотой 103 м на р. Койна — притоке р. Кистна в Индии. Этот район асейсмичен, но начиная с 1962 г. в процессе наполнения водохранилища начались местные сотрясения. Сейсмографы показали, что землетрясения сосредоточены на небольшой глубине под водохранилищем. В сентябре 1967 г. произошло около 700 толчков, в том числе несколько крупных землетрясений, которые завершились катастрофическим землетрясением с магнитудой 6,4. Почти полностью был разрушен г. Койнанагар, расположенный в 1,5 км от плотины. Погибло 177 человек, ранено более 1500 человек. При-

чину катастрофы подтверждает тот факт, что землетрясения на р. Койна более или менее удовлетворительно коррелируются с повышением уровней в водохранилище при его наполнении, связанным с паводками, формируемыми в период летних муссонов.

В Пакистане на р. Джерум в 1962—1968 гг. была сооружена плотина Мангла высотой 115 м с водохранилищем объемом 7,2 км^3. Геологическое строение в зоне водохранилища характеризуется наличием сдвигов. Район сейсмически активен. В результате начатого в феврале 1967 г. наполнения водохранилища сейсмическая активность возросла, частота толчков значительно увеличилась, хотя они были небольшой силы: магнитуда наибольшего из них — 3,6.

В 1965 г. было начато наполнение водохранилища Кремаста на р. Ахилос в Греции, образованного плотиной высотой 147 м. Одновременно стали происходить многочисленные, предваряющие землетрясение толчки (форшоки), которые завершились в феврале 1966 г. сильным толчком с магнитудой 6,3. Землетрясение сопровождалось оползнями, открытыми трещинами и разрушением 480 домов. В течение 1966 г. было зарегистрировано множество толчков, среди которых пять с магнитудой 5.

На р. Драк, несколько ниже г. Гренобля (Франция), в 1962 г. было закончено сооружение водохранилища Монтейнар с арочной плотиной высотой 155 м. Наполнение водохранилища осуществлено в период с мая 1962 по апрель 1963 г. До этого район плотины Монтейнар считался асейсмичным. Сейсмическая активность возросла после наполнения водохранилища до проектного уровня. Так, в апреле 1963 г. после двух слабых толчков произошел толчок с магнитудой 4,9, вызвавший некоторые повреждения в соседних поселках.

В Японии на о-ве Хонсю, где, как известно, часто бывают землетрясения, на р. Курабе была сооружена плотина высотой 186 м. При относительно небольшом объеме водохранилища (0,15 км^3) была установлена удовлетворительная корреляция между колебаниями уровня воды в водохранилище и числом землетрясений.

В недавно опубликованной книге (Кисин, 1982) сообщаются подробные сведения о землетрясениях на Нурекском водохранилище (объем 10,5 км^3), созданном плотиной высотой 300 м. После того как в 1967 г. уровень при наполнении водохранилища поднялся на 40 м, была обнаружена тенденция увеличения числа толчков. В 1972 г. при уровне, близком к 100 м, сейсмическая активность в районе водохранилища резко возросла. В течение 1962—1972 гг. в среднем за три месяца число толчков составляло 26, а в последнем квартале 1972 г. оно достигло 133. Одновременно наблюдалось уменьшение средней глубины очагов: в 95% случаев она не превышала 5 км. В целом приведенный в цитируемой работе график иллюстрирует заметную корреляцию между колебаниями уровня и сейсмичной активностью в период с 1972 по 1977 г. Интересно, что эта активность возрастала при подъеме уровня, что особенно ярко выразилось в третьем квартале 1976 г., когда уровень

водохранилища почти достиг отметки 200 м. В отдельных случаях наблюдалось усиление сейсмической активности и при резком спаде уровня.

Сейсмичность небольшой силы проявлялась также при наполнении водохранилищ, образованных плотинами: Гранваль (высота 88 м) на р. Трюйер во Франции, Мовуазен (высота 237 м) и Контра (230 м) в Швейцарии, Варрагамбе (137 м) в Австралии, Орвилл (236 м) на севере Калифорнии.

Приведенные факты о возбуждении или усилении сейсмичности под влиянием водохранилищ установлены на основании специальных сейсмологических исследований, так что они относятся к числу вполне достоверных (Болт, 1981; Рикитаке, 1979; Тиздель, 1972, и др.).

Приведу статистический итог относительно вероятности происхождения землетрясений под влиянием водохранилищ. Так, в результате детального изучения в США 500 крупных плотин и водохранилищ, по данным на 1976 г., установлено, что такое явление обнаружено в 4% изученных случаев (Болт, 1981). Этот итог относится к плотинам высотой более 100 м и землетрясениям с магнитудой более 3. Установленная небольшая вероятность землетрясений, вызванных водой, вовсе не говорит о малом значении этого явления. Вспомним описанное выше, бесспорно вызванное водохранилищем катастрофическое землетрясение на р. Койна в Индии, повлекшее разрушение целого города с многочисленными человеческими жертвами. Для подобных случаев вероятность, составляющая даже небольшую долю в 4%, представляет собой большую опасность.

В Лондоне в 1980 г. на международной конференции по изучению землетрясений, связанных с созданием водохранилищ, приведены другие сведения, показывающие бóльшую вероятность искусственно вызванных землетрясений. Так, на 236 обследованных глубоких водохранилищах в 64 случаях (27%) отмечены индуцированные землетрясения, в том числе:

с магнитудой более 6		— на 4 водохранилищах		(2%),
—"—	3—5,9	— на 36	—"—	(15%),
—"—	менее 3	— на 24	—"—	(10%)

(Плотины..., 1982).

Итог этого обобщения показывает, что сейсмичность проявляется чаще, чем говорят результаты упомянутых выше обследований 500 водохранилищ в США.

Интересно рассмотреть причины возникновения и активизации землетрясений под влиянием водохранилищ.

На первых шагах изучения этого вопроса возникло предположение о том, что причиной активизации сейсмичности является добавочное давление массы плотины и водохранилища. Но в ряде случаев такие катастрофические землетрясения, как койнское и кремастенское (соответственно объемы 2,8 и 4,7 км^3) произошли при сравнительно небольших объемах водохранилищ. Кроме того,

были сделаны расчеты, показавшие, что давление таких масс, как плотина и водохранилище, на больших глубинах, к которым приурочены очаги землетрясений, мало в сравнении с существующими естественными напряжениями в горных породах.

Одним из необходимых условий для возникновения землетрясений антропогенного происхождения является накопление тектонических напряжений в очаговой зоне района водохранилища. В зонах разломов, ширина которых нередко измеряется многими метрами, под влиянием движений в течение геологических отрезков времени, иногда исчисляемых многими миллионами лет, происходит дробление и перетирание горных пород до механического состояния пыли. При обводнении стыков таких разломов в них образуется скользкая глинистая масса («глинка трения»), по которой происходит скольжение горных пород. При интенсивном движении больших массивов горных пород такой механизм может служить причиной выделения большого количества энергии и возбуждения сейсмичности.

Немаловажную роль играет повышение порового давления в горных породах, что также может привести к уменьшению их сдвиговой прочности. Дополнительное давление воды водохранилища, считают сейсмологи, распространяется в земной коре в виде волны, или импульса, которая становится причиной их обводнения и увеличения порового давления. В результате этого процесса происходит перераспределение напряжений в горных породах, что служит непосредственной причиной их перемещений на больших глубинах. Скорость распространения такой волны обычно невелика. Существующий опыт показывает, что иногда требуется несколько месяцев или даже лет, чтобы преодолеть расстояние в несколько километров. В этом вопросе большую роль играет фильтрационная способность горных пород. Водоупорные горизонты при соответствующем геологическом строении могут послужить преградой для достижения водой зоны разломов. В целом обводнение горных пород в зоне тектонических напряжений при больших напорах воды играет роль «спускового механизма», интенсивной разрядки таких напряжений, что сопровождается сдвиговыми деформациями в толще горных пород (Вербицкий, 1979).

Возбуждение сейсмической активности под влиянием водохранилищ широко известно в сейсмологии и в практике гидротехнического строительства. По этой причине для выявления такого неблагоприятного явления проводятся надлежащие исследования и изыскания; устанавливаются в необходимых случаях сейсмографы, по возможности задолго до начала строительных работ. Результаты таких изысканий находят отражение при конструировании сооружений, причем, как правило, для предупреждения повреждений плотин осуществляется усиление их, требующее дополнительных затрат.

Вода возбуждает землетрясения, но, по мнению некоторых авторов, она может также служить средством их ослабления. В свя-

зи с этим необходимо сказать о подобных землетрясениях, вызванных обводнением глубоких буровых скважин.

Впервые было отмечено такое землетрясение в районе г. Денвера (США, штат Колорадо), который считается асейсмичным, а по другим данным — районом низкой естественной сейсмичности. Причиной землетрясения явилась глубокая буровая скважина (3800 м), в которую в период с 8 марта 1962 по 30 сентября 1963 г. производилась закачка сточных вод промышленного предприятия. Приблизительно через месяц после начала закачки местные сейсмические станции стали регистрировать толчки, которых к октябрю 1963 г. насчитывалось 700. Магнитуда их колебаний составляла от 0,7 до 4,3 по шкале Рихтера. Особенно много их отмечено в начале 1963 г. Корреляция между количеством закачиваемой воды и повторяемостью толчков была высокой.

В 1964 г., после прекращения закачки сточных вод, сейсмичность резко снизилась, а в 1965 г. закачка вод была возобновлена. Одновременно возникли многочисленные землетрясения, что совпало с нагнетанием насосами в скважину большого количества воды (Болт, 1981). В сентябре 1969 г. закачка воды была прекращена, но после этого стали происходить сравнительно сильные землетрясения, продолжавшиеся почти 10 лет. Особенно активная сейсмичность наблюдалась в период с конца 1965 по март 1966 г. В течение этого времени ежесуточно регистрировались слабые землетрясения с магнитудой до 3,7. Эпицентры землетрясений с очагами на глубине 4,5—5,5 км располагались на площади эллипсоидной формы длиной 8 км и шириной около 3 км; в центре эллипсоида находилась скважина. Всего в скважину было закачано 600 тыс. м^3 сточных вод (Рикитаке, 1979).

Керны, взятые из скважины, показали, что она пробурена в сильно трещиноватых породах, притом в разрывной зоне. Трещины были обводнены под большим давлением, что, по мнению сейсмологов, могло привести к уменьшению сдвиговой прочности горных пород и усилить смазку в трещинах на границах сдвигов. Это и явилось основной причиной активизации сейсмичности.

После этого случая в 1969—1973 гг. были развернуты экспериментальные исследования последствий закачки воды в отработанные нефтяные скважины в сейсмически активном районе Рейнджли (штат Колорадо). Результаты показали высокую корреляцию между давлением воды в трещинах горных пород и частотой землетрясений. При давлении в трещинах выше порогового число землетрясений, вызванных водой, достигало 100—150 в месяц и намного превышало их частоту при естественном происхождении. В то же время при давлении ниже порогового преобладали естественные землетрясения.

Это явление необходимо учитывать при создании подземных водохранилищ, которые, как считает автор, должны в будущем получить развитие более интенсивное, чем в настоящее время. Однако активизация землетрясений происходит под влиянием нагнетания воды в глубокие скважины. Подземные же водохранилища целесообразно создавать на меньших глубинах, во всяком случае выше залегания соленых подземных вод.

Возникла идея о том, что нагнетание воды в буровые скважины, расположенные в соответствующих местах зоны ожидаемого возбуждения сейсмичности в районе создаваемого водохранилища, может служить средством для «снятия напряжения» в горных породах этой зоны. Таким путем ожидаемое крупное землетрясение антропогенного происхождения можно было бы разделить на большое число мелких. В часть специально заложенных скважин вода закачивается, из другой части — откачивается. Предполагается, что таким образом удастся перераспределить тектонические напряжения в горных породах и дифференцировать ожидаемые под влиянием водохранилищ мощные сдвиги на большое число малых сдвигов, создаваемых водой скважин. Действие этих скважин можно сравнить со спуском сильно оттянутой пружины, конечный эффект которого можно ослабить, если пружину спускать небольшими частями.

Вопрос о таком регулировании антропогенных, а может быть, и естественных землетрясений еще далек от решения. Высказываются даже мнения, что если будет допущена ошибка в размещении скважин и в режиме нагнетания и откачки воды, то такая неточность может вызвать землетрясение еще более интенсивное, чем под влиянием наземных водохранилищ. Идея управления антропогенными землетрясениями, конечно, весьма актуальна, но практическое применение намеченного метода требует пока осторожности. В этом направлении во многих странах проводятся теоретические и лабораторные исследования, включая и эксперименты на моделях. Результаты этих исследований в конечном счете несомненно позволят создать конкретный, поддающийся однозначному решению метод управления грозным явлением — землетрясениями, вызванными водохранилищами.

3. Паводки на реках

Вода — благо на Земле, но вместе с тем некоторые элементы режима рек создают неблагоприятные условия для людей. Это прежде всего относится к экстремальным явлениям. Паводки и половодья нередко вызывают разливы рек и наводнения. В периоды засух реки становятся маловодными, а в условиях сухой степи, полупустыни или пустыни регулярно пересыхают; водой они наполняются на короткое время весеннего половодья или ливневых дождей. Типичные для первых — р. Узень в Южном Заволжье, для вторых — вади Сахары и омурамбо Калахари.

Борьба с паводнениями ведется уже много веков путем создания дамб по берегам рек. Но более эффективный способ для ликвидации или смягчения паводков и усиления стока в межень (сезоны маловодья) — регулирование стока водохранилищами, о чем было сказано выше.

Проблема максимального паводочного стока в этой главе освещается в определенном направлении, имеющем для людей не меньшее значение, чем прямые помехи и ущерб от разливов рек. Этот вопрос относится к совмещению обеспечения надежности и безопасности существования гидротехнических сооружений — плотин — с экономической целесообразностью этих сооружений.

Дело в том, что размеры таких дорогостоящих сооружений, как железобетонные плотины, должны обеспечивать пропуск через них максимального паводочного стока. Чем больше максимум, тем длиннее должна быть железобетонная водосливная часть плотины. Для безопасности ее существования в течение двух-трех веков она должна пропустить наибольший расход воды, который когда-либо в течение этого срока может сформироваться на данной реке.

С первого взгляда может показаться, что решение такого вопроса элементарно. На самом деле это не так.

Более или менее массовые систематические наблюдения над речным стоком ведутся в течение 20—50 лет. В экономически развитых странах они часто имеются за период до 100 лет. Вспомним (см. главу 3), что реки на территории, занимающей более $^1/_4$ площади суши (не считая Гренландии и Антарктиды), вовсе не обеспечены какими-либо гидрологическими наблюдениями. В СССР основная массовая сеть гидрологических станций действует в течение 40—50 лет, а для многих больших рек гидрометрические данные имеются за 80—100 лет. Освещенность гидрологическими данными социалистических стран и развитых капиталистических стран в общем довольно высока, но полного ответа на интересующий нас вопрос они не дают, так как нет уверенности в том, что в течение даже векового периода наблюдений зарегистрирован предельный максимум речного стока.

Более полувека тому назад американский инженер Фостер предложил метод своего рода удлинения продолжительности гидрологических наблюдений. С этой целью он использовал разработанную философом и математиком К. Пирсоном кривую III типа обеспеченности, математическое выражение которой позволяет определить вероятность повторяемости максимального стока различной обеспеченности — 1%, 0,1%, 0,01% соответственно 1 раз в 100 лет, 1 раз в 1000 лет, 1 раз в 10 000 лет и т. д. Как видим, этот метод, позволяющий «удлинить» ряды гидрологических наблюдений, оказался 50 лет тому назад весьма заманчивым для применения и в СССР, так как в то время были развернуты большие работы по проектированию и сооружению гидроэлектростанций, предусмотренных ленинским планом ГОЭЛРО, разработанным в 1920 г. Тогда продолжительность гидрологических наблюдений была на 50—60 лет меньше, но других, более рациональных методов не было. Поэтому начиная с начала 30-х годов метод Фостера—Пирсона получил распространение и в СССР (Крицкий, Менкель, 1934; Соколовский, 1934). Следует подчеркнуть, что за истекшие десятилетия этот метод сыграл немаловажную роль, так как позво-

лил унифицировать проектирование гидроэлектростанций и обеспечить надежность существования плотин.

Для того чтобы гарантировать безаварийность ГЭС, появился соблазн производить расчеты максимального стока с запасом, который, как потом оказалось, был чрезмерно преувеличен. В качестве нормативной обеспеченности при проектировании сооружений высоких классов принимался максимальный сток 0,01% обеспеченности, что условно соответствует повторяемости 1 раз в 10 000 лет. Как показали исследования, проведенные автором этих строк 30 лет тому назад, такой расчет с гарантированной поправкой увеличивал действительно наблюдаемый в течение 60—70 лет максимум приблизительно в 1,5—2 раза. Масштаб такого преувеличения значительно превосходил необходимый запас на прочность инженерного сооружения и таким образом чрезмерно удорожал его стоимость. Преувеличенные затраты связаны с тем, что по мере увеличения максимального стока, который должна пропустить водосливная плотина, длина ее увеличивается. Каждый погонный метр плотины на средней или большой равнинной реке обходится от нескольких сот тысяч до миллиона рублей.

Выступая по этому вопросу на III Всесоюзном гидрологическом съезде в 1957 г., я отметил: «Сказанное дает основание считать, что максимальные расходы воды в результате применения формальных статистических приемов содержат немалый резерв возможного снижения стоимости гидротехнических сооружений. Нельзя признать сколько-нибудь обоснованными затраты больших денежных средств на основании ничего не значащих в физическом отношении чисто формальных статистических критериев различной обеспеченности». Далее говорится: «Интересно, что на родине Фостера (автора внедренного у нас почти 25 лет[1] тому назад статистического способа гидрологических расчетов) — в США — статистические приемы гидрологических расчетов с каждым годом все больше отступают на второй план. Величины максимальных расходов воды, полученные по вероятностным кривым, считается обязательным контролировать методом физического анализа возможных предельных максимумов. Этот метод, по образному выражению Хортона, исходит из простого положения о том, что «малая река не может дать паводка, наблюдаемого на Миссисипи, точно так же, как обыкновенная курица не может снести яйцо диаметром в метр» (Horton, 1936, с. 438)».

«Нужно ясное и четкое представление относительно полной необоснованности ныне применяемых гидрологических расчетов. При этом дело не должно ограничиваться констатацией отсутствия других, более совершенных приемов, которыми богата гидрологическая литература двух последних десятилетий (ныне 4—5 десятилетий), а требуется активная работа для постоянной замены чисто статистических приемов в гидрологии генетическими. Для этой

[1] Ныне — более 50 лет тому назад.

цели требуется большая, можно сказать, новаторская исследовательская работа комплексного географо-генетического направления. Для начала могут служить уже достигнутые результаты научных исследований, в ряде случаев пригодные для контрольной оценки реальности расчетных гидрологических величин, полученных на основании статистических расчетов. Мы будем неверно поняты, если нам припишут отрицание применимости статистики в гидрологии. Она полезна и необходима, но мы против возведения статистики в ранг самостоятельного метода познания природы гидрологических явлений, против формального применения статистики, против того, чтобы статистика бесконтрольно использовалась для определения ответственных расчетных величин дорогостоящих сооружений... Нельзя признать сколько-нибудь обоснованными затраты больших средств на основании ничего не значащих в физическом отношении чисто формальных статистических приемов, исходящих из слепого закона больших чисел. В настоящее время, когда наука и практика обогатились большим опытом, необходимо, чтобы наряду с решением гидрологических задач, гарантирующих безопасность гидротехнических сооружений, была поставлена проблема повышения их экономичности — в данном случае экономичности, зависящей от точности гидрологических расчетов» (Львович, 1959, с. 16—17).

По этому вопросу на секции общей гидрологии гидрологического съезда развернулась интересная дискуссия. Один из выступивших, инженер В. С. Гвоздев — научный сотрудник Уральского филиала АН СССР, сказал: «Недостатки формального применения статистического метода в гидрологии особенно ощутимы при гидротехническом использовании малых рек. Имеется ряд примеров того, что некритическое применение статистического метода приводит к завышению максимальных расходов (воды) редкой повторяемости. Так, например, на р. Старая Утка (Урал) существует плотина, построенная 230 лет тому назад. Можно полагать, что за этот период плотина пропустила расход (воды) 1% обеспеченности[1]. Однако проведенные расчеты дают величину расхода (воды), превышающую все фактические, показывая, что эта плотина якобы не может пропустить расход (воды) такой обеспеченности. Обусловливаемая этим необходимость перестройки плотины вызывает излишние затраты средств и создает неблагоприятные условия для работы завода, расположенного выше плотины» (Тр. III Всесоюзн. гидрол. съезда, т. VII. Л., 1959, с. 289—290).

В течение двух с половиной десятилетий после III Всесоюзного гидрологического съезда я не прекращал размышлений о генетических методах расчетов максимального стока и пришел к выводу о том, что в принципе гидрологические расчеты должны исходить

[1] Формально, по статистическому методу, за 230 лет через плотину прошел максимальный расход воды 0,43% обеспеченности, т. е. в 2,5 раза меньшей, чем названа (1%) в выступлении В. С. Гвоздева (*Прим. автора*).

из тех же генетических положений, что и методы прогнозов. Кроме того, в указанном докладе была показана целесообразность использования для расчетов максимального стока исторических меток высоких вод.

В середине 70-х годов к целенаправленным исследованиям этого направления был привлечен А. Г. Георгиади (1981). Суть полученных выводов и результатов этого исследования освещена в статье (Львович, Георгиади, 1983).

Каковы же теоретические основы решения задачи генетическим методом?

Кривая Пирсона III типа и ей подобные, беспредельно возрастающие в своих верхних частях, не соответствуют структуре характерных для природных условий длинных рядов максимальных расходов воды. Объясняется это тем, что в каждом более или менее крупном районе, например в пределах географической зоны, условия формирования весеннего максимального стока не беспредельны, а ограничены энергетическим потенциалом тех факторов, которые участвуют в формировании весеннего половодья. Например, запасы воды в снежном покрове лимитированы максимальными показателями циркуляции атмосферы, от которой зависит снегонакопление. Интенсивность снеготаяния весной также не беспредельна, а обусловлена энергетическим потенциалом циклонической деятельности в этот важный период, когда определяется дружность весны и в значительной мере максимальный сток. При кратковременном дружном весеннем снеготаянии формируются высокие максимумы, но при таких условиях выпадает меньше дождевых осадков, чем при затяжном снеготаянии.

Промерзание почвы также довольно существенный фактор максимального стока; при больших снегозапасах он не может быть значительным даже в суровые зимы вследствие отепляющего действия снежного покрова.

Из сказанного следует вывод о том, что каждый из факторов весеннего половодья в данных региональных условиях не может беспредельно увеличиваться. Но, кроме того, при их сочетании в условиях формирования максимального стока каждый из влияющих факторов не может достигать наибольших значений в силу того факта, что некоторые из них взаимно компенсируют друг друга. Наиболее ярко это проявляется с факторами снегозапасов и зимнего промерзания почв, о чем было сказано выше.

К числу немаловажных вопросов генезиса максимального весеннего стока, его энергетического потенциала относится продолжительность периода, в течение которого могли наблюдаться максимумы, соответствующие современной эпохе. Палеогеографические исследования показали, что современная географическая зональность в европейской части СССР сложилась приблизительно 3—3,5 тыс. лет тому назад, что относится к последней трети голоцена. Имеются основания предполагать, что в течение этого периода максимальный сток неоднократно достигал предела, соответст-

вующего максимальным энергетическим условиям его формирования.

О факторе времени речь идет не в связи с заменой условных статистических показателей времени, соответствующих различным обеспеченностям максимального стока. Такие, например, показатели, как обеспеченность 1 раз в 1000 лет (обеспеченность 0,1%) или 1 раз в 10 000 лет (обеспеченность 0,01%) и т. п., являются не более как условными характеристиками, а автор дает приближенную оценку реального периода времени — продолжительности эпохи, в течение которой могли наблюдаться современные максимальные весенние расходы воды. Эта эпоха ограничена во времени. Современные энергетические условия формирования максимального весеннего стока относятся к сравнительно непродолжительному периоду — к последней трети голоцена, т. е. к истекшим 3—3,5 тысячелетия. Нет оснований считать, что до этого периода мог наблюдаться максимальный сток, близкий к стоку современной эпохи. До ее наступления максимальный весенний сток формировался в условиях отступающего оледенения, поэтому максимальные снеговые максимумы могли быть гораздо выше.

Имеются основания полагать, что в ближайшие века, на которые рассчитывается существование гидротехнических сооружений высоких классов, условия формирования максимального весеннего стока существенно не изменятся. Внимания в основном заслуживают антропогенные изменения климата, но их направленность дает больше оснований для предположения об уменьшении в будущем потенциальных условий формирования максимального стока.

Приведем вполне надежные данные наиболее длительных наблюдений над максимальным стоком на реках восточной части европейской территории СССР. Характеристика этих данных приведена в табл. 11. Продолжительность наблюдений в пяти створах колеблется в пределах от 241 до 340 лет, из которых около 100 лет относится к инструментальному периоду учета стока, включая сюда период после создания водохранилищ на Волге, Каме, Дону и Днепре. В этот период значения максимального стока восстанавливались по эмпирическим зависимостям.

В таблицу включены также данные доинструментальных наблюдений продолжительностью от 140 до 240 лет. В течение этих периодов производилась фиксация наибольших годовых уровней рек, которые по царским указам отмечались на зданиях и оградах монастырей, на стенах острогов. На Оке у Каширы первая метка высоких вод относится к 1641 г., на Каме в Перми — к 1688 г., на Волге у Горького и на Днепре у Лоцманской Каменки [1]—к 1709 г., на Дону у Раздорской — к 1740 г.

В результате работ, проведенных Е. В. Бергом (1955, 1956), Б. Д. Зайковым (1954), Г. И. Швецом (1972), указанные метки

[1] В этом створе метки высоких вод наносились на скалистом берегу Днепра.

Таблица 11

Характеристика длинных рядов наблюдений над максимальными расходами воды весеннего половодья на некоторых реках европейской части СССР

Река, пункт	Площадь бассейна, км²	Наибольший наблюденный расход воды		Инструментальный период		Доинструментальный период		Период после создания водохранилищ		Весь период	
		м³/с	год	Годы	Число лет	Годы	Число лет	Годы	Число лет	Годы	Число лет
Волга, Горький	479 000	38 000	1926	1877—1940	64	1709—1876	178	1941—1980	40	1709—1980	272
Ока, Кашира	68 700	16 400	1908	1881—1980	100	1641—1880	240	—	—	1641—1980	340
Кама, Пермь	169 000	18 000	1914	1877—1953	77	1688—1876	189	1954—1980	27	1688—1980	293
Днепр, Лоцманская Каменка	459 000	25 800	1931	1881—1931	51	1709—1880	172	1932—1980	49	1709—1980	272
Дон, Раздорская	378 000	13 500	1917	1881—1951	71	1740—1880	141	1952—1980	29	1740—1980	241

высоких вод были привязаны к ближайшим водомерным постам. В итоге были получены данные, охватившие максимальные расходы воды за 2,5—3,5 века. Низкие из максимальных расходов, разумеется, не вошли в эти наблюдения, так как разливы не достигали строений, на которых производились отметки высоких вод. При статистических расчетах этот пробел восполнялся путем применения метода М. Бенсона (Benson, 1950). Вполне обоснованно принималось допущение, что кривые расходов воды за инструментальный период могут быть использованы для восстановления максимальных расходов воды доинструментального периода. Измерения расходов воды, производившиеся в течение десятилетий, показали, что русла рек в створах соответствующих гидрометрических станций достаточно устойчивы. В целом это самые надежные данные вековых наблюдений над максимальными расходами рек европейской части СССР.

В табл. 12 приведены данные о наибольших максимальных расходах воды, зарегистрированных в тех пунктах на реках, где производились длительные наблюдения. Важно отметить, что самые высокие расходы весеннего половодья отмечались в течение трех первых десятилетий текущего столетия. Возможно, что такая концентрация во времени наступления максимального стока не является случайной. Интересно также, что в пределах 10% отклонений от максимума они повторяются дважды на Волге и Днепре, трижды на Каме и даже 7 раз на Дону у Раздорской.

Кривая обеспеченности продолжительного ряда максимального весеннего стока Дона у Раздорской (рис. 18) наиболее ярко иллюстрирует указанную особенность структуры таких рядов наблюдений. Увеличение экстремально высоких значений, когда максимальные расходы воды приближаются к своему пределу, становится все менее вероятным. С каждым последующим более высоким максимумом уменьшается возможность появления энергетических условий, приближающихся к его предельному потенциалу.

Структуре продолжительных рядов в общем отвечает ограниченная с двух сторон кривая S_B Джонсона, которая уже нашла применение для расчетов годового стока (Сванидзе, 1977). Однако оценки предельных весенних максимумов половодья, полученные по этой кривой, недостаточно устойчивы и существенно зависят от структуры ряда наблюдений. Вместе с тем экстраполяция максимального стока, производимая по кривой Пирсона III типа и ей подобным, приводит к тому, что расчетные максимумы 0,01% обеспеченности дают преувеличение по отношению к наибольшим наблюденным в течение нескольких столетий расходам на 25—95%, а с гарантийной поправкой отклонения колеблются в пределах от 30 до 112% (табл. 13); расчетные максимумы 0,1% обеспеченности выше наблюденных на 10—55%.

Отсюда вытекают два практически важных следствия. Первое заключается в том, что для рек с упомянутым типом водного режима, для которых имеются продолжительные ряды регулярных

Таблица 12

Наибольшие и близкие к ним максимальные расходы воды весеннего половодья некоторых рек европейской части СССР за период наблюдений

Река, пункт	Период наблюдений (лет)	Наибольший максимум		Второй максимум		Третий максимум		Четвертый максимум		Пятый максимум	
		м³/с	год	м³/с	год	м³/с	год	м³/с	год	м³/с	год
Волга, Горький	272	38 000	1926	37 900	1709	—	—	—	—	—	—
Ока, Каширa	340	16 400	1908	15 800	1641	14 900	1789	—	—	—	—
Кама, Пермь	293	18 000	1914	17 500	1810	16 200	1902	—	—	—	—
Днепр, Лоцманская Каменка	272	25 800	1931	22 500	1845	—	—	—	—	—	—
Дон, Раздорская	241	13 500	1917	13 400	1849	13 100	1942	13 000	1881	13 000	1740*

* в пределах 10% величины наибольшего максимума; кроме того, наблюдены еще 2 максимума.

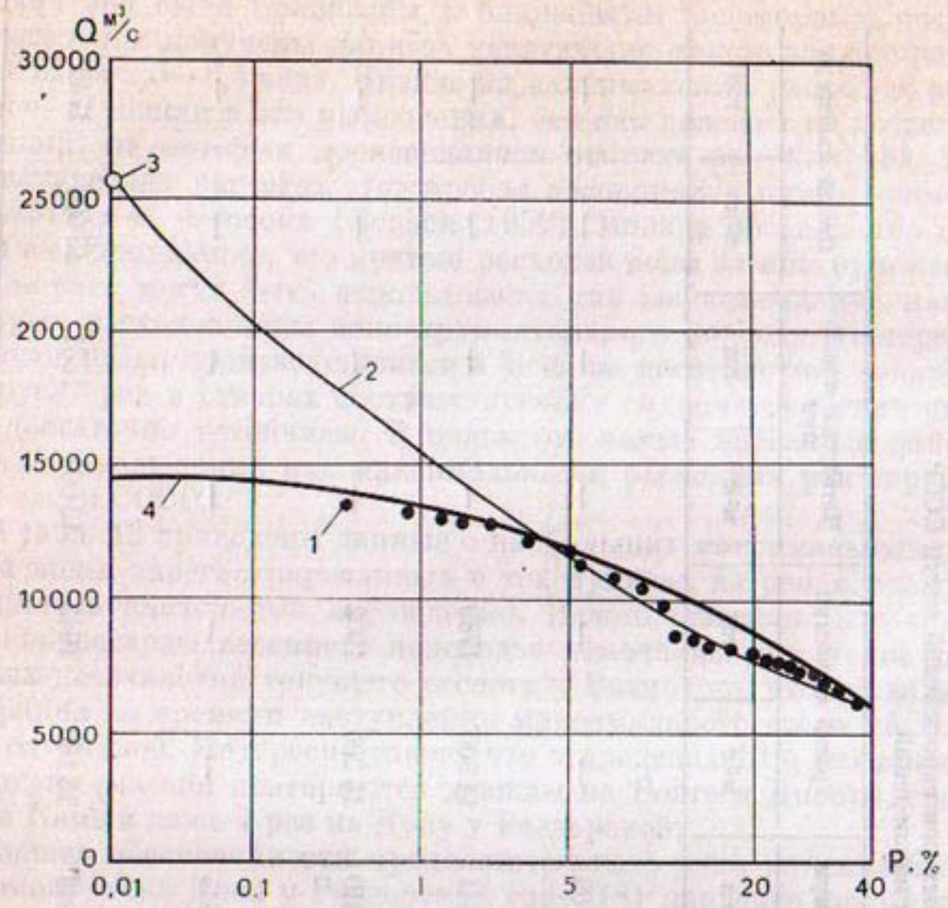


Рис. 18. **Кривые обеспеченности (P) максимального весеннего стока (Q) Дона у с. Раздорской:**

1 — эмпирические точки, рассчитанные по формуле М. Бенсона; 2 — теоретическая кривая, рассчитанная по «Указаниям...» (1972) с учетом поправок на выдающийся максимум; 3 — расчетный максимум стока 0,01% обеспеченности без гарантийной поправки; 4 — кривая S Джонсона

наблюдений (порядка 50—100 лет), а также исторические максимумы в расчетах предельно высоких расходов воды, вполне обоснованно принимать обеспеченность, равную 0,1%, если пользоваться применяемыми ныне кривыми обеспеченности. Что касается рек, на которые нет сведений об исторических максимумах, а также тех, которые характеризуются меньшей продолжительностью регулярных наблюдений, репрезентативность их временной структуры необходимо проверять, используя для этого структуру имеющихся продолжительных рядов.

Из всего сказанного выше ясно, насколько методически обедняется работа по расчету максимального стока, в которой не учитываются основные процессы формирования весеннего половодья, его максимум, а формально подменяются кривой обеспеченности, недостаточно проанализированной с точки зрения структуры длинных рядов гидрологических наблюдений.

Для того чтобы испытать возможность генетического решения задачи предвычисления верхнего предела расхода весеннего поло-

Таблица 13

Сравнение максимального весеннего стока по наблюдениям и расчетам

Река, пункт	Максимальный сток по наблюдениям: Весенний максимум, м³/с	Год наблюдений	Число лет наблюдений	по расчетам: без гарантийной поправки: При расчетной обеспеченности 0,1%, м³/с	На сколько расчетный максимум больше наблюдавшегося, %	При расчетной обеспеченности 0,01%, м³/с	На сколько расчетный максимум больше наблюдавшегося, %	с гарантийной поправкой: Расчетный максимум, м³/с	На сколько расчетный максимум больше наблюдавшегося, %
Волга, Горький	38 000	1926	272	46 500	22	53 200	40	56 500	49
Ока, Кашира	16 400	1908	341	19 600	20	23 900	46	25 600	56
Кама, Пермь	18 000	1914	293	19 800	10	22 500	25	23 500	30
Днепр, Лоцманская Каменка	25 800	1931	272	31 000	28	40 200	56	44 200	71
Дон, Раздорская	13 500	1917	241	21 000	56	26 300	95	28 600	112

водья, в Институте географии АН СССР была проведена работа (Георгиади, 1979, 1981), которая, кратко говоря, заключалась в следующем.

В основу положен метод прогнозов элементов весеннего половодья, который разработан В. Д. Комаровым (1959) и в котором максимальный весенний сток определяется по уравнению линейной регрессии, связанному с запасами воды в снежном покрове, сформированном к началу снеготаяния, и коэффициентом дружности половодья. Это соотношение выражается следующим уравнением:

$$K_i = \left(\frac{Q_i}{\overline{Q}}\right) \Big/ \left(\frac{h_i}{\overline{h}}\right),$$

где:

K_i — коэффициент дружности половодья i-го года;

$\overline{Q}$, Q_i и $\overline{h}$, h_i — соответственно средние многолетие и за i-ый год максимальные расходы воды и максимальный слой стока половодья.

Этот метод применен для расчетов максимального стока нескольких рек лесостепной зоны европейской части СССР.

При поиске сочетания факторов, благоприятствующих формированию предельного весеннего максимума, использовалось их пространственно-временное обобщение в рамках природной зоны, в данном случае лесостепной. Необходимость этого обусловлена

тем, что, располагая рядами в несколько десятков лет, нельзя быть уверенным в сочетании факторов весеннего половодья, позволяющих выявить предельный максимум. Допущение о единстве пространственно-временны́х характеристик половодья оправдано рядом исследований (Калинин, Макарова, 1957; Комаров, 1959; Lvovich, 1980). Основная предпосылка такого подхода к восполнению данных связана с упомянутым выше положением о том, что в основных природных зонах европейской части страны в отдельные годы инструментального периода зарегистрированы условия формирования расходов воды половодья, близких к их предельным значениям.

Наибольшие снегозапасы определялись путем перемещения контуров каждого из исследуемых бассейнов по картам ежегодных полей этого фактора в границах лесостепной зоны европейской части страны. Из всего множества определений снегозапасов данного речного бассейна выбиралась наибольшая величина. Таким образом, для поиска наибольших запасов воды в снежном покрове используются временны́е данные и к ним добавляется информация, полученная на основании пространственных данных в пределах соответствующей географической зоны.

Затем вблизи того места, где был получен указанным выше способом максимум снегозапасов, подбирался речной бассейн с многолетними данными по стоку приблизительно такой же по площади и с аналогичными природными условиями, что и исследуемый. По среднему за период наблюдений на этом речном бассейне слою стока и максимальному расходу воды весеннего половодья, а также с учетом их значений, соответствующих году, когда были зарегистрированы наибольшие снегозапасы, определялся коэффициент дружности половодья (K_i).

Максимальный расход воды из рядов, полученных путем введения найденных факторных сочетаний в генетическую зависимость, или средние значения из близких величин максимумов принимались за расчетные величины предельных максимумов.

В итоге этой работы, которую следует считать лишь первым заслуживающим внимания опытом генетического подхода к расчетам максимального весеннего стока, были получены следующие результаты (табл. 14).

В расчетах потребовалось использовать в обработанном виде все материалы по факторам весеннего половодья за каждый год всего периода наблюдений. Эту работу удалось провести благодаря В. Д. Комарову, который предоставил необходимые для этой цели карты и исходные данные.

Полученный результат не следует рассматривать как завершенное исследование, но он интересен и заслуживает дальнейшего углубления и более массового применения. Вполне возможна бо́льшая дифференциация элементов алгоритма расчетов максимального весеннего стока, но эта работа громоздка, так как требует обработки материалов по нескольким десяткам речных бассейнов и

Таблица 14

Опыт применения генетического метода расчета максимального весеннего стока

Река, пункт	Максимальный сток, м³/с		
	восстановленный по вековым рядам других рек с учетом средней квадратической ошибки	рассчитанный	
		по принятой методике (Указания..., 1972)	по генетическому методу
Дон, Казанская	7 800	14 500	11 700
Хопер, Бесплемяновский	3 440	6 780	4 870
Сейм, Рыльск	3 680	6 410	3 140

составления карт по каждому элементу алгоритма. Необходимо также теоретическое исследование энергетических условий формирования максимального стока.

Применение кривых обеспеченности для экстраполяции недостаточно обосновано, так как по существу они носят случайный характер, в значительной мере произвольный и не отвечают естественной структуре многолетних рядов максимального стока. К числу таких кривых относится кривая Пирсона III типа и ей подобные. Более соответствует указанным условиям кривая S_B Джонсона, но она недостаточно устойчива. Подобная экстраполяция принципиально возможна, но при одном непременном условии: такая кривая обеспеченности, которую мы хотим использовать для экстраполяции, должна быть строго обоснована моделью структуры рядов наблюдений над максимальным стоком.

Таким образом, максимальные расходы при приближении к предельным, согласно физической модели, подтверждаемой некоторыми эмпирическими данными, не поднимаются быстрыми темпами по мере уменьшения обеспеченности; наоборот, их подъем постепенно начинает замедляться и должен остановиться на уровне предельной энергии процессов, участвующих в формировании весеннего половодья. Но сказанное о предельных энергетических возможностях пока гипотеза, которую нужно изучать и углублять. Но есть еще другой реальный путь — использовать охарактеризованный выше метод прогнозов весеннего половодья, его объема и максимального расхода. По существу не должно быть принципиального различия в модели при решении задач прогнозов и расчетов максимального стока.

Подводя итог изложенному, следует подчеркнуть, что результаты расчета генетическим методом должны обеспечивать безопасность существования гидротехнических сооружений, поскольку это зависит от величины максимального стока. При любых явлениях природы в течение 2—3-векового срока работы сооружения пре-

дельный максимальный сток не должен быть выше расчетного, желательно с некоторым запасом на неполное знание. По мере развития науки разница между расчетным и естественным максимальным стоком должна уменьшаться и составлять 10—20%, а не 50% или даже 100%, как это дают кривые обеспеченности Пирсона и аналогичные им. Необходимо стремиться к расчетам таких максимумов, которые отвечают обоим требованиям — безопасности и экономичности гидротехнических сооружений.

Если в прошлом, когда раздел гидрологической науки о происхождении паводков был еще недостаточно развит, расчеты максимального стока приходилось производить со значительным запасом «на незнание», то современная наука позволяет уменьшить этот запас и таким образом сократить напрасное расходование труда и средств. Следует подчеркнуть, что все сказанное относится также к строительству создаваемых на реках мостов.

Глава 7
УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМ БАЛАНСОМ И РЕЖИМОМ СОЛЕНОСТИ ВОД ЮЖНЫХ МОРЕЙ

1. Общие принципы управления

На земном шаре много бессточных озер, но наиболее крупные из них — бóльшая часть Каспийского моря, Аральское море — находятся в СССР. Их водный баланс и режим уровней чрезвычайно чувствительны к притоку воды из впадающих в них рек. Чем мелководнее такие озера, тем более часто их акватория реагирует на колебания притока воды. В процессе формирования водного баланса таких озер участвуют также испарение, которое является основным элементом расходования воды, и атмосферные осадки, обычно небольшие, поскольку бессточные озера, как правило, приурочены к пустыням и полупустыням.

Яркий пример такой закономерности — бессточное оз. Эйр в Австралии. В многоводный летний сезон оно наполняется и площадь его достигает 15 тыс. км^2, а глубина — 20 м. В сухой же год озеро часто пересыхает и превращается в сор.

На колебания притока речной воды в бессточные озера, а следовательно, и на изменение их площади и солености с каждым десятилетием все в большей степени накладываются антропогенные факторы. Главный из них — отъем воды и безвозвратный расход ее на хозяйственные нужды из рек, питающих бессточные озера. Особенно этот процесс стал сказываться с 50-х годов, когда было положено начало быстрому развитию орошаемого земледелия — самой водоемкой отрасли водного хозяйства — на реках бассейна Каспия, Арала, Балхаша и многих других менее значительных озер.

В периоды многоводья расходование воды на хозяйственные нужды играет стабилизирующую роль в режиме уровней бессточных озер. Но в периоды маловодья этот же антропогенный фактор, как понятно, усиливает падение уровня естественного происхождения.

В настоящее время безвозвратный расход воды из рек бассейнов Каспия, Арала и Балхаша на хозяйственные нужды довольно быстро возрастает, поэтому с каждым новым десятилетием систематическое снижение уровней этих озер с усилением падения их уровней в периоды маловодья становится более интенсивным. Но при этом все же амплитуда колебаний уровня бессточных озер в меньшей мере зависит от антропогенных факторов и в большей мере остается зависимой от естественных факторов формирования водного баланса. В данном случае нельзя говорить о такой функциональной зависимости в связи с характером чаши озера: приток воды в озеро при высоких стояниях уровня, т. е. при большой его площади, дает прирост уровня меньший, чем такой же приток воды при более низких стояниях уровня, когда площадь данного озера меньше. Это явление относится к одному из факторов стабилизации (чаще всего небольшой) колебаний уровня бессточного озера независимо от происхождения притока речной воды в озеро — естественного или антропогенного. Таким образом, причина некоторой стабилизации — морфометрия самого озера, которая хорошо выражается зависимостями размеров площади и объемов воды в озере от его уровней.

Другой, более эффективный фактор, стабилизирующий размах колебаний уровня бессточного озера, — испарение. Объем воды, расходуемой с акватории бессточного озера на испарение, за вычетом атмосферных осадков также зависит от положения уровня самого озера, т. е. морфометрии озерной чаши.

Уровень равновесия бессточного озера наступает при приблизительно равных значениях объемов притока речных и подземных вод в озеро и расходования с его акватории воды на испарение за вычетом атмосферных осадков.

Такая зависимость между элементами водного баланса и морфометрией бессточных озер при соответствующих условиях может служить довольно мощным средством управления их водным балансом. Так, при систематическом уменьшении притока речных и подземных вод в озеро, которое часто происходит в результате использования водных ресурсов на хозяйственные нужды, можно приостановить вызванное им падение уровня путем искусственного отсечения с помощью дамб части акватории озера с целью уменьшения его площади, а следовательно, и снижения объема воды, расходуемого на испарение. Изменяя морфометрию озера искусственным путем, можно создавать равновесный водный баланс. Таким образом, человек может управлять водным балансом, а вместе с тем и соленостью бессточных озер. Такой способ управления будет показан на примере Аральского моря. Это бес-

сточное озеро в настоящее время усыхает, поэтому применение мер воздействия на его морфометрию приобрело весьма актуальное значение. К категории озер с искусственным управлением водного баланса, правда в более ограниченных размерах, относится и Каспийское море. Но в отношении водоема возникает проблема поддержания уровня воды его северо-восточной части (с помощью дамбы) на более высокой отметке.

К числу южных морей СССР, претерпевающих большие антропогенные изменения, относится также Азовское море. Оно сообщается через Черное и Средиземное моря с Атлантическим океаном и соединено с Черным морем узким Керченским проливом, поэтому носит некоторые черты, свойственные бессточным озерам, но нарушаемые водообменом с более соленым Черным морем. Приток речных вод в этот водоем уменьшился в настоящее время приблизительно на 12 км³/год, что составляет почти $^1/_3$ естественного притока в это море. В результате произошло резкое сокращение рыбной продуктивности на большей части его акватории, ослабление водообмена пресных вод в Азовском море, усилилось вторжение более соленой черноморской воды в Азов и повысилась его соленость. Дополнительной, но очень важной причиной таких изменений антропогенного происхождения послужило влияние обладающего большой многолетней регулирующей способностью Цимлянского водохранилища, в котором аккумулируется почти весь сток половодья Дона. В результате приток в море вод весеннего половодья Дона, по последним расчетам (Ремизова, 1984), ныне почти на 15 км³, или более чем в 3 раза, уменьшился по сравнению с естественным — до сооружения Цимлянского водохранилища. В естественных условиях весеннее половодье играло большую роль в режиме умеренной солености Азовского моря, усиливало обмен пресных вод и обогащало море первичным органическим веществом. Только по этой причине важный показатель рыбной продуктивности Азовского моря снизился на 20% (Бронфман и др., 1979).

В качестве меры, позволяющей рассчитывать на восстановление былой продуктивности Азовского моря, намечается переброска волжской воды в Дон в объеме около 6 км³/год, а также организация рыбных весенних попусков воды из Цимлянского водохранилища, имитирующих естественное весеннее половодье. Целесообразно не откладывать проведение в жизнь этих мер, так как длительная отсрочка может привести к необратимым последствиям и создаст дополнительные трудности при восстановлении рыбной продуктивности Азовского моря. Положительное воздействие на водный режим моря может оказать, по-видимому, сооружение гидроузла в Керченском проливе, основное назначение которого заключается в регулировании обмена вод между Азовским и Черным морями при недостаточном поступлении речного стока в Азовское море. Марикультура в условиях будущего несомненно сыграет большую роль в восстановлении рыбной продуктивности.

Начало резкого падения уровня Каспийского моря относится ко второй половине 30-х годов. Оно произошло вследствие маловодья рек бассейна Волги. Так, водность Камы в течение десятилетия до 1940 г. была на 365 км³ ниже средней за период 1886—1929 гг. Всего же в течение указанного десятилетия приток волжской воды в Каспий был на 700 км³ ниже среднего многолетнего (Зайков, 1946), что повлекло за собой снижение уровня моря на 190 см. Таким образом, начало этого процесса прошло по естественным причинам. Роль антропогенного фактора была тогда небольшой. Лишь впоследствии, начиная с 50-х, особенно с 60-х годов, антропогенные факторы водного баланса в бассейнах Волги, Урала, Куры стали существенными. Происходил водозабор из рек на орошение, благодаря повсеместному применению зяблевой пахоты умножились ресурсы почвенной влаги за счет весеннего половодья, возрастал расход воды на водоснабжение, увеличивались потери воды на испарение с акватории водохранилищ. По этим причинам падение уровня Каспия стало систематически происходить под воздействием антропогенных факторов.

При дальнейшем развитии этого процесса наиболее уязвима самая мелководная северо-восточная часть Каспийского моря, играющая немаловажную роль в воспроизводстве рыбы. В связи с этим в целях поддержания уровня северо-восточной части Каспия Б. А. Аполлов (1959) предложил отчленение ее дамбами в целях поддержания уровня этой части моря на более высокой отметке. Но при этом отчлененная часть неизбежно должна была опресняться, что отрицательно сказалось бы на рыбном хозяйстве.

Д. Я. Раткович (1975) обратил внимание на указанный недочет создания Северокаспийского водохранилища по схеме Б. А. Аполлова и произвел расчеты, которые показали, что для сохранения солености на уровне около 6‰ в Северном Каспии, отделенном от Южного дамбой, необходимо ежегодно перекачивать из южной части моря в северную около 200 км³ воды, что осуществить невозможно. На основании этого и с учетом ряда других причин Д. Я. Раткович пришел к выводу о нецелесообразности сооружения разделительной дамбы для регулирования уровня Северного Каспия.

Конструктивные предложения, направленные на регулирование уровня Каспийского моря, выдвигает И. П. Герасимов (1961, 1976). Речь идет о создании системы дамб, отчленяющих мелководья от моря в целях уменьшения площади акватории и соответствующего уменьшения объема испаряющейся воды с поверхности моря. При дамбах общей протяженностью до 100 км расход воды на испарение с Каспия может быть сокращен приблизительно на 25 км³/год. Это предложение заслуживает особого внимания в связи с тем, что оно предусматривает устройство на соответствующих участках дамб водосливных плотин, через которые можно будет подавать воду из моря в отчлененные участки в неизбежные по естественным причинам периоды подъема уровня Каспия. Таким

образом, дамбы будут играть роль стабилизаторов уровня моря. После выхода в свет указанных работ И. П. Герасимова пролив в залив Кара-Богаз-Гол был перекрыт глухой дамбой. Идея такого перекрытия возникла еще во второй половине 30-х годов, когда произошло снижение уровня Каспийского моря почти на 2 м, но она своевременно не была воплощена в жизнь. Однако, если бы Кара-Богаз-Гол был тогда отделен дамбой от Каспия, современный уровень моря был бы по крайней мере на 1,5 м выше. При такой ситуации угроза обмеления северо-восточной части Каспийского моря и его отчленения не стояла бы столь остро.

При перекрытии (несколько лет тому назад) пролива в залив Кара-Богаз-Гол глухой дамбой намечалось сооружение на ней водосливной плотины для подачи в залив ограниченного количества воды (для химической промышленности). Такая плотина должна также служить для сброса каспийской воды в залив при существенном повышении уровня моря. Эта мера позволила бы в каких-то пределах стабилизировать уровень Каспия. В таком режиме заинтересованы все отрасли хозяйства. Однако задержка осуществления этого мероприятия, по-видимому, породила недостаточно обоснованное мнение о том, что дамба на Кара-Богаз-Голе была сооружена без особой необходимости. В этом вопросе немаловажную роль сыграло и временное повышение уровня Каспия, которое несомненно имеет положительное значение, что отнюдь не снимает необходимости всемерной борьбы со снижением уровня Каспия путем уменьшения количества воды, питающей Кара-Богаз-Гол, и сооружения указанной выше системы дамб, отчленяющих мелководные участки в северо-восточной части моря.

Что касается происшедшего в течение 1978—1983 гг. повышения уровня Каспия на 80 см, то имеются веские основания полагать, что такой подъем, связанный с многоводьем Волги[1], не устраняет остроты проблемы и не должен притуплять внимание к неблагоприятной ситуации, создавшейся на Каспийском море. Это соображение связано с тем, что, как показали исследования, необходимо учитывать безвозвратный расход воды из рек бассейна Волги и других притоков моря — Урала, Куры на хозяйственные нужды. Если в 30-х годах на эти цели ежегодно расходовалось около 8 км^3, то в настоящее время безвозвратный расход речной воды возрос почти в 5 раз, а, как показывают недавно проведенные осторожные расчеты, к 2000 г. он может достигнуть 60 км^3. В первые десятилетия будущего столетия рост расходования воды должен, по-видимому, постепенно стабилизироваться.

Компенсация расходования воды в бассейне Каспийского моря на хозяйственные нужды требует проведения ряда мер, среди которых наиболее доступной, по-видимому, является отчленение

[1] Не следует смешивать колебания уровня Каспийского моря, вызванные водностью Волги, с тектоническими изменениями, которые происходят гораздо медленнее.

мелководий с помощью дамб в северо-восточной части моря. Не утрачивает своего значения осуществленное в последние годы отчленение залива Кара-Богаз-Гол. На нужды химической промышленности в заливе целесообразно подавать воду в минимально необходимом объеме. Поддержанию уровня Каспийского моря может в какой-то мере помочь и сброс возвратных после орошения вод из системы Каракумского канала. Но эта вода не в меньшей мере необходима для поддержания уровня отдельных частей Аральского моря, о чем подробнее сказано в следующем разделе. Все эти меры, возможно, в сочетании с другими позволят замедлить ожидаемое падение уровня Каспия и сохранить его на отметке не ниже минус 28,5 м, что по вполне обоснованным выводам специалистов рыбного хозяйства, имеет большое значение для воспроизводства рыбы, так как снижение уровня ниже этой отметки означало бы утрату большой, общей площадью около 50 тыс. км^3, мелководной акватории Северо-Восточного Каспия (Уральской бороздины), которая играет важную роль в нагуле промысловых рыб.

Вместе с тем осуществление всех мер даже в наиболее оптимальные сроки не исключает таких неблагоприятных последствий. Так, если они позволят в 90-х годах компенсировать объем воды в количестве 10—20 км^3/год, то в течение двух-трех десятилетий уровень моря может оказаться ниже указанной критической для воспроизводства рыбы отметки минус 28,5 м. Если учесть подъем уровня моря в последние годы, то картина несколько улучшится. Но это принципиально не меняет положения, так как в последующие годы влияние современного подъема уровня будет сказываться все в меньшей степени.

Следует подчеркнуть, что приведенный анализ исходит из средней водности рек, впадающих в Каспийское море. Довольно значительный опыт показывает, что научно обоснованный долгосрочный прогноз колебаний уровня Каспия пока еще невозможен, а чисто эмпирические подходы для решения этого вопроса не дают положительных результатов. Поэтому при прогнозе на отдаленные сроки приходится ориентироваться на средние естественные условия с учетом изъятия речного стока на хозяйственные нужды, которое, как отмечено выше, повысится к 2000 г. до 60 км^3/год, что составит 20% естественного притока воды в море, а впоследствии, до стабилизации антропогенных влияний на речной сток, может оказаться еще более высоким. Если же наступит естественный многоводный период, то он в значительной мере, а может быть и полностью, будет компенсироваться расходованием воды на хозяйственные цели. Даже при исключительно высоком и продолжительном многоводье нарисованная выше картина принципиально не изменится. Возможно лишь несколько менее глубокое и менее продолжительное падение уровня, которое, вероятно, может привести к выпадению акватории северо-восточной части Каспия как объекта, играющего большую роль в волго-каспийском рыбном хозяйстве.

Для того чтобы избежать этого неблагоприятного последствия, необходимо предусмотреть дополнительно запасное мероприятие, которое должно подстраховать вполне вероятную возможность управления водным балансом северо-восточной части Каспийского моря, чтобы не допустить отчленения Уральской бороздины от моря.

Теперь, после освещения общих вопросов проблемы южных морей и отдельных особенностей Азовского и Каспийского морей, охарактеризуем более конкретно эти вопросы на примере Аральского моря. Приведенные соображения по Аральскому морю направлены на решение задач по преобразованию водного баланса и солености гидролого-гидротехническими средствами.

2. Преобразование Аральского моря

Существование и сохранность бессточных озер в настоящее время, как отмечено в предыдущем разделе, в значительной степени зависят от уровня хозяйственной деятельности на их водосборах. Наиболее ярко этот процесс проявляется в засушливых зонах. Примером тому — Аральское море. Дальнейшее развитие орошаемого земледелия, развитие промышленности, рост хозяйственно-бытового водопотребления в бассейне моря в отдаленной перспективе, если не будут предприняты соответствующие меры, могут привести к почти полному прекращению притока воды в Арал. Следствием этого явится постепенное уменьшение акватории моря и повышение солености воды. В конце концов это приведет к исчезновению моря и образованию обширных солончаков.

По этой причине проблема Аральского моря привлекает пристальное внимание научной общественности страны. Некоторые исследователи считают, что само существование Аральского моря при рациональном ведении хозяйства в Средней Азии представляется совершенно неоправданным, поскольку использование речной воды на орошение сулит несравненно больший экономический эффект, чем сток ее в Аральское море, а в настоящее время удельный экономический вес Арала в народном хозяйстве страны невелик.

Такое отношение к будущему Аральского моря представляется неоправданным. Море имеет промысловое и транспортное значение, с морем связаны жизненные интересы населения. В настоящее время невозможно также в полной мере оценить природные и экономические последствия вмешательства в физико-географические условия данного района, а также неэкономическое значение Арала. Но может быть, важнее всего наша моральная ответственность перед потомками за сохранение уникального природного объекта?

Аральское море нужно сохранить, но эту проблему необходимо решить, расходуя минимальное количество водных ресурсов на

питание Арала. Такой результат может быть достигнут не сохранением его в том виде, в каком море существовало веками, а путем преобразований Арала, сделав режим его управляемым.

Аральское море по размерам акватории второй в Советском Союзе и четвертый в мире замкнутый водоем. Средний многолетний уровень Аральского моря — 53 м над у. м. При этом уровне акватория занимала 66 000 км², объем воды в море составлял около 1000 км³, средняя глубина — 16 м, наибольшая — 69 м, средняя минерализация — 10,4‰.

Почти в течение 60 лет с начала текущего столетия реки бассейна Арала были преимущественно многоводнее, чем в периоды второй половины прошлого столетия и в 60-х годах текущего. По этой причине, несмотря на рост расходования воды на орошение, особенно существенный начиная с 30-х годов, уровень моря держался на высоких отметках и колебался в сравнительно небольших пределах. По расчетам В. Л. Шульца (1975), приток в море в период 1950—1960 гг. в среднем составлял 65 км³/год, а в десятилетие 1961—1970 гг. уменьшился в среднем до 41,8 км³/год, т. е. на 35%. Резкое снижение уровня Арала (на 2,5 м в течение этого десятилетия) связано не только с уменьшением естественной водности Сырдарьи и Амударьи, но также и с развитием орошаемого земледелия. Маловодный период наблюдался также и в прошлом — во второй половине прошлого века, когда уровень Арала снижался до отметки 50 м и был на 2,5—3,5 м ниже, чем в течение 60 лет с начала текущего столетия.

После 1960 г. началось резкое падение уровня моря. За 23 года он снизился на 9,3 м и падал со средней интенсивностью 0,4 м/год. Особенно ускорилось падение уровня после 1971 г., когда уровень был на отметке 51,5 м (абс.), и к 1983 г. он достиг отметки 44,2 м, т. е. снижался со средней интенсивностью 0,6 м/год (рис. 19).

Столь быстрое падение уровня Арала является следствием не только отъема воды на орошение из рек Сырдарьи и Амударьи и не только нескольких маловодных лет на этих реках после 1960 г. Слишком много воды теряется на питание вновь образованных Арнасайского и Сарыкамышского водоемов, в которые сбрасываются возвратные воды после орошения. Во избежание их осолонения они подпитываются также пресной водой из рек Сырдарьи и Амударьи. Новые водоемы дают большие уловы рыбы, но это осуществляется ценой снижения рыбной продуктивности Арала.

В целях смягчения сложившихся на Аральском море неблагоприятных условий автор совместно с И. Д. Цигельной разработали схему его реконструкции. Суть этой схемы состоит в том, чтобы уменьшить его испаряющую поверхность и сбалансировать ее с минимальным притоком в Арал вод Сырдарьи и Амударьи (Lvovitch, Tsigelnaja, 1973; Львович, Цигельная, 1978). Для решения этой задачи необходимо было прежде всего определить приток речных вод в Арал, а для этого охарактеризовать элементы водного

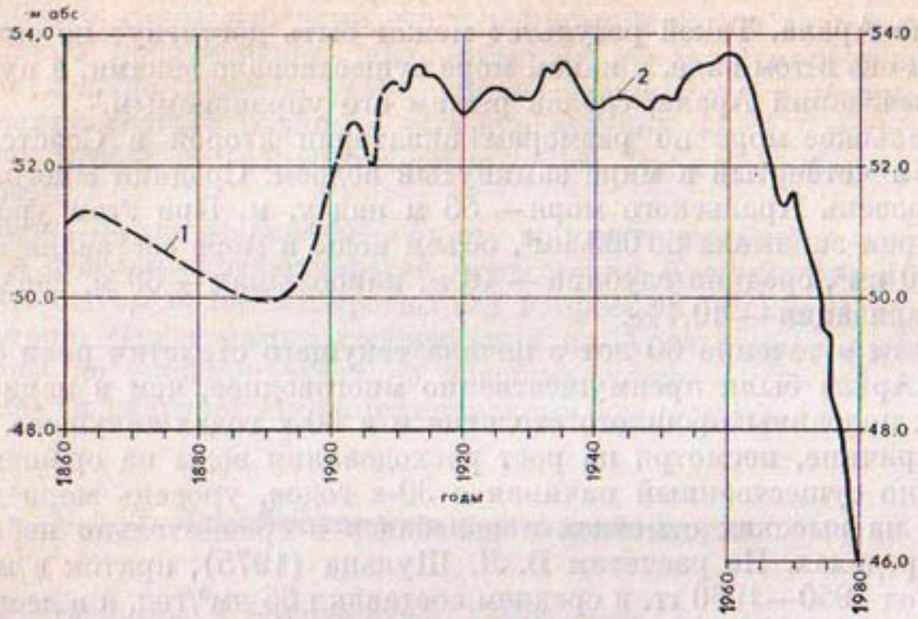


Рис. 19. **Колебания уровня Аральского моря:**
1 — восстановленные уровни; 2 — наблюдавшиеся уровни

баланса Аральского моря и обосновать возможность его разделения на две части, суммарная площадь которых будет отвечать поставленному выше условию.

Водные ресурсы рек, формирующихся в горных частях бассейна Аральского моря, в среднем достигают 125 км³, в том числе в бассейне Сырдарьи формируется 42 км³, в бассейне Амударьи — 83 км³, из которых приблизительно 7 км³ формируется вне пределов Советского Союза. В зоне рассеивания стока бассейна Аральского моря до 1970 г. в среднем ежегодно использовалось на орошение и другие хозяйственные нужды около 80 км³. Из них половина расходовалась на орошение. Заметим, что уменьшение непроизводительных потерь воды в зоне рассеивания могло бы послужить дополнительным источником водных ресурсов не только для орошения, если более полно зарегулировать речной сток, но и в какой-то мере для увеличения притока в Аральское море.

Особенность рельефа дна Аральского моря — подводная гряда, простирающаяся с севера на юг (от п-ова Куланды до п-ова Муйнак). Некоторые участки гряды возвышаются над поверхностью моря и образуют острова. К западу от гряды находится глубокая часть моря (до 60 м), к востоку — обширная котловина с глубинами, не превышающими в настоящее время 25 м.

Результаты исследований Арала позволяют сейчас сделать некоторые научные предложения.

Рациональное использование водоема для рыбного хозяйства, транспортных целей, рекреации требует стабилизированного уровня и солености воды. Целесообразно установить такой уровень моря, который можно реально поддерживать, несмотря на изъятие довольно больших количеств воды на орошение в бассейнах Сырдарьи и Амударьи. Этот уровень должен отвечать условиям равновесного водного баланса, который будет складываться в течение ближайших десятилетий с учетом изъятий воды из рек на хозяйственные нужды, но при максимальной их экономии, о реальных возможностях которой будет сказано ниже. При расчетах этого уровня учитывались и требования экономики рыбного хозяйства, судоходства, а также интересы населения, хотя и немногочисленного, для которого море является важнейшим компонентом природной среды.

Непременное условие стабилизации уровня — уменьшение площади моря, которое, однако, не должно происходить стихийно, а подлежит управлению по намеченному плану путем отчленения его частей дамбами и плотинами в целях сокращения расхода воды на испарение. Следует, разумеется, выбирать наиболее суженные и мелководные входы в заливы или другие части моря с подходящими для возведения дамб и плотин условиями. Возможность управления водным балансом оз. Балхаш исходя из этих же принципов была выдвинута А. В. Шнитниковым (1973).

Какие же резервы воды в бассейне Арала могут быть использованы для усиления питания моря и повышения эффективности использования воды в орошаемом земледелии? Прежде всего необходима энергичная борьба с потерями воды. Так, на фильтрацию и испарение из Каракумского канала ежегодно теряется около 2,8 км³ (Проблема Аральского моря, 1973), а в настоящее время еще больше через Дарьялыкский и Озерный коллекторы в Сарыкамышскую впадину ежегодно сбрасывается около 3 км³ воды. В многоводном 1969 году во избежание разливов в низовьях реки в Арнасайскую впадину был сброшен 21 км³ сырдарьинской воды. Вся эта напрасно теряемая вода могла бы и направляться в Арал. Кроме того, необходимо осуществлять меры по более экономному использованию воды. Непроизводительные потери воды в орошаемом хозяйстве еще велики. Затраты воды растут быстрее, чем расширяются орошаемые площади. По данным указанного выше источника, в зоне Каракумского канала в 1970 г. на 1 га орошаемой земли расходовалось 25 000 м³/год воды, а в среднем и нижнем течении Амударьи — 27 000 м³/год. Еще чрезмерно велик расход воды на орошение и в некоторых других районах Средней Азии. К настоящему времени потери воды снижены, но требуется проведение ряда дополнительных мер для их исключения.

Ликвидация этих потерь и экономия воды повысят эффективность орошаемого хозяйства и одновременно послужат существенным вкладом в поддержание уровня Арала.

Значительные объемы воды для развития орошаемого земледелия могут быть получены лишь в том случае, если будет пересмотрено традиционное отношение к водным ресурсам Средней Азии. Целесообразно, чтобы каждый кубометр поданной на поля воды давал максимальное количество сельскохозяйственных продуктов — орошаемое земледелие должно здесь развиваться прежде всего на

основе его интенсификации. Главной задачей остается все-таки ликвидация непродуктивных потерь. В связи с этим помимо сказанного выше большое внимание должно уделяться инженерному оборудованию оросительных систем, развитию и внедрению механизированных поливов, в конечном счете дальнейшему повышению коэффициента полезного действия оросительных систем. В оросительных системах непродуктивное испарение воды и фильтрация из каналов должны быть сведены до минимума. Это будет также способствовать уменьшению вторичного засоления. В последние десятилетия преобладает строительство облицованных оросителей или бетонных лотков. Потери воды на фильтрацию в ирригационной сети часто так значительны, что обусловливают вторичное засоление плодородных земель, а дренажная сеть создана еще не везде и не всюду обеспечивает снижение уровня грунтовых вод на надлежащую глубину.

Чрезвычайно важно расширить использование подземных вод для орошения, что даст некоторую экономию расходования речной воды и частично заменит дренажную поверхностную сеть. Использованию подземных вод мешает их повышенная минерализация, достигающая 3 г/л, а иногда и больше. Но неблагоприятное действие такой солености можно, по-видимому, ослабить промывочными поливами слабоминерализованной речной водой. Во время поездки в Индию автор имел возможность ознакомиться с орошаемым хозяйством на равнине междуречья Ганг—Джамна. Интересно, что там при наличии значительных ресурсов речного стока на орошаемых землях почти повсеместно создана густая сеть колодцев, из которых в сухой сезон берется вода на орошение. При этом уровень подземных вод поддерживается на глубине 6—10 м, благодаря чему капиллярная вода не достигает поверхности почвы. В таких условиях существенно снижается вероятность засоления земель. В целом в Индии около 20% воды, расходуемой на орошение, берется из колодцев или буровых скважин. Опыт дружественной нам страны с успехом могли бы использовать в условиях Средней Азии.

Большую роль в рациональном использовании воды может сыграть создание системы ирригационных водохранилищ многолетнего регулирования стока в горных частях бассейна Амударьи и Сырдарьи. Потенциальные возможности увеличения стока в маловодные годы путем строительства системы многолетнего его регулирования в бассейнах Сырдарьи и Амударьи, с учетом рядов фактических наблюдений, приблизительно достигают 25—30 км³/год (см. раздел I, главу 6). Если произвести простой ориентировочный расчет будущего уровенного режима Арала исходя из среднего ежегодного притока речной воды 30 км³, который можно сохранить или, может быть, даже несколько увеличить после устранения потерь воды, широкого применения маловодоемкой техники поливов, то получится, что от большого «живого» Аральского моря мало что останется. Так, через 25—35 лет уровень воды понизится приблизительно на 8—10 м против уровня 1980 г., а его

площадь уменьшится на 15—18 тыс. км². К середине будущего столетия при указанном притоке будет достигнут равновесный водный баланс, но отметка его уровня упадет до 38 м (абс.), т. е. на 6—8 м ниже современного (1983 г.); площадь акватории уменьшится до 35—40 тыс. км², что почти в 2 раза меньше, чем до начала резкого падения уровня, начавшегося в 1960 г.; его объем сократится в 2 раза с лишним, соответственно возрастет соленость и достигнет 35‰, т. е. будет приблизительно такой же, как у океанической воды. Важно также, что в этих условиях Малый Арал, побережье которого наиболее населено, отчленится от основной акватории и в центральной его части образуется небольшой сор. Мелководные восточная и южная прибрежные части основной акватории Арала отступят от уреза воды на 40—60 км. Ближе к западному берегу в меридиональном направлении на 150 км с лишним протянется остров (см. рис. 20 А).

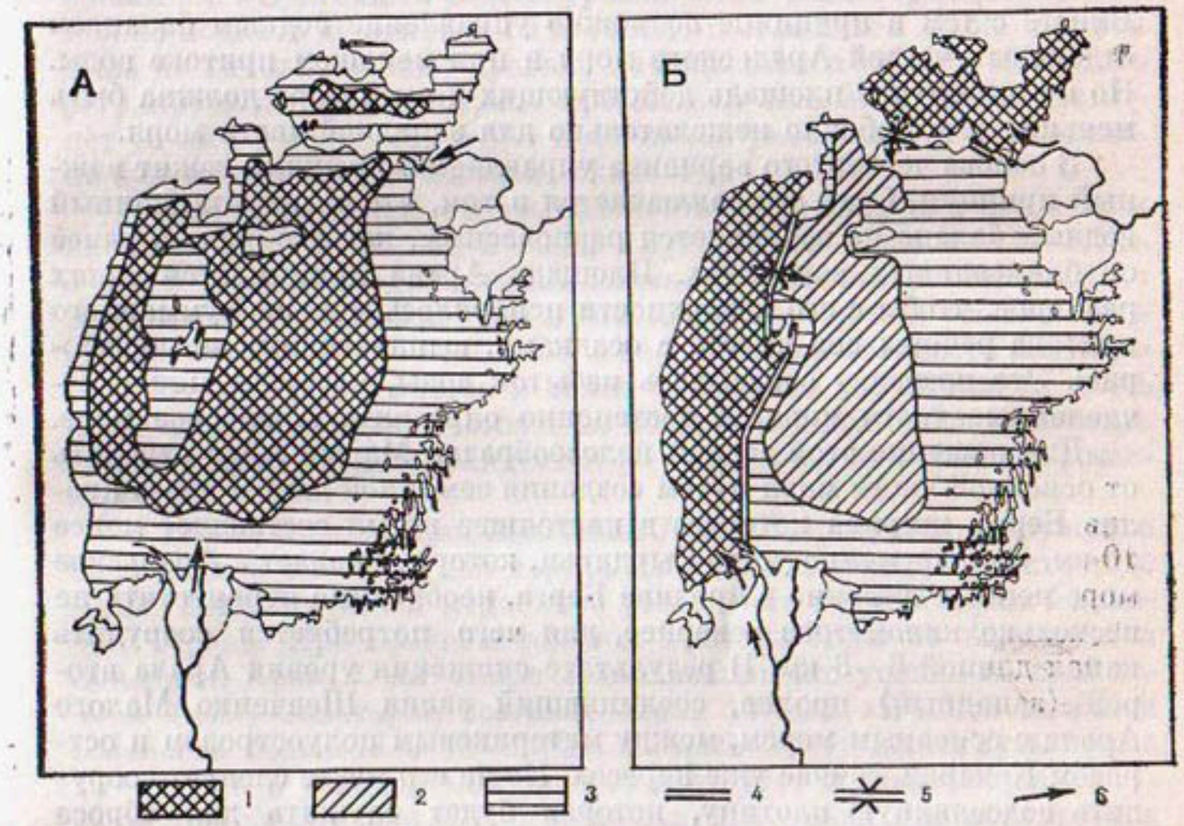


Рис. 20. Схема Аральского моря:

А — при неуправляемом водном балансе; Б — при управляемом водном балансе (сохранении акваниями Малого Арала и Западного Арала).
1 — действующие части моря; 2 — отчлененная часть моря; 3 — осушенные части моря; 4 — земляные дамбы; 5 — водосливные плотины; 6 — приток и отток воды

Автор этих строк совместно с И. Д. Цигельной разработали несколько предложений по нескольким вариантам управляемого режима. Четвертый из них представляется наиболее благоприятным и реально осуществимым. Его суть заключается в следующем.

В расчетах управляемого гидрологического режима Аральского моря в соответствии с исследованиями В. Л. Шульца (1975) принято годовое испарение с акватории моря, равное в среднем 1000 мм, а атмосферные осадки — 156 мм. Эти данные не лишены условности, поскольку испарение, по-видимому, должно изменяться в зависимости от размеров акватории и минерализации воды Арала, которые будут существенно отличаться от современных. Однако возможные уточнения исходных данных не изменят принципиального подхода к расчетам равновесного водного баланса, лежащего в основе идеи управления им. Это же относится и к другому параметру расчетов — притоку речной воды, который, как было отмечено выше, принят в расчетах равным 30 км^3/год. Такой средний годовой объем притока желательно обеспечить с помощью названных выше мер, в числе которых уменьшение потерь воды, дальнейшая интенсификация поливного хозяйства являются главными. Вместе с тем в принципе возможно управление водным балансом отдельных частей Аральского моря и при меньшем притоке воды. Но в этом случае площадь действующих частей моря должна быть меньше, что особенно нежелательно для западной части моря.

В основе четвертого варианта управляемого режима лежит важный принцип. Суть его заключается в том, что эксплуатационный водный баланс не сохраняется равновесным, как это было в ранее опубликованных вариантах. Площадь Арала принимается таких размеров, чтобы с его поверхности испарялось меньше суммарного притока речных вод вместе с осадками, выпадающими на акваторию. Это позволит сбрасывать избыток воды, поступающий в отчлененные части моря, и постепенно опреснить Аральское море.

Для решения этой задачи целесообразно Малый Арал отделить от основной части моря путем создания земляной дамбы через пролив Берга, ширина которого в настоящее время составляет менее 10 км. Одновременно устье Сырдарьи, которая впадает в Аральское море непосредственно в проливе Берга, необходимо переместить на несколько километров севернее, для чего потребуется соорудить канал длиной 6—8 км. В результате снижения уровня Арала второй (западный) пролив, соединявший залив Шевченко Малого Арала с основным морем, между материковым полуостровом и островом Кокарал, сейчас уже пересох. Но на его месте следует соорудить водосливную плотину, которая будет служить для сброса избытка воды из Малого Арала в основной. Такие сбросы понадобятся в периоды, когда сток Сырдарьи будет превышать «видимое» испарение, т. е. разность между атмосферными осадками, выпадающими на акваторию Малого Арала, и испарением. Таким образом, Малый Арал превратится в проточный водоем с более или менее устойчивым уровнем и постепенно будет опресняться. Выполнение этой программы не потребует больших затрат. Сооружения несложны ни для проектирования, ни для осуществления.

Второй активный проточный водоем может быть создан на месте глубоководного Западного Арала, который потребуется отде-

лить от основной части моря. Для этой цели необходима дамба, идущая от полуострова Куланды на севере между островами Комсомольский, Возрождения, Беллинсгаузена, Лазарева до полуострова Муйнак, приблизительно в 15 км западнее современного основного устья Амударьи. Между этими островами преобладают мелководные участки. Если, например, завершить сооружение этих дамб в 2000 г., то уровень Арала к этому времени снизится приблизительно до отметки 40 м (абс.) и большая часть указанных мелководных участков выйдет на поверхность, за счет чего размеры перечисленных островов увеличатся, а длина дамб уменьшится. По этой причине сооружение дамб станет менее трудоемким.

Результаты расчетов уровней воды и солености двух активных частей Аральского моря — Малого Арала и Западного Арала показывают, что при отчленении Малого Арала в 1990 г. и при превращении его в проточный водоем уровень этой части Аральского моря можно поднять до отметки 53 м (абс.), т. е. близкой к той, которая была до начала падения уровня, начавшегося в 1960 г. Площадь регулируемого Малого Арала превысит 6 тыс. км^2, объем достигнет 75 км^3, а соленость будет постепенно уменьшаться и в середине будущего столетия составит около 6‰.

В расчете допускается, что соленость воды, притекающей в Арал из Сырдарьи, достигнет 2—3‰, амударьинской воды — 1—1,5‰, а атмосферные осадки, выпадающие на акваторию моря, будут практически пресными, хотя в действительности они обычно здесь содержат некоторое количество солей. Высокая соленость сырдарьинской воды принимается в связи с тем, что значительная часть стока этой реки будет состоять из возвратных вод после орошения. Аналогичный процесс ожидается на Амударье, но в меньших масштабах.

В дамбе, отделяющей Западный Арал, потребуется сооружение водосливной плотины для сброса избыточной воды в Восточный Арал. Тогда начнется медленное рассоление водной массы Западного Арала. При среднем годовом притоке воды из Амударьи в Западный Арал 20 км^3 и при стабилизации его уровня на отметке 40 м (абс.) акватория составит около 10 тыс. км^2. Что касается солености воды, то с 18—20‰, которые будут достигнуты через 15—20 лет, в управляемом режиме она будет постепенно снижаться и приблизительно в середине будущего века стабилизируется на уровне 5—6‰.

Следует подчеркнуть, что приведенные соображения показывают возможность сохранения Аральского моря, но не в первозданном виде, а преобразованном так, чтобы море существовало при меньшем притоке воды и при меньших размерах (рис. 20Б).

Главный же эффект намеченных мер — превращение Аральского моря в проточные водоемы, в результате чего оно станет слабосоленым. Это создаст благоприятные условия для развития продуктивного рыбного и других отраслей хозяйства. Перспектива опреснения Арала, очевидно, создаст благоприятные условия для

интенсивного рыборазведения на уровне марикультуры. Необходимо заранее разработать программу расширенного воспроизводства рыбных ресурсов Арала. Наиболее серьезной помехой для рыборазведения могут служить пестициды и другие ядохимикаты, применяемые в орошаемом земледелии. Часть их будет попадать с возвратными водами в Аральское море. Зарубежный опыт показывает, что необходим осторожный подход к подобным вопросам. Так, в некоторых районах США в результате неумеренного применения ядохимикатов в сельском хозяйстве наблюдались массовые заморы рыбы в водоемах. Там не были предусмотрены предупредительные меры на орошаемых землях и не ограничивалось применение ядохимикатов.

Другая важная проблема, связанная с преобразованием солености Аральского моря, — восстановление продуктивности хозяйства в дельтах Сырдарьи, особенно Амударьи, в плавнях которых в значительных масштабах было развито животноводство. Дельты рек были довольно богаты рыбой. Здесь создались благоприятные условия для разведения ондатры. Однако естественное восстановление продуктивности дельты — процесс весьма продолжительный, поэтому целесообразно осуществить искусственное обводнение дельт Сырдарьи и Амударьи по мере отступления моря. В числе таких мер следует, по-видимому, предусмотреть орошение и обводнение придельтовых земель в сочетании с системой полузапруд, позволяющих при расходовании сравнительно малых количеств воды поддерживать высокую обводненность земель и превратить их в плавни. Аналогичную систему полузапруд автор предложил для дельты Волги (Львович, 1962).

Один из вопросов, не нашедший еще полного решения, — прогноз ветрового переноса солей, которые могут быть отложены на обнажившихся участках дна тупиковых (неактивных) частей Арала. Однако перенос солей несомненно будет меньше, чем при неуправляемом режиме Арала.

Проблема преобразования Аральского моря, превращения его в пресный водоем решена пока на уровне научного предложения и требует, конечно, дальнейшего технико-экономического обоснования, а также выбора такого варианта управления водным балансом, который наиболее соответствовал бы природным условиям и хозяйственным задачам.

Глава 8
ГИДРОМЕЛИОРАТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

По традиционной классификации гидромелиоративные преобразования разделяются на два типа — орошение, применяемое в районах недостаточного увлажнения, и осушение болот и заболоченных земель. Известный мелиоратор А. Н. Костяков выделил в европейской части СССР три зоны: избыточного увлажнения — на северо-западе, недостаточного увлажнения — на юго-востоке, неустойчивого увлажнения — в средней полосе. В первой из них, как считалось, требуется осушение, во второй — орошение, в третьей в основном нет нужды в гидромелиорации, однако отдельные сельскохозяйственные культуры, например овощи, нуждаются в орошении, а переувлажненные участки — в осушении.

В последние годы границы между районами орошения и осушения в значительной мере сглаживаются. Орошение стало распространяться далеко на север и сейчас применяется в сравнительно хорошо увлажненной Ленинградской области.

В дренажной сети, по существу в осушении, нуждаются многие оросительные системы аридных районов Средней Азии.

Такая тенденция, явно наблюдающаяся в настоящее время, вероятно, станет основой управляемого водного режима почвы, который получит большое распространение в условиях будущего. Уже сейчас создаются мелиоративные системы двойного действия. В периоды избытка почвенной влаги они действуют как осушительные системы, в периоды недостатка — как оросительные. Именно таким способом можно постоянно поддерживать оптимальные условия увлажнения — метод, который в будущем несомненно будет основным в мелиорации. Но такое направление пока не исключает целесообразности рассмотрения двух видов гидромелиорации — орошения и осушения в отдельности.

1. Влияние орошения на водные ресурсы

Орошаемое земледелие относится к одной из древнейших отраслей хозяйства. Еще в Древнем Египте орошение служило основой жизни людей и развития цивилизации. В течение многих столетий техника орошения была примитивной и благополучие населения по существу полностью зависело от природной стихии — разливов Нила. Когда вода спадала, на увлажненной разливами почве производился посев. Этот процесс напоминает современные влагозарядковые поливы. Зерно высевалось во влажную почву, но дальнейший ход развития растений зависел не только от количества воды, напитавшей почву, но и от последующих условий. Большие разливы Нила служили предпосылкой для посевов на больших площадях и получения урожаев в условиях пустыни. Для предсказания таких условий еще в третьем тысячелетии до нашей эры на Ниле были сооружены нилометры — первые водомерные посты. Если они показывали высокий подъем паводка, жрецы предсказывали большой урожай и ожидаемое благополучие людей. Вероятно, примерно к тому же времени относится начало развития орошаемого земледелия в междуречье Тигра и Евфрата. Весьма давно оно применялось (очевидно, в речных дельтах) в Индии, Индокитае и Китае (посевы риса).

В последующем в Египте стало применяться так называемое бассейновое орошение: в зоне разливов поля окружались дамбами, нильская вода заполняла бассейн на подъеме паводка, а после его спада вода оставалась на обвалованных участках и обиль-

но увлажняла почву. Бассейновое орошение частично сохранялось вплоть до момента сооружения Ассуанского водохранилища, в котором аккумулируется вода почти всех паводков, кроме наиболее высоких. Это потребовало перевода всего орошаемого хозяйства на основу регулярного орошения.

В Средней Азии регулярное орошаемое земледелие практиковалось в раннем средневековье, свидетельством чего, например, являются остатки оросительных систем древнего Хорезма. Использование разливов для земледелия, несомненно, и здесь практиковалось значительно раньше.

Велика роль орошаемого земледелия в жизни людей и в наше время. На 240 млн. га орошаемых земель человечество получает около половины сельскохозяйственной продукции, хотя они составляют $^1/_6$ мировой площади пашни и насаждений (Зонн, Носенко, 1981).

Орошение, как неоднократно отмечалось выше, относится к наиболее водоемким отраслям хозяйства. Это и понятно, если учесть, что на производство 1 т орошаемой пшеницы расходуется 1,5—2 тыс. м³ воды (брутто), в зависимости от зональных условий района орошения, для получения 1 т хлопка — от 3 до 4 тыс., а чтобы собрать 1 т риса — более 5 тыс. м³. Производство многих миллионов тонн этих продуктов в мировом масштабе требует тысяч кубических километров воды. По приближенным расчетам, только в СССР в 60-х годах орошаемое земледелие ежегодно расходовало около 100 км³ воды. Предполагается, что в 2000 г. на эти цели в нашей стране потребуется 480 км³/год (Львович, Коронкевич, 1971), на земном шаре в целом — 2500 км³/год, а в перспективе — 4250 км³/год (брутто, включая соответственно 600 и 400 км³ возвратных вод; Львович, 1974). В последних расчетах принималось во внимание, что не только в 2,5 раза увеличится площадь орошаемых земель, но и должна уменьшиться норма орошения в среднем с 13 000 до 8500 м³ в условиях будущего, при сокращении безвозвратного расхода воды на 1 т сельскохозяйственной продукции с 3300 до 1900 м³. Такой прогресс ожидается частично в результате продвижения орошаемого земледелия в районы достаточного и избыточного увлажнения, где нормы орошения гораздо ниже, чем в засушливых, а также в результате повышения коэффициента полезного действия оросительных систем, который в значительной мере зависит от методов орошения. Опыт истекшего десятилетия именно в этом направлении превзошел все ожидания. Стал получать все большее распространение метод подпочвенного орошения, а также наиболее тонкая и экономная разновидность современной техники поливов — метод капельного орошения, который обеспечивает расходование воды, близкое к транспирации, т. е. при низком непродуктивном испарении и при отсутствии возвратных вод. Расход воды на единицу продукции хлопка-сырца при применении этого метода орошения в 2—2,5 раза меньше, чем при поверхностном поливе, при этом урожай повышается приблизи-

тельно на 2,5 ц/га, а эксплуатационные расходы существенно снижаются.

В Крыму практиковались частые подпочвенные поливы (1—2 раза в неделю) при поливной норме до 22 м³/га и оросительной — 800—1500 м³/га. Для подпочвенного орошения через керамические трубы использовались хозяйственно-бытовые сточные воды после их отстоя и внесения минеральных удобрений. При этом урожай кукурузы на силос достиг 633 ц/га, т. е. на 140 ц/га, или почти на 30%, выше, чем при орошении чистой водой, и в 2 раза больше, чем без орошения (Бердышев и др., 1975). При применении подпочвенного орошения расход воды снижается и приближается к уровню транспирации на 1 т орошаемой сельскохозяйственной продукции. Например, для зерновых культур такой расход составляет 600—800 м³ (нетто). Это означает, что в условиях степной зоны и на большей части территории полусухой саванны, где в среднем за год выпадает до 400—450 мм осадков, норма орошения может быть снижена даже при поверхностном дождевании в среднем до двух-трех поливов при норме каждого полива 600—800 м³/га. Вообще в таких условиях орошаемое земледелие следует развивать на основе «голодных» норм расходования воды. В годы средней увлажненности, как правило, потребуется 2—3 полива при норме орошения 1200—1500 м³/га, а в засушливые годы — 3—5 поливов при норме орошения 1500—2000 м³/га, что равноценно прибавке атмосферных осадков от 120 до 200 мм за период вегетации, причем выпадающих не в случайное время, как это бывает в естественных условиях, а в сроки благоприятные для развития растений.

В высокой эффективности действия вертикального дренажа автор убедился, как уже было отмечено выше, при ознакомлении с некоторыми оросительными системами междуречья Ганг—Джамна в Индии. На оросительных системах, в основном использующих воду каналов, создаются колодцы, из которых ведется откачка грунтовых вод, поддерживаемых на глубине 6—10 м, причем откачиваемая вода в сухой, зимний сезон поступает на орошение. Следует добавить, что вода из каналов в сухое время года подается в оросительные системы в весьма ограниченных объемах, поэтому грунтовые воды служат ценным дополнением. Важно подчеркнуть, что грунтовая вода, откачиваемая из колодцев, пресна и это, по-видимому, является следствием продолжающегося многие годы постепенного расслоения почвы.

Этим вопросом занимались многие специалисты, рассматривая возвратные воды в основном как неблагоприятное явление. В. П. Светицкий (1964) считает, что возвратные воды Ферганы составляют 43% общего объема используемых для орошения вод и что эта вода является дополнительным резервом для орошения. К такому же выводу об объеме возвратных вод (40%) этого района пришла Т. Н. Аткарская (1970).

Для Ферганы и оросительных систем Зерафшана, Чу и других рек Средней Азии возвратные воды составляли 15—30%, по рас-

четам В. Л. Шульца (1975). По результатам исследования Среднеазиатского научно-исследовательского института ирригации (Рубинова, 1973) прослеживается динамика возвратных вод в стоке Сырдарьи начиная с 30-х годов до конца 60-х. В начале этого периода доля возвратных вод в общем объеме стока при выходе Сырдарьи из Ферганской долины составляла 10% и, возрастая от года к году, во второй половине 50-х годов уже достигла 30%, а еще через 10 лет увеличилась до 53%. В створе Чардары в первой половине 50-х годов доля возвратных вод достигала 24%, а во второй половине 60-х годов, т. е. за полтора десятилетия, повысилась до 60%. Такой быстрый рост объема возвратных вод (может быть, в какой-то мере преувеличенный), объясняется рядом причин, из которых наиболее важны следующие:

— в Ферганской долине значительная часть орошаемых земель была расположена на конусах выноса притоков Сырдарьи, которые обладают хорошей естественной способностью дренировать избыток оросительных вод;

— после освоения земель в районах распространения конусов выноса оросительные системы стали создаваться за их пределами, часто на распространенных здесь тяжелых суглинках, нуждающихся в дренажной сети, с появлением которой объем возвратных вод возрос;

— увеличение норм орошения, особенно после сооружения Большого Ферганского канала, повлекло увеличение объема возвратных вод.

Интересную работу по выявлению и методике оценки объема возвратных вод провел С. И. Харченко (1973), который считает, что расчеты объема возвратных вод нередко проводятся субъективно, и иллюстрирует этот вывод примерами. Он отмечает, что количество возвратных вод зависит от состояния оросительных систем и их эксплуатации, что сказывается на изменении количества почвенной влаги в зоне аэрации почвогрунтов и запасов грунтовых вод. Указанный автор отмечает также, что на вновь созданных оросительных системах расход воды на насыщение влагой зоны аэрации почвогрунтов и приращение грунтовых вод постепенно растет и при отсутствии дренажной сети снижает количество возвратных вод. Впоследствии устанавливается равновесие этих элементов водного баланса, и тогда возможно существенное увеличение доли возвратных вод. Заметим, что такой процесс действительно возможен, особенно при создании дренажной сети без уменьшения подачи воды на орошаемые земли.

Интересны также приведенные в указанной работе данные об ожидаемых объемах возвратных вод, которые будут иметь место в будущем, при рациональном поливном режиме. Этот прогноз, предусматривающий относительное уменьшение доли возвратных вод (для хлопчатника — до 11%, а для риса — до 20%), учитывает снижение оросительных норм до оптимальных значений, которые на основании экспериментов для риса составляют 20—

24 тыс. м³/га, при проточности — 10—12 тыс., для хлопчатника, свеклы и других культур — 7 тыс. м³/га.

Потери воды за счет разливов и испарения естественной растительностью при освоении новых земель под орошение имеют все меньшее значение и в будущем снизятся еще в большей степени, так как освоение этих земель под орошение происходит во все более сухих районах, отдаленных от разливов рек. Насколько мне известно, на роль расходования воды естественной растительностью в преобразовании водного баланса под влиянием развития орошения впервые обратил внимание Л. В. Дунин-Барковский (1959), но этот фактор постепенно утрачивает свое значение. Так, если в хлопководческой зоне бассейна Сырдарьи на испарение с территории, занятой естественной растительностью, в 1928—1932 гг. расходовалось 4,7 км³/год, что составляло 53% испарения с орошаемых земель, то через 25 лет этот вид испарения снизился до 1,6 км³/год, или до 9% от испарения с орошаемых земель, которое увеличилось больше чем вдвое — до 17 км³/год. Спустя 20 лет испарение с территории, занятой естественной растительностью, в водном балансе бассейна Сырдарьи стало еще меньше.

В начале этого раздела была рассмотрена основная причина высокой водоемкости орошаемого земледелия — большое количество воды, требующейся на единицу сельскохозяйственной продукции. Следует подчеркнуть, что на единицу производства однородной продукции на орошаемых землях требуется больше воды, чем на неорошаемых. Объясняется это рядом причин:

— преимущественным распространением орошаемого земледелия в засушливых районах, где после поливов испарение приближается к испаряемости;

— преобладанием таких водоемких культур, как рис, хлопчатник, люцерна, отчасти кукуруза;

— еще имеющими место высокими потерями воды на многих оросительных системах мира в виде большого количества возвратных вод и еще недостаточно высокими коэффициентами полезного действия части оросительных систем.

Статистический учет расходования воды на орошение во всемирном масштабе не производится. Поэтому расход воды можно оценить приближенно на основании учета площади, занимаемой орошаемыми землями. Первый подробный обзор орошения и осушения в странах мира примерно на уровне 1970—1972 гг. произведен в СССР в книге «Орошение и осушение в странах мира» (1974). В этом источнике список орошаемых земель охватывает 116 стран, в которых общая площадь ежегодно орошаемых земель приближенно составляет 234 140 тыс. (с округлением) га. В табл. 15 приведены сведения по континентам из указанного источника, а по СССР площадь орошаемых земель принята по материалам ФАО.

В начале 70-х годов автор этих строк имел основания принять мировую площадь орошаемых земель в 220 млн. га. Вышедшая в свет в 1974 г. указанная выше книга об орошении и осушении в

Таблица 15

Площадь орошаемых земель, тыс. га

Страны света, СССР	Площадь
Европа (без СССР)	12 774
Азия (без СССР)	164 640
Африка	8 929
Северная Америка	27 431
Южная Америка	6 662
Австралия и Океания	1 701
СССР	17 000*
Мир	239 137

* По данным: FAO. Production Yearbook, 1980.

странах мира, в которой приведены уточненные данные с использованием большого числа источников, в целом подтвердила результаты его расчетов. Степень точности данных табл. 15 оценить трудно, так как, по сведениям на 1979 г., общая площадь орошения в 136 странах мира оценена в 206,5 млн. га (FAO. Production..., 1981), что, по-видимому, преуменьшено. По другому, не менее достоверному источнику, общая площадь орошаемых земель мира составляет 264 млн. га (Зонн и Носенко, 1981). В источнике, опубликованном на 12 лет ранее, по данным Международной комиссии по ирригации и дренажу, мировая площадь орошаемых земель принимается в 458 млн. га (Framji, Mohojan, 1969). Возможно, что в эту площадь входят и осушенные, т. е. все мелиорированные, земли мира.

Согласно данным табл. 15, общая площадь орошаемых земель мира принимается в 240 млн. га. При этом следует иметь в виду, что еще менее достоверными данными мы располагаем по водопотреблению орошаемым земледелием. К сожалению, приходится констатировать, что обобщенные данные о мировом расходовании воды орошаемым земледелием в каких-либо официальных или полуофициальных источниках отсутствуют. Попытка такого обобщения сделана автором этих строк (Львович, 1969). При этом удельный водозабор из источников был принят в 13 000 м³/га, а безвозвратный расход воды — в 9000 м³/га. В итоге суммарное водопотребление для орошения составило 2800 км³/год, а безвозвратный расход — 2100 км³/год. Результаты расчетов того же порядка получены И. А. Шикломановым (1979). Учитывая приближенный характер расчетов, расхождения по этим двум источникам следует признать сравнительно небольшими.

Что касается метода расчетов мирового расходования воды на орошение, то его усовершенствование сводится к решению вопроса об удельном расходовании воды на 1 га или один урожай дифференцированно для трех культур: риса, всех прочих продовольственных культур, хлопчатника и прочих технических культур. Необходимость этого обусловлена тем, что нормы орошения для риса приблизительно в 1,5 раза выше, чем для остальных культур, а занимаемая посевами риса площадь составляет почти половину всех орошаемых земель. Так, по данным одного источника, в 1966 г. рис выращивался на площади 126 млн. га при урожае 2 т/га, или всего было собрано 255 млн. т (Биосфера..., 1971), а по другому источнику — на площади 134 млн. га при мировом производстве этой культуры 321 млн. т, или 2,4 т/га (БСЭ, т. 22, с. 369). Принимаем общую современную площадь орошения под рисом в 130 млн. га при среднем урожае 2,7 т/га.

Другое принципиальное уточнение метода расчетов заключается в его дифференцировании по числу урожаев, которые выращиваются повторно в течение года на 1 га орошаемых земель. В связи с тем что орошаемое земледелие наиболее распространено в районах с высокими тепловыми ресурсами и коротким невегетационным периодом, а в некоторых районах — при его отсутствии, принимается, что из 130 млн. годовых урожаев риса приблизительно 40% приходится на площадь с одним урожаем, столько же — на площадь с двумя урожаями в год и 20% — с тремя урожаями. Заметим, что, учитывая продолжительность вегетации риса, можно при соответствующих климатических условиях получить три урожая риса лишь при его посеве саженцами, что связано с большими затратами трудовых ресурсов. В Юго-Западной Азии оба условия благоприятствуют трехурожайному производству риса.

Значительная часть посевов риса производится, например, в Южной и Юго-Восточной Азии, где при 2—3 урожаях в течение года часть их приходится на влажные периоды муссонов и поэтому не требует орошения за счет изъятия воды из рек. Для риса такая площадь составляет ежегодно около 40 млн. га (табл. 16). Таким образом, урожай риса ежегодно снимается с общей площади 130 млн. га, а на орошаемых площадях — 90 млн. га.

Хлопчатник и другие технические культуры занимают орошаемую площадь 40 млн. га, но, кроме того, часть технических культур на площади около 5 млн. га производится в естественно увлажненные периоды и не требует орошения из водных источников. Для всех продовольственных культур, кроме риса, это соотношение составляет 120 и 110 млн. га.

Для каждой из выделенных групп культур приближенно приняты дифференцированные нормы орошения и выделен безвозвратный расход воды на единицу площади.

Как показывают данные табл. 16, общий современный водозабор из источников ежегодно достигает 2810 км³/год, в том числе безвозвратный расход — 2340 км³/год; около 500 км³ составляет ежегодный объем возвратных вод с орошаемых полей.

По результатам прежних расчетов (Львович, 1969), датируемых приблизительно серединой 60-х годов, общий мировой расход

Таблица 16

Современный мировой расход воды на орошение

Сельскохозяйственная культура	Орошаемая площадь, млн. га		Норма орошения, м³/га		Ежегодный суммарный расход воды, км³		Безвозвратный расход воды на 1 т продукции, м³
	общая	требующая систематического ежегодного орошения	водозабор из источников	безвозвратный расход	водозабор из источников	безвозвратный расход	
Рис	130	90	15 000	13 000	1 350	1 170	4 800
Другие зерновые и продовольственные культуры	120	110	8 000	7 000	880	770	1 850
Хлопчатник и другие технические культуры	45	40	12 000	10 000	580	400	3 300
Всего . . .	295	240	11 700	9 750	2 810	2 340	2 640

воды орошаемым земледелием, как отмечено выше, оценивался в 2800 км³/год по водозабору из источников и в 2100 км³/год по общему безвозвратному расходу, т. е. почти совпадает с современным. Но тогда мировая площадь орошаемых земель оценивалась в 190 млн. га, а теперь — в 240 млн. Рост орошаемых земель за истекший 17-летний период на 50 млн. га весьма вероятен, и в среднем за год прирост составляет 3—3,5 млн. га. Однако с методической точки зрения новый расчет, относящийся приблизительно к 1980 г., я считаю более обоснованным, поскольку он исходит из дифференцированных принципов. Тем не менее подобные расчеты в связи с рядом допущений носят приближенный характер. Если систематический учет площади орошаемых земель более или менее реален, то по расходованию воды он в мировом масштабе более проблематичен.

Из сказанного видно, что орошаемое земледелие весьма водоемко. На эту отрасль хозяйства расходуется 6% мировых ресурсов речных вод. Часть воды используется из подземных горизонтов. О высокой водоемкости орошения можно судить по безвозвратному расходу воды на 1 т сельскохозяйственной продукции, который, по приближенным расчетам для трех из выделенных культур, колеблется в пределах 1850—4800 м³ (см. табл. 16).

Теперь перейдем к соображениям прогностического характера — проблеме многоплановой и чрезвычайно сложной. Постановка ее, хотя бы в сугубо приближенном порядке, важна в связи с необходимостью нацеливания развития современного орошаемого земледелия на решение определенных задач.

В середине 60-х годов при разработке прогноза ожидаемого развития водного хозяйства и охраны водного компонента окружающей среды мне не удалось найти каких-либо источников, позволивших подкрепить выводы по этой проблеме. В основу ее решения была положена задача обеспечения населения мира продовольствием и техническими культурами с учетом их недостаточной обеспеченности в тех условиях. Тогда исходя из прогноза роста населения и необходимости обеспечения всех людей продовольствием (считалось, что около 1 млрд. людей недоедает) можно было ориентироваться на 500 млн. га орошаемой площади в условиях будущего. Однако не было достаточной уверенности, что развитие орошаемого земледелия такими темпами позволит полностью решить поставленные задачи.

После указанного времени появилось несколько вариантов прогнозов ожидаемого роста площади орошаемых земель. Это, во-первых, прогноз И. С. Зонна и П. П. Носенко (1981), которыми площадь возможного орошения на 2000 г. оценена в 492,8 млн. га, а также данные Международной комиссии по ирригации и дренажу (458 млн. га) и П. Буринга, оценившего площадь будущих орошаемых земель в 470 млн. га (цитируется по указанной выше работе Зонна и Носенко). Кроме того, Г. П. Калинин и И. А. Шикломанов (1974) по разным источникам, включая ФАО, приняли площадь орошаемых земель в условиях будущего в 420 млн. га.

Таким образом, оценка роста площади орошаемых земель колеблется в пределах 420—492,8 млн. га. Учитывая недостаточную определенность будущего и вообще чрезвычайную сложность решения задачи, следует признать, что автор прежде принял приемлемую величину (500 млн. га) площади орошаемых земель. И в настоящее время нет оснований для пересмотра размеров площади будущего орошаемого земледелия. Однако необходимо точнее установить срок, в течение которого следует ожидать такого его развития. Конечно, речь идет не об определенной дате, что установить невозможно, а об условиях, при которых в будущем понадобится принятая площадь орошения. Основным условием является общая численность населения — около 10 млрд. человек. Время наступления такой численности следует рассматривать как отдаленную перспективу. Ее можно поставить в качестве «конечной» цели, к достижению которой необходимо стремиться в ирригационном хозяйстве. Но было бы неверно ограничивать решение этой задачи только площадью орошения.

Для того чтобы развитие орошаемого земледелия носило вполне прогрессивный характер, а в будущее нельзя заглядывать, не решая этой чрезвычайно важной особенности развития любой отрасли хозяйства, необходимо включить в прогноз расходование воды на орошение, ориентируясь на дальнейшее усовершенствова-

ние техники поливов и повышение урожайности орошаемых сельскохозяйственных культур.

Поэтому разрабатываемый прогноз развития ирригации исходит из следующих основных положений.

Во-первых, орошаемое земледелие нуждается в интенсивном развитии, для того чтобы удовлетворить потребности населения мира, при этом надо учитывать, что почти $^1/_4$ современного населения голодает или недоедает. Если «конечную» цель ориентировать на обозримую перспективу, следует принять во внимание рост населения, численность которого в отдаленной перспективе ориентировочно достигнет 10 млрд. человек. Отсюда следует, что сельское хозяйство в целом и важную его отрасль—орошаемое земледелие необходимо ориентировать на обеспечение продуктами растениеводства дополнительно 6—7 млрд. человек, т. е. увеличить его производительность приблизительно в 3,5—4 раза. Если учесть реальные успехи микробиологической промышленности в производстве кормовых культур, то такое увеличение за счет орошаемого сельского хозяйства можно снизить до 2,5—3 раз.

Во-вторых, расходование воды орошаемым земледелием необходимо оценивать применительно к будущей более совершенной технике орошаемого земледелия. В настоящее время наиболее передовым методом является капельное орошение, а также другие маловодоемкие методы внутрипочвенного орошения. Но повсеместное применение капельного орошения, очевидно, невозможно, например для производства риса и вообще для пропашных культур. Этот метод, по-видимому, нецелесообразно применять в условиях степной зоны, где орошение по принципу «голодных» норм требует в среднем два-три полива, при этом норму полива с помощью полуавтоматических дождевателей, особенно при их ночной работе, можно снизить до 600 м³/га. Таким образом, для степной зоны СССР и подобных ей по условиям формирования водного баланса, так же как и для северных районов, в которых все большее распространение получает орошение (на гидромелиоративных системах двойного действия), норма орошения в среднем не должна превышать 2000 м³/га. В условиях сухой и полусухой саванны, где испаряемость выше, чем в степной зоне умеренного пояса, эта норма может быть в 2—3 раза большей. При применении подпочвенного орошения, даже в крайних условиях засухи, норма орошения, например, хлопчатника вряд ли будет превышать 4000 м³/га.

Одним из путей снижения норм орошения, особенно при поверхностных поливах, как показали исследования автора, является система полезащитных насаждений, с помощью которых возможна экономия оросительной воды в пределах около 15% в Средней Азии и до 25% в степных районах (Львович, 1954). Наконец, для риса норма орошения сохраняется близкой к современным условиям — 13 000—15 000 м³/га на каждый урожай, число которых в ряде районов достигает двух-трех. При этом безвозвратный расход на орошение риса не может превышать испаряемости, которая в

сухих зонах тропиков достигает 2000 мм, или 20 000 м³/га. Поэтому потребуется новое решение в технике поливов в сочетании с выведением селекционным путем таких сортов риса, которым не понадобится столь обильное орошение. Приближенно оценивая приведенные для условий будущего нормы орошения пропорционально площади, занимаемой соответствующими культурами, с учетом зональных условий, получаем среднюю мировую норму орошения — 6000—6500 м³/га, допуская при этом, что возвратные воды не превысят 10% этой нормы. Следует еще учесть, что в ряде районов мира (например, где господствует муссонный климат) в орошении нуждается лишь один-два урожая, а третий урожай (в некоторых случаях второй и третий) требует небольших поливов, а иногда обеспечивается естественными атмосферными осадками.

В-третьих, устанавливая площадь орошения в условиях будущего, следует рассчитывать на резкое повышение урожаев. Сейчас уже в тропическом поясе получает распространение мексиканская орошаемая пшеница, потенциальный урожай которой достигает 10 т/га. Она послужила основой для «зеленой революции» в Индии и решения продовольственной проблемы в некоторых других странах. В СССР при орошении кормовых культур в южных районах урожаи достигают 12 т кормовых единиц. Современный опыт показывает, что селекционная наука в растениеводстве должна занять одно из первых мест, так как именно она открывает большие возможности для обеспечения населения необходимым количеством продовольствия. В течение 6—7 десятилетий, до середины будущего столетия, она должна сыграть главную роль в этом чрезвычайно важном деле, от которого в большой мере зависит ближайшее и отдаленное будущее человечества. Мне представляется, что с помощью одних технических мер невозможно разрешить мировую продовольственную проблему. Биологии в этом деле принадлежит весьма большая, может быть, ведущая роль. Именно с ее помощью, привлекая и достижения технического характера (например, капельное и другие приемы внутрипочвенного орошения), возможно достигнуть ожидаемых результатов, включая и их важную часть — обеспечение водными ресурсами. Они относятся к категории возобновимых, но до известного предела, который зависит от размеров отъема воды из источников и от качества воды, связанного с их использованием. Решая задачу в этих двух важных для водных ресурсов аспектах, можно обеспечить все потребности человечества в воде в течение весьма продолжительного времени. Этот вопрос будет подробнее рассмотрен в III части книги.

Исходя из предпосылки о необходимости существенного повышения урожаев, на отдаленную перспективу (третья четверть будущего столетия) ставится вопрос о развитии площади орошаемого земледелия в 2—2,5 раза по сравнению с современной при росте населения мира, нуждающегося в обеспечении продовольствием, включая $^1/_4$ современного недоедающего и голодающего населения, приблизительно в 4 раза.

Таблица 17

Ориентировочный прогноз мирового расхода воды на орошение

Срок	Орошаемая площадь, млн. га	Норма орошения, м³/га		Ежегодный суммарный расход воды, км³		Безвозвратный расход воды на 1 т продукции, м³
		Водозабор из источников	Безвозвратный расход	Водозабор из источников	Безвозвратный расход	
Современный (1980 г.)	240	11 700	9 750	2 810	2 340	2 640
Близкая перспектива (начало будущего столетия)	320	9 500	8 200	3 040	2 610	1 740
Отдаленная перспектива («конечная» цель)	500	6 500	6 000	3 250	3 000	1 000

Приведенные принципиальные соображения отражены в табл. 17, из данных которой вытекают следующие закономерности:

— площадь орошаемых земель на отдаленную перспективу увеличится приблизительно в 2 раза;

— норма орошения путем усовершенствования техники поливов и селекции к этому же сроку уменьшится в 2 раза;

— суммарный мировой безвозвратный расход воды возрастет незначительно; практически этот показатель должен постепенно стабилизироваться;

— при этом за счет увеличения орошаемой площади и роста урожая с 1 га валовой сбор продуктов растениеводства с орошаемых земель возрастет в 3—4 раза;

— главный эффект в экономии воды выражается в ее расходовании на одну тонну продукции, которое ориентировочно уменьшится в 2—3 раза.

Данные табл. 17 и сделанные на основании их выводы носят, конечно, приближенный характер, что неизбежно при разработке долгосрочных, перспективных прогнозов. Но я считаю главными в этом прогнозе *тенденции* в развитии орошения, которые необходимо учитывать, поскольку они подсказываются соотношением некоторых показателей современного мирового орошаемого земледелия. Если расходование водных ресурсов будет расти такими темпами, которые были свойственны последним десятилетиям, то можно с уверенностью сказать, что во многих районах мира будут исчерпаны имеющиеся водные ресурсы уже в будущем столетии. Поэтому *основным стратегическим направлением в дальнейшем развитии водного хозяйства, решающим проблему количества и качества водных ресурсов, является снижение расходования воды*

на единицу продукции. Это направление важно проводить в жизнь во всех отраслях водного хозяйства, но в первую очередь в наиболее водоемком орошаемом земледелии. А о социальной эффективности рассмотренных мер можно судить по следующим итоговым выводам: в настоящее время при населении мира 4,3 млрд. человек (1980 г.) и валовом сборе 0,8 млрд. т продукции со всех орошаемых земель на душу населения приходится приблизительно 0,2 т/год этой продукции, а «конечной» целью при населении приблизительно 10 млрд. человек предусматривается на орошаемых землях ежегодно производить 3 млрд. т продукции, или 0,3 т на душу населения.

Количественные показатели прогноза носят, конечно, ориентировочный характер и лишь служат иллюстрацией к тенденции развития. Ясно, что достижение этой цели зависит от социальных условий.

В заключение о водных аспектах орошаемого земледелия приведу краткие соображения о влиянии этой отрасли водного хозяйства на природу, включая и среду, окружающую людей.

Нельзя не согласиться с И. И. Бородавченко (1975), что появление дополнительной воды и развитие орошаемого земледелия в засушливой зоне являются благоприятным фактором для улучшения окружающей среды и в то же время важным положительным социальным фактором. Но развитие орошения в некоторых районах мира связано с отъемом из рек большого количества воды, что далеко не всегда бывает благоприятным.

Следует учесть, что Средняя Азия является в нашей стране своего рода уникальным оазисом, где высокие тепловые ресурсы позволяют производить такую тропическую культуру, какой является хлопок. Размеры этого производства не лимитируются земельными ресурсами, которых здесь достаточно для значительного его расширения. Но решение этой задачи ограничивается имеющимися водными ресурсами. Так или иначе, но дополнительная вода здесь потребуется; вместе с тем необходимо повысить эффективность использования водных ресурсов, осуществить их многолетнее регулирование, создать систему специализированных ирригационных водохранилищ в горах, направить расходование воды главным образом на орошение хлопчатника, частично сахарной свеклы, люцерны и кукурузы в севообороте с ним. Что же касается таких менее теплолюбивых культур, как пшеница и другие, то производство их на орошаемых землях целесообразно в степных районах европейской части СССР, на юге Западной Сибири и в районах Северного Казахстана, где расход воды на единицу урожая орошаемой продукции гораздо меньше, чем в Средней Азии, а при «голодных» нормах орошения возможно предотвратить угрозу засоления почв, не создавая при этом трудоемких и расчленяющих поля дренажных систем.

Важным положительным фактором такого же направления является создание ирригационных водохранилищ, но, как уже отме-

чалось, предпочтительнее создавать такие водохранилища в горах, где гораздо меньше потери воды на испарение и не приходится затоплять ценные для орошения земли.

Наиболее неблагоприятное влияние орошения на природу кроме отдельных случаев чрезмерного отъема воды из рек заключается в засолении почв, но в настоящее время существуют и широко применяются способы предупреждения и устранения этого явления. К ним прежде всего относится борьба с потерями воды на фильтрацию в оросительных системах и строгое нормирование орошения, вплоть до «голодных» поливов в степной зоне. Этот путь решения задачи интересен и эффективен своей профилактической направленностью. Из технических путей широкое применение получили устройство дренажной сети на орошаемых землях и практика рассоления почв с помощью промывочных поливов. Но нельзя недоучитывать и отрицательную роль такой меры: неизбежное следствие промывочных поливов — возвратная соленая вода, которую нежелательно сбрасывать в понижения, где конечным последствием явится образование соров. Через многие десятилетия они могут получить слишком большое распространение. Поэтому всюду, где это возможно, соленые возвратные воды Средней Азии следует направлять в Аральское и Каспийское моря. По-видимому, было бы целесообразно в опытном порядке развернуть работы по рассолению возвратных вод с применением мембранных фильтров.

В начале этой главы была отмечена современная тенденция сочетания двух гидромелиоративных мер — орошения и осушения. Интересным примером такой тенденции является недавно завершенное строительство гидротехнической системы Дунай—Тиса—Дунай на северо-востоке Югославии (Дукич, 1981). Эта система с магистральным каналом протяженностью 277,7 км представляет собой ядро комплекса мер по борьбе с частыми в этом районе наводнениями, осушению 760 тыс. га переувлажненных земель и орошению 500 тыс. га в целях развития земледелия и животноводства. При этом значительные орошаемые площади созданы на осушенных землях.

2. Осушение как гидрологический фактор

Общая площадь болот и заболоченных земель на земном шаре, по приближенным данным, достигает 3,5 млн. км^2, т. е. занимает почти 3% суши. Из этого количества почти 60% площади находится в СССР, где она составляет около 9% территории (Булавко, 1961). Осушение заболоченных земель играет в жизни людей немаловажную роль, так как значительная часть болот является потенциальным сельскохозяйственным фондом. О его значении можно судить по следующим данным. Например, в Белорусской ССР в 1985 г. осушенная площадь увеличилась до 22% общей территории.

В странах, где распространены болота и заболоченные земли, осушение имеет большое значение как фактор улучшения окружающей среды: относительно мало продуктивные территории в их естественном состоянии после осушения используются в качестве сельскохозяйственных угодий, для повышения продуктивности лесов, торфоразработок — одним словом, приобретают значительную роль в хозяйственном и социальном отношении. Так, в Финляндии площадь торфяников, в основном осушенных для повышения продуктивности лесного хозяйства, в конце 1975 г. составила 4,5 млн. га, а в 1985 г. увеличится на 3 млн. га, что в общей сложности составит 25% территории этой страны (Mustonen, 1976).

В нашей стране болота осушаются уже давно, но их роль как гидрологического фактора в конце прошлого — начале текущего столетия стала предметом научной дискуссии. Высказывались две противоположные точки зрения. Одни считали, что осушение болот влияет положительно на водный режим рек, другие, исходя из предпосылки о том, что болота являются источником питания рек, высказывали предположение об отрицательной гидрологической роли осушения. Тогда, однако, не было известно, что сток воды с болот мал и они не играют большой роли в питании рек.

Для обоснованного решения преобразующей гидрологической роли этого фактора около века тому назад не было достаточных данных и отсутствовала теория образования и режима болот. Начало изучению болот было положено 50 лет тому назад, когда А. Д. Дубах начал исследования в Белоруссии и в 1936 г. опубликовал первые их результаты и выводы (Дубах, 1944). Большая роль в проведении весьма обязательных исследований гидрологии болот принадлежит К. Е. Иванову и его школе (Иванов, 1953, 1975; Романов, 1961). Много сделала в проведении экспериментальных исследований естественных и осушенных болот В. Ф. Шебеко (1970).

Здесь следует коснуться лишь одного методологического вопроса, который не утратил своего значения и в настоящее время. Целый ряд противоречивых выводов о гидрологическом влиянии осушения болот порожден чисто эмпирическими подходами к решению этой задачи без достаточных попыток обосновать их теорией. Такое положение, конечно, тормозило развитие обоснованных представлений по этой проблеме. В последние десятилетия выводы на чисто эмпирической основе стали явлением более редким, что несомненно свидетельствует о прогрессе метода К. Е. Иванова. В его статье проанализированы вопросы естественной и антропогенной (осушение) роли болот и заболоченных земель (Иванов и др., 1973).

Болота и заболоченные земли — сложное образование, зависящее от большого числа естественных условий: зональных закономерностей, геологического строения, рельефа, водного питания болота и степени его естественной дренированности. Как известно, болота делятся на два основных типа — верховые и низовые. Болота верховые по ряду причин в основном формируются на склонах и даже водораздельных участках, вне зависимости от речного сто-

ка и его разливов. Водное питание этих болот происходит за счет атмосферных осадков, практически неминерализованных, благодаря чему развиваются разновидности мхов, особенно сфагновых. Основа таких болот — торф, сформированный из отмершего мха. Развитие другого типа болот — низовых — связано с разливами рек, с продолжительным застоем воды и переувлажнением почвы. В низовых болотах торфяная толща образуется главным образом из отмерших влаголюбивых трав. Заболоченные почвы отделяют от болот по мощности торфа: условным признаком для них служит слой торфа до 0,5 м.

Почти каждое болото одного типа обладает некоторыми отличительными гидрологическими свойствами, но вместе с тем имеются и общие черты. Они положены в основу настоящего анализа, который ограничивается изучением влияния осушения на речной сток и испарение.

Прежде всего этот вопрос целесообразно решать для отдельной системы болот с последующим переходом на речной бассейн. При этом следует учитывать, что характер таких влияний зависит от характера проведенных осушительных мероприятий. Иногда осушительные работы в недостаточной мере учитывают свойства данной болотной системы и поэтому в отдельных случаях приводят к последствиям, которых не ждали: местность нередко переосушивается, иногда недоосушивается. Но второй вариант предпочтительнее первого, так как в большей степени поддается исправлениям. Что касается переосушения, то при использовании осушенной территории для сельского хозяйства наиболее целесообразный путь устранения этого неблагоприятного явления заключается в создании мелиоративной системы двойного действия, в которой с осушением как основным процессом сочетается орошение в периоды недостатка почвенной влаги. При оценке гидрологического влияния осушения за основу принималась правильно созданная осушительная система, что на практике бывает наиболее часто.

Сейчас уже имеется большое количество фактов, свидетельствующих о том, что испарение с естественных болот и заболоченных земель выше, чем после осушения. Такая направленность преобразований хорошо согласуется с теорией. Действительно, на естественном болоте уровень болотных вод находится ближе к поверхности, чем на осушенном. По данным крупного специалиста по преобразованию болот Финляндии С. Е. Мустонена (Mustonen, 1976), уровень осушенных для сельского хозяйства болот понижается на 1—1,5 м, а при дренаже заболоченных лесов — на 0,3—0,5 м. Вместе с тем данные об изменениях испарения с болот под влиянием осушения носят противоречивый характер. Например, по данным К. Т. Хоммика (1976), испарение с осушенных болот возрастает в многоводные годы и снижается в маловодные. Однако физическая сторона такого результата исследований остается неясной, тем более что этот вывод относится к болотам разного типа. Более вероятно, что осушение приводит к ослаблению испарения,

а в связи с таким процессом — к некоторому усилению стока с болот. Но размеры таких изменений в сравнительно небольшой мере влияют на сток реки, в бассейне которой проведены осушительные работы, и чаще всего они непродолжительны.

Поверхностный сток с естественного болота мал и возрастает после осушения. Этот процесс происходит под влиянием дренажной сети, несколько увеличивающей и ускоряющей поверхностный сток с болота. В первые годы после осушения такой процесс усиливается за счет сработки части вековых запасов воды естественного болота. При интенсивном осушении больших площадей болот может заметно увеличиться речной сток. Но при постепенном проведении осушительных работ этот процесс заметно не сказывается на водности рек. Вместе с тем осушенное болото замедляет питание водой более глубоких подземных горизонтов, поэтому сток рек, дренирующих их в естественных условиях, в меженные периоды после осушения болот несколько понижается.

Сработка вековых запасов воды торфяных болот в результате осушения заметна при распространении мочажин и озер, но при их отсутствии этот процесс не может заметно повлиять на речной сток, в связи с тем что торф способен удерживать 80—90% воды и после осушения. Просадка поверхности болот лишь частично связана с уменьшением их обводненности после осушения. В значительной мере она происходит в результате разложения торфа, которое протекает интенсивно при использовании осушенных болот под сельскохозяйственные угодья, требующие регулярной распашки. Такое явление нежелательно, так как в результате просадок уменьшается глубина дренажных канав, а при закрытом дренаже — глубина, на которой заложены керамические трубы. На осушенных территориях следует отдавать предпочтение культивации многолетних трав, не требующих частой распашки. При развитии на осушенных землях мощного травостоя расход воды на транспирацию возрастает и усиливает суммарное испарение.

Ряд наблюдений показывает, что интенсивное сельскохозяйственное использование таких земель в какой-то мере нивелирует влияние осушения на речной сток. В избыточно увлажненных районах рост транспирации не всегда происходит за счет той почвенной влаги, которая участвует в питании рек. Размеры этого явления ограниченны, поэтому рост транспирации не всегда вызывает уменьшение речного стока.

При оценке гидрологической роли осушения болот следует иметь в виду мелиоративные системы двойного действия, которые получают все большее распространение и позволяют поддерживать оптимальную влажность почвы, необходимую для обеспечения наиболее высокой биологической продуктивности угодья. Здесь мы не касаемся другого важного приема поддержания высокой продуктивности почвы — создания оптимальных условий питания растений, особенно важных для малоурожайных торфяных почв. В этом деле большую роль играют минеральные и органические удобре-

ния, которые способствуют формированию мощного травостоя и тем самым, усиливая транспирацию, в какой-то мере влияют на водный баланс почвы. Мелиоративные системы двойного действия требуют в засушливые периоды отъема воды из рек, что, разумеется, оказывает прямое влияние на речной сток. При использовании для орошения подземных вод такое влияние будет сказываться на речном стоке лишь в тех случаях, когда водозабор осуществляется из подземных горизонтов, дренируемых реками.

Следует учесть еще одну закономерность влияния осушения болот на водный баланс территории и речной сток. Количественные изменения элементов водного баланса и стока, даже направленность этих изменений не остаются постоянными после осушения. В первой фазе речной сток увеличивается за счет сработки вековых влагозапасов болот и уменьшения испарения, о чем было сказано выше, но по истечении некоторого, по-видимому, не очень продолжительного времени сработка прекращается, поэтому речной сток во второй фазе несколько уменьшается; в третьей фазе, после культивации осушенной территории и повышения ее биологической продуктивности, испарение возрастает и сток снова уменьшается. Следует подчеркнуть, что такое соотношение испарения и стока в третьей фазе может складываться только при высокой продуктивности фитомассы за счет роста транспирации. Если же в этой фазе применяются мелиоративные системы двойного действия, то производится непосредственный отъем воды из рек на орошение. При использовании для этой цели подземных вод процесс уменьшения их притока в реки также может снизить речной сток. Трехфазовый ритм водного режима осушенного болота создает волну, продолжительность которой может достигать нескольких лет. Так, цитированный выше автор (Mustonen, 1976) отмечает, что сработка вековых запасов осушенного болота продолжается в течение ряда лет.

Что касается культивации осушенных почв, то и этот процесс требует нескольких лет. Общая продолжительность всех трех фаз может, вероятно, достигать 16 лет. Осушение болот более или менее большой территории производится в течение многих лет, иногда десятилетиями. Таким образом, фазовые изменения водного режима осушенных болот последовательно накладываются друг на друга со сдвигом, соответствующим постепенному осушению болотных массивов в бассейне данной реки. В таких условиях, если осушение в отдельные годы производится приблизительно на равных площадях, совмещение фаз в конце концов приводит к установившемуся режиму водного баланса территории и речного стока.

Расчеты преобразований водного баланса и речного стока под влиянием осушения болот и заболоченных земель, произведенные Р. А. Юревич по изложенной схеме для территории Белорусской ССР в условиях установившегося режима в будущем, привели к следующим приближенным результатам:

Изменения полного речного стока (R)	—3,5 мм,
В том числе:	
поверхностного (S)	—2,0 мм,
подземного стока в реки (U)	—1,5 мм,
Изменения валового увлажнения территории (W)	+2,0 мм,
Изменения испарения (E)	+3,5 мм

Эти расчеты относятся ко всей территории республики. Для отдельных заболоченных территорий, например для Полесья, они будут, конечно, выше. Для болот эти цифры возрастают в 5 раз.

Необходимыми условиями для достижения такой направленности преобразований являются: поддержание осушительных систем в хорошем рабочем состоянии, использование мелиоративных систем двойного действия, высокая биологическая продуктивность мелиорированных земель. Нарушение одного из этих условий, несомненно, ослабляет действие на гидрологический режим всей системы мероприятий.

Глава 9
ПОЧВА — ПОСРЕДНИК МЕЖДУ АТМОСФЕРОЙ И ГИДРОСФЕРОЙ

1. Гидрологическая роль почвы

На протяжении многих десятилетий гидрология развивалась на основе климатических факторов. Это было вполне закономерно, поскольку климат и его элементы являются непосредственной, ярко выраженной причиной формирования водного баланса и его элементов, в частности речного стока. К изучению стока было привлечено особенно пристальное внимание науки и практики во второй половине прошлого столетия. Однако данных непосредственных измерений стока было недостаточно, поэтому появились методы его расчетов по атмосферным осадкам. Для того чтобы учесть испарение как фактор расходования осадков, в этих методах учитывалась третья переменная в зависимостях — в виде, например, температуры воздуха, дефицита влажности воздуха и тому подобных метеорологических элементов. Эти методы давали в общем приемлемые результаты.

Как ни парадоксально, но с ростом гидрологической информации стал падать интерес к теории гидрологической науки, к расчетным методам на основе метеорологических факторов, которые таили в себе потенциальные возможности открытия других, кроме климата, гидрологических факторов: почвы, литологии, растительности, рельефа, антропогенных гидрологических влияний, играющих, как теперь известно, большую роль в формировании водного баланса и речного стока. Одновременно и чаще независимо от гидрологической науки развивалось почвенное направление в гидрологии, научной роли которой посвящена настоящая глава.

Насколько мне известно, почвенный гидрологический фактор впервые был обнаружен при разработке метода прогноза паводков Сены известным французским гидрологом E. Belgrand (1869). Он установил, что зависимости паводочного стока от осадков для разных притоков Сены, водосборы которых характеризуются различными почвами, отличаются своими особенностями. Это был один из первых опытов применения научно обоснованного метода гидрологических прогнозов, и весьма симптоматично, что в нем фигурировала почва как гидрологический фактор.

Несколько позже возникла дискуссия, центром которой был почвенный фактор в гидрологии. Поводом для дискуссии явилось выступление в печати австрийского инженера Векса (Wex, 1873) об антропогенных изменениях водности рек Центральной Европы. Сравнивая уровни воды на реках Рейне, Эльбе, Одере, Висле и Дунае, автор пришел к выводу, что во время половодья второй половины многолетнего периода наблюдений уровни воды повысились, а в межень понизились по сравнению с первой половиной этого периода; средние годовые уровни также уменьшились. Приведу в качестве примера результаты для Эльбы у Магдебурга: в 1828—1869 гг. по сравнению с 1728—1827 гг. средние уровни половодья увеличились на 7 см, для межени они уменьшились на 70 см, а среднегодовые понизились на 75 см. Причина таких изменений водности, как считал автор, заключается в уничтожении лесов, обработке почвы и в других видах хозяйственного воздействия на водный режим рек. Для такого вывода было, конечно, недостаточно учитывать уровни воды, которые могли зависеть не только от водности рек, но и от деформации русел. Но в то время данных о речном стоке было очень мало.

Работа Г. Векса была рассмотрена Петербургской, Венской и Копенгагенской академиями наук. В Петербурге для этой цели создали специальную комиссию, в которую входили такие авторитетные ученые, как Г. Гельмерсен и Г. Вильд. Комиссия пришла к выводу, что перераспределение водности рек во времени (по сезонам) вполне возможно в связи с уничтожением лесов и осушением болот, которые обоснованно (особенно для лесов) считались регуляторами влаги. Это могло явиться причиной уменьшения водности в период межени и увеличения ее в половодье. Что же касается оценки изменений средней годовой водности, то, поскольку исходили из ошибочной предпосылки о зависимости этого показателя режима рек только от количества атмосферных осадков, было признано, что такое изменение речного стока могло произойти при условии уменьшения атмосферных осадков. Поскольку же явных изменений осадков не было обнаружено, то отрицалось и изменение водности рек (Гельмерсен, Вильд, 1876).

Эта неверная предпосылка господствовала еще много лет. Через четверть века после выводов указанной комиссии известный гидролог Е. В. Оппоков отмечал, что «перед атмосферными осадками, питающими реки, все другие факторы, за исключением температуры, представляются более чем второстепенными» (Оппоков, 1900, с. 75). В итоге этот автор пришел к выводу, что ожидать обмеления рек и искать для него доказательства «представляло бы бесцельный труд» (там же).

Климатологическая концепция в гидрологии, под которой понимается преобладающее влияние метеорологических и климатологических факторов, при недооценке других факторов, и особенно почвенных, еще долго господствовала в инженерной гидрологии и частично не утратила своего значения и в наши дни, хотя после выхода в свет монографии «Человек и воды» (Львович, 1963), в основном посвященной выявлению и обоснованию гидрологической роли почвы, стала менее распространенной.

Задолго до появления работы Е. В. Оппокова, в которой не придавалось должного значения почве, вышли в свет замечательные произведения В. В. Докучаева «Наши степи прежде и теперь» (1892) и А. И. Воейкова «Воздействие человека на природу» (1894), в которых показана огромная роль почвы как гидрологического фактора, ярко проявляющаяся при различных антропогенных воздействиях на почву. В этих трудах было показано, что не изменение климата местности, а изменение характера почвы послужило основной причиной антропогенных гидрологических изменений. Это было также подтверждено в работах агронома А. А. Измаильского (1893) и почвоведов П. А. Костычева (1893), Г. Н. Высоцкого (1960) и др.

Крупной вехой в развитии правильных представлений о гидрологических факторах были интересные работы В. Г. Глушкова (переизданные в 1961 г.), послужившие началом ландшафтного, или комплексного, направления в гидрологии. Предложенное В. Г. Глушковым географо-гидрологическое направление в науке рассматривало гидрологические явления и процессы как результат совокупного действия всех элементов ландшафта. Тем не менее в 30-х годах текущего столетия еще не сложилось вполне ясное представление о гидрологической роли леса. Это было связано с тем, что в исследованиях природных факторов почве не придавалось ведущего значения. Считалось, что комплексный подход должен охватить все факторы, а это мешало выделить главнейшие из них. Однако в это же время стали создаваться стоковые, по существу балансовые, станции — Тосненская, Валдайская, Подмосковная и др.

В конце 40-х—начале 50-х годов стимулом для развития почвенного направления в гидрологии стал план преобразования природы (полезащитное лесоразведение) в степных и лесостепных районах, повышения урожаев и обеспечения их устойчивости. В связи с выяснением влияния систем лесных полос на природу были развернуты экспериментальные исследования, в результате которых впервые были получены довольно массовые данные по экспериментальным исследованиям гидрологической роли почвы. Они позволили получить не только качественные, но и количест-

венные представления о почвенном факторе в гидрологии. Вышли в свет десятки работ этого направления, среди которых кроме упомянутой выше монографии автора монографии С. В. Басса (1963), Л. И. Субботина (1966, 1978), Г. В. Назарова (1970, 1981), А. М. Грина (1965), Н. И. Коронкевича (1973) и др.

Не претендующий на полноту краткий обзор развития представлений о роли почвы в гидрологии показывает, что до тех пор, пока эта проблема не была фундаментально решена, в гидрологии складывался недостаточно полный подход к раскрытию генезиса гидрологических явлений и процессов.

Рассмотрим *теоретические аспекты* этой проблемы. Общеизвестно, что колебания гидрологического режима, например, стока чаще всего не следуют строго за метеорологическими факторами. Это хорошо обнаруживается при сравнении аналогичного хода явлений для речных бассейнов, расположенных на большом расстоянии один от другого, или для смежных районов (бассейнов) с существенно различными физическими свойствами почвы.

Почва — среда, в которой формируются элементы водного баланса. Без участия почвы, ее фильтрационных и водоудерживающих свойств гидрологические явления следовали бы климатическим условиям. Таким образом, *почва* — своего рода *посредник между климатическими и гидрологическими явлениями.*

В практике гидрологических прогнозов это хорошо известно, и поэтому прогнозисты внимательно следят за влажностью почвы или ее промерзанием перед паводками. Для одних районов эти факторы имеют большее, для других меньшее значение, но специалист по гидрологическим прогнозам редко оставит их без внимания. Здесь речь идет о временно́м изменении физических свойств почвы, но они также меняются в пространстве.

Обобщение результатов полевых воднобалансовых экспериментальных исследований весеннего поверхностного стока лесной зоны европейской части СССР показало, что коэффициенты стока в зависимости от угодий и разного механического состава подзолистых почв — песчаных, супесчаных и глинистых — на лугу изменяются в пределах 2,5 раза, на пашне — в пределах 4 раз, а в лесу — даже в пределах 20 раз (Басс, 1963). Следует подчеркнуть, что эти данные относятся к району с более или менее однородными климатическими условиями, но в его пределах в зависимости от характера почв коэффициенты поверхностного стока колеблются от 0 в лесу на песчаных почвах до 0,5—0,6 на лугу на суглинистых. Это характеризует гидрологическую (воднобалансовую) роль почвы почти в чистом виде.

На инфильтрационные свойства почвы, как показали результаты исследований Г. В. Назарова (1970), влияют десятки различных причин. Среди них генетические разности почвы, содержание гумуса, степень солонцеватости, количество водопрочных агрегатов, объемный вес, степень смытости почв, характер и густота растительного покрова и многие другие. К этому необходимо добавить

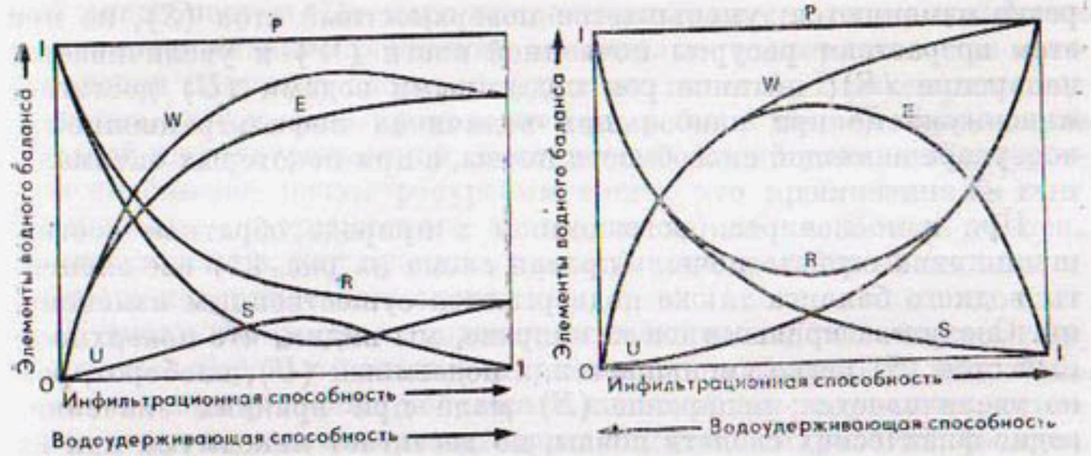


Рис. 21. Теоретические зависимости водного баланса от свойств почвы:
P — атмосферные осадки; *R* — полный речной сток; *U* — подземный сток в реки; *S* — поверхностный (паводочный) сток; *W* — валовое увлажнение территории; *E* — испарение

такие временны́е факторы, как влажность почвы, интенсивность снеготаяния и дождя, промерзаемость почвы и др.

Эмпирические выводы о влиянии почвы на элементы гидрологического режима подтверждены теоретическими исследованиями. Об этом свидетельствуют разработанные автором (1963) теоретические кривые зависимости элементов водного баланса от водно-физических свойств почвы — ее инфильтрационной и водоудерживающей способности. Оба этих свойства влияют на элементы водного баланса не независимо друг от друга, а совокупно (рис. 21).

Левый график показывает, как изменяются элементы водного баланса в том случае, когда инфильтрационная и водоудерживающая способность параллельно возрастают или уменьшаются. На правом графике та же задача решается при более частом обратном соотношении этих же свойств почвы, т. е. когда при росте инфильтрационной способности уменьшается водоудерживающая или когда при уменьшении первого свойства почвы увеличивается второе.

Проследим, как изменяются элементы водного баланса в зависимости от водно-физических свойств почвы. Сначала рассмотрим случай, когда инфильтрационная и водоудерживающая способности почвы изменяются параллельно. При очень малой инфильтрационной и водоудерживающей способности основная масса осадков (*P*) расходуется на поверхностный сток (*S*); отсутствует или очень незначителен источник испарения — почвенная влага (*W*), поэтому нечему испаряться (*E*); питание подземных вод (*U*) очень слабое; полный речной сток (*R*) почти достигает значений атмосферных осадков, но он состоит в основном из поверхностных (паводочных) вод (*S*), а в периоды между паводками реки пересыхают, так как получают скудное питание за счет подземных вод. При большой инфильтрационной и водоудерживающей способности значения и соотношения всех элементов водного баланса

резко изменяются: уменьшается поверхностный сток (S), но при этом возрастают ресурсы почвенной влаги (W) и увеличивается испарение (E); питание рек подземными водами (U) достигает максимума не при наибольших величинах инфильтрационной и водоудерживающей способности почвы, а при некоторых оптимальных их значениях.

При наиболее распространенном в природе обратном соотношении этих свойств почвы (правая схема на рис. 21) все элементы водного баланса также подвергаются существенным изменениям. Следуя за кривыми слева направо, мы видим, что поверхностный сток (S) резко уменьшается, а подземный (U), наоборот, резко увеличивается; испарение (E) мало при крайних значениях водно-физических свойств почвы, но достигает максимума при их оптимальных (средних) значениях; полный речной сток (R) изменяется в обратной зависимости: он велик при крайних значениях водно-физических свойств почвы и снижается до минимума при средних значениях.

Следует подчеркнуть, что все эти изменения элементов водного баланса рассматриваются при одинаковых атмосферных осадках (P). Это позволяет выявить воднобалансовую роль почвы в чистом виде. Как мы видим, водный баланс и его элементы изменяются в весьма больших пределах не только под влиянием атмосферных осадков, но и в результате воздействия на них почвы.

Теоретические зависимости, приведенные на рис. 21, служат также ключом к пониманию *антропогенных* изменений водного баланса. Односторонние систематические изменения климата как естественного происхождения, так и под влиянием хозяйственной деятельности происходят медленно и преимущественно в ограниченных размерах, которые не могут существенно повлиять на водный баланс и сток. Вместе с тем их антропогенные изменения значительны и ограничиваются сравнительно короткими сроками. Эти влияния связаны с воздействиями на почву.

Действительно, в прошлом, в основном за счет уничтожения лесов, в Европе росла площадь пахотных земель. Но в течение веков пахотные земли обрабатывались недостаточно совершенно. Следствием явилось ухудшение в сравнении с лесами инфильтрационных свойств почвы, а по этой причине — увеличение поверхностного (паводочного) стока и ухудшение условий питания подземных вод. Но по мере развития агротехники, механизации обработки почвы и применения удобрений культурные растения постепенно стали получать больше влаги и «пищи», а это повлекло за собой повышение урожаев, развитие мощной корневой системы растений и повышение инфильтрационной способности почв.

В Советском Союзе рубежом для распространения этих процессов послужила зяблевая (осенняя) пахота, которая до 20-х годов текущего столетия почти не применялась. Тогда преобладала весенняя пахота и по этой причине весеннее снеготаяние происходило на уплотненной почве, обладающей слабой инфильтрационной способностью. По мере коллективизации сельского хозяйства и развития механизированного земледелия повсеместное распространение получила зяблевая (осенняя пахота). Благодаря этому весеннее снеготаяние происходит при рыхлой почве, обладающей высокой инфильтрационной способностью. Следствием явилось лучшее снабжение почвы ресурсами влаги, что происходит за счет уменьшения поверхностного (паводочного) стока. Кстати говоря, по этой причине, как правило, стала уменьшаться эрозионная способность поверхностного стока.

К числу интересных теоретических вопросов, связанных с гидрологической ролью почвы и открывающих возможности использования их при решении некоторых новых задач гидрологии, относятся вопросы закономерности эргодичности в гидрологии, объединяющие временну́ю и пространственную динамику процессов и явлений. Термин «эргодичность» применен по аналогии с его значением в физике.

Уже давно обращали на себя внимание аналогия, иногда и совпадение временны́х и пространственных характеристик в природе. Такая закономерность была подмечена Г. П. Калининым (1968), но выявил он ее по статистическим параметрам кривых распределения элементов гидрологического режима. Это положение хорошо аргументировано указанным автором и иллюстрируется примерами. Однако, по моему мнению, это не исключает закономерностей эргодичности в отношении общности колебаний во времени и пространственного распределения, относящихся непосредственно к наблюдаемым элементам гидрологического режима или, во всяком случае, к их обобщенным значениям.

Примером могут служить закономерности эргодичности, установленные эмпирически для подземного стока р. Дон у Калача, и испарения (осадки минус сток). Данные многолетнего ряда наблюдений сравнены с данными, полученными в пределах бассейна этой реки по карте подземного стока и испарения. Временны́е и пространственные значения элементов водного баланса от валового увлажнения территории легли на одну структурную зависимость (Lvovitch, 1979). Это говорит о единстве пространственно-временны́х структурных зависимостей. Более того, структурные зависимости этих двух категорий применялись для решения практических задач: временны́е — для оценки антропогенных изменений стока под влиянием земледелия, пространственные — для установления зональных структурных зависимостей по европейской части СССР.

Этот результат требует, конечно, теоретического обоснования, которое в настоящее время мы можем высказать в виде гипотезы. Дело заключается в том, что в формировании (генезисе) временны́х колебаний и в пространственных распределениях элементов водного баланса участвуют одни и те же природные факторы. Если говорить о пространстве, то в каждом из речных бассейнов данной зоны водный баланс формировался в течение длительного времени под влиянием комплекса природных факторов. Результаты палео-

географических исследований показали, что продолжительность этого периода ограничивается приблизительно второй половиной — последней третью голоцена, т. е. по крайней мере тремя-четырьмя тысячелетиями, в течение которых границы географических зон в Европе были сравнительно устойчивыми.

Природные факторы, под влиянием которых в течение определенного периода времени сложился водный баланс на данном речном бассейне, действуют и в современную эпоху. Это относится и к гидрометеорологическим (гидроклиматическим) факторам, время наступления которых в какой-то мере носит вероятностный характер и от сочетания которых в течение длительного времени зависят характер и количественные показатели водного баланса. Весьма возможна повторяемость гидроклиматических факторов и в современную эпоху. Именно такое соотношение — основная причина схожести пространственных и временны́х закономерностей. Такое сходство усиливается временны́ми процессами, протекающими в почве, которая обладает, как говорят почвоведы, большой «памятью». Действительно, процессы почвообразования протекают веками и современная почва, отражая те процессы, которые были свойственны почве в отдаленное время, как бы «запоминает» свою историю. Отсюда пространственно-временна́я закономерность влияния почвы на водный баланс носит более направленный характер и в меньшей мере зависит от типичного вероятностного значения гидроклиматических факторов.

Такова в общих чертах гипотеза происхождения эргодичности в гидрологии, которая, конечно, нуждается в дальнейшем развитии. Это же относится к накоплению эмпирических фактов, свидетельствующих о наличии эргодичности.

Сказанное вкратце характеризует развитие представлений о гидрологической роли почвы. Использование второго по своему значению, после климатического, фактора — почвенного — обогатило гидрологическую науку. Трудно точно определить значение этого фактора в развитии науки. Однако возможности гидрологии с его появлением весьма существенно возросли. Это утверждение основывается на опыте и учитывает перспективы развития почвенного направления в гидрологии. Несомненно, еще многое можно сделать в развитии представлений о теоретических аспектах гидрологической роли почвы, а также в решении практических задач.

2. Влияние неорошаемого земледелия на водный баланс

В динамике режима рек и речного стока следует различать *колебания* циклического характера, вызываемые преимущественно климатическими и другими естественными физико-географическими факторами, и *изменения* систематического направленного характера, происходящие главным образом под влиянием мероприятий земледелия и других способов воздействия на почву, осуществляемых в бассейне реки.

Внутривековые колебания элементов гидрологического режима происходят сравнительно быстро, и их амплитуда обычно бывает значительной. Они характеризуются сменой многоводных и маловодных циклов. Изменения, вызванные хозяйственной деятельностью, происходят гораздо медленнее, и их диапазон меньше. Они носят односторонний характер в течение более или менее длительных периодов времени; знак их меняется под влиянием крупных событий в хозяйственной жизни, например при смене угодий, принципиально новых приемах земледелия или строительства городов, дорог и промышленных предприятий. Направленность и интенсивность изменений находятся в зависимости от природных условий, но в основном определяются социальными условиями, уровнем хозяйственного развития.

При быстром осуществлении хозяйственных мероприятий изменения речного стока часто приобретают скачкообразный характер. Примером могут служить изменения формирования стока рек Северного Казахстана и Западной Сибири под влиянием распашки огромных пространств целинных и залежных земель или изменения режима рек старопахотных степных районов европейской части СССР в результате осуществления мероприятий по повышению продуктивности земледелия, среди которых большая роль принадлежит зяблевой пахоте и полезащитному лесоразведению.

Таким образом, естественные колебания и антропогенные изменения представляют собой две тесно связанные между собой составляющие одного процесса — динамики гидрологического режима во времени. Изменения антропогенного происхождения и колебания климатического происхождения сочетаются в едином процессе. Чаще всего антропогенные изменения заметно не нарушают циклических колебаний гидрологических явлений, но меняют их средний уровень. Изменения среднего уровня вуалируются циклическими колебаниями, поэтому, как правило, их не удается выявить в результате внешнего ознакомления с динамикой речного стока за многолетний период. Для этой цели требуется применение тонкого комплексного анализа, элиминирующего колебания климатического происхождения.

В основе количественной оценки изменений водного баланса под влиянием земледелия лежит полевой эксперимент. От метода постановки эксперимента зависят получаемые выводы. Поэтому необходимо ясно представлять цели эксперимента и всю цепь природных процессов, которые происходят в естественных условиях и в результате антропогенных воздействий на почву. Большое значение имеет правильный выбор экспериментальных объектов: они должны быть репрезентативными в пространстве и во времени и отражать современную агротехнику. Для получения надежных результатов, основанных на сравнении хода процессов, происходящих на двух или более экспериментальных объектах, необходимо исходить из принципа: все факторы схожи, кроме изучаемого. Этот принцип лежит и в основе сельскохозяйственного опытного дела.

Первые экспериментальные исследования водного баланса территории, отчасти и его преобразований автор провел в начале 30-х годов в Курдаргинском районе близ Хабаровска. Тогда были организованы наблюдения за стоком рек, впадающих в озеро Даргу, и за испарением с его поверхности и почвы. На основании этих данных по связи с метеорологическими данными была удлинена продолжительность наблюдений за стоком и получены нормативные показатели для проектирования осушительных систем. Опыт полевых исследований позволил автору совместно с М. А. Великановым составить типовую программу исследований на стоковых стационарах (Великанов и др., 1932). Совместно с А. И. Решетниковым (1945) проводились воднобалансовые исследования на стоковых площадках и логах Валдайской гидрологической станции (1935—1940 гг.). В 1950 г. автор руководил комплексными воднобалансовыми исследованиями и организацией гидрометеорологической обсерватории в Каменной Степи на участке полезащитных лесонасаждений, заложенных здесь в 90-х годах прошлого столетия В. В. Докучаевым. Трехлетние экспериментальные исследования гидрологической роли зяблевой пахоты в Ершовском районе Саратовской области вместе с ранее проведенными исследованиями И. А. Кузника (1958) в том же районе позволили получить 10-летний ряд наблюдений, раскрывающий воднобалансовые закономерности зяблевой пахоты в условиях степной зоны.

Данные этих экспериментов показывают, что почти при одинаковых снегозапасах и осадках за время снеготаяния средние за период наблюдений коэффициенты стока с зяби в 5 раз меньше, чем со стерни и залежи, которые преобладали прежде (приблизительно до 30-х годов) на сельскохозяйственных угодьях.

В Курской области Институтом географии АН СССР в 1962 г. организован воднобалансовый стационар, уникальный по разнообразию экспериментальных объектов. Здесь представлены целинные угодья (степь, лес) Центральночерноземного заповедника, характеризующие условия водного баланса отдаленного прошлого, когда пахотные земли еще не получили большого распространения в лесостепной зоне, пахотные земли хозяйственного комплекса Курской опытной сельскохозяйственной станции и территория с экстремальными условиями по влиянию почвы на водный баланс в Курске (с 1975 г.). Результаты этих многолетних исследований приведены в главе 10 (таблицы 20 и 21). Прежде всего обращает на себя внимание полное отсутствие весеннего и дождевого стока за 20-летний период наблюдений на целине. Причина этого явления и анализ эволюции водного баланса лесостепной зоны за истекшее тысячелетие будут охарактеризованы ниже.

Интересно также, что не очень интенсивное использование целинной степи под пастбище и сенокос вносит принципиальные изменения в водный баланс. В результате уменьшения инфильтрационной способности почвы (на пастбище под влиянием вытаптывания почвы и поедания растительности, а на сенокосе — скашивания травостоя и уплотнения почвы трактором и сенокосилкой) поверхностный сток увеличивается до 26 мм при коэффициентах весеннего стока 0,22—0,24 и годового 0,04—0,05, что соответствует показателям стока на зяби и приблизительно в 2 раза меньше, чем с озимых посевов, которые при весеннем снеготаянии влияют на водный баланс примерно так же, как стерня.

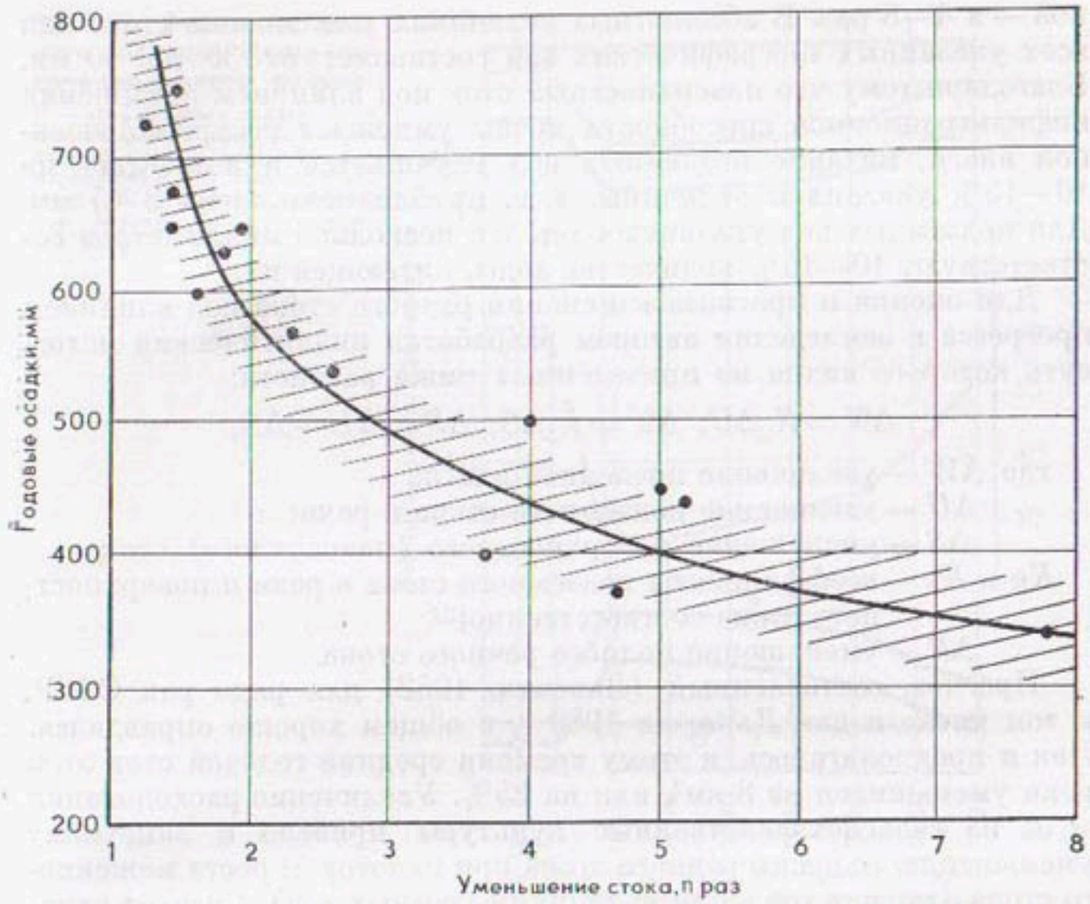


Рис. 22. **Уменьшение стока под влиянием зяблевой пахоты по данным экспериментальных наблюдений**

В европейской части СССР работает 15 стационаров, на которых изучается воднобалансовая роль зяблевой пахоты. Итог этих исследований — зависимость, показанная на рис. 22. Некоторое рассеяние точек является следствием различий в агротехнике и в методах воднобалансовых исследований, особенно в результате недостаточно тщательного выбора экспериментальных объектов. Вместе с тем, учитывая указанные недочеты, зависимость следует признать вполне достоверной. Во всяком случае, она дает достоверные результаты для восточных районов европейской части СССР. Зависимость свидетельствует о высокой гидрологической эффективности зяблевой (осенней) пахоты. Переход на эту систему обработки почв способствовал повышению ее инфильтрационной способности и уменьшению весеннего поверхностного стока с полей в лесной зоне в 1,5—2 раза, в лесостепной — в 2—4 раза, в степ-

ной — в 4—8 раз. В абсолютных величинах уменьшение стока для всех указанных географических зон составляет от 30 до 40 мм. Благодаря тому что поверхностный сток под влиянием повышения инфильтрационной способности почвы умножает ресурсы почвенной влаги, питание подземных вод улучшается и возрастает на 10—15% указанной величины, т. е. приблизительно на 3—5 мм. Для подземных вод указанных зон эти несколько миллиметров соответствуют 10—15% количества воды, питающей их.

Для оценки и прогноза изменений речного стока под влиянием прогресса в земледелии автором разработан аналитический метод, суть которого видна из приведенных ниже равенств:

$$\Delta W = K_U \Delta U;\ \Delta W = K_S \Delta S;\ \Delta R = \Delta U + \Delta S,$$

где ΔW — увеличение почвенной влаги;
ΔU — увеличение подземного стока в реки;
ΔS — уменьшение поверхностного (паводочного) стока;
K_U и K_S — коэффициенты подземного стока в реки и поверхностного стока соответственно;
ΔR — уменьшение полного речного стока.

Прогноз, составленный (Львович, 1952) для ряда рек СССР, в том числе и для Дона, на 1980 г. в общем хорошо оправдался. Как и предполагалось, к этому времени средний годовой сток этой реки уменьшился на 8 км³, или на 25%. Увеличение расходования воды на сельскохозяйственные культуры привело к заметному уменьшению годового речного стока при некотором росте меженного стока (за счет усиления питания подземных вод). Следует отметить, что прогноз, разработанный 30 лет тому назад, исходит из хозяйственных предпосылок, которые были подвергнуты изменениям по ходу их развития. Это прежде всего относится к масштабам развития полезащитных лесонасаждений в степной и лесостепной зонах. Густота лесных полос в целях приспособления размеров полей к условиям механизированной агротехники была принята более низкой, чем проектировалось. Но в большей мере, чем предполагалось по прогнозу, на преобразование водного баланса пахотных угодий повлияли прогрессивные методы земледелия, включая зяблевую пахоту. Кроме того, существенно возрос отбор воды из рек на орошение, который не учитывался в указанном прогнозе.

На рис. 23 приведен график эволюции водного баланса речных бассейнов лесостепной зоны европейской части СССР за тысячелетие. Исходными данными для его построения послужили результаты экспериментальных исследований водного баланса целинной заповедной степи (Грин, 1965), несколько сот гектаров которой сохранено в Центральночерноземном заповеднике. Для построения 30-летней правой части графика использован прогноз до 2000 г. Этот график показывает, что в целинной степи почва обладает весьма высокой инфильтрационной способностью. По этой причине до распашки целинной степи паводки на реках были очень малы, а меженный (междупаводочный) сток был выше современного, осо-

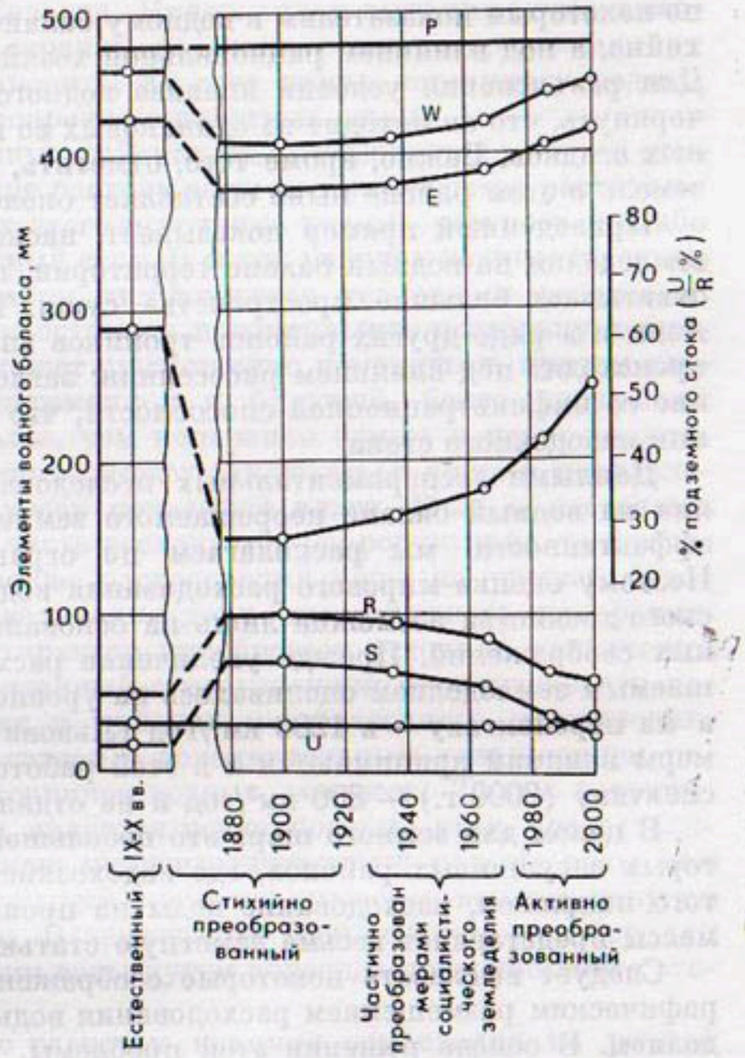


Рис. 23. Эволюция водного баланса Центральночерноземного района:
P — атмосферные осадки; *R* — полный речной сток; *U* — подземный сток в реки; *S* — поверхностный (паводочный) сток; *W* — валовое увлажнение территории; *E* — испарение

бенно высок по сравнению со стоком в конце прошлого столетия — в первой четверти текущего. Другими благоприятными показателями водного баланса в прошлом были более высокий уровень увлажнения почвы и высокий процент подземного стока в реки. До распашки он достигал 65%, после распашки (при низкой продуктивности земледелия) снизился до 30%, а по мере роста продуктивности земледелия стал увеличиваться и в настоящее время составляет около 40%, а по прогнозу на 2000 г. превысит 50%.

Третий характерный показатель многовековой эволюции водного баланса степей — более низкий полный речной сток в прошлом. Это объясняется двумя причинами: бо́льшим увлажнением почвы, а следовательно, более устойчивым источником испарения почвенной влаги, а также продуктивным растительным покровом, на транспирацию с которого расходовалось больше воды, чем при малопродуктивном земледелии после распашки степи. Начиная с 50-х годов в связи с повышением продуктивности земледелия этот процесс изменился, и современный водный баланс становится все более благоприятным и, как видно из сказанного, приближается

по некоторым показателям к водному балансу прошлого, но не стихийно, а под влиянием рациональной хозяйственной деятельности. Для разъяснения условий анализа водного баланса следует подчеркнуть, что он исходит из одинаковых во всех случаях атмосферных осадков. Важно, кроме того, отметить, что площадь пахотных земель в этом районе ныне составляет около 70% территории.

Приведенный пример показывает, насколько велико влияние земледелия на водный баланс территории, причем это воздействие охватывает большие пространства суши. Так, в Юго-Восточной Азии и в ряде других районов тропиков значительные изменения происходят под влиянием рисосеяния: заглеение почвы, уменьшение ее инфильтрационной способности, что сказывается на усилении паводочного стока.

Данными экспериментальных исследований влияния земледелия на водный баланс неорошаемого земледелия, повышения его эффективности мы располагаем по ограниченной территории. Поэтому оценка мирового расходования воды этой отраслью сельского хозяйства возможна лишь на основании общих, приближенных соображений. Прежде увеличение расходования воды неорошаемым земледелием оценивалось на уровне 1965 г. в 500 км³/год, а на перспективу — в 1200 км³/год (Львович, 1974). Близкие размеры влияний принимаются и в этой работе: на ближайшую перспективу (2000 г.) — 800 км³/год и на отдаленную — 1400 км³/год.

В целом для земного шара это небольшой расход, но для некоторых засушливых районов, где водохозяйственный баланс и без того напряжен, расходование воды на производство растительной массы представляет весьма заметную статью водного бюджета.

Следует высказать некоторые соображения, связанные с географическим размещением расходования воды неорошаемым земледелием. В основе решения этой проблемы, как подсказывают результаты расчетов будущего водных ресурсов, должен лежать принцип минимальных затрат воды на единицу растительной массы при достаточно высокой продуктивности пашни. Если речь идет о неорошаемом земледелии, то к наиболее благоприятным условиям для решения проблемы в таком направлении относятся отнюдь не относительно теплые и засушливые районы, где ресурсы почвенной влаги часто бывают недостаточными для оптимального развития и роста культурных растений. В таких условиях невысок и коэффициент полезного действия удобрений, которые эффективны в виде растворов, но почвенной влаги для создания благоприятных условий усвоения растениями удобрений часто не хватает. Вместе с тем в ряде районов зоны избыточного увлажнения умеренного пояса, например в Советском Союзе — в Прибалтийских республиках и Белоруссии, в Псковской, Новгородской, Ленинградской областях и в ряде других районов, тепловые ресурсы вполне достаточны для выращивания зерновых культур. Не случайно Эстонская ССР вышла в нашей стране на одно из первых мест по урожайности зерновых культур. Об этом же говорит и зарубежный

опыт: в Финляндии, Бельгии, Нидерландах выращиваются высокие, в двух последних странах, вероятно, рекордные, урожаи.

Теперь нужно установить, за счет каких источников водных ресурсов увеличится испарение с пахотных земель.

В хорошо увлажненных районах, где наблюдается избыток почвенной влаги, увеличение расхода воды на производство растительной массы идет за счет этого источника водных ресурсов и слабо затрагивает поверхностный сток. В таких районах количество испаряющейся воды в основном лимитируется тепловыми ресурсами. Поскольку они в общем остаются неизменными, постольку и суммарное испарение не может существенно измениться, причем различие испарения с современной и будущей, более урожайной пашни будет тем меньше, чем испарение ближе к испаряемости. В таких условиях различие может заключаться лишь в направлении расходования ресурсов почвенной влаги. Если в настоящее время значительная ее часть расходуется непродуктивно, то в условиях будущего повышение расходования воды на урожай будет происходить за счет увеличения доли продуктивного испарения.

Но совсем другой характер приобретает источник увеличения расходования воды, связанный с повышением продуктивности неорошаемого земледелия в районах недостаточного увлажнения. Здесь рост испарения связан с дополнительным увлажнением полей за счет других источников водных ресурсов. Таким источником, как было сказано, является поверхностный сток, представляющий в засушливой зоне непроизводительную потерю воды для пахотных земель и служащий причиной смыва почвенного покрова и образования оврагов. В земледелии принимается ряд мер для борьбы с этими потерями воды путем перевода поверхностного стока в почвенную влагу.

Несколько работ по расчетам влияния земледелия на речной сток нам известно из зарубежного опыта. Интересные выводы получены по отдельным речным бассейнам Польши (Dubrowin, Roginski, 1954). Урожай влияет на водный баланс в основном через почву, за счет увеличения ее влагозапасов. R. Keller (1970) для ФРГ установил, что испарение на территории страны за период 1931—1960 гг. в результате существенного повышения урожаев увеличилось на 81 мм в сравнении с периодом 1891—1930 гг., а речной сток во втором периоде уменьшился на 56 мм, или на 14%, хотя осадков выпало на 25 мм/год больше, чем в первом.

В заключение следует подчеркнуть, что эти изменения происходят в течение тысячелетий — со времени освоения человеком земледелия. Важно иметь в виду тот факт, что направленность изменений водного баланса современного механизированного высокопродуктивного земледелия носит противоположный характер в сравнении с прошлым. Если водный баланс и режим стока, как правило, ухудшались: валовое увлажнение почвы уменьшалось, паводочный сток возрастал, питание подземных вод уменьшалось, а с ним понижался и меженный речной сток при общем возрастании реч-

ного стока в целом, то теперь все эти изменения происходят в обратном направлении. Этот перелом произошел в результате повышения культуры земледелия, основы которой в СССР были заложены после Великой Октябрьской социалистической революции, и его гидрологическое значение заметно стало ощущаться в 50-х годах.

Другая важная закономерность заключается в том, что в прошлом изменения водного баланса территории и стока рек умеренного пояса происходили почти исключительно под влиянием неорошаемого земледелия и связанного с его развитием сокращения площади лесов. Ныне же этот антропогенный фактор стал утрачивать свое значение в связи с тем, что появились другие. К ним относится прежде всего орошаемое земледелие, получившее большое распространение в степной зоне и постепенно проникающее в увлажненные районы лесной зоны.

В последние десятилетия быстрыми темпами растет водоснабжение городов и промышленности. Достаточно сказать, что в РСФСР городское население возросло до 70% общего населения республики. В каждом городе созданы водопровод и канализация, способствующие росту расходования воды на хозяйственно-бытовые нужды. Существенно возросло промышленное водоснабжение. К этому следует добавить воздействия на режим речного стока гидротехническими средствами, особенно с помощью водохранилищ, а также гидромелиораций. Среди всех этих видов водопользования расход воды неорошаемым земледелием составляет лишь часть. Но из этого факта нельзя делать вывод о второстепенном характере проблемы гидрологических изменений под влиянием агротехники. Она не утратила своего значения, но считаться с ней нужно как с одним из элементов комплекса антропогенных гидрологических преобразований.

Почвенный фактор в ряду антропогенных гидрологических преобразований и изменений играет относительно важную роль, но, кроме того, он имеет большое методологическое значение для гидрологической науки, для понимания процессов формирования круговорота воды и его элементов, т. е. основного предмета, изучаемого этой наукой. Вместе с тем почва, ее инфильтрационные процессы, подвергаемые крупномасштабным антропогенным изменениям, заслуживают большого внимания в связи с изучением гидрологической роли как агротехнических мероприятий, так и полезащитных лесонасаждений, которые по существу относятся к числу агрономических мер, а также лесов.

3. Воднобалансовая роль полезащитных лесонасаждений

Лесные полосы в степной и лесостепной зонах играют существенную роль в повышении урожайности. Внимание к агролесомелиорациям было привлечено после катастрофического недорода 1891 г., охватившего основные земледельческие районы России.

Известный географ, почвовед и, как я считаю, гидролог В. В. Докучаев организовал и возглавил специальную экспедицию, заложившую три опытных полезащитных участка в Каменной Степи, Деркуле, Велико-Анадоле. Это был важный шаг в развитии научно обоснованного полезащитного лесонасаждения. На указанных участках, особенно первом из них, по широкой программе изучался эффект полезащитных лесонасаждений, в частности влияние лесных полос на поверхностный сток и сдувание снега с полей, которые особенно значительны при примитивном земледелии и отсутствии лесных полос и представляют резерв для дополнительного увлажнения почвы.

В 1921 г. постановлением Совета Труда и Обороны для борьбы с засухой было предусмотрено устройство снегосборных лесных полос. По этой программе в степной зоне было создано около 500 тыс. га полезащитных лесонасаждений. Следующим этапом полезащитного лесоразведения явилось постановление Совета Министров СССР и ЦК ВКП(б) от 20 октября 1948 г., во исполнение которого были осуществлены работы по посадке лесных полос общей площадью около 2 млн. га.

В 1950—1951 гг. экспедиция Государственного гидрологического института под руководством автора провела в Каменной Степи комплекс гидрометеорологических экспериментальных исследований, направленных на выяснение механизма действия лесных полос на урожай и усовершенствования на этой основе принципов их размещения. Одна из задач экспедиции заключалась в создании Каменностепной гидрометеорологической обсерватории, которая продолжает работать по настоящее время. Основные результаты этих исследований освещены в выпуске 34 «Трудов Гос. гидрологического института» (1952), а также монографиях автора (Львович, 1963), А. Р. Константинова и Л. Р. Струзера (1974; 1-е изд. — 1965), в сборниках «Сельскохозяйственная эрозия» (1956, 1958). Этой проблеме было посвящено также много журнальных статей и известная коллективная монография (учебное пособие под ред. Н. И. Суса — 1956). В течение нескольких лет комплексные исследования полезащитного лесоразведения проводились межинститутской экспедицией АН СССР. В перечисленных выше публикациях отражена часть результатов исследований, проведенных этой экспедицией. Своеобразным подведением итога послужила интересная монография Д. Л. Арманда о географических подходах к проектированию сети полезащитных лесных полос. Таким образом, постановление партии и правительства явилось стимулом развития методов преобразования природы.

Основная черта преобразования водного баланса под влиянием лесных полос заключается в том, что оно происходит главным образом в результате изменения ветрового режима. Поэтому их иногда называют ветрозащитными, хотя они изменяют и другие элементы климата приземного слоя атмосферы, а также водный баланс территории.

Элементарный процесс влияния отдельных лесных полос на ветровой режим носит чисто местный характер. Так, если полоса (при высоте 10 м) состоит из небольшого числа рядов деревьев и не представляет собой непроницаемого для ветра препятствия, а создается так, чтобы она была ажурной и продуваемой для ветра, то на заветренной стороне скорость ветра уменьшается в 2 раза на 10-кратном расстоянии (т. е. выраженном в высотах деревьев) за полосой и на 25% — на 20-кратном расстоянии. Приблизительно на расстоянии 300 м за полосой при ее высоте 10 м, что довольно характерно для степной зоны, влияние полосы на скорость ветра уже мало заметно. Отсюда был сделан вывод о том, что эффективное влияние лесных полос на микроклимат может быть достигнуто при создании их через каждые 200—250 м. Это относится к продольным, основным полосам, которые, как это представлялось прежде, необходимо создавать поперек преобладающего направления ветра. Поперечные лесные полосы, ограничивающие прямоугольные межполосные поля, считалось возможным размещать на расстоянии 400—500 м, т. е. приблизительно в 2 раза большем, чем между продольными.

Проведенное автором этих строк изучение вопроса о влиянии «розы» вредных для сельского хозяйства суховейных и снегосдувающих ветров показало, что указанный принцип размещения лесных полос в какой-то мере оправдан в междуречье нижнего течения Волги и Дона, где довольно ярко выражено широтное направление таких ветров. Однако в других районах полезащитного лесоразведения на европейской территории СССР преобладающее направление неблагоприятных для сельского хозяйства ветров сколько-нибудь ясно не выражено. В таких условиях нет смысла ориентировать лесные полосы поперек направления ветра. Вместе с тем другое неблагоприятное для сельского хозяйства явление в этих районах — эрозия почвы — требует размещать лесные полосы поперек склонов. Подробнее об этом будет сказано ниже.

Но при размещении лесных полос необходимо учитывать другие их ветрозащитные свойства. К числу таких свойств относится мало учитывавшаяся закономерность замедления скорости ветра при его направленности параллельно основным (продольным) лесным полосам. Так, эксперименты показали, что под влиянием боковой шероховатости лесных полос скорость ветра замедляется на расстоянии до 40—60 м от лесных полос, но под влиянием поперечных полос этот эффект расширяется и на прямоугольной клетке размером 200—250 на 400—500 м при расчете на 10-метровую высоту деревьев скорость ветра на межклеточном пространстве замедляется почти в 2 раза, а при ветре перпендикулярного направления к продольным полосам — почти в 4 раза. При учете изменяющегося в течение года направления неблагоприятных для урожая ветров этот диапазон сужается: в районах с явно выраженным широтным направлением ветра до 57—65% в зависимости от угла набегания ветра, а в районах, где преобладающее

направление ветра выражено слабо, — до 58—62%. Этот вывод служит дополнительным аргументом в пользу того, что размещение эффективных для сельского хозяйства лесных полос следует ориентировать не столько в зависимости от ветра, сколько в зависимости от других неблагоприятных для сельского хозяйства явлений.

Система полезащитных лесных полос, размещенная на площади в несколько квадратных километров и больше, обладает еще одной важной особенностью, которая указанной выше экспедицией изучалась с помощью горизонтального самолетного зондирования на разных высотах над системой лесных полос в Каменной Степи. Интересно, что многочисленные экспериментальные полеты показали, что набегающие на систему лесных полос токи воздуха испытывают заметный подъем. Так, самолеты, планировавшие без управления на высоте 100 м, в среднем, по данным 24 полетов, под влиянием лесных полос поднимались на 56 м. На высоте 300 м подъем в среднем за 26 полетов составил 68 м, а на высотах 500 и 1000 м при нескольких десятках полетов достигал 40—65 м.

Отсеяв недостаточно репрезентативные данные, А. Р. Константинов и Л. Р. Струзер (1974) получили следующие обобщенные результаты о подъеме воздушных масс над Каменностепным участком полезащитного лесоразведения:

Высота, м	100	300	500	1000
Средний подъем воздушных масс, м	92	70	11	0

При больших размерах территории с полезащитными лесными полосами и тем более при сплошном их создании на всей территории степной зоны эффект подъема воздушных масс приобретает установившийся характер и на всем протяжении, вероятно, достигнет не менее 80—100 м.

Таким образом, шероховатость поверхности с размещенными на ней лесными полосами существенно влияет на подъем воздушных масс, а это может сказаться на усилении интенсивности конденсации атмосферной влаги, что даст некоторое увеличение осадков.

Необходимо упомянуть еще об одном ветрозащитном свойстве лесных полос, открытом известным аэрологом М. И. Юдиным (Будыко и др., 1952). Ажурная лесная полоса выполняет роль аэродинамической решетки, под влиянием которой уменьшается интенсивность турбулентного перемешивания воздуха. Так, по наблюдениям А. Р. Константинова, участника упомянутой выше экспедиции в Каменную Степь, сконструировавшего для этой цели специальный прибор, размеры вертикальных вихрей воздуха за ажурной полосой составляют 35% на расстоянии 5-кратной высоты деревьев, а на расстоянии 10-кратной высоты — 60% от их размера до набегания ветра на лесные полосы. Такое влияние лесных полос на структуру ветра играет существенную роль в со-

отношении непродуктивного и продуктивного (транспирация) испарения на межполосном поле.

Совокупное влияние лесных полос на ветер приводит к снижению интенсивности сдувания снега с межполосных полей и накоплению его в пределах самой полосы. При системе лесных полос, занимающих большую территорию, снегозадерживающий эффект на межполосных полях усиливается, а количество снега, накапливающегося в лесной полосе, снижается. Это важное свойство говорит об особом качестве системы лесных полос в сравнении с отдельной полосой, которое необходимо учитывать, поскольку значительная часть экспериментальных исследований изменений гидрометеорологического режима относится к отдельным лесным полосам. Результаты таких экспериментов нельзя распространять на действие системы лесных полос: ветрозащитная эффективность клеток лесных полос, созданных на больших пространствах, выше, чем отдельных.

Снегозадерживающая способность системы лесных полос изучалась в составе Каменностепной экспедиции М. И. Гуревичем (1952). Результаты этих обстоятельных исследований нисколько не устарели и репрезентативны для всей лесостепной зоны, а отчасти и степной.

Иногда считается, что снег, задержанный лесными полосами, наносит ущерб увлажнению полей. Такой взгляд не вполне обоснован, если в лесной полосе накапливается умеренное количество снега, что характерно для лесных полос системы. Выводы же о том, что лесные полосы как бы отнимают у межполосных полей снег, либо не основываются на фактах, либо являются результатом наблюдений на отдельных лесных полосах, снегосборная площадь которых в открытой степи необозрима.

Расчеты же, основанные на многократных наблюдениях, показывают, что за счет сдувания с межполосного поля размером 100 га в лесных полосах десятиметровой ширины задерживается лишь 2 мм снегозапасов, переведенных в слой воды, от снегозапасов всего поля и лишь в лесных полосах шириной 40 м, которые создаются редко, образуются сугробы снега, в которых содержится 3,2 мм снегозапасов защищаемого ими поля. Таким образом, мы видим, что лесные полосы отнимают у межполосных полей снегозапасы в количестве около 3%. Тем не менее при таком «отъеме» снега с межполосных полей даже площадью 100 га под влиянием ветрозащитного действия лесных полос дополнительно повышаются снегозапасы (в пересчете на воду) в среднем для поля на 10 мм, а на 25-гектарном поле — на 20 мм, т. е. польза в 5—10 раз превосходит потери воды. Кроме того, следует подчеркнуть, что дополнительное увлажнение почвы лесных полос за счет снегозадержания не бесполезно. Оно обеспечивает существование лесных полос, которые в степной зоне не могут расти без дополнительной влаги, так как естественных атмосферных осадков здесь, как правило, недостаточно для обеспечения потребностей в воде древесных пород.

В отдельных случаях лесоразведение в степной зоне удавалось без дополнительного питания водой за счет близкого к поверхности земли расположения подземных вод, как, например, в Великоанадолье. Вместе с тем установлено, что воднобалансовая эффективность лесных полос еще больше умножается за счет других процессов. Так, на основании многочисленных экспериментальных данных и расчетов, приведенных в книге, посвященной влиянию лесных полос на урожай (Константинов и др., 1974), установлено, что испаряемость на межполосном поле размером 25 га при соотношении длины сторон 1 : 4 уменьшается приблизительно на 30%, на 50-гектарном поле — на 20%, а на 100-гектарном — на 10%. Этот вывод говорит о том, что под влиянием ветрозащитного действия системы лесных полос соответствующим образом уменьшается интенсивность транспирации, следствием чего является повышение сельскохозяйственной продуктивности поля.

Для решения этой задачи Каменностепной гидрометеорологической экспедицией был поставлен эксперимент по сравнительному изучению испарения с сельскохозяйственного поля в открытой степи и среди лесных полос. Особенность этого эксперимента заключалась в раздельном определении продуктивного испарения — транспирации, которая является необходимым физиологическим процессом, связанным с питанием растения и выполняющим при этом терморегулирующую роль, а также непродуктивного испарения — непосредственно с почвы, представляющего собой непроизводительную потерю почвенной влаги, что, конечно, нежелательно в засушливых районах.

Для этой цели были впервые применены испарители в виде цилиндров высотой 60—80 см с площадью испаряющей поверхности 700 см². Дно испарителей съемное. Это позволяет при взятии почвенных монолитов пользоваться цилиндром испарителя, погружая его в почву по мере откапывания монолита. Таким путем удается поместить в испаритель монолит в естественном состоянии, не нарушая структуры почвы и растительного покрова. При выемке монолита надевается дно цилиндра, через которое может просачиваться избыток почвенной влаги. Цилиндры испарителей в рабочем состоянии помещаются в стационарные цилиндрические сосуды, врытые в почву на засеянном поле. На дне этих стационарных испарителей устанавливаются сосуды, улавливающие просочившуюся воду. Испарители парные. В одном из них сохраняется травостой, в другом — травостой срезается и стебли растений подвешиваются немного выше поверхности почвы. Это делается для того, чтобы имитировать затенение поверхности почвы применительно к естественным условиям. Первый из этой пары испарителей служит для определения суммарного испарения — транспирации и испарения непосредственно с поверхности почвы, второй — только для определения непродуктивного испарения. Испарители через несколько суток взвешиваются. Разность их показаний дает транспирацию.

Для того чтобы этот эксперимент как можно больше приблизить к естественным условиям, испарители не только устанавливаются непосредственно на поле среди травостоя, но и в течение всего периода вегетации производится смена монолитов. Сигналом для смены служит расхождение в содержании почвенной влаги в двух монолитах, которое происходит в связи с тем, что со второго типа испарителей, со срезанным травостоем, расходуется на испарение меньше почвенной влаги, чем с испарителя первого типа. Для переноса испарителей на весы применяется легкий дюралевый кран, вокруг которого устанавливаются монолиты с двух-трехкратной повторностью.

В табл. 18 приведены результаты трехлетних экспериментов в Каменной Степи на полях Института земледелия черноземной

Таблица 18

Изменение соотношения между продуктивным и непродуктивным испарением под влиянием лесных полос

Место проведения эксперимента	Испарение, мм			Процент продуктивного испарения	Биомасса (зерно+ +солома), т/га	Транспирация, м³ на 1 т биомассы
	суммарное	в том числе				
		продуктивное	непродуктивное			
Поле пшеницы в Каменной Степи						
Среди лесных полос	217	137	80	63	3,92	350
В открытой степи	173	84	89	48	1,85	450
Разность	+44	+53	—9	+15	+2,07	—100
Поле овса в Каменной Степи						
Среди лесных полос	185	121	64	65	—	—
В открытой степи	170	96	74	56	—	—
Разность	+15	+25	—10	+9	—	—
Поле орошаемой пшеницы в Южном Заволжье						
Среди лесных полос	388	249	139	64	8,63	265
В открытой степи	397	204	193	51	6,56	320
Разность	—9	+45	—54	+13	+2,07	—55

полосы и на орошаемом поле в Южном Заволжье на участках Ершовской сельскохозяйственной опытной станции (Львович, 1963).

Данные в этой таблице хорошо характеризуют воднобалансовый эффект лесных полос:

— суммарное испарение с межполосного поля выше, чем в открытой степи. Это говорит о том, что почвенной влаги на межполосном поле больше, чем в открытой степи. Здесь сказывается отмеченный эффект снегозадержания лесных полос;

— среди лесных полос увеличивается продуктивное испарение (транспирация) на 25—53 мм, что соответствует прибавке влаги, почти равной одной поливной норме при механизированном поливе;

— непродуктивное испарение на межполосном поле снижается как в абсолютном, так и в относительном значении; за счет непродуктивного испарения возрастает продуктивное;

— под влиянием лесных полос уменьшается транспирация: на 1 т биомассы расходуется на 50—100 м³ воды меньше, чем в открытой степи;

— лесные полосы влияют на увеличение урожая: по наземной биомассе — на 2 т/га, а по зерну — на 0,5—0,6 т/га.

Из таблицы видно, что выводы однородны как для неорошаемого поля, так и для орошаемого. Даже на основании немногочисленных экспериментов мы можем быть уверенными в определенной тенденции преобразований элементов водного баланса лесными полосами. Что же касается размеров этих преобразований, то они зависят от климатических условий, условий погоды данного года и ряда других причин.

Многочисленные опыты, проведенные в лесостепной и степной зонах европейской части СССР, показывают, что на полях среди клеток лесных полос урожаи повышаются для разных зерновых культур в пределах от 3 до 7 ц/га. В Каменной Степи, представляющей классический пример высокой агрономической роли лесных полос (напомним, что опыт заложен в конце прошлого столетия В. В. Докучаевым), урожаи озимой пшеницы среди лесных полос повышаются на 43%, или на 7 ц/га, а яровой — на 48%, или на 6,3 ц/га. Массовый опыт, проведенный в 1954 г. в 580 колхозах и охвативший 40 тыс. га пашни и 573 лесных полосы 5—6-летнего возраста, защитная эффективность которых намного ниже, чем полос старшего возраста, показал, что средняя прибавка урожая составляла 2,2 ц/га, тогда как более или менее полное защитное действие лесных полос наступает через 10—15 лет.

Обратимся к книге участников Каменностепной экспедиции А. Р. Константинова и Л. Р. Струзера (1974), обобщивших большой материал разных авторов по вопросу о влиянии лесных полос на урожай зерновых (табл. 19).

Данные таблицы показывают, что прибавка урожая существенно зависит от размеров межполосного поля и от высоты деревьев в лесной полосе. Как можно полагать, таблица несколько преуменьшает агрономический эффект лесных полос. Это предположение исходит из того, что при ее составлении наряду с современными данными использовались сведения об урожае при недостаточном применении удобрений. Вместе с тем при использовании их

Таблица 19

Увеличение урожая зерновых в зависимости от размеров межполосного поля (при длине 2 км) и высоты деревьев

(по А. Р. Константинову и Л. Р. Струзеру — 1974, с сокращениями)

Высота деревьев, м	Увеличение урожая, ц/га				
	при ширине поля, м				
	200	400	600	800	1000
	при площади поля, га				
	40	80	120	160	200
6	3,5	1,8	1,3	1,0	1,0
10	5,5	3,0	2,2	1,8	1,6
14	—	4,2	3,0	2,5	2,2
18	—	5,5	4,0	3,1	2,8

агрономический эффект полезащитных лесонасаждений повышается. Не в полной мере учтена также выгода для сельского хозяйства от ослабления эрозии, которая при правильном размещении лесных полос может быть существенно ослаблена или прекращена полностью.

Здесь уместно подчеркнуть, что борьба с ростом оврагов наиболее эффективно осуществляется при уменьшении, а тем более при прекращении поверхностного стока, поступающего с его водосборной площади, а этого можно достигнуть с помощью лесных полос, размещенных поперек склонов. Облесение самого оврага недостаточно эффективно, если не уменьшить приток снеговых и дождевых вод к его вершине.

Возвращаясь к табл. 19, следует подчеркнуть вытекающий вывод о том, что агрономическая эффективность полезащитного лесоразведения существенно зависит от размещения лесных полос — размеров полей, ограниченных ими, и высоты лесонасаждений.

Автору представляется, что в целях повышения продуктивности поля расстояния между основными, продольными лесными полосами, как правило, не должны превышать 250 м. Тогда каждый гектар зерновых культур с помощью сгущения лесных полос может дать прибавку урожая в 2—3 ц/га. В таких случаях следует исходить из результатов экономических расчетов, которые должны показать разницу в прибавке зерна при длинных и широких полях, в которых заинтересована механизация сельскохозяйственного производства, и при умеренных размерах полей, защищенных лесными полосами. Эффект полезащитных лесонасаждений можно существенно увеличить при создании предложенных автором так называемых дополнительных лесных полос, размещаемых посредине и вдоль прямоугольника межполосного поля. При этом дополнительная полоса не доходит до поперечных полос на расстояние, соответствующее ширине поля между дополнительной и продольной полосами. Такое размещение полос служит минимальной помехой для механизированной обработки поля.

Немаловажное значение для урожая имеет и высота древостоев в лесных полосах. Зависимость урожая от высоты деревьев, как видно из табл. 19, носит прямолинейный характер. При увеличении высоты древостоев в 3 раза на полях одинакового размера во столько же раз увеличивается прибавка урожая. Это соотношение изменяется в зависимости от размеров межполосного поля. Отсюда следует, что при подборе лесных пород необходимо отдавать предпочтение быстрорастущим и высоким породам деревьев. Посадки деревьев должны сочетаться с кустарником.

Вопрос о необходимости сгущения лесных полос по указанным принципам относится приблизительно к 50—60 млн. га полей, используемых под посевы зерновых культур в степной и лесостепной зонах. При сгущении лесных полос до отмеченных выше пределов урожай зерновых возрастет в среднем на 2—3 ц/га, а общего эффекта можно достигнуть ежегодной прибавкой урожая на 10—15 млн. т, что будет служить немаловажным вкладом в выполнение Продовольственной программы.

К этому следует добавить, что на орошаемых полях системы лесных полос с достаточно густой сетью клеток не только будут способствовать увеличению урожаев, но и помогут экономить воду при орошении. Так, эксперименты показали, что в степной зоне оросительная норма на межполосных полях может быть снижена приблизительно на 20—25%, а на полях Средней Азии и Закавказья — на 10—15%. Это различие обусловлено тем, что в степной зоне кроме снижения испаряемости происходит задержание снега на межполосных полях.

Глава 10
ГИДРОЛОГИЯ ГОРОДОВ

В настоящее время города земного шара занимают около 1 млн. км² суши, что составляет менее 1% ее поверхности. Тем не менее гидрологическая роль городов значительна, особенно если учесть, что они быстро растут. Уже сейчас в наиболее населенных и экономически развитых районах мира города занимают более 10% территории. Например, в Московской области площадь, занятая городами и промышленными предприятиями, достигает 15%.

В настоящее время в городах проживает около 1,5 млрд. человек, или почти $^1/_3$ населения мира. Через 15—20 лет, когда, по имеющимся расчетам, население земного шара возрастет до 6—7 млрд. человек, по прогнозу ЮНЕСКО, не менее половины его численности — более 3 млрд. человек — будет проживать в городах.

В СССР при населении 270 млн. человек доля городских жителей составляет более 60%, а общая площадь городов превышает

100 тыс. км², из которых ¾ приходится на европейскую часть страны.

По данным ООН (Patterns of Urban..., 1980), площадь городов мира в десятилетие 1950—1960 гг. увеличивалась ежегодно в среднем на 3,5%, а в 1975—1980 гг. — на 2,93%; в последнем десятилетии текущего столетия ежегодный рост площади городов ожидается на 2,81%. Соответствующие цифры для СССР — 3,91; 2,23 и 1,35%.

Гидрологическая роль городов выражается главным образом в том, что занимаемая ими территория характеризуется экстремальным состоянием проницаемости поверхности (асфальтовые покрытия, крыши домов). В городах она намного ниже, чем на естественных почвах, которые чрезвычайно редко обладают столь низкой инфильтрационной способностью, как поверхность городов. Асфальтированные улицы, крыши домов практически непроницаемы для воды. По этой причине поверхностный сток с территории городов велик, а питание подземных вод незначительно. Но едва ли не самое большое гидрологическое значение имеют города как источники загрязнения рек и водоемов, которое происходит по двум причинам. Первая из них — сильно загрязненные канализационные воды, которые и после широко применяемой очистки содержат остаточные загрязнения, спускаются в реки и водоемы. Но около половины канализационных вод на земном шаре попадает в реки и водоемы без очистки. (О гидрологической роли и путях устранения неблагоприятных последствий сброса канализационных вод будет подробно сказано в III части книги.) Во-вторых, снеговые и дождевые воды, стекающие с территории городов, смывают в реки и водоемы большее или меньшее количество загрязнений. Особенно значителен смыв наносов с участков городов в период их застройки.

В будущем в связи с быстрым ростом городов указанные процессы изменения водного баланса и связанного с ним вещественного обмена приобретут бóльшие масштабы. Это явление будет происходить не только в связи с ростом городского населения, но и в связи с перспективой приближения сельских населенных мест к городским условиям. В деревнях и селах появляются асфальтированные улицы, постройки городского типа с централизованным водопроводом и канализацией, а через 2—3 десятилетия эти изменения получат еще большее распространение и, по-видимому, охватят почти все села и деревни нашей страны. К этому следует добавить промышленные агломерации и дороги с непроницаемым для воды покрытием, которые по гидрологическим условиям близки к современным городам.

В целом через 20—30 лет с учетом этих дополнительных факторов площадь городов и аналогичных по условиям формирования водного баланса территорий в СССР возрастет по крайней мере до 200 тыс. км². Их влияние распространяется на окружающую среду территории и водные объекты, особенно вдоль течения рек, а по

некоторым показателям это влияние будет сказываться в пределах территории, в несколько раз превышающей занимаемую городами площадь, т. е. достигает более 1 млн. км².

Приведенные цифры носят приближенный характер, но они с определенной достоверностью показывают, что гидрологические факторы городов и территорий, приравненных к ним по водообменным признакам, уже оказывают заметное влияние на окружающую среду в глобальном масштабе и могут значительно возрасти, притом в неблагоприятных направлениях. В связи с этим представляется необходимым возможно детальнее изучить этот процесс, на основании результатов таких исследований дать прогноз ожидаемого, а также по возможности наметить меры, которые позволили бы максимально снизить его отрицательные стороны.

С этой целью в Институте географии АН СССР (Львович, Черногаева, 1978; Львович, 1979) были произведены первые расчеты водного баланса некоторых городов СССР. Для более подробного изучения роли городов в формировании водного баланса территории и вещественного обмена на Курском стационаре института с 1975 г. были организованы соответствующие исследования в г. Курске. Они явились дополнением к начатым в 1962 г. исследованиям водного баланса и смыва почвы в условиях целинной степи и дубравы на территории Центральночерноземного заповедника им. В. В. Алехина, а также угодий Курской государственной опытной сельскохозяйственной станции, что было отмечено в 9 главе. В целом сформировалась уникальная географо-гидрологическая программа экспериментального изучения элементов водного баланса и вещественного обмена в условиях трех различных ландшафтов, расположенных на территории в радиусе около 10 км.

В этой главе освещаются преимущественно результаты исследований преобразующего влияния города на водный баланс и вещественный обмен. Эти исследования — часть программы изучения гидрологической роли почвы, поскольку главным фактором указанных изменений водного баланса являются антропогенные воздействия на инфильтрационную способность почв. Непроницаемые для воды асфальтированные покрытия городских улиц и дорог, как уже отмечено, играют наибольшую роль среди антропогенных гидрологических преобразований, связанных с воздействием на инфильтрационные свойства почвы.

В тех случаях, когда снеговой и дождевой сток с крыш домов и промышленных предприятий попадает на асфальтированные территории и в ливнесточную сеть, он намного больше, чем формируемый на почве. Но часто вода, стекающая с крыш или асфальтированных улиц, попадает на озелененные участки, обладающие довольно высокой инфильтрационной способностью. В итоге лишь часть стока с непроницаемых поверхностей, а также содержащиеся в его воде наносы и растворенные вещества попадают в гидрографическую сеть. Такое формирование стока характерно для небольших городов, особенно на участках новостроек и в районах инди-

видуальной застройки, где дома чаще всего окружены зелеными насаждениями и приусадебными садово-огородными участками. Особенно значительны гидрологические изменения, вносимые городом, при сравнении с естественными целинными угодьями — лесом, целинной степью, почва которых обладает максимальной инфильтрационной способностью. Между этими двумя условиями существует множество вариантов, значительная часть которых выявлена в результате наших исследований и исследований некоторых других авторов.

Эти исследования, проведенные совместно с Е. П. Чернышевым (Львович, Чернышев, 1983), осуществляются в рамках конструктивной географии и направлены на всестороннее изучение воздействий городов, особенно больших, на природу, в частности на водообмен (Герасимов, 1976, с. 19).

Результаты экспериментального изучения инфильтрационных свойств почвы на разных угодьях Курского стационара приведены в табл. 20. Эти данные показывают, что весенний сток (S) с основных частей городской территории несущественно отличается от стока с пахотных угодий. Это объясняется промерзаемостью почвы на пашне. Из сельскохозяйственных угодий зяблевая пахота характеризуется менее значительным стоком, что объясняется не только повышенной инфильтрацией почвы, но и сдуванием снега (процесс, почти отсутствующий в городе, а также на целинных угодьях — в некосимой степи и лесу). Следует, однако, учесть практикующийся вывоз снега с магистральных улиц городов.

Вместе с тем в течение теплого периода, когда приходная часть водного баланса складывается из дождевых осадков (P_2), водный баланс города весьма существенно отличается от водного баланса естественных и сельскохозяйственных угодий, для которых характерно отсутствие дождевого стока. В то же время на типичных для города участках дождевой сток (S) составляет $^1/_4$ выпавших осадков, а увлажненность территории ($И$) на $^1/_3$ меньше, чем на сельскохозяйственной территории. Некоторое исключение составляет индивидуальная застройка города, где распространены приусадебные участки, используемые под огороды, цветники и фруктовые сады. В этой части города поверхностный сток и его коэффициент в 5 раз меньше, чем на остальных, наиболее распространенных участках города с коммунальной застройкой.

Водный баланс за год является, конечно, отражением двух сезонов. Что касается годовых осадков, то установлена не очень четкая закономерность их повышенных значений в пределах города, но различие в годовых осадках (P_1+P_2) на разных угодьях объясняется главным образом распределением по территории снежного покрова, так как зимние осадки принимались не на основании показаний осадкомеров, а по снегомерным съемкам в пределах всей площади экспериментальных водосборов. Значение этого приходного элемента водного баланса связано с условиями аккумуляции и переноса снега. По этой причине в лесу, на озимых посевах и на

Таблица 20

Водный баланс основных угодий центральной лесостепи (мм)

Элемент водного баланса	Территория г. Курска			Сельскохозяйственные угодья		Естественные заповедные угодья			
						Степь непаханая		Целина	
	Старая коммунальная застройка	Коммунальная многоэтажная новостройка	Индивидуальная застройка	Зяблевая пахота	Озимые посевы	косимая	выпасаемая	Лес	Степь
Зимне-весенний период									
Запасы воды в снежном покрове (по снегосъемкам) + осадки за период таяния снега (P_1)	120	121	138	96,7	117	106	108	132	122
Поверхностный сток (S)	33,5	33,6	30,4	24,8	42,2	23	26	0	0
Коэффициент стока (K)	0,28	0,28	0,22	0,26	0,36	0,22	0,24	0,0	0,0
Увлажнение территории (W)	86,5	87,4	108	71,9	74,8	83	82	132	122
Летне-осенний период									
Атмосферные осадки теплого периода (P_2)	399	399	399	430	430	415	415	415	415
Поверхностный сток (S)	99,8	95,8	20	0	0	0	0	0	0
Коэффициент стока (K)	0,25	0,24	0,05	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Увлажнение почвы (W)	299	303	379	430	430	415	415	415	415
Год									
Годовые осадки (P_1+P_2)	519	520	537	527	547	521	523	547	537
Поверхностный сток (S)	133	129	50,4	24,8	42,2	23	26	0	0
Коэффициент стока (K)	0,26	0,25	0,09	0,05	0,08	0,04	0,05	0,0	0,0
Увлажнение почвы (W)	386	391	487	502	505	498	497	547	547

участках индивидуальной застройки в городе запасы воды в снежном покрове самые значительные. Наибольший годовой поверхностный сток (S) и наименьшее увлажнение территории (W) характерны для районов коммунальной застройки города; в обратном соотношении они установлены для целины, а промежуточное значение — для пашни и района индивидуальной застройки города.

Обобщенные данные по водному балансу трех указанных ландшафтов лесостепной зоны приведены в табл. 21. Здесь они обобщены для трех ландшафтов всей изучаемой территории. Следует сказать, что для расчета водного баланса городской территории в целом использованы также результаты экспериментальных исследований, полученные для асфальтированной части города и зоны городских бульваров. Об экстремальных условиях формирования поверхностного стока на непроницаемой городской территории говорилось ранее. Данные этой таблицы свидетельствуют о существенных преобразованиях водного баланса лесостепной зоны.

Если учесть площадь, занимаемую городами, а также асфальтированных дорог (всего около 2% территории), влияние этого фактора на водный баланс в целом для лесостепной зоны пока незначительно. Но через два-три десятилетия, после расширения городов, почти сплошного переустройства деревень и сел по типу, приближающемуся к городу, а также в связи с существенным увеличением дорожной сети, площадь слабопроницаемых для воды поверхностей может возрасти до 6% площади лесостепной зоны, а это окажет более ощутимое влияние на изменение водного баланса территории в неблагоприятном направлении. Общая тенденция положительных изменений водного баланса лесостепной зоны за счет уменьшения поверхностного стока и увеличения ресурсов почвенной влаги будет сохраняться, но несколько замедленными темпами по сравнению с теми, что имели место в период освоения зяблевой пахоты. Это объясняется тем, что изменения водного баланса пахотных угодий и городов происходят в разных направлениях. Кроме того, задержание каждого последующего миллиметра поверхностного стока на сельскохозяйственных землях требует бóльших усилий.

Приведем результаты произведенных в Институте географии исследований по другим городам СССР в сравнении с водным балансом ближайших речных бассейнов, преимущественно сельскохозяйственного характера, принимаемых в качестве «эталона» (табл. 22). Полученные результаты водного баланса отличаются от условий, близких к естественным, прежде всего повышением полного стока за счет существенного роста поверхностного стока при относительно меньшем снижении питания подземных вод. Интересно, что в пределах Садового кольца в Москве, где непроницаемая поверхность достигает почти 60% площади, поверхностный сток на 265% выше, чем в бассейне р. Москвы, подземный сток на 50% меньше, а полный сток больше на 105%. Здесь по понят-

Таблица 21

Водный баланс основных ландшафтов центральной лесостепи (мм)

Ландшафт	Зимне-весенний период			Летне-осенний период				Год		
	Снегозапасы+осадки за время снеготаяния (P_1)	Поверхностный сток (S)	Коэффициент стока (λ)	Атмосферные осадки (P_2)	Поверхностный сток (S)	Коэффициент стока (λ)	Увлажнение пятна (W)	Атмосферные осадки ($P=P_1+P_2$)	Поверхностный сток (S)	Коэффициент стока (λ)	Увлажнение пятна (W)
Городской (г. Курск)	128	43,5	0,34	399	42	0,10	357	527	85,5	0,16	442
Сельскохозяйственный	105	27,4	0,26	430	1,18	0,002	429	535	28,6	0,05	506
Естественный, заповедный	124	7,84	0,06	415	0,50	0,001	414	539	8,34	0,02	531
В том числе:											
степь непаханая (косимая, выпасаемая)	106	23,3	0,22	415	0	0,0	415	521	23,3	0,04	498
целина (степь, лес)	131	0	0,0	415	0	0,0	415	546	0	0,0	546
				415			84,5				442
				430			77,6				506
				415			115				531
				415			82,7				498
				415			131				546

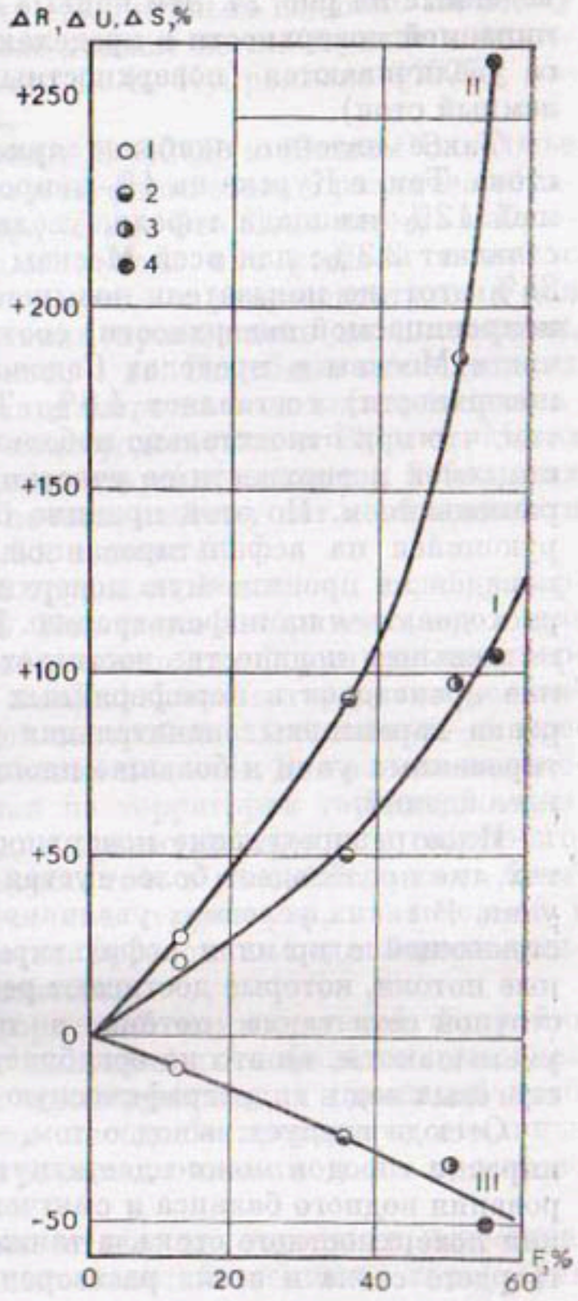
Таблица 22

Сопоставление водного баланса городской и сельской территорий, мм

Элемент водного баланса	Москва			Минск			Курск		
	С территории города	С бассейна р. Москвы до г. Звенигорода	Изменение под влиянием города, %	С территории города	С бассейна р. Свислочь до г. Минска	Изменение под влиянием города, %	С территории города	С бассейна р. Тускарь до г. Курска	Изменение под влиянием города, %
Осадки (P)	700	700		800	800		527	527	
Полный речной сток (R)	300	200	+50	472	240	+97	133	111	+20
Подземный сток (U)	50	70	—28	64	96	—34	47,2	50,2	—6
Поверхностный сток (S)	250	130	+93	408	144	+186	85,5	61	+26
Испарение (E)	400	500	—20	328	560	—42	395	416	—4
Валовое увлажнение территории (W)	450	570	—21	392	656	—40	442	466	—5
Коэффициент полного стока (K_R)	0,43	0,28		0,59	0,30		0,25	0,21	
Коэффициент питания подземными водами (K_U)	0,11	0,12		0,16	0,15		0,41	0,11	
Процент подземного стока в полном речном (U%)	17	35		14	40		36	45	
Процент непроницаемых территорий в пределах города	35	—		50	—		12	—	

Рис. 24. **Изменение элементов водного баланса в городах:**

I — полный речной сток (ΔR); II — поверхностный сток (ΔS); III — подземный сток в реки (ΔU) от площади непроницаемых городских территорий (F): 1— Курск, 2— Москва, 3 — Минск, 4 — Москва в пределах Садового кольца



ным причинам проявляется четкая зависимость стока от площади непроницаемой поверхности.

Результаты расчетов изменений элементов водного баланса трех городов, а также наиболее густо застроенной части г. Москвы в пределах Садового кольца позволяют установить приближенные зависимости их от площади непроницаемой поверхности (рис. 24). Для того чтобы элиминировать влияние зонального фактора, эти зависимости даны в процентах. Они показывают, насколько велико влияние городов на водный баланс. Следует, однако, напомнить, что это влияние носит чисто местный характер, так как ограничено пределами города или сооружениями, к нему приравниваемыми, — промышленными агломерациями, поселками городского типа и дорогами. Если оценить гидрологическое влияние города на более значительную территорию, то его значение, конечно, уменьшится и будет зависеть от доли площади городов на этой территории. Допуская, например, что города, подобные Минску, занимают 10% какой-то территории, мы все же увидим по полученному результату довольно существенное влияние их на водный баланс всей этой площади: полный речной сток всей территории увеличится приблизительно на 10% при росте поверхностного на 20% и уменьшении подземного стока в реки на 5%.

Но при анализе влияния городов на водный баланс прилегающих к ним территорий нельзя принимать во внимание только площадь городов, не учитывая характера их планировки. Влияние этого фактора хорошо иллюстрируют кривые зависимостей, при-

веденные на рис. 24. Эти кривые показывают, что с ростом непроницаемой поверхности в пределах города элементы водного баланса увеличиваются (поверхностный сток) или уменьшаются (подземный сток).

Такое явление наиболее ярко выражено для поверхностного стока. Так, в Курске на 1% непроницаемой поверхности, занимающей 12% площади города, увеличение поверхностного стока составляет 2,2%; для всей Москвы при непроницаемой поверхности 35% этот же показатель повышается до 2,7%, для Минска (50% непроницаемой поверхности) соответственно достигает 3,7%, а для части Москвы в пределах Садового кольца (55% непроницаемой поверхности) составляет 4,8%. Такая закономерность связана с тем, что при относительно небольшом распространении водонепроницаемой поверхности ее участки характеризуются существенным рассеиванием. По этой причине более вероятно, что сток, формирующийся на асфальтированной поверхности и крышах домов, попадая на пропицаемую поверхность зеленых насаждений, будет расходоваться на инфильтрацию. В таких случаях он в относительно меньшем количестве достигает речной сети. Аналогичное явление происходит в периферийных частях Москвы, где для планировки характерны значительная разрозненность домов и асфальтированных улиц и большие площади внутриквартальных зеленых насаждений.

Иное распределение поверхностного стока в городах и их частях, где преобладает более густая сеть домов и асфальтированных улиц. В таких условиях увеличивается вероятность слияния воды, стекающей с крыш и асфальтированных покрытий, в значительные потоки, которые достигают речных русел. При наличии ливнесточной сети такие потоки в пределах городской территории уменьшаются, но это не ослабляет притока городских ливневых и снеговых вод в гидрографическую сеть.

Отсюда следует вывод о том, что путем соответствующей планировки городов можно достигнуть той или иной степени регулирования водного баланса и смягчения неблагоприятной концентрации поверхностного стока, а также связанной с ним концентрации твердого стока и стока растворенных веществ. Нельзя не учитывать также, что если такое направление процесса формирования стока охватывает большую территорию, занятую преимущественно пахотными землями, то повышение поверхностного стока играет крайне неблагоприятную роль, так как усиливает интенсивность эрозионных процессов; отрицательный характер носило бы также снижение питания подземных вод, наиболее ценного источника водных ресурсов. Но на сельскохозяйственных землях, как ясно из сказанного выше, антропогенные влияния дают обратный эффект, частично компенсируемый воздействием городов.

Изучение эрозионных процессов городских территорий на основании количества наносов, транспортируемых за пределы города (местного твердого стока), так же как и исследование влияния

городов на водный баланс, начато сравнительно недавно. По этому вопросу существуют разрозненные данные из иностранных источников, которые обобщены в работе В. В. Куприянова (1977), поэтому мы не будем их повторять.

В 1953 г. Институт географии АН СССР в Южном Заволжье начал исследования смыва почвы и твердого стока с различно обработанных склонов (Львович и др., 1960). Это были первые наблюдения над элементарным твердым стоком или смывом почвы с определением мутности воды, стекающей с репрезентативных для данной зоны склонов. Исследования проводились на площадках, каждая из которых занимала около 1 га. Подобные исследования были развернуты на Курском стационаре на всех экспериментальных объектах, в том числе и непосредственно в Курске. Метод исследований твердого стока с элементарных склонов и небольших водосборов подробно освещен в печати, поэтому нет необходимости излагать его здесь (Львович, 1963, и глава 9).

Результаты этой семилетней трудоемкой полевой и лабораторной работы обобщены в табл. 23. Как видно из приведенных в ней данных, наиболее благоприятные условия для формирования твердого стока в весенний период складываются в городских условиях — в пределах индивидуальной застройки, а на пашне — в пределах площадей, распаханных с осени под зябь. Это вполне закономерно, поскольку процесс эрозии на территории городской индивидуальной застройки происходит преимущественно с садово-огородных участков и грунтовых дорог, т. е. в условиях, весьма близких к тем, которые имеют место на территории, вовлеченной в сельскохозяйственное производство. Эрозионная податливость сельскохозяйственной пашни общеизвестна.

Твердый сток в пределах городской коммунальной застройки формируется за счет размыва непокрытых асфальтом участков, территории, занятой зелеными насаждениями, и площадей новостройки, на которых в большом масштабе проводятся земляные работы по нулевому циклу строящихся зданий и по прокладке коммуникаций.

Для хода весеннего твердого стока на городских элементах ландшафта, так же как на сельскохозяйственных, характерны внутрисуточная цикличность и полное повторение хода жидкого стока. В городе амплитуда суточных циклов твердого стока и максимальных расходов взвешенных наносов за весенний период выше, чем на пашне.

Из самых общих черт закономерностей твердого стока следует отметить, что весной в целом для города он лишь в 1,5 раза больше, чем на пахотных угодьях, но в теплый период года это различие намного больше. Как отмечено выше, твердый сток на пахоте и целине отсутствует, а в среднем с территории г. Курска он в 4 раза больше, чем на окружающих его распаханных полях.

Данных о твердом стоке с городских территорий в сравнении с фоновыми данными сельскохозяйственных угодий в мировой

Таблица 23

Твердый сток в условиях города и сельскохозяйственных угодий центральной лесостепи

Исследуемая территория	Зимне-весенний период				Летне-осенний период				Год			
	Объем стока, м³/га	Коэффициент стока	Мутность, кг/м³	Модуль твердого стока, кг/га	Объем стока, м³/га	Коэффициент стока	Мутность, кг/м³	Модуль твердого стока, кг/га	Объем стока, м³/га	Коэффициент стока	Мутность, кг/м³	Модуль твердого стока, кг/га
Курск												
Старая коммунальная застройка	335	0,28	2,08	697	998	0,25	0,66	659	1 333	0,26	1,02	1 356
Коммунальная многоэтажная новостройка	336	0,28	2,47	830	958	0,24	3,75	3 592	1 294	0,25	3,42	4 422
Индивидуальная застройка	304	0,22	7,14	2 170	200	0,05	17,3	3 460	504	0,09	11,2	5 630
Зона бульваров	1 020	0,64	0	0	Стока нет		Стока нет		1 020	0,18	0	0
Вся территория	431	0,34	2,43	1 046	420	0,10	4,1	1 721	851	0,16	3,25	2 767
Сельскохозяйственные угодья												
Зяблевая пахота	248	0,26	4,50	1 116	Стока нет		Стока нет		248	0,05	4,50	1 116
Озимые посевы	422	0,36	0,38	160	То же		То же		422	0,08	0,38	160
Вся пашня	274	0,26	2,57	704	12	0,002	0	0	286	0,05	2,57	704
Естественные заповедные угодья в целом	78,4	0,06	0	0	5,0	0,001	0	0	83	0,02	0	0

литературе еще немного. Аналогичные данные приведены в работе по эрозионным процессам в различных условиях в штате Северная Каролина (США) (Brown, 1978). Хотя природные условия в этом штате существенно отличаются от тех, к которым относятся результаты освещенного здесь исследования, такое сравнение несомненно интересно, поскольку также свидетельствует о большом контрасте твердого стока с разных угодий и местностей. Так, с городских территорий в Северной Каролине годовой твердый сток составляет 4,4 т/га против 2,8 т/га в Курске. Но в Северной Каролине с участков городских новостроек он повышается до огромной величины — 162 т/га, а в расчеты по Курску в целом входит и территория новостроек. Если допустить, что площадь новостроек в Северной Каролине занимает 5% городской территории с завершенными постройками, то в этих условиях твердый сток с города, включая новостройки, составит около 12 т/га против 18,6 т/га на культивированных угодьях. О полном сходстве с данными для Курска по указанной причине не может быть и речи, но по одному признаку оно имеется: твердый сток с территории новостроек велик в обоих районах независимо от различия природных условий. При этом контраст между твердым стоком новостроек и города больше, чем в условиях Курска, главным образом потому, что в Северной Каролине зима кратковременна и почти круглый год происходит эрозия под влиянием дождевого стока, причем осадков там выпадает больше, чем в Курской области.

Здесь уместно подчеркнуть, что интенсивность смыва почвы в целом для территории Курской области за истекшие 20—30 лет несколько уменьшилась в связи с распространением зяблевой пахоты. Это произошло главным образом за счет уменьшения весеннего стока с пашни и снижения притока воды в овраги, вследствие чего их размыв замедлился или почти прекратился. Между тем овражная эрозия по указанному американскому источнику составляет в Северной Каролине 350 т/га, что приблизительно соответствует ежегодному смыву 20 мм слоя почвы. Мы не располагаем данными о твердом стоке действующих оврагов, но прекращение или существенное ослабление их роста явились одним из основных факторов уменьшения твердого стока рек этого района.

Интересно, что весенний смыв почвы с зяби стал более интенсивным, чем во время преобладания весенней пахоты. Этот процесс произошел, как отмечено выше, при уменьшенной энергии (количества) снегового стока и вследствие ослабления устойчивости разрыхленной почвы (Назаров, 1981). Продукт эрозии со склонов, вспаханных под зябь, аккумулируется на днищах заросших оврагов, особенно в пределах их приустьевых участков, и часто не достигает речных русел. Лишь около 10% наносов, смываемых со склонов, занятых сельскохозяйственными угодьями, а также с овражно-балочной сети, попадает в реки и формирует их твердый сток. В то же время в условиях города, главным образом под влиянием ливнесточных систем, ускоряется транспортировка наносов,

смытых с территории города, и по этой причине значительная часть их попадает в реки (в Курске — в реки Тускарь и Сейм) и повышает их твердый сток. Это неблагоприятное явление необходимо устранять или по крайней мере ослаблять. Еще в большей мере это относится к растворенным в воде элементам, особенно биогенным, смываемым с территории города. Количественная оценка этого процесса будет освещена ниже.

Насколько известно, первые сведения о содержании растворенных веществ в ливневых водах, стекающих с территории городов, опубликовал Г. Г. Шигорин (1963). Приведенные им данные, относящиеся к городским территориям общей площадью свыше 1000 га, показали, что в водах ливневого стока в среднем содержится 137 кг/га взвешенных веществ и 46 кг/га биогенных элементов по $БПК_{20}$. Эти цифры свидетельствуют о том, что степень загрязнения ливневых вод в общем приближается к степени загрязнения канализационных. Поэтому снеговые и дождевые воды, стекающие с территории городов, а также промышленных предприятий и дорог, должны приниматься во внимание как один из неблагоприятных факторов окружающей среды. Выше уже было отмечено, что смыв взвешенных и растворенных веществ с территории городов является благом для их населения, так как в дополнение к мерам по поддержанию чистоты в городах служит немаловажным фактором их очистки. Вместе с тем таким путем происходит некоторое загрязнение речных вод ближайших к городу рек, особенно если они невелики и поэтому не могут существенно разбавить воду, стекающую с территории города.

Для исследования этого вопроса параллельно с изучением снегового и ливневого стока систематически определялся качественный состав вод, стекающих с характерных территорий Курска, сельскохозяйственных угодий и целины (Барымова, Чернышев, 1982). Особое внимание уделено биогенным элементам — азоту, фосфору, калию и содержанию в воде органических веществ по показателю химического потребления кислорода (ХПК). Важной характеристикой является также общая минерализация.

В табл. 24 приведены обобщенные за 7 лет данные стока растворенных веществ по указанным элементам и показателям. Для сравнения в этой таблице приведены также данные о стоке растворенных веществ с сельскохозяйственных и естественных заповедных угодий, часть которых занимает никогда не распахивавшаяся и совершенно не используемая ныне для хозяйственных целей, но имеющая большое научное значение целинная степь Центральночерноземного заповедника. К такому же целинному угодью относится заповедный лес — дубрава. Наблюдения в течение двух десятилетий показали отсутствие стока, даже весеннего, с этих угодий, о чем было сказано выше. Эти интересные сведения говорят о том, что в условиях целинной степи и леса сток растворенных веществ также отсутствует. В отдаленном прошлом, до распашки лесостепи и практически до ее хозяйственного освоения,

весеннее половодье на реках этой зоны было небольшим, а минерализация речной воды происходила почти исключительно за счет подземного стока в реки.

Общая минерализация воды, стекающей с территории Курска в период весеннего снеготаяния, составляет 102 кг/га, что в 3 с лишним раза больше, чем с сельскохозяйственных угодий. Летом различие усиливается: с сельскохозяйственных угодий дождевого стока, как правило, не бывает, а минерализация дождевых вод, стекающих с территории города, превышает 900 кг/га. За год суммарный сток растворенных веществ с территории города превышает 1 т/га, а с сельскохозяйственных угодий — 32 кг/га, т. е. в 30 раз меньше. В то же время с площади Центральночерноземного заповедника, приближенно характеризующего фоновые показатели, сток растворенных веществ снижается до 5 кг/га, что в 200 раз меньше, чем в городе, и в 6 раз меньше, чем с сельскохозяйственных угодий.

Средний годовой показатель обогащения поверхностного стока с городской территории основными биогенными компонентами составляет: по минеральному азоту — 1,27 кг/га, по минеральному фосфору — 0,25 кг/га. Основная часть смыва минерального азота как в весенний, так и в теплый периоды приходится на асфальтированную городскую территорию с интенсивной транспортной нагрузкой. В то же время источником общего и минерального фосфора является: в городе — территория, отличающаяся большим распространением непроницаемых покрытий, вне его — территория, вовлеченная в сельскохозяйственное производство.

Содержание растворенного органического вещества в поверхностном стоке с городской территории составляет около 60 кг/га, при этом биохимическому окислению подвержено 30% его годового выноса. Это свидетельствует о наличии в стекающей воде значительного количества органического вещества, плохо поддающегося биохимическому окислению. Как в весенний, так и в теплый периоды наибольшее количество органического вещества поступает со стоком, состав которого формируется на городской территории с большим распространением твердых покрытий. Поверхностный сток существенно обогащается органическим веществом с городской коммунальной застройки, особенно в теплый период.

В течение года с единицы площади городской территории смывается минерального азота в 2 раза, минерального фосфора в 1,5 раза, калия в 9 раз, органического вещества в 5 раз больше, чем с сельскохозяйственных угодий, и соответственно в 25, 80, 100 и 16 раз больше, чем с естественных заповедных угодий.

Смягчение охарактеризованных выше неблагоприятных влияний города на водный баланс и связанный с ним вещественный обмен — дело более сложное, чем защита рек и водоемов от загрязнения сточными водами. Объясняется это тем, что городские и промышленные сточные воды поддаются довольно строгому учету и управлению их качеством путем применения методов очистки, в

Таблица 24

Сток растворенных веществ (кг/га) в условиях города и с сельскохозяйственных угодий центральной лесостепи

Исследуемая территория	Зимне-весенний период					Летне-осенний период					Год				
	Азот минеральный	Фосфор минеральный	Калий (K^+)	Органическое вещество (по ХПК)	Минерализация	Азот минеральный	Фосфор минеральный	Калий (K^+)	Органическое вещество (по ХПК)	Минерализация	Азот минеральный	Фосфор минеральный	Калий (K^+)	Органическое вещество (по ХПК)	Минерализация
Курск															
Старая коммунальная застройка	0,53	0,19	3,58	18,2	113	1,65	0,28	21,4	94,3	851	2,18	0,47	25,0	112	964
Коммунальная многоэтажная новостройка	0,28	0,15	1,71	15,8	103	0,65	0,31	23,4	61,7	945	0,93	0,46	25,1	77,5	1048
Индивидуальная застройка	0,68	0,09	2,52	18,3	93,0	0,12	0,02	20,4	3,32	891	0,80	0,11	22,9	21,6	984
Асфальтированная территория с интенсивной транспортной нагрузкой	2,42	0,25	15,9	86,1	1389	5,46	0,03	53,3	379	1337	7,88	0,28	69,2	465	2726
Вся территория города	0,60	0,13	2,51	17,0	102	0,67	0,12	22,2	42,5	907	1,27	0,25	24,7	59,5	1009
Сельскохозяйственные угодья															
Зяблевая пахота *	0,71	0,17	0,62	10,1	25,6	Стока нет					0,71	0,17	0,62	10,1	25,3
Озимые посевы	0,44	0,24	4,85	10,7	38,6	То же					0,44	0,24	4,85	10,7	38,6
Вся пашня	0,60	0,18	2,74	10,4	32,0	» »					0,60	0,18	2,74	10,4	32,0
Естественные заповедные угодья															
Степь непаханая (косимая, выпасаемая)	0,17	0,01	0,72	11,6	16,4	Стока нет					0,17	0,01	0,72	11,6	16,4
Целина (степь, лес)	Стока нет					То же					Стока нет				
Заповедные угодья в целом	0,05	0,003	0,23	3,66	5,2	» »					0,05	0,003	0,23	3,66	5,2

* Летом — яровые посевы.

том числе путем получившей большое распространение биологической очистки, позволяющей устранять по крайней мере $^2/_3$ органических загрязнений, а при применении некоторых специальных методов снижать содержание биогенных элементов на 90% и даже больше. Перспективы активного управления водоотведением послужили основой для разработки географической концепции защиты вод от загрязнений, предусматривающей кардинальное решение этой проблемы путем перехода на профилактические принципы, осуществления охраны вод в процессе их использования (Львович, 1961). Вполне реален и довольно широко стал применяться перевод водоемких промышленных предприятий на замкнутое оборотное водоснабжение, основой чего являются повышение уровня технологии и локальная очистка сточных вод, содержащих одно загрязнение с отдельных производственных линий. Конечной целью комплекса специальных мер должно стать всемерное отделение хозяйственного звена круговорота воды от естественного, т. е. постепенное прекращение сброса сточных вод в реки и водоемы.

Этот вопрос для хозяйственно-бытовых сточных вод, содержащих большое количество органических элементов, в условиях будущего должен решаться путем использования их для удобрения кормовых и технических культур или для изготовления компоста, наиболее ценного удобрения (А. И. Львович, 1977; Львович, 1974).

Вместе с тем для ликвидации неблагоприятных влияний города на водный баланс и вещественный обмен указанный путь приемлем лишь отчасти, так как усиление поверхностного стока в городах, ослабление питания подземных вод и прекращение сброса загрязненных поверхностных вод в полной мере неосуществимы в связи с чрезмерной громоздкостью мероприятий. Однако ряд вполне доступных мер по смягчению неблагоприятного гидрологического влияния городов реален.

Прежде всего это относится к планировке городов. Выше уже отмечалось, что современные принципы планировки позволяют смягчить неблагоприятные влияния на водный баланс. Прежняя планировка, когда строился дом к дому и непосредственно к периметру домов примыкали непроницаемые дорожные покрытия, сплетавшиеся в единую сеть, ныне, как правило, не получает большого распространения. Системы дорог в пределах отдельных частей города следует проектировать так, чтобы не создавалось больших потоков снеговой и дождевой воды. Для этой цели на дорогах вдоль таких потоков целесообразно создавать ливнесточные системы, из которых вода должна поступать на массивы зеленых насаждений и расходоваться на инфильтрацию. Чрезвычайно важно поддерживать предельно возможную чистоту городских кварталов и улиц. Это само собой разумеется, но мы хотим подчеркнуть необходимость систематической мойки улиц, особенно при напряженном транспортном движении. Дождевой сток частично очищает такие улицы от загрязняющих веществ, но моечные машины соз-

дают мощные струи воды и производят эту работу более эффективно.

Наконец, следует поставить вопрос о целесообразности создания в пределах города систем прудов, используя для этой цели балки или копани в пределах города и на его окраинах, оборудованные водосливными плотинами. Часть дождевых вод, стекающих с территории города, будет аккумулироваться в таких прудах-отстойниках и освобождаться от наносов и отчасти от растворенных органических веществ путем их окисления. Для усиления такого эффекта могут служить каскады прудов. Указанные меры несомненно будут способствовать улучшению санитарного состояния города и вместе с тем могут служить эстетическим целям.

В связи со сказанным возникает вопрос: целесообразно ли в больших масштабах засыпать и выравнивать мелкую гидрографическую сеть в пределах города? По всей вероятности, лучше использовать ее для создания прудов-отстойников указанного назначения.

Часть III
Охрана водных ресурсов в условиях будущего

Глава 11
ПРИНЦИПЫ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ОХРАНЫ ВОД

На Западе нередко считают, что улучшение природной среды, включая ее водный компонент, требует сокращения производства предметов потребления и услуг. Но такой подход, имеющий в некоторых случаях основание, не может быть принят безоговорочно. Действительно, если ограничения производства относятся к излишествам, в которых не заинтересован широкий круг населения, то такой путь не вызывает возражений. Но расходование воды, связанное с ростом благосостояния людей, не подлежит сокращению, а, наоборот, нуждается во всемерном развитии. При этом не следует забывать, что около $^1/_3$ (а по некоторым данным, еще большая часть) населения земного шара недоедает и не обеспечена надлежащими жильем и одеждой. В таких условиях не может быть речи об ограничении развития экономики. Любые масштабы ее развития при надлежащих социальных условиях можно почти повсеместно приспособить к имеющимся водным ресурсам путем их расширенного воспроизводства — регулирования водных ресурсов во времени и пространстве, всемерной экономии воды, вплоть до перехода на безотходную технологию промышленных предприятий, и, что едва ли не наиболее важно, применения эффективных принципов и методов использования и охраны вод, которым посвящена эта глава.

В настоящее время охрана водных ресурсов осуществляется преимущественно путем *надстройки* к использованию водных ресурсов — запретов и ограничений, которые нередко оказываются в противоречии с интересами развития экономики, но, главное, не являются вполне эффективными для защиты вод от загрязнения. Конечно, некоторые из запретов и ограничений целесообразны, но не они должны быть основой.

Назовем главные принципы эффективной защиты вод от загрязнения в условиях будущего, исходя из того, что прогрессивные силы в мире восторжествуют и социальное совершенствование и демократические преобразования в ряде государств будут осуществлены:

— охрану вод необходимо осуществлять преимущественно в процессе их использования; охрана, как правило, должна быть неотъемлемой частью использования;

очистки хозяйственно-бытовых сточных вод недостаточна, она не обеспечивает их полного обезвреживания.

Этот метод очистки, получивший наибольшее распространение, позволяет уменьшить содержание в сточной воде азота и фосфатов приблизительно в 2 раза, калия — в 1,2, биологическое поглощение кислорода в течение пяти суток ($БПК_5$) — в 4 и сухой остаток — в 1,5 раза. По другим данным, полная искусственная биологическая очистка сточных вод еще менее эффективна. Вместе с тем в настоящее время существуют более совершенные методы искусственной биологической очистки сточных вод, например биологические фильтры и аэротенки. Так, например, на одном из наиболее совершенных очистных сооружений в Москве — Курьяновской станции, пропускающей ежегодно более 1 км³ (3000—3200 тыс. м³/сут) сточных вод, достигается весьма глубокая их очистка: по $БПК_5$ со 100—180 до 3—8 мг/л на выходе, а после доочистки на скорых фильтрах и хлорирования — до 1,5 мг/л.

Все большее распространение получают химические методы очистки, которые при совмещении с биологическими дают высокий результат. Однако, когда в сточной воде содержатся сотни различных загрязнений, трудно найти такие методы, которые позволили бы полностью от них освободиться, т. е. довести сточную воду до состояния естественной воды рек и водоемов. Поэтому как минимум требуется разделение сточных вод на две основные группы — хозяйственно-бытовые и промышленные.

Наряду с положительным опытом очистки сточных вод Москвы на Курьяновской станции следует отметить и положительные результаты применения комплексной трехступенчатой очистки, проводимой в США в штате Невада. Здесь кроме широко распространенной биологической очистки применяются химическая очистка и новый усовершенствованный процесс очистки, а также ряд дополнительных приемов. Не касаясь подробно технологического процесса этой очистки, приведем в табл. 26 сведения, характеризующие результаты действия этой небольшой регенерационной станции, пропускающей ежесуточно 26 тыс. м³ сточных вод (Бертокс и др., 1980, с. 18—21).

Эта вода после очистки пригодна для питья, но она перекачивается в горное водохранилище Сьерра-Невады, которое используется для разведения форели и водного спорта. Кроме того, вода водохранилища расходуется на орошение.

Опыт регенерации городских сточных вод говорит о первом шаге на пути постепенного перевода городского водоснабжения на замкнутое оборотное водоснабжение, может быть с использованием биогенных элементов для их возврата почве. Однако здесь мы имеем дело с трудоемким процессом, который пока, вероятно, применим в небольших масштабах: в данном случае в объеме несколько менее 10 млн. м³/год.

Специалист по охране водных ресурсов В. С. Каминский (1982) приводит интересные данные о затратах по мере роста степени

Таблица 26

Результаты регенерации городских сточных вод в штате Невада (США)

Показатели качества воды	Химическое поглощение кислорода (ХПК), мг/л	Биологическое поглощение кислорода (БПК), мг/л	Мутность (по Джексону), мг/л	Взвешенные частицы, мг/л	Фосфор, мг/л	Аммиачный азот, мг/л	Бактерии *coli* (число в 100 мл), млн.	Запах
До очистки	200—500	250—300	100	225	10—15	20—30	15	Имеется
После очистки	10	1	0,2	0,9	0,06	Перешел в хлорамин	Менее 2,2	Отсутствует

очистки сточных вод. На основании обследования многочисленных промышленных предприятий он делает вывод о том, что даже при самом тщательном соблюдении всех условий эксплуатации очистных сооружений их эффективность не превышает 80%, и приводит данные Института экономики Уральского научного центра АН СССР, показывающие, что при повышении степени очистки с 80 до 95% расходы на очистку примерно удваиваются, а свыше 95% повышаются приблизительно в 10 раз на каждый дополнительный процент улучшения качества очистки. Достоверность этого вывода не вызывает сомнения, однако следует помнить, что он относится к сточным водам, содержащим большое количество разнообразных загрязнений. Высокая степень очистки таких сточных вод действительно чрезвычайно сложна. По этой причине автор выдвинул другой метод для решения этого вопроса — локальную очистку, позволяющую достигнуть близкой к 100% степени очистки сточных вод ценой гораздо меньших усилий.

Приведенный ниже пример локальной очистки на одном крупном уральском металлургическом заводе показывает, что применение этого метода позволило перевести завод на замкнутое оборотное водоснабжение и снизить затраты по сравнению с затратами при традиционных методах очистки. Таким образом, экономика водоохранных мер существенно зависит от применяемых методов, причем наиболее совершенные из них дают высокий экономический эффект, не говоря уже о водоохранном их значении.

Характерной чертой современной традиционной мировой практики очистки вод является отставание распространения и улучшения методов от роста объема сточных вод и степени их загрязнения. Однако применение даже наиболее совершенных современных методов биологической очистки сточных вод не освобождает их в полной мере от загрязнений. Для того чтобы сточная вода после такой очистки стала пригодной для питьевого и хозяйственно-

бытового водоснабжения, она должна быть многократно разбавлена чистой водой. Кратность разбавления возрастает в тех случаях, когда сточные воды перед сбросом в реки и водоемы не подвергаются достаточно тщательной очистке. Нередко пропускная способность очистных сооружений отстает от роста объема сточных вод. Более того, приблизительно около половины мирового объема городских сточных вод сбрасывается в реки и водоемы без очистки.

Если очищенные сточные воды с остаточными загрязнениями попадают в реку, то они в процессе движения с потоком самоочищаются. Этот процесс протекает более интенсивно при многократном разбавлении сточных вод чистой водой. При сбросе неочищенных сточных вод кратность разбавления существенно возрастает (от 12 до 40). Заметим, что чистую воду, расходуемую на разбавление сточных вод, чаще всего не принимают во внимание в водохозяйственном балансе. Между тем ее необходимо учитывать, так как до достижения определенной кратности разбавления качество расходуемой на разбавление речной воды снижается настолько, что использование ее для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения требует предварительной, часто трудоемкой доочистки.

Важное значение имеет также длина пути, который проходят остаточные загрязнения в свободном речном потоке. В густонаселенных и экономически развитых странах и районах чаще всего сточные воды сбрасываются в реки во многих местах на небольшом расстоянии друг от друга. В тех случаях, когда водность потока увеличивается медленнее, чем растет количество сточных вод, самоочищающая способность реки подавляется. Это создает неблагоприятные условия для водоспабжения, так как вода, как уже сказано выше, требует предварительной обработки. Ухудшается также среда для обитания рыб.

Когда биогенные элементы — азот, фосфор, калий — вместе с речной водой попадают в озеро или водохранилище, их биологическая продуктивность повышается. Вследствие такого «удобрения» водоемов интенсивно развиваются синезеленые водоросли, происходит так называемое цветение воды. На окисление обильно отмирающих водорослей расходуется большое количество растворенного кислорода, в анаэробных условиях из их белка выделяется ядовитый сероводород, и вода становится мертвой. Этот процесс, развиваясь сначала в придонных слоях воды, постепенно охватывает большие водные массы — происходит эвтрофирование водоема. Такая вода непригодна для водоспабжения и резко снижает рыбную продуктивность водоема.

Интенсивность развития процесса эвтрофирования зависит от степени проточности водоема и его глубины. Как правило, самоочищение воды в озерах и водохранилищах происходит медленнее, чем в реках. Поэтому по мере роста числа водохранилищ, особенно их каскадов, самоочищающая способность рек уменьшается. Нельзя не учитывать эту тенденцию, так как водохранилища, несомненно, будут создаваться и впредь. Это связано не только со строи-

тельством гидроэлектростанций, но и с необходимостью умножения водных ресурсов в периоды маловодья, лимитирующего развитие хозяйства.

В качестве иллюстрации, к чему ведут процессы эвтрофирования водоемов, можно привести оз. Эри, которое является, по оценке Б. Коммонера (1974, с. 67), «наиболее вопиющим примером кризиса окружающей среды в Соединенных Штатах Америки». Б. Коммонер в своей книге посвятил этому озеру отдельную главу, на основании которой мы приведем сжатую характеристику состояния этого озера на начало 70-х годов.

До 1900 г. годовой улов осетра в оз. Эри достигал 5000 ц, сига — 70 000 ц; в 1964 г. он снизился по этим рыбам до 20 и 40 ц соответственно. Практически эти ценные виды рыбы почти исчезли из озера и были заменены «грубой» рыбой — окунем, карпом, сомом, корюшкой. Такое обеднение — следствие загрязнения этого озера сточными водами, на окисление которых стал расходоваться содержащийся в воде озера кислород. Суммарная масса органических отбросов потребовала для своего окисления ежегодно 90 000 т кислорода, а кислородный дефицит в придонных слоях озера составил 130 000 т.

Основная причина недостатка кислорода — «цветение» водорослей. В это время вода обширных частей озера приобретает консистенцию «горохового супа». Обильно отмирающие водоросли оседают на дно озера и в процессе окисления расходуют огромное количество кислорода. Это и есть процесс эвтрофирования озера, основной причиной которого является ежегодное поступление в озеро с очищенными сточными водами 25 000 т фосфатов. Лишь незначительная часть этих «удобрений» — немногим более 10% — выносится из озера Ниагарой, а остальная часть оседает в нем. В итоге озеро «стало чем-то вроде огромной подводной помойной ямы» (Коммонер, 1974, с. 74). Сброс бытовых и промышленных органических отходов и сельскохозяйственных удобрений, поступающих со стоком воды с бассейна озера, усугубляет процесс эвтрофирования, в результате чего со временем может привести к полному исчезновению кислорода в большей части водной массы озера. «На фоне подобной катастрофы нынешнее состояние озера показалось бы пустяком» (там же, с. 75).

Экологические изменения, подобные тем, которые произошли в оз. Эри, начались в озерах Мичиган и Онтарио. «Загрязнение, подобное тому, которое наблюдается в оз. Эри, грозит еще более сильными экологическими потрясениями». «Как мы можем восстановить оз. Эри?» — задает вопрос автор книги Б. Коммонер и не находит ответа на этот вопрос. Он считает, что, если даже полностью прекратить сброс в озеро сточных вод и других загрязнений, все равно останутся загрязнители, накопившиеся в течение десятилетий на дне озера. В заключение он высказывает предположение, что «озеро Эри никогда не вернется к состоянию, хотя бы чуть похожему на то, что наблюдалось 25—30 лет тому назад» (там же, с. 77).

Действительно, огромное озеро площадью 52,7 тыс. км² и глубиной до 64 м запущено настолько, что его восстановление представляет собой весьма сложную задачу.

Насколько мне известно, больших озер и водохранилищ, эвтрофированных так глубоко, как оз. Эри, не существует. Но эвтрофирование этого озера служит предупреждением и лишний раз подтверждает правомерность выдвигаемой автором этих строк меры по массовому прекращению сброса сточных вод в реки и водоемы.

Далеко не в такой степени, но следы эвтрофирования больших озер имеются и в нашей стране. Так, О. А. Алекин (1979) отмечает, что в настоящее время оз. Ладога в глубоководной части остается олиготрофным, а в отдельных мелководных частях в той или иной степени выражен процесс эвтрофирования.

Первые признаки эвтрофирования появились в отдельных частях некоторых водохранилищ Волжского и Днепровского каскадов. Причинами, как правило отмечает Л. А. Сиренко (1979), являются замедление обмена и повышение содержания биогенных элементов в речной воде. Так, время добегания стока Волги от Рыбинска до Волгограда для разных фаз режима в естественных условиях колебалось в пределах 30—50 суток, а после строительства каскада водохранилищ возросло приблизительно в 10 раз. Аналогичное замедление произошло на участке Днепра от устья Припяти до Киева, где до создания водохранилища добегание речной воды происходило за 2—3 суток, а после его появления увеличилось до 60 суток.

Процессы эвтрофирования распространились и на такие внутренние моря, как Балтийское, Средиземное и др. Причины те же, что при эвтрофировании озер и водохранилищ. В Балтийское море с промышленными и хозяйственно-бытовыми сточными водами с территории всех стран, тяготеющих к морю, ежегодно поступает 14 тыс. т фосфора антропогенного происхождения. Это составляет 50% всех поступлений этого биогенного элемента. Баланс фосфора показывает, что общий его запас в Балтийском море возрастает ежегодно на 28—29 тыс. т (Ярвекюльг, 1979). По данным за 1964—1967 гг., указанный автор отмечает, что гибель донной фауны в открытой глубоководной части Балтики из-за недостатка кислорода произошла на площади 40 тыс. км² (10% акватории моря). Это является ярким показателем эвтрофирования.

Как устранить неблагоприятное явление эвтрофирования? Полумеры здесь не помогут. В первую очередь следует устранять нарушения антропогенного происхождения в круговороте биогенных элементов.

На рис. 25А приведена схема обмена биогенных элементов в процессе хозяйственного звена круговорота воды при сбросе городских сточных вод в реки и водоемы. Процесс обмена проходит следующие основные стадии: *почва — урожай — население — водные источники — население*. Посредником между частью урожая и населением является животноводство.

Содержащиеся в очищенных и неочищенных сточных водах биогенные элементы, попадая в реки и водоемы, частично возвращаются обратно населению с питьевой и хозяйственно-бытовой водой. Такой обмен носит явно противоестественный характер.

В. И. Ленин в работе «Аграрный вопрос и «критики Маркса»» подчеркивал, что использование минеральных удобрений нисколько не опровергает того факта, что нерационально выбрасывать в реки естественные удобрения понапрасну, отравляя притом их нечистотами, и отмечал, что использование городских нечистот для орошения полей сулит громадную пользу[1]. Такой путь является единственно правильным направлением использования биогенных веществ и элементов, содержащихся в сточных водах. Он обеспечивает интенсивное почвенное обезвреживание нечистот и наиболее радикальную защиту водных ресурсов от загрязнения. Следует при этом учесть, что окисление биогенных элементов в почве происходит в 100 раз интенсивнее, чем в воде рек и водоемов.

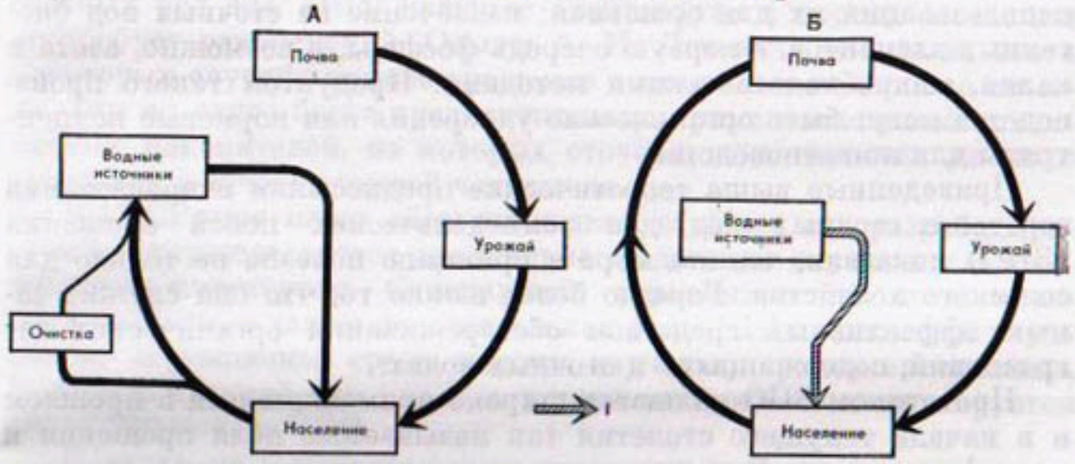


Рис. 25. **Схема обмена биогенных элементов, связанного с городским водоснабжением:**

А — при сбросе сточных вод в реки и водоемы; Б — при использовании сточных вод для орошения кормовых культур и извлечении из них биогенных элементов; 1 — чистая вода

Схема 25Б характеризует направление охраны вод в процессе использования биогенных элементов, содержащихся в сточных водах. Стадиями такого обмена являются *почва — урожай — население — почва*, т. е. осуществляется замкнутый цикл обмена веществ, минующий водные источники. Последние используются для водоснабжения населения. Водные источники таким образом профилактически защищаются от загрязнения. В этом случае канализационные воды и воды очистных сооружений заканчивают свой путь не в реке, водоеме и в конце концов океане, а перекачиваются на сельскохозяйственные поля, где после соответствующей подготовки служат для орошения и удобрения кормовых культур.

[1] См.: *Ленин В. И.* Полн. собр. соч., т. 5, с. 152.

Этот же принцип несомненно должен распространяться на сточные воды, сбрасываемые непосредственно в океан, особенно во внутренние моря, характеризующиеся слабым обменом с океаном, такие, например, как Азовское, Черное, Средиземное, Балтийское и др. Еще в большей степени это относится к таким бессточным водоемам, как Каспийское, Аральское моря, оз. Балхаш, оз. Иссык-Куль в СССР и бессточные озера Африки и зарубежной Азии, а также для водохранилищ.

Важно подчеркнуть, что такой путь решения проблемы не только умепьшает расход минеральных удобрений. Он имеет важное водоохранное значение, так как в почве, как уже отмечено, обезвреживание загрязнений происходит гораздо интенсивнее, чем в водной массе. Это объясняется тем, что в единице объема почвы содержится окисляющих бактерий по крайней мере в 100 раз больше, чем в такой же единице объема воды. Однако существует еще и другой путь радикального обезвреживания сточных вод, кроме использования их для орошения: извлечение из сточных вод биогенных элементов, в первую очередь фосфора, а возможно, азота и калия, микробиологическими методами. Продуктом такого производства могут быть органические удобрения или кормовые концентраты для животноводства.

Приведенные выше теоретические предпосылки использования городских сточных вод для земледельческих полей орошения (ЗПО) показали, что эта мера в принципе полезна не только для сельского хозяйства. Гораздо более важно то, что она служит самым эффективным средством обезвреживания органических загрязнений, содержащихся в сточных водах.

Прототипом ЗПО являются широко применявшиеся в прошлом и в начале текущего столетия так называемые поля орошения и поля фильтрации. В конце прошлого столетия известный агропочвовед В. Р. Вильямс создал в Подмосковье Люберецкие и Люблинские поля орошения. В настоящее время такой способ очистки сточных вод применяется весьма редко, так как он оказался недостаточно эффективным. Объясняется это чрезмерно большими нагрузками сточных вод на единицу площади. Так, на полях орошения она в течение года достигала 15 000—35 000 м³/га, а на полях фильтрации — даже 40 000—60 000 м³/га. При столь больших нагрузках, которые в умеренной зоне во избежание заболачивания возможны только на почвах, обладающих высокой инфильтрационной способностью, вся масса воды не успевала испариться, питала подземные воды и создавала антисанитарные условия вокруг полей орошения и фильтрации.

Земледельческие поля орошения, на создание которых много труда положил А. И. Львович (1977), коренным образом отличаются от полей орошения и фильтрации. Для них характерны малые «голодные» нормы орошения — в пределах 1500—4000 м³/га в зависимости от климатических условий, характера почв и подстилающих грунтов. В весьма засушливых районах они могут быть

выше. Норма не должна превышать расхода воды на испарение и транспирацию.

Одно из основных условий при обезвреживании сточных вод на ЗПО — минимальное промачивание почвы с целью максимальной изоляции сточных вод от подземных. Другое необходимое условие — специальная подготовка сточных вод перед орошением. Как минимум с этой целью практикуется более или менее продолжительное выдерживание воды в отстойниках. Это необходимо для осаждения из сточных вод твердых частиц и яиц гельминтов. В ряде случаев считается целесообразным применять для орошения сточные воды после их биологической очистки. Это несомненно целесообразно, но при условии, что продукт предварительной очистки (ил) служит для изготовления компоста, используемого для удобрения почвы. В таком случае в почву наиболее полно будут возвращаться биогенные элементы, изъятые с урожаем.

Важным условием является круглогодичное использование сточных вод для ЗПО. Решение этой задачи в период вегетации не требует разъяснений. Опыты А. И. Львовича показали, что в некоторых случаях зимнее орошение возможно и не лишено смысла. Тем не менее более предпочтительно применение зимой специальных накопителей, из которых сточная вода подается на поля орошения в течение теплой части года.

В СССР этот метод обезвреживания сточных вод разрабатывается и совершенствуется специально созданным научно-исследовательским институтом. Санитарный, агрономический, экономический аспекты, а также положительная роль ЗПО в целом для улучшения окружающей среды хорошо изучены и регламентированы. В сельском хозяйстве СССР в настоящее время эксплуатируется около 200 тыс. га ЗПО.

В целях повышения урожая кормовых культур для орошения используются не только городские сточные воды, но и отходы животноводческих хозяйств. По данным известного луговеда А. Г. Андреева (1979), стоимость одной кормовой единицы [1] на культурных пастбищах чрезвычайно мала — 2—3 коп., а при производстве кормовых трав — 3—4 коп. против 8—10 коп. для зерновых культур и 16 коп. для кормовых корнеплодов. Урожаи на культурных пастбищах в лесной зоне без орошения составляют в среднем 3600 кормовых единиц, а при орошении — 7300 кормовых единиц, т. е. в 2 раза больше; в степной зоне — соответственно 1100 и 8000, т. е. в 7 раз больше. В будущем урожаи можно повысить до 8000 — 12 000 кормовых единиц с гектара. Это эквивалентно урожаю овса 8—12 т/га. Но такие урожаи зерновых вряд ли возможны и в отдаленной перспективе. Отсюда следует, что продуктивность орошаемых культурных пастбищ по кормовым единицам не менее чем в 2 раза выше, чем зерновых.

[1] Продукт, эквивалентный 1 кг овса.

Все это позволяет рассматривать лугопастбищное хозяйство, интенсивно применяющее орошение сточными водами, в качестве кормовой базы животноводства индустриального типа как в ближайшее время, так и на отдаленную перспективу.

Современное загонное животноводство способствует улучшению здоровья животных, их физического состояния, повышает полноценность кормового рациона и позволяет более полно реализовать генетический потенциал породы. Стойловое же содержание скота целесообразно ограничить рамками холодной части года. Это позволит повысить продуктивность животноводства.

В настоящее время в СССР используется свыше 1,5 млн. га культурных пастбищ. Они орошаются и удобряются преимущественно отходами животноводства, разбавленными чистой водой. Потенциальные возможности развития этой отрасли сельского хозяйства гораздо выше, особенно если использовать для этой цели городские сточные воды. Для ЗПО можно брать сточные воды некоторых пищевых предприятий — консервных, сахарных, крахмально-паточных, дрожжевых и т. п. (Бородавченко и др., 1979). Однако высокая концентрация органических веществ в сточных водах некоторых предприятий пищевой промышленности и животноводческих хозяйств требует предварительного разбавления их чистой водой.

Напомним, что высокая эффективность использования городских сточных вод в сельском хозяйстве сочетается с решением исключительно важной задачи интенсивного обезвреживания содержащихся в них загрязнений.

Опыт эксплуатации ЗПО показывает, что такой вид использования и обезвреживания сточных вод гораздо выгоднее, чем их очистка с последующим сбросом в реки и водоемы. Во-первых, сохраняется чистой вода рек и водоемов и не требуется столь высоких затрат на ее подготовку для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения. Во-вторых, экономически выгодна очистка сточных вод на ЗПО с одновременным развитием высокопродуктивного животноводства. В-третьих, ЗПО позволяют уменьшить расходование минеральных удобрений. Наконец, едва ли не наиболее важным в этом случае является прекращение противоестественного загрязнения воды, которую мы пьем.

Почвенное обезвреживание сточных вод весьма эффективно, но этот путь не единственный. Целесообразно вторично использовать очищенные сточные воды теми промышленными предприятиями, которые не нуждаются в совсем чистой воде. К числу таких предприятий относятся и тепловые электростанции. Они могут применять очищенные сточные воды для охлаждения турбогенераторов.

«Конечная» цель указанных мер заключается в прекращении сброса городских сточных вод, в том числе и очищенных, в реки и водоемы. Это один из наиболее реальных и экономически оправданных путей предохранения водных источников от загрязнения на основе профилактических принципов.

В отдаленном будущем вполне вероятна регенерация городских сточных вод, их полное восстановление до состояния чистой природной воды. Такой метод уже существует, но он пока применяется в небольших масштабах, например на космических кораблях и, как было показано, на примере одного из городов Невады. Развитие этого метода может послужить основой для перестройки городского водоснабжения по принципу замкнутого оборотного. Органические отходы таких фабрик регенерации вод могут использоваться для поддержания плодородия почвы. В этом случае не будет нарушаться обмен биогенных элементов. Он будет полностью осуществляться при очистке городских сточных вод на земледельческих полях орошения. Следует, однако, подчеркнуть, что регенерация сточных вод в больших масштабах пока представляет собой дело весьма сложное и, по-видимому, осуществимое в больших масштабах в отдаленном будущем.

В основе решения проблемы защиты водных ресурсов от загрязнения промышленными сточными водами лежит освещенный выше профилактический принцип. Весь комплекс водохозяйственных мер в промышленности будет правильно организован лишь в том случае, если охрана водных ресурсов будет осуществляться в процессе их использования. Это значит, что сам процесс использования должен предусматривать охрану водных ресурсов. Отсюда следует, что меры при проведении в жизнь профилактического принципа в условиях промышленного водоснабжения отличаются от тех, которые применимы для городского.

Главные водоохранные меры в промышленности:

— снижение водоемкости производства вплоть до перехода на безотходную и «сухую» технологию; другими словами, не использовать воду в технологических процессах во всех случаях, где это возможно;

— локальная очистка промышленных сточных вод, т. е. замкнутое оборотное водоснабжение, основой которого является очистка сточных вод, которые содержат одно или группу однородных загрязнений;

— изменение технологии производства, позволяющее получать сточные воды, легко поддающиеся очистке или регенерации.

Рассмотрим эти три направления на примерах.

Примером постепенного перехода на «сухую» технологию может служить нефтеперерабатывающая промышленность. Если на заводах, применяющих старую технологию, на 1 т перерабатываемой нефти расходуется до 15 м^3 воды, то на Киришинском заводе (проект 1960 г.) — 1,3 м^3/т; в ряде последующих проектов расход воды уже не превышал 0,24 м^3/т, а при проектировании Ачинского завода он был снижен до 0,12 м^3/т. Таким образом, за последние десятилетия удельный расход воды на переработку нефти уменьшился в 100 раз. Современная нефтеперерабатывающая промышленность переходит на «сухую» технологию. Подобное решение задачи — большой вклад в дело охраны водных ресурсов.

Чрезвычайно важное значение имеет локальная очистка сточных вод. Большое преимущество этого направления охраны вод заключается в том, что очистке подвергается сточная вода, содержащая одно загрязнение или несколько однородных. Технология такой очистки проще, экономичнее и несоизмеримо более эффективна, чем любые способы очистки сточных вод, содержащих много самых разнообразных загрязнений. Локальная очистка должна проводиться непосредственно при выходе технических сточных вод с предприятия, из его отдельных цехов или с производственных линий. При этом не допускается смешение сточных вод, содержащих разнородные загрязнения.

Иллюстрируем этот способ на примере одного из крупных уральских металлургических заводов. Сточные воды разных цехов по характеру загрязнений разделены на четыре группы: отработанные травильные растворы, промывные воды травильных отделений, сточные воды с преимущественно взвешенными веществами, маслосодержащие сточные воды. Для регенерации каждой из этих групп сточных вод разработана специальная технология и созданы соответствующие установки. Регенерация позволяет настолько освободить сточные воды от загрязнений, что они оказываются пригодными для повторного многократного использования на этом же предприятии. Такая мера позволила перейти на *замкнутый* цикл водоснабжения, который не следует смешивать с простым и притом малоэффективным незамкнутым оборотным водоснабжением, которое позволяет экономить энергию, но сопровождается отрицательными в смысле охраны водных ресурсов залповыми сбросами сточных вод в реки и водоемы, так как на них обычно не рассчитана пропускная способность очистных сооружений. Между тем при замкнутом цикле сброс сточных вод в реки исключается, а подпитка из водоисточника составляет всего 2—3% общего водопотребления. Все это открыло возможность для перевода предприятия на бессточную систему водоснабжения с общим расходом воды 400 тыс. м^3/сут, или около 150 млн. м^3/год, что приблизительно соответствует размерам водоснабжения города с населением 1—1,5 млн. человек. Система локальной очистки позволила использовать все содержащиеся в сточной воде отходы производства и отключить техническое водоснабжение от канализации.

По традиции считается, что такая глубокая физико-химическая очистка промышленных сточных вод является дорогостоящей и в экономическом отношении трудно осуществима. Однако настоящий пример свидетельствует об обратном. Ежегодный экономический эффект от применения системы охраны водных ресурсов на указанном предприятии достигает 1350 тыс. руб. Только на одной из групп сточных вод ежегодная экономия составила 300 тыс. руб. в год. Кроме того, оказалось возможным освободить более 200 га ценной земли, ранее занятой недостаточно эффективными очистными сооружениями. Отсюда видно, что локальная очистка сточных вод экономически выгодна.

Замкнутое оборотное водоснабжение промышленных предприятий, позволяющих прекратить сброс сточных вод в реки и водоемы, получает в нашей стране все большее применение. Так, в последние годы оно введено на новых предприятиях г. Волжска, на Первомайском химическом заводе, внедряется на строящемся Тобольском нефтехимическом комбинате. Интересно, что эта задача решалась не только для промышленных сточных вод. В городах Волжске и Первомайске бытовые сточные воды после соответствующей подготовки использованы для орошения кормовых культур и для охлаждения установок на промышленных предприятиях. В итоге годовой экономический эффект, полученный на каждом из названных предприятий, колеблется в пределах от 2,3 млн. до 4,5 млн. руб. (Безотходные промышленные узлы, 1984).

Таким образом, довольно широкий опыт показывает, что экономическая сторона вопроса, на которую часто ссылаются при внедрении нового направления охраны воды — регенерации на основе локальной очистки, не служит препятствием для кардинального решения проблемы охраны водных ресурсов значительной части промышленных предприятий. Но гораздо большее значение имеет главный результат, который трудно оценить экономически, — прекращение загрязнения рек, в которые ранее сбрасывались не полностью очищенные сточные воды. Такой социальный эффект достигнут принципиально новым подходом к охране водных ресурсов. На указанных предприятиях сточные воды локально очищаются непосредственно в процессе водоснабжения. Этот принцип может быть централизован путем сооружения регенерационных установок для очистки однородно загрязненных вод с нескольких предприятий данного района.

Суть третьей группы мер охарактеризуем на примере целлюлозной промышленности. Прежняя технология, которую еще используют многие целлюлозные заводы, дает большое количество сточных вод, чрезвычайно трудно поддающихся очистке. Достаточно отметить, что неочищенные сточные воды этой отрасли промышленности требуют 200—400-кратного разбавления чистой водой, после биологической очистки в аэротенках — 50—100-кратного, а после доочистки — 20—50-кратного (Каминский, 1982).

К этому следует добавить, что самоочистка сточных вод целлюлозно-бумажных заводов в реках и водоемах происходит очень медленно и часть загрязнений, даже на больших реках, достигает устьев и попадает в моря. По этой причине, а также учитывая высокую водоемкость отрасли производства, основным сырьем которой является древесина, целлюлозные заводы сооружали в малонаселенных, богатых лесом районах с многоводными реками. Однако из-за роста населения и хозяйства таких малообжитых районов становится все меньше. Поэтому возникла необходимость в изменении технологии целлюлозного производства, которое направлено на решение двух задач: 1) устранить из сточных вод отходы производства; 2) уменьшить потери такого ценного

продукта, как целлюлоза, а это возможно лишь в том случае, если сточная вода подвергается глубокой очистке.

Ключ к решению указанных задач — переведение технологии варки целлюлозы на растворимую основу. В этом случае возможна регенерация сточной воды — извлечение из нее реагента и существенное сокращение потерь целлюлозы.

На вновь сооруженных крупных целлюлозно-бумажных комбинатах СССР (Красноярском, Братском, Усть-Илимском) предусмотрена технология, решающая эти задачи. Это является крупным шагом в развитии методов охраны водных ресурсов. Пройдет одно-два десятилетия, и целлюлозно-бумажные комбинаты, работающие по прежней технологии, будут занимать небольшую долю в общем производстве целлюлозы. Но и их следует постепенно перевести на более рациональную технологию, которая, несомненно, будет способствовать решению важнейших проблем человечества — сократить водопотребление и снизить загрязнение вод на основе принципа их охраны в процессе использования.

На примере зарубежного опыта отметим, что в Швеции бóльшая часть промышленности страны переведена на принципиально новые, технологические основы. Эффект оказался впечатляющим (Folkenmark, 1977): не только уменьшено загрязнение воды, но и снижено ее расходование. Так, в целом по стране в 1965—1975 гг. расходование воды в промышленности уменьшилось в 3 раза в сравнении с тем, что планировалось к концу этого десятилетия по прогнозу, в основе которого лежал довольно часто применяемый для этой цели способ экстраполяции на будущее прежнего опыта без должного учета прогресса в технологии производства (рис. 26). В Швеции при увеличении производства целлюлозы в 2 раза после проведения указанных мер расход технической воды уменьшился в 3 раза, а потери целлюлозы сократились в 7 раз (рис. 27), что возместило все расходы по перестройке технологии целлюлозно-бумажного производства. Таким образом, проведенные мероприятия не только привели к положительному результату в деле охраны водных ресурсов, но и принесли пользу самому производству.

В отечественной науке большую роль сыграли физико-химические методы очистки промышленных сточных вод, разработанные Б. Н. Ласкориным. Следует отметить, что в химической промышленности СССР положительно отнеслись к предложенным мною принципам охраны вод. Этой проблеме был посвящен специальный выпуск журнала Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева (1972). «Сухая» технология в сочетании с безотходной не только решает задачу охраны водных ресурсов, но и, как мы видим, нередко способствует повышению качества и экономичности самого производства.

Именно от научно-технического прогресса в большой степени зависит эффективность защиты водных ресурсов от загрязнения промышленными сточными водами. Их нельзя, как джинна из

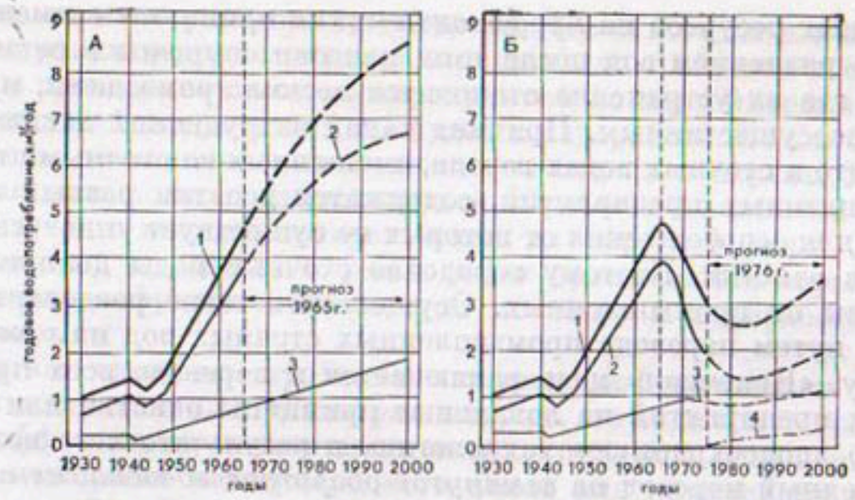


Рис. 26. Развитие использования водных ресурсов в Швеции:

А — состояние в 1965 г., Б — состояние в 1975 г. Годовой расход: 1 — общий для страны; 2 — на промышленность; 3 — хозяйственно-бытовой; 4 — на орошение. Сплошные линии — фактическое состояние, пунктирные — прогноз

Рис. 27. Динамика развития целлюлозно-бумажной промышленности в Швеции с 1962 по 1978 г.:

1 — расходование воды (км³/год); 2 — потери целлюлозы (10^5 т); 3 — годовое производство целлюлозы (млн. т)

бутылки, выпускать в природу, нарушая тем самым опресняющее действие круговорота воды.

В заключение следует отметить главные направления прогресса в деле использования и охраны водных ресурсов в условиях будущего. Это прежде всего необходимость переориентации охра-

ны водных ресурсов на *профилактические принципы* взамен борьбы с загрязнением вод после того, как они спущены в реки и водоемы, где их устранение становится весьма громоздким, практически неосуществимым. Причина таких затруднений заключается в том, что в сточных водах города, смешанных со сточными водами промышленных предприятий, содержатся десятки разных загрязнений, для освобождения от которых не существует универсальных методов очистки. Поэтому городские сточные воды должны быть отделены от промышленных. Осуществить такое разделение возможно путем перевода промышленных сточных вод на *локальную* очистку. «Конечная» цель заключается в переводе всех промышленных предприятий на локальные принципы очистки или специальную «водоохранную» технологию, в результате чего возможен постепенный перевод на *замкнутое оборотное водоснабжение*. Тогда в канализации городов будут преобладать сточные воды хозяйственно-бытового происхождения и отчасти предприятий пищевой промышленности. Содержащиеся в них *биогенные элементы* следует извлекать микробиологическими методами и использовать для орошения кормовых культур. В северных районах целесообразно применение орошения в виде мелиоративных систем двойного действия. *Сточные воды,* соответственным образом предварительно подготовленные, иногда разбавленные чистой водой, представляют собой ценный *источник орошения в сочетании с удобрениями.*

Разумеется, эта глава, как и книга в целом, не претендует на универсальное решение проблемы кардинального избавления от такого неблагоприятного фактора, каким является загрязнение рек и водоемов, отчасти подземных вод. Несомненно, методы решения этой проблемы могут быть умножены, но достаточно совершенными они будут лишь на основе профилактического принципа, который кроме сказанного выше открывает пути для *экономии при использовании водных ресурсов* — чрезвычайно важной и эффективной хозяйственной меры, вместе с тем решающей и проблему защиты вод от загрязнения.

Загрязненные речные воды в конечном счете попадают в океан и во внутренние моря. Поэтому эффективные меры охраны вод суши предупреждают загрязнение и океана, и внутренних морей. Предположительно более половины загрязнений попадает в океан с суши. Поэтому прекращение сброса сточных вод в реки и водоемы наполовину решает проблему охраны морских вод. Разумеется, при этом в приморских городах должен быть прекращен сброс канализационных вод в моря. Все сказанное выше о промышленном водоснабжении и водоотведении в полной мере относится к предприятиям, расположенным на морских побережьях. Следует, однако, подчеркнуть, что такой путь лишь частично решает проблему охраны океанских вод, так как в океане существуют свои специфические источники загрязнений, к которым в числе наиболее существенных относятся судоходство и нефтяные промыслы на морском шельфе.

Что касается морского судоходства (это относится и к судоходству на реках, озерах и водохранилищах), то требуется последовательное проведение системы мероприятий по контейнерному сбору всех отходов и загрязнений на судах с переработкой их и обезвреживанием на специальных очистных станциях в портах. На этих же станциях должна производиться обработка слапиевых и балластных вод с полным прекращением их сброса в море. Следует отметить, что на многих морях и реках принимаются меры такого назначения — функционируют суда по сбору и переработке этих отходов.

Другая сложная проблема — аварии нефтеналивных судов. В этом направлении принят ряд мер, но, по-видимому, требуется более эффективное навигационное и техническое оснащение танкеров и создание международного флота для ликвидации последствий аварий нефтеналивных судов. Этот же флот может, вероятно, обеспечивать и ликвидацию утечки нефти при разведочном бурении на морском шельфе.

Для изучения изложенных подходов к эффективной охране водных ресурсов большое значение имеет мониторинг окружающей среды, ее водный компонент.

Мониторинг служит объективным средством слежения за состоянием вод, степенью их загрязненности. Поскольку в настоящее время действует система предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязнений, постольку мониторинг позволяет осуществлять слежение за степенью загрязненности и в необходимых случаях принимать меры, исключающие превышение ПДК.

По этим функциям мониторинга окружающей среды и ее водного компонента большая работа проводится Государственным комитетом СССР по гидрометеорологии и контролю окружающей среды. Производится большое количество анализов речных, озерных и подземных вод — до нескольких десятков тысяч в год в 4000 пунктов наблюдений, расположенных на 1200 водных объектах. Ю. А. Израэль в своей книге делит Общегосударственную систему службы наблюдений и контроля за уровнем загрязнений окружающей среды на три крупных блока (подсистемы):

— контроль загрязнений в зонах возможного существенного антропогенного воздействия;

— контроль загрязнений на региональном уровне;

— контроль загрязнений на фоновом уровне (Израэль, 1979).

И. П. Герасимов рассматривал мониторинг как систему наблюдения, контроля и управления состоянием окружающей среды. В этом определении, с моей точки зрения, особенно интересна и заслуживает внимания третья функция — управление (Герасимов, 1976). Она расширяет рамки мониторинга, придает ему активную роль и выходит за пределы наблюдения и контроля, которые необходимы, но непосредственно не могут существенно влиять на борьбу с загрязнениями. Придерживаясь такой постановки проблемы, я много лет работаю именно в этом направлении.

После рассмотрения принципиальных положений охраны водных ресурсов следует перейти к конкретной характеристике современного состояния этого вопроса в мире и прогнозам на будущее. Материалом для решения этой задачи служат отдельные расчеты, приведенные во II части книги. Но в рамки группы вопросов, освещенных в этой части, не укладывается крупная отрасль водного хозяйства — водоснабжение. Оно не вносит каких-либо существенных преобразований в круговорот воды, но с ним связаны неблагоприятные воздействия на качество вод. Этой проблеме посвящена следующая глава.

Глава 12
ОХРАНА ВОД В ПРОЦЕССЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

1. Хозяйственно-бытовое водоснабжение и водоотведение

Водоснабжение влияет на окружающую среду в результате отъема воды из источников — рек, озер, подземных горизонтов. Отъем воды на нужды водоснабжения невелик, особенно в сравнении с расходованием воды на орошение. Водоснабжение, вернее, его последствия наносят серьезный ущерб окружающей среде. Количество воды для хозяйственно-питьевого водоснабжения существенно зависит от социального фактора. Объем воды, потребляемой людьми, значительно отличается в городах и в сельской местности.

Как уже было отмечено выше, при общей мировой численности населения 4,4 млрд. человек (1980 г.) в городах проживало 1,8 млрд. человек, или 41%. Но доля городского населения неодинакова в разных частях света: от 28% в Азии до 76% в Европе (без СССР); в СССР городское население составляет 71%.

Мы будем вести расчет хозяйственно-бытового и питьевого водоснабжения для всего земного шара в целом. Для этой цели необходимо подразделить население по типам водопотребления.

В табл. 27 применен более дифференцированный способ расчета, чем прежде (Львович, 1974). Ранее по способам хозяйственно-бытового водоснабжения выделялись две категории — городское водоснабжение и сельское. Теперь введена третья, переходная категория централизованного водоснабжения (водопроводные колонки) с частичной канализацией. Эта категория дает небольшое уточнение, но имеет принципиальное значение, так как распространена в сельской местности, отчасти на окраинах городов. Вместе с тем в сельской местности все большее распространение получает и централизованный водопровод с канализацией.

Расчет самой высокой категории городского централизованного водоснабжения с канализацией основывается на данных о количестве населения земного шара, пользовавшегося канализацией на

Таблица 27

Мировой расход воды на хозяйственно-бытовое водоснабжение

Способ водоснабжения	Современное состояние								«Конечная» цель (отдаленная перспектива)							
	Численность населения, млн. человек	Расход воды на душу населения, л/сут	Годовое водопотребление, км³			Объем речного стока, задержанного отобранной водой, км³	Близкая перспектива		Годовое водопотребление, км³			Объем речного стока, задержанного отобранной водой, км³	Численность населения, млн. человек	Расход воды на душу населения, л/сут	Годовое водопотребление, км³			Объем речного стока, задержанного отобранной водой, км³
			Водозабор из источников	Безвозвратный расход	Сточные воды		Численность населения, млн. человек	Расход воды на душу населения, л/сут	Водозабор из источников	Безвозвратный расход	Сточные воды				Водозабор из источников	Безвозвратный расход	Сточные воды	
Централизованное водоснабжение с канализацией	1 100	100	40	14	18	160	1 255	2 500	700	77	33	2 500	6 000	200	1 200	240	960	0
Централизованное водоснабжение (колонки) с частичной канализацией	800	40	32	14	18	160	1 255	2 500	700	77	33	2 500	2 000	50	100	70	30	0
Водозабор из источников	2 470	20	50	50	0	0	2 500	40	100	50	50	0	2 000	20	40	40	0	0
Всего	4 370	44	192	97	95*	860	6 255	65	480	160	320**	990	10 000	100	1 340	350	990***	0
В том числе население, не обеспеченное питьевой водой надлежащего качества	2 000	—	—	—	—	—	1 000	65	150	40	110	0	0	—	—	—	—	—
							1 500	65	380	50	330	0	0	—	—	—	—	—
								65	80	30	50	0	0	—	—	—	—	—
								65	300	20	280	0	0	—	—	—	—	—
								65	900	90	810	0	0	—	—	—	—	—

* Приблизительно половина проходит не вполне совершенную очистку, поло вина сбрасывается в реки и водоемы без очистки.

** Все очищаются, в том числе около половины радикально обезвреживаются — извлекаются биогенные элементы и используются для орошения кормовых культур.

*** Все радикально обезвреживаются — извлекаются биогенные элементы и используются для орошения кормовых культур.

уровне середины 60-х годов. Доля этой части населения составляла тогда 800 млн. человек, или 22% от общего населения 3 600 млн. человек (Львович, 1974, с. 323). Даже в Европе этот процент едва достигал 50, в Азии он уменьшался до 6, а в Африке — до 4. Теперь (1980), когда население увеличилось до 4 370 млн. человек (Patterns of urban..., 1980), можно, по-видимому, считать, что 1 100 млн. человек пользуются канализацией, а это составляет 25%.

Ежегодное увеличение в мире числа людей, пользующихся централизованной канализацией, на 30 млн. человек вполне правдоподобно. Остальная часть населения на уровне 1980 г. — 3 270 млн. человек — делится на две части: 75%, или 2 470 млн. человек, берет воду непосредственно из источников, а 25%, или 800 млн. человек, пользуется централизованным водоснабжением с колонками и частичной канализацией (выгребные ямы). Учитывая, что в настоящее время городское население составляет 1 807 млн. человек (41%), по данным табл. 27 мы получаем, что не все городское население пока обеспечено централизованным водопроводом и централизованной канализацией. При этих показателях общий водозабор на хозяйственно-бытовые нужды в настоящее время (1980) составляет 192 км³/год при безвозвратном расходе 97 км³/год (50%) и ежегодном количестве сточных вод 95 км³. Среднее количество воды, потребляемой одним человеком, равно приблизительно 44 м³/год, или 120 л/сут.

Чрезвычайно важным отрицательным показателем системы современного хозяйственно-бытового водоснабжения является тот факт, что, по данным ВОЗ, 2 млрд. человек не обеспечено питьевой водой надлежащего качества. В этом заключается крупный недостаток современной системы мирового водоснабжения, вследствие чего распространяются инфекционные заболевания и водные инвазии, главным образом в развивающихся странах. Одна из основных задач, нацеленных на развитие водоснабжения в будущем, заключается в устранении этого неблагоприятного фактора.

В соответствии с принятым положением о том, что сброс сточных вод в реки и водоемы приводит к загрязнению ресурсов поверхностных вод, в табл. 27 введены соответствующие графы, в которых приведены приближенные данные, характеризующие масштабы этого явления, поскольку оно связано с хозяйственно-бытовым водоснабжением. Для очищенных сточных вод, считая, что остаточные загрязнения после биологической очистки достигают 30%, берется 6-кратное разбавление, а для неочищенных — 12-кратное. При этом принимается, что в настоящее время половина городских сточных вод сбрасывается в реки и водоемы без очистки.

Прогноз общей численности населения на 2000 г. (6 254 млн. человек) с разделением на городское (3 208 млн. человек — 51% [1]) и сельское (3 046 млн. человек) принимается в табл. 27 с округлением по тому же источнику (Patterns of urban..., 1980). При этом допускается, что канализацией будет обеспечено 40% всего населения мира, или 2 500 млн. человек, т. е. на 1 400 млн. человек больше, чем в 1980 г. Водозабором из источников будет пользоваться в 2000 г. примерно столько же людей, что и в 1980 г., но процент населения, пользующегося этим видом водоснабжения, снизится с 57 в 1980 г. до 40 в 2000 г. Среднее водопотребление на душу населения мира, как допускается в расчетах, может повыситься до 180 л/сут, или до 65 м³/год.

[1] По другому источнику (The Global 2000 Report..., 1980), 3 000 млн. человек, или 50% населения мира.

Другим важным показателем прогресса явится уменьшение числа людей, не обеспеченных питьевой водой надлежащего качества. Если в настоящее время к этой категории относится около 40% населения, то к 2000 г. стоит задача уменьшить этот процент примерно до 15—20. Очень важно также к началу будущего столетия широко использовать специально подготовленные сточные воды городских канализаций для орошения кормовых культур, а также радикально обезвреживать их путем извлечения биогенных элементов, возможно методами микробиологической промышленности, с последующим использованием их в качестве удобрений.

Кроме того, необходимо принять во внимание положительный опыт, указывающий возможность регенерации хозяйственно-бытовых сточных вод до показателей питьевой воды (см. главу 11). Такой опыт к 2000 г. получит, вероятно, значительное распространение. Поэтому, а также с учетом того, что все городские сточные воды перед сбросом в реки и водоемы будут подвергаться очистке, в расчетах допускается возможность снижения средней кратности их разбавления до трех вместо в среднем 9-кратной на современном уровне. По этой причине сброс сточных вод в реки и водоемы, во всяком случае количества содержащихся в них загрязнений, в принципе должен уменьшиться, а объем мирового речного стока, загрязненного сточными водами, сохранится приблизительно на современном уровне. Это важные показатели прогресса в деле водоснабжения — сначала прекратить общий рост загрязнений, а впоследствии постепенно их ликвидировать. Разумеется, этот процесс будет протекать в разных странах не одновременно.

В основе прогноза на отдаленную перспективу лежат использованные приближенные данные по населению мира — в будущем оно достигнет 10 млрд. человек. При этом допускается, что с середины XXI в. население мира начнет постепенно стабилизироваться на этом уровне. Датировка этого демографического прогноза вряд ли надежна, но в водохозяйственном прогнозе будем исходить из десятимиллиардной численности независимо от времени ее наступления.

К этому времени доля населения, пользующегося централизованными водопроводом и канализацией, должна увеличиться до 60%, т. е. в 1,5 раза по относительному показателю и примерно в 2,5 раза, или до 6 млрд. человек, по абсолютному количеству.

Таким образом, главными показателями прогресса в хозяйственно-бытовом водоснабжении на отдаленную перспективу будут:

— обеспечение всего населения мира доброкачественной водой;

— уменьшение доли населения, пользующегося водозабором из источников, до 20% при условии, что водозабор из поверхностных источников, особенно в тропических странах, будет производиться только при их обезвреживании специальными установками, которыми должны быть обеспечены все сельские населенные пункты, вплоть до передвижных установок для кочевого населения, если оно при 10 млрд. населения не перейдет в оседлое;

— прекращение сброса сточных вод в реки и водоемы путем перехода на профилактические принципы охраны водных ресурсов: использование их для орошения кормовых культур и извлечение из них микробиологическими методами биогенных элементов для последующей утилизации их как удобрений, а также широкое применение регенерации хозяйственно-бытовых сточных вод до уровня питьевой воды.

Таковы основные задачи прогноза на отдаленную перспективу — «конечные» цели, к достижению которых необходимо стремиться уже в настоящее время. Речь идет о выполнении долгосрочной программы продолжительностью от нескольких десятилетий до века. По существу уже положено начало ее выполнению, но необходимо постепенно наращивать темпы ее развития.

2. Животноводство

Вопрос о роли животноводства в загрязнении вод непрост в связи с отсутствием обобщенных сведений о распределении отходов этой отрасли сельского хозяйства на удобрения и на сброс в реки и водоемы. При пастбищном животноводстве удобрение почвы происходит естественным путем, но во многих странах в холодный сезон содержание скота сменяется на стойловое. Немало скота содержится в стойлах бóльшую часть года. Основным источником загрязнений при стойловом содержании является не перерабатываемый в компост навоз.

35 000 голов крупного рогатого скота ежегодно дают отходы по содержанию биогенных веществ, соответствующие сточным водам города с численностью населения 350 000 человек (Сиренко, 1979). Этот же автор приводит сведения о том, что в США загрязнение жидким навозом в 10 раз превышает суммарное загрязнение бытовыми сточными водами. В том же источнике приводятся сведения о том, что силосный сок также является существенным загрязнителем: по $БПК_5$ — около 40 г O_2/л. Эти факты говорят о большой потенциальной способности загрязнения вод животноводством. Так, 1 млрд. голов крупного рогатого скота обладает такой же потенциальной способностью загрязнения, как и 10 млрд. человек. В настоящее время в мире больше 1 млрд. голов скота. Тем не менее загрязнений указанного масштаба не происходит вследствие торможения этого процесса преобладающим ныне пастбищным содержанием скота.

По данным на 1979—1980 гг., в мире содержалось 1 350 млн. голов крупного скота, включая крупный рогатый скот, лошадей, мулов, верблюдов; общая численность мелкого скота — овцы, козы, а также свиньи — составляла 1 960 млн. голов (дополнительные данные ООН по: Statistical Yearbook..., 1981).

На водопой крупного рогатого скота расходуется 50 л/сут при пастбищном содержании, 70 л/сут при стойловом (ручное поение) и 100 л/сут при наличии водопровода; для дойных коров норма расходования воды повышается до 120 л/сут. Норма для лошадей колеблется в пределах 50—60 л/сут, для верблюдов она увеличивается до 100 л/сут.

Численность крупного рогатого скота составляет около 1 216 млн. голов. Если допустить, что $^3/_4$ этого количества содержится на пастбищах, а также если учесть сезонные изменения содержания скота, средняя взвешенная норма водопотребления для этой категории животных составит приблизительно 65 л/сут. Для лошадей, мулов и верблюдов при общей численности 134 млн. голов средняя взвешенная норма суточного водопотребления исходя из того же соотношения численности голов, содержащихся на пастбище и в стойлах, составит 55 л/сут.

При определении средней взвешенной нормы водопотребления для овец (6—8 л/сут) и свиней (50—80 л/сут) получаем пропорционально числу голов 30 л/сут.

Таким образом, общее мировое водопотребление в животноводстве оценивается в 52 км³/год. При этом водопотребление крупным рогатым скотом (годовая норма — 24 м³) составит 32 км³/год, а мелким скотом (годовая норма — 11 м³) — 20 км³/год.

Напомним, что в расчетах на уровне середины 60-х годов, результаты которых приведены ранее (Львович, 1974), водозабор из источников на нужды животноводства оценивался в 40 км³/год. Увеличение на 12 км³/год в настоящем расчете объясняется ростом поголовья скота, а также уточнением самого расчета, который основывается на более надежной, чем в 1965 г., мировой сводке поголовья скота.

Лишь приближенно можно оценить сброс сточных вод с отходами животноводства при стойловом содержании скота. В прежнем расчете я принимал, что 75%, или 40 км³/год, общего водопотребления в животноводстве расходуется безвозвратно и 25% (10 км³/год) объема сбрасывается в водоемы в виде сточных вод. В последнее число входит также смыв загрязнений с животноводческих ферм дождевыми и снеговыми водами, что представляет собой весьма неблагоприятное явление, так как служит источником загрязнения рек и водоемов. Большой процент безвозвратного расходования воды в животноводстве связан с двумя причинами: пастбищным содержанием, которое практически не дает сточных

вод, и использованием навоза для удобрения пахотных земель и для создания культурных пастбищ (Андреев, 1979).

Для крупных ферм при содержании на многих из них по нескольку тысяч голов проблема использования всех отходов животноводства в полной мере не решена. Однако представляется целесообразным, чтобы при каждой из таких ферм был организован завод для изготовления компоста — удобрения более эффективного и гигиеничного, чем некомпостированный навоз. В будущем должны быть созданы условия для компостирования всех отходов стойлового животноводства. Это один из важных моментов прогресса в методах охраны окружающей среды, особенно ее водного компонента, поскольку она зависит и от животноводства. Это условие войдет в прогноз на отдаленное будущее, который, напомним, мы рассматриваем как «конечную» цель.

Прогноз увеличения численности скота в животноводстве можно дать лишь исходя из прежнего опыта и учитывая, что около 500 млн. современного населения земного шара недоедает; особенно существенный недостаток ощущается в животном белке. Поэтому рост поголовья домашнего скота должен опережать прирост населения. Если в 1965 г. на душу населения мира приходилось 0,26 голов крупного рогатого скота, то в настоящее время — 0,29; для 2000 г. принимается 0,35, для отдаленной перспективы, когда население вырастет до 10 млрд. человек, — приблизительно 0,42 крупного рогатого скота. Соответствующие данные для мелкого скота (овцы, свиньи): 1980 г. — 0,19, 2000 г. — 0,32 и отдаленная перспектива — 0,40. При этом допускается, что увеличение поголовья мелкого скота должно происходить главным образом за счет свиней, численность которых в отдаленной перспективе может вырасти приблизительно в 5 раз в сравнении с настоящим временем (1980 г.). Можно также предположить, что поголовье овец будет увеличиваться медленнее поголовья других домашних животных. Это предположение исходит из ограниченности естественных пастбищ для выпаса овец, а также из возможности замены естественной шерсти и овчин синтетическими материалами.

Что касается норм водопотребления в животноводстве, то средний расход воды на голову скота должен несколько повыситься за счет увеличения процента его стойлового содержания.

Конечно, такой прогноз не может претендовать на высокую точность. Он говорит о том, что расход воды на нужды животноводства сравнительно невелик в настоящее время и возрастет в относительно небольших размерах в отдаленной перспективе (табл. 28).

Основной прогресс водоснабжения животноводства в будущем, как показывает таблица, заключается в прекращении сброса сточных вод в реки и водоемы, что требует расходования на удобрение всех отходов животноводческих ферм. Условно принято, что для достижения этой «конечной» цели надлежит использовать не менее 80% безвозвратного водопотребления для изготовления компоста.

Таблица 28

Приближенный прогноз расходования воды на нужды животноводства

Год	Крупный скот			Мелкий скот			Суммарный расход воды, км³/год	Безвозвратный расход воды		Сточные воды		Объем речного стока, загрязненного сточными водами, км³
	Поголовье, млн.	Средняя норма водопотребления, м³/год	Общий расход воды, км³/год	Поголовье, млн.	Средняя норма водопотребления, м³/год	Общий расход воды, км³/год		всего, км³/год	в том числе использование для удобрения, %	всего, км³/год	в том числе использование для удобрения, %*	
1980	1350	24	32	1920	12	23	55	47	15	8	20	320
2000	2200	26	57	3200	17	55	112	100	30	12	50	180
—**	4500	30	135	5500	20	110	245	223	80	22	100	0

* Не считая удобрения почвы при пастбищном содержании скота.
** При мировой численности населения 10 млрд. человек.

При этом образующиеся сточные воды также должны быть полностью использованы для орошения или для изготовления компоста.

Следует подчеркнуть, что прогноз носит приближенный характер, но его главная задача заключается в иллюстрации развития безотходного животноводства. Все биогенные элементы пищи домашних животных, полученные с урожаем, должны быть возвращены в почву в виде удобрений.

3. Электроэнергетика

Общая выработка электроэнергии в 1965 г. составляла 3 700 млрд. кВт·ч, в том числе 3 000 млрд. кВт·ч теплоэнергии и 700 млрд. кВт·ч гидроэнергии. АЭС в мире было тогда ничтожно мало. Удельный водозабор из источников для теплоэлектростанций приближенно оценивался в 100 л/кВт·ч, а безвозвратный расход — в 6—7 л/кВт·ч. Соответствующие суммарные объемы составили: водопотребление (водозабор из источников) — 250 км³/год, безвозвратный расход воды — 15, сброс — 235 км³/год теплой воды в реки и водоемы. Исходя из того, что тепловое «загрязнение» природных вод относится к числу неблагоприятных явлений и что каждый кубический километр теплой воды, сбрасываемой в реки и водоемы, создает неблагоприятную среду в 3 км³, общее тепловое загрязнение составляет приблизительно 600 км³ воды. При этом учитывается, что в реки и водоемы сбрасывается вода ТЭС с температурой до 30°, преобладающей в мировой практике. В умеренном поясе такая вода, если она не загрязнена, например, нефтеотходами, не приносит столь больших помех. Однако в тропиках сброс даже чистой теплой воды в реки и водоемы действует отрица-

тельно на их экологию. Другой помехой является обеднение сточной воды ТЭС кислородом. Использование такой воды для рыборазведения дает положительный эффект в умеренном поясе, особенно зимой, после обогащения ее кислородом.

В 1980 г. производство электроэнергии возросло до 8 180 млрд. кВт·ч, т. е. увеличилось в 2,2 раза в сравнении с 1965 г. По видам выработки она распределяется следующим образом: 5 770 млрд. кВт·ч на ТЭС, 662 млрд. на АЭС, 1 736 млрд. на ГЭС и 12 млрд. кВт·ч на гидротермальных станциях. Водозабор на АЭС, на которых создаются замкнутые системы водоснабжения, почти равен безвозвратному расходу воды. На каждый выработанный киловатт-час энергии требуется 3 л воды. Такое же удельное расходование воды на ТЭС. Общий безвозвратный расход воды на всех тепловых и атомных станциях мира составляет около 20 км^3/год (табл. 29), а водозабор из источников только для части ТЭС, которые работают на прямоточном водоснабжении, составляет приблизительно 300 км^3/год. Небольшое увеличение этого показателя (на 50 км^3/год) по сравнению с 1965 г. объясняется тем, что бóльшая часть ТЭС в последнее время сооружается на замкнутом цикле водоснабжения.

В целях экономии пресной воды в теплоэнергетике все больше применяется морская вода. Так, в США в 1965 г. в этой отрасли энергетики использовалось 25% морской воды, по прогнозу на 2020 г. расходование морской воды оценивается в 51% (The National Water..., 1968).

При расчете современного удельного безвозвратного расходования на 1 кВт·ч выработки энергии принималось 3 л воды. В результате повышения коэффициента полезного действия ТЭС и ТЭЦ норма расходования воды должна снижаться. Так, некоторые специалисты считают, что она может быть уменьшена в 2 раза и в будущем составит 1,6 л/кВт·ч (Ландсберг и др., 1965). Неизвестно, однако, как этот вопрос может быть решен для АЭС, поэтому примем, что на 1 кВт·ч в 2000 г. в среднем будет расходоваться 2,5 л воды. Тогда в 2000 г. при выработке энергии ТЭС и АЭС 25 000 млрд. КВт·ч безвозвратный расход воды составит 63 км^3/год. Но водозабор из источников будет больше за счет старых станций с прямоточным водоснабжением.

Что касается объема водозабора и безвозвратного расходования воды теплоэнергетикой в отдаленной перспективе, то оценка его затруднительна в связи с тем, что мы не располагаем сведениями о возможном прогрессе в энергетике в течение нескольких десятилетий. Поэтому на отдаленную перспективу приходится ограничиться прогнозом качественных изменений, считая, что в теплоэнергетике водоснабжение полностью будет переведено на замкнутый цикл и тепловое «загрязнение» водных источников будет полностью прекращено.

Исключение возможно лишь в тех случаях, когда прямоточное водоснабжение тепловых электростанций будет использовано для

рыборазведения. Такова «конечная» цель, которая, как нам представляется, будет достигнута теплоэнергетикой в отдаленной перспективе.

Следует заметить, что в прогнозе развития мировой энергетики за 1975—1990 гг., который приведен в работе «The global 2000 report» (1980), рост выработки тепловой и гидравлической электроэнергии оценивается в 1,6 раза. По приведенным же выше фактическим данным выработка электроэнергии с 1965 по 1980 г. увеличилась в 2,2 раза.

Установленная мощность гидроэлектростанций (ГЭС) мира на 1980 г. достигает 458 млн. кВт, что составляет 23,3% от общей мощности электростанций всех типов (1 970 млн. кВт). На ГЭС вырабатывается 1 736 млрд. кВт·ч энергии, или 21,2% общей выработки всеми электростанциями мира, которая достигла 8 180 млрд. кВт·ч (Statistical Yearbook, 1979/1980, United Nations. N. Y., 1981). Считается, что современная мощность ГЭС не превышает 20% потенциальной мировой гидроэнергии, которая оценивается приблизительно в 2 500 млн. кВт. Эти данные показывают, что рост выработки самой «чистой» для окружающей среды электроэнергии возможен в весьма значительных пределах. При этом необходимо помнить, что стоимость выработки 1 кВт·ч гидроэлектроэнергии наиболее низка. В этом отношении ее можно сравнить со стоимостью выработки 1 кВт·ч на гидротермальных станциях, которых еще немного (2,2 млн. кВт установленной мощности; вырабатывают 12,7 млрд. кВт·ч электроэнергии). Следует иметь в виду также приливные ГЭС на морских побережьях. Их еще мало, но они, по всей вероятности, перспективны.

Гидроэлектростанции при всем своем преимуществе перед другими способами выработки электроэнергии (они бестопливны и безотходны) наиболее благоприятны для окружающей среды, но создание многих из них связано с затоплением земельных ресурсов, которое в настоящее время в мире достигает 350 тыс. км^2, куда входят значительные площади, пригодные для сельскохозяйственного использования. Кроме того, большие амплитуды колебаний уровней на некоторых водохранилищах неблагоприятно сказываются на воспроизводстве рыбы; плотины преграждают путь (на нерест) проходным рыбам; неблагоприятен процесс эвтрофирования некоторых водохранилищ, в основном обусловленный сбросом в реки и водоемы сточных вод, содержащих большое количество биогенных элементов; наконец, возможно, возбуждение землетрясений при заполнении отдельных водохранилищ даже в асейсмичных районах. Однако перечисленные неблагоприятные явления, связанные с работой ГЭС,— неизбежные издержки, которые, однако, с большим избытком перекрываются «чистой» для окружающей среды гидроэнергией, вырабатываемой ими. Это вовсе не значит, что с неблагоприятными последствиями не следует бороться; их надо сводить к минимуму и осуществлять такие компенсационные меры, которые могут снизить уровень издержек или ликвидировать

их. Урон от затопления земель можно компенсировать культивацией почв в других районах и повышением рыбной продуктивности водохранилищ, с каждого гектара акватории которых возможно получать больше животного белка, чем с сельскохозяйственных угодий. В качестве компенсационной меры для достижения такой цели могут служить рыбные заводы. Мелководные участки на водохранилищах в равнинных районах возможно осушить, отделив их дамбами. Наконец, радикальным способом предупреждения эвтрофирования водоемов является прекращение сброса сточных вод в реки и водоемы.

Необходимо иметь в виду еще одно отрицательное последствие водохранилищ — потери воды на испарение с их поверхности, о которых говорилось выше. В настоящее время существует 2260 больших водохранилищ с акваторией 590 тыс. км^2; из них 350 тыс. км^2 приходится на площадь затопленных земель, а 240 тыс. — на акватории подпертых озер. С акватории подпертых озер потери воды на испарение существенно не изменяются, так как в обоих случаях, до их сооружения и после, испарение приблизительно достигает размеров испаряемости. Поэтому потери на испарение с акватории водохранилищ необходимо считать только для площади затопленных земель. При этом к потерям на испарение следует отнести не весь испаряющийся годовой слой воды, который приблизительно достигает размеров испаряемости, а лишь часть его — за вычетом того испарения, которое имело место с поверхности почвы до затопления земельных ресурсов.

Зная распределение водохранилищ мира по географическим зонам (Авакян и др., 1979), а также испаряемость для каждой из зон, получаем приблизительную величину испарения с их акватории — 840 мм. Но до затопления с суши испарялось около 460 мм, что можно определить по карте испарения с суши, приведенной в ранее изданной книге (Львович, 1974). Таким образом, слой фактических потерь воды с акватории водохранилищ составляет 380 мм, что соответствует объему годовых потерь на испарение с акватории водохранилищ 130 км^3. Эта величина значительна, так как почти достигает годового безвозвратного расходования воды на хозяйственно-бытовые нужды населения мира (141 км^3/год).

Полученный объем 130 км^3 следует отнести на гидроэнергетику, орошение и водоснабжение, но, учитывая, что водохранилища объемом более 100 млн. м^3 каждое в превалирующем числе случаев сочетаются с ГЭС, мы условно относим эти потери на гидроэнергетику. Между тем лишь в отдельных случаях столь большие водохранилища служат только для ирригационных или других неэнергетических целей. Из 5000 ныне существующих ГЭС потери на испарение учтены с акватории 2260 водохранилищ. По их числу это половина, но немало ГЭС деривационного типа действует без водохранилищ, а много небольших ГЭС создано при водохранилищах объемом менее 100 млн. км^3 каждое. По аналогии с приближенно оцененным объемом малых водохранилищ (см. главу 6)

потери на испарение с их акватории составляют около 3% от потерь на испарения с больших. Таким образом, эта цифра находится в пределах точности сделанных расчетов.

Для того чтобы получить приближенное представление об ожидаемом росте потерь воды на испарение с водохранилищ ГЭС, необходимо сделать хотя бы грубую прикидку мощности будущих ГЭС на ближайшую (2000 г.) и отдаленную перспективу. При этом допускается, что в 2000 г. будет использовано 40% потенциальных гидроэнергетических ресурсов и мощность ГЭС достигнет 1 000 млн. кВт при годовой выработке 4 000 млрд. кВт·ч, а на отдаленную перспективу использование гидроэнергетического потенциала возрастет до 80% при мощности 2 000 млн. кВт и годовой выработке энергии 8 000 млрд. кВт·ч. Последние 20% потенциальных ресурсов использовать будет, по-видимому, сложно по техническим и экономическим причинам. Компенсировать их будет электроэнергия, вырабатываемая на приливно-отливных гидростанциях, а также на гидротермальных электростанциях.

Учитывая современную удельную акваторию водохранилищ гидроэлектростанций, приходящуюся на единицу установленной мощности, получим потери воды на испарение с водохранилищ: 260 км^3 в 2000 г. и 500 км^3 в отдаленной перспективе.

Этот прогноз можно считать весьма ориентировочным, но он показывает, что с использованием $^4/_5$ всего гидроэнергетического потенциала земного шара связано увеличение потерь на испарение с водохранилищ до 500 км^3/год, что составляет немного более 1% мировых ресурсов речного стока.

В табл. 29 приведены обобщенные данные о расходовании воды на нужды энергетики в настоящее время и приближенный прогноз на ближайшую и отдаленную перспективу. Напомним, что последняя дата связывается с достижением численности населения мира 10 млрд. человек.

В заключение следует отметить, что безвозвратный расход ТЭС и АЭС уже в 2000 г. достигнет 60—70 км^3/год, а в будущем увели-

Таблица 29

Расход воды на нужды мировой энергетики, км^3/год

Вид расходования	1980 г.	2000 г.	Отдаленная перспектива
Водозабор из источников ТЭС и АЭС	320	200	—
Безвозвратный расход воды ТЭС и АЭС	20	63	—
Сброс сточных вод ТЭС	300	137	0
Тепловое «загрязнение» водных источников	900	400	0
Потери на испарение с акватории гидроэнергетических водохранилищ	130	260	500
Всего безвозвратный расход и потери воды	150	323	500

чится еще больше, хотя удельная норма, как можно полагать, будет уменьшаться. В первые десятилетия XXI столетия следует, по-видимому, ожидать появления нового вида энергии — термоядерной, которая в будущем столетии может уже занять существенное место в энергетическом балансе. О количестве расходования воды этим видом энергетики пока еще неизвестно. Но если речь идет о ТЭС и АЭС, то абсолютный безвозвратный расход воды на них не так уж велик и в отдаленной перспективе, если пока не учитывать возможных потребностей в воде термоядерной энергетики, вряд ли будет в 3—4 раза больше, чем в 2000 г. Значительны в настоящее время и будут быстро расти в будущем потери воды на испарение с акватории водохранилищ. При населении 10 млрд. человек этот расход, как отмечено выше, уже может превысить 1% мирового речного стока.

4. Промышленность

Обобщенная количественная характеристика водопотребления мировой промышленностью весьма затруднительна в связи с большим ее разнообразием как по выпускаемой продукции, так и по применяемой технологии и режимам работы. Примером зависимости размеров водопотребления от технологического уровня производства, приведенным в 11-й главе, может служить нефтеперерабатывающая промышленность, расходование воды в которой колеблется в пределах от 0,1 до 10 м³ на 1 т перерабатываемой нефти. Наиболее совершенная технология в этой отрасли промышленности позволяет ограничиться нижним пределом указанного диапазона.

Весьма распространено использование воды в промышленности для целей охлаждения. При этом дело не ограничивается тепловым «загрязнением» водных источников: вода, использованная для охлаждения, часто содержит те или иные отходы производства.

Безвозвратный расход воды в промышленности чаще всего невелик и колеблется в пределах от 2% при наиболее совершенных системах водоснабжения и водоотведения с применением локальной регенерации использованной воды, что проиллюстрировано в главе 11 на примере металлургического завода на Урале, до 20% в зависимости от характера производства и применяемой технологии. При низком проценте безвозвратного расхода воды бóльшая часть водозабора — до 90% — используется для удаления отходов производства, которые чаще всего представляют собой ценный продукт, что неблагоприятно влияет на окружающую среду, на его водный компонент.

Увеличение расходования воды промышленностью связано не только с быстрым ее развитием, но и с ростом водоемкости производства, т. е. с увеличением расхода воды на единицу продукции. Так, например, на производство 1 т хлопчатобумажной ткани фабрики расходуют около 250 м³ воды, на производство 1 т синтетического волокна — 2500—5000 м³. Если же учесть расходование воды на производство 1 т орошаемого хлопчатника, то эти величины удельного водопотребления почти однозначны. Много воды требуется химической промышленности. Так, на производство 1 т аммиака затрачивается около 1000 м³ воды, 1 т синтетического каучука — 2000 м³ воды. Весьма водоемка также цветная металлургия: на выплавку 1 т никеля расходуется 4000 м³ воды. Эту цифру интересно сравнить с затратой воды на выплавку 1 т чугуна — 180—200 м³, что в 20 раз меньше.

Эти данные, полученные из разных источников, относятся к прямоточному водоснабжению. Однако уже на протяжении ряда лет в промышленности получает распространение оборотное водоснабжение, которое позволяет снизить количество расходуемой воды. Это относится как к удельному водопотреблению — на единицу производимой продукции, так и к суммарному расходованию воды. Такой способ водоснабжения приносит некоторую экономическую выгоду, но недостаточно эффективен с точки зрения охраны окружающей среды. Повторное использование воды при незамкнутом цикле водоснабжения сопровождается концентрацией загрязнений в меньшем объеме воды, чем при прямоточном. Другими словами, оборотное водоснабжение не снижает общей массы содержащихся в воде отходов производства, загрязняющих воду, приводит к залповым сбросам концентрированных загрязнений.

Если такой сброс приходится на очистные сооружения, то процесс очистки усложняется в связи с большим колебанием содержания загрязнений в сточных водах, а также из-за объема самих сточных вод. В таких условиях технология очистки должна быть более совершенной, а очистные сооружения более мощными, чем при равномерном поступлении на них сточных вод с менее концентрированными загрязнениями. Залповые сбросы многократно использованной в производстве воды непосредственно в реки и водоемы без очистки, что в мировой практике становится менее частым явлением, приносят еще больший ущерб окружающей среде. Отсюда следует, что несовершенное оборотное водоснабжение промышленных предприятий при незамкнутом цикле должно быть постепенно заменено замкнутым оборотным водоснабжением, которое не требует отведения сточных вод. Такая система водоснабжения, с локальной очисткой, точнее, регенерацией отработанной воды позволяет восстановить ее до состояния, пригодного для повторного использования на данном предприятии или на другом производстве, для которого регенерированная отработанная вода может быть более пригодной.

В середине 60-х годов общий потенциальный ежегодный расход воды промышленностью мира достигал приблизительно 400 км³. Если принять, что половина промышленных предприятий применяет незамкнутое оборотное водоснабжение, то получается, что реальный ежегодный водозабор из источников составлял 200 км³/год, а безвозвратный — 40 км³/год. В результате ежегодно

сбрасывалось в реки и водоемы 160 км³ очищенных и неочищенных сточных вод, которые загрязняли не менее 4000 км³ естественной чистой воды, что составляло 10% стока рек мира и 25% водных ресурсов наиболее развитых в экономическом отношении стран (Львович, 1974). Эти приближенные данные свидетельствовали о неблагополучном состоянии водоснабжения и водоотведения в мировой промышленности.

Вместе с тем тогда уже наметилась положительная тенденция, о чем свидетельствовало появление отдельных предприятий с «сухой» и безотходной технологией на основе локальной регенерации.

По приближенным оценкам, в настоящее время (1980 г.) потенциальные потребности промышленности в водных ресурсах оцениваются в 700 км³/год. Критерием для этой оценки мы принимаем рост за период начиная с середины 60-х годов мировой выработки электроэнергии, которая увеличилась за это время в 2,2 раза. Опыт показывает, что развитие промышленности несколько отстает от роста выработки электроэнергии, поэтому для оценки увеличения объема промышленного производства за истекшие 15 лет берем увеличение в 1,6 раза. Такое соотношение, принятое для оценки расходования воды промышленностью, учитывает, что в истекшие годы найдены пути экономии воды в этой отрасли хозяйства, вплоть до замкнутого оборотного водоснабжения, которое снимает проблему водоотведения и существенно снижает безвозвратный расход воды в производстве. Считая, что применение оборотного водоснабжения снижает объем расходуемой воды на 350 км³/год, получаем, что в настоящее время в промышленности используется 350 км³/год, т. е. на 150 км³ больше, чем в середине 60-х годов. Увеличение объема используемой воды за 15 лет произошло в 1,75 раза, а безвозвратный расход воды снизился до 17% (вместо 20% в середине 60-х годов). На уровне 1980 г. ежегодный безвозвратный расход воды составлял в промышленности 60 км³, объем сточных вод — 290 км³, а расход чистой воды на разбавление очищенных и неочищенных сточных вод в 15-кратном соотношении вместо 25-кратного, принятого для середины 60-х годов, ежегодно достигал 5800 км³ (табл. 30).

В эту таблицу не включено расходование воды предприятиями пищевой промышленности и предприятиями других видов промышленности, непосредственно обслуживающими население города. Считается, что водоснабжение таких предприятий обеспечивается из городских водопроводов и входит в норму водопотребления на душу городского населения (см. табл. 27). Однако стратегические принципы развития промышленного водоснабжения должны быть едиными независимо от источников, из которых берется вода городского или технического водопроводов.

В числе таких принципов следует предусмотреть постепенный переход уже в текущем столетии новых промышленных предприятий на технологию, основывающуюся на замкнутом цикле водо-

Таблица 30

Расход воды на нужды мировой промышленности, км³/год

Вид расходования	1980 г.	2000 г.	«Конечная» цель
Потенциальная потребность в водных ресурсах	700	1 800	5 000
Водозабор из источников с учетом замкнутого оборотного водоснабжения	350	500	400
Безвозвратный расход воды	60	120	400
Сброс сточных вод	290	380	0
Объем загрязненных речных вод	5 800	5 800	0

снабжения, исключающем сброс сточных вод в реки и водоемы. Локальный принцип регенерации отработанной в промышленности воды получит, как можно представить, всеобщее распространение. В результате вновь вводимые в действие промышленные предприятия будут безотходными, а водозабор из источников ограничен безвозвратным расходованием воды. Целесообразно в ближайшие два-три десятилетия все вводимые в строй промышленные предприятия перевести на такую безотходную технологию. Система замкнутого оборотного водоснабжения, которая находит в настоящее время большее или меньшее распространение, в начале будущего столетия должна получить всеобщее распространение на новых предприятиях. Вероятно, можно допустить, что в ближайшей перспективе (2000 г.) около половины промышленности будет работать по такой прогрессивной технологии, а в первых десятилетиях будущего столетия вся мировая промышленность перейдет на этот принцип водоснабжения, и водоотведение из промышленных предприятий практически будет прекращено.

В настоящее время существенным источником загрязнений является захоронение отходов производства в недрах земной коры и в глубинах океанов. Такой способ удаления отходов производства сулит крайне неблагоприятные конечные последствия, так как в недрах земли участки, изолированные от подземных вод, ограниченны. В океане даже на больших глубинах, по прежним представлениям, считалось, что вода находится в стационарном состоянии. В последние годы здесь обнаружены течения, которые впоследствии могут переместить загрязненную захороненными отходами воду в любые другие зоны океана. Поэтому следует считать необходимым, чтобы захоронение отходов было в основном прекращено.

В табл. 30 указаны ориентировочные потенциальные потребности промышленности в водных ресурсах, если исходить из прежнего опыта водоемкости этой отрасли хозяйства при прямоточном водоснабжении. При сравнении современного и будущего водозабора из источников, а также безвозвратного расхода воды можно уви-

деть преимущества промышленного водоснабжения при целенаправленных мерах. При условии прогрессивного характера социальных преобразований в странах мира «конечные» цели промышленного водоснабжения могут быть следующими:

— перевод в будущем столетии всех новых промышленных предприятий мира на замкнутое, следовательно, безотходное и бессточное (без сточных вод) производство;

— перевод в будущем столетии всех старых промышленных предприятий на такой же принцип водоснабжения;

— прекращение в основном захоронения отходов промышленности в недрах земной коры и в океане.

В связи с перечисленными целями в прогнозе на ближайшую перспективу предусматривается, что 50% промышленных предприятий будет работать на замкнутом цикле водоснабжения и безвозвратно расходовать около 5% воды, забираемой из источников при незамкнутом оборотном водоснабжении, а другая половина предприятий будет работать по распространенной в настоящее время оборотной схеме водоснабжения.

Что касается отдаленной перспективы, то все современные недочеты водоснабжения промышленных предприятий, как следует из прогноза, исходящего из принципа «конечной» цели, должны быть ликвидированы. А это означает, что водозабор из источников будет равен безвозвратному расходу воды в промышленности, а промышленные сточные воды будут исключены из практики водоснабжения.

В заключение следует подчеркнуть, что по водоснабжению промышленности трудно дать прогноз, особенно на отдаленную перспективу. Это связано с тем, что вполне вероятно появление совершенно новых видов промышленного производства, как это имело место в прошлом. Тем не менее независимо от характера производства указанный основной принцип — прекращение сброса сточных вод в реки и водоемы на основе замкнутого оборотного водоснабжения и безводной технологии — остается в силе.

5. Суммарный расход воды на водоснабжение

Прогноз водоснабжения (табл. 31) исходит из «конечной» цели, к достижению которой необходимо стремиться. Следует напомнить, что под «конечной» целью понимаются задачи, которые могут быть поставлены в настоящее время перед водным хозяйством на предельно обозримый период. Конец этого периода соответствует росту численности населения мира около 10 млрд. человек.

Интересно хотя бы приближенно оценить, когда можно ожидать такой численности населения. Так, С. И. Брук (1981) считает, что в середине будущего столетия население планеты достигнет примерно 9 млрд., а к концу века — 11—12 млрд. человек. Указанный автор считает, что на этом уровне можно ожидать полную стаби-

Таблица 31

Суммарный мировой расход на водоснабжение (км³/год)

Водоснабжение	Современное состояние (1980 г.)				Близкая перспектива (2000 г.)				Отдаленная перспектива («конечная» цель)			
	Водозабор из источников	Безвозвратный расход	Сточные воды	Объем речного стока, загрязненного сточными водами	Водозабор из источников	Безвозвратный расход	Сточные воды	Объем речного стока, загрязненного сточными водами	Водозабор из источников	Безвозвратный расход	Сточные воды	Объем речного стока, загрязненного сточными водами
Питьевое и хозяйственно-бытовое	192	97	95	860	480	160	320	990	1 340	350	990	0
Для животноводства	55	47	8	320	112	100	12	180	245	223	22	0
Для теплоэлектроэнергетики*	320	20	300	900	200	63	137	400	—**	—	0	0
Для промышленности	350	60	290	5 800	500	120	380	5 700	400	400	0	0
Всего	917	224	693	7 080	1 292	443	849	7 170	>1 985	>973	1 012	0

* Не включая потерь воды на испарение с гидроэнергетических водохранилищ: 130 км³ в 1980 г.; 260 км³ в 2000 г.; 500 км³ в 2050 г.

** Затруднительно установить в связи с возможностью появления новых видов получения энергии.

лизацию численности населения или лишь незначительный его рост. Эти оценки дают основание считать, что численность населения 10 млрд. человек наиболее вероятно ожидать в первые десятилетия второй половины XXI в.

Кроме прогноза на отдаленную перспективу разработан прогноз на промежуточный срок, приблизительно до 2000 г. Он предусматривает решение части задач, намечаемых «конечной» целью, в первую очередь частичное осуществление мер по использованию в сельском хозяйстве биогенных элементов из отходов городского хозяйства и животноводства, частичный переход на замкнутое оборотное водоснабжение теплоэнергетики и промышленных предприятий, а также переход на безотходную и бессточную технологию.

Подытожим отдельные выводы по «конечной» цели в деле водоснабжения:

— обеспечение всего населения мира доброкачественной питьевой и хозяйственно-бытовой водой;

— использование биогенных элементов хозяйственно-бытовых сточных вод и отходов животноводства для удобрения сельскохозяйственных культур на основе орошения сточными водами кормовых и технических культур, а также их очистка до стандартов питьевой воды с последующим использованием извлеченных биогенных веществ для удобрения;

— перевод теплоэлектрических станций и промышленных предприятий на замкнутое оборотное водоснабжение;

— применение всюду, где это возможно, безводной технологии на промышленных предприятиях, а также перевод их на такие технологические процессы, которые не исключают сточных вод, но обеспечивают их регенерацию.

Перечисленные меры на основе профилактических принципов будут служить прекращению сброса каких-либо сточных вод в реки и водоемы, что представляет собой главную «конечную» цель. Что касается прогноза количества используемой воды для водоснабжения и намечаемых сроков осуществления тех или иных мер, то они, конечно, носят сугубо ориентировочный характер и служат главным образом конкретной иллюстрацией необходимости проведения мероприятий, предусмотренных освещаемой здесь концепцией охраны или защиты вод от загрязнений.

В заключение необходимо подчеркнуть, что намечаемые мероприятия целесообразно осуществлять уже в настоящее время, а затем проводить нарастающими темпами. Внезапный переход от современных, уже устаревающих традиционных мер охраны водных ресурсов к мерам, намечаемым в настоящей концепции, как можно себе ясно представить, невозможен. Для осуществления намеченных целей требуется большая исследовательская работа, которая должна завершиться конкретными результатами, вплоть до соответствующего решения технологических вопросов промышленного производства и определения методов регенерации сточных вод на локальной основе.

Следует еще отметить, что многие из этих мер, которые должны стать основными в условиях будущего, уже применяются в настоящее время. Но такое применение пока еще не носит достаточно целенаправленного характера. Проблема, о которой речь идет в настоящей книге, нуждается в бо́льшем внимании.

Глава 13
МИРОВЫЕ ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В БУДУЩЕМ

Прогноз на отдаленную перспективу мы рассматриваем как «конечную» цель, характеризующую, к чему необходимо стремиться, чтобы полностью ликвидировать те неблагоприятные явления в использовании и охране водных ресурсов, которые стали очень заметны за истекшие десятилетия в некоторых районах мира.

Тем не менее представления о «копечной» цели, может быть, и недостаточно полны, так как в настоящее время невозможно предвидеть все новое, что может появиться в предстоящие десятилетия. Тем не менее введение понятия ««конечная» цель» мы считаем оправданным, поскольку уже в настоящее время необходимо проводить в жизнь целый ряд мероприятий, полная реализация которых невозможна в течение ближайших десятилетий, а требует целенаправленной работы в течение более продолжительного периода.

Если бы шла речь о проведении нарастающими темпами тех принципов, которые себя оправдали к настоящему времени, то дело обстояло бы гораздо проще. Однако, несмотря на предпринимаемые усилия, в условиях современных чрезвычайно многообразных загрязнений вод и огромного их масштаба принцип предельно допустимых концентраций загрязнений перестал себя оправдывать. Он играл определенную роль тормоза распространения загрязнений в то время и в тех странах, где их масштаб и концентрация были относительно ограниченными. Но теперь уже в ряде стран он исчерпал себя, а в условиях будущего будет все менее эффективным.

Вот почему возникла ясная необходимость в переориентации принципов и подходов на более кардинальные, направленные на прекращение сброса сточных вод в реки и водоемы. Такие направления решения этой задачи вполне сложились к настоящему времени. Теперь требуется целеустремленная работа на разных уровнях. Во-первых, привлечение внимания к необходимости соответствующей переориентации. В одних отраслях хозяйства такой подход нашел понимание и применение, в других — стратегия охраны водных ресурсов ориентируется на предельно допустимые концентрации загрязнений и на связанные с этим принципом слабо действующие ограничения и запреты, часто находящиеся в противоречии с требованиями экономики. Важно, чтобы намеченная цель была всеобщим делом. Во-вторых, для решения поставленной зада-

чи охрана должна исходить из профилактических принципов; в промышленности она должна быть нацелена на бессточную (лишенную водоотведения) и безотходную технологию. Необходимо также загрязняющие воду биогенные элементы возвращать в почву. Опасно для будущего практикующееся захоронение отходов в недрах земли и даже на больших глубинах океанов.

Перед человечеством стоит также важная задача расширенного воспроизводства водных ресурсов на основе гидрологических преобразований. В последние десятилетия они достигли больших масштабов и успешно проводятся в самых разнообразных направлениях, в числе которых основными являются водохранилища, гидромелиоративные преобразования и преобразования различными методами сельскохозяйственного воздействия на почву, а также воздействия на нее при строительстве городов, промышленных предприятий и дорог. Но намечаются некоторые новые решения, например создание подземных водохранилищ, которые сооружаются и в настоящее время, но в ограниченном масштабе, в основном для обеспечения питьевого водоснабжения. В будущем их емкость, как можно полагать, приблизится к емкости поверхностных водохранилищ. Поэтому будет решаться более широкий круг вопросов, включая магазинирование воды для орошения, а также для усиления питания рек подземными водами. Несомненно возрастут масштабы перевода промышленности на замкнутое оборотное водоснабжение на основе локальной регенерации отработанной воды.

Еще далеко не все необходимое сделано для учета мировых водных ресурсов. Вовсе не безразлично, каким методом учтены водные ресурсы и когда мы решим эту задачу. Тем не менее в перспективе стоит задача создания сети гидрологических станций в не изученных в воднобалансовом отношении районах мира. В основном это относится к развивающимся странам, где в отдельных случаях излишне густая сеть таких станций сосредоточивается в ограниченных, наиболее экономически развитых районах при полном ее отсутствии на больших пространствах менее освоенных районов. В этом случае должен быть использован опыт Гидрометеорологической службы СССР, где в результате заранее планируемой работы создана опорная сеть гидрометеорологических станций.

1. Прогноз водного баланса мира и СССР на перспективу

На принципах использования и охраны водных ресурсов и практических выводах по этой проблеме, рассмотренных в предыдущих главах, основан прогноз преобразований на отдаленную перспективу. Приведенные ниже величины преобразований носят сугубо ориентировочный характер, но они дают представление о тех изменениях, которые можно вполне реально осуществить методами расширенного воспроизводства.

Сущность основных преобразований заключается в увеличении устойчивой части речного стока с 14 тыс. км³ до 20 тыс. км³, причем это достигается в основном путем регулирования паводочного стока водохранилищами, который в ближайшие десятилетия возрастет примерно на 2,5 тыс. км³, а также магазинирование (около 5 тыс. км³ подземных вод). Такой характер преобразований позволяет увеличить самые ценные водные ресурсы, т. е. ту их часть, которая наиболее доступна для использования и поэтому представляет особую ценность для хозяйства.

Можно полагать, что коэффициент полезного действия искусственного магазинирования подземных вод в среднем будет равен 0,5—0,7. Это значит, что примерно $^1/_3$ магазинированных подземных вод практически нельзя будет использовать. Если это предположение оправдается, то эффективность искусственного магазинирования подземных вод нужно будет признать высокой. Но и вода, которую нельзя извлечь из данного подземного водохранилища, будет продолжать свое участие в круговороте и в конце концов послужит для пополнения других подземных горизонтов или питания рек подземными водами.

Другое крупное преобразование коснется умножения ресурсов почвенной влаги на неорошаемых землях примерно в объеме около 700 км³ за счет соответствующего уменьшения поверхностного (паводочного) стока. До 500 км³ увеличится расход воды на испарение с водохранилищ и на несколько сот кубических километров — на испарение с лесных территорий и лугов за счет повышения их продуктивности, достигаемого мелиоративными средствами. Кроме того, валовое увлажнение территории увеличится за счет искусственного магазинирования подземных вод — создания подземных водохранилищ.

С увеличением влажности почвенного покрова обычно возрастает и питание подземных вод. Интересно оценить, насколько оно может увеличиться при росте ресурсов почвенной влаги на 1000 км³. Для этого нужно определить коэффициент питания рек подземными водами (K_U) [1]. Если принять его равным среднему значению для земного шара, то следует разделить подземный сток в реки (12 000 км³) на валовое увлажнение территории (83 500 км³). Отсюда для всей суши $K_U = 0{,}144$.

Для условий дополнительного питания подземных вод сверх 12 000 км³ коэффициент (K_U) должен быть несколько выше. Примем предположительно, что его значение возрастет до 0,2. Тогда питание рек подземными водами увеличится на 200 км³ ($1000 \times 0{,}2$). Эта абсолютная величина значительна: она почти соответствует безвозвратному расходу воды на хозяйственно-питьевое водоснабжение более чем 6-миллиардного населения земного шара, ожидаемого к 2000 г. Но относительно современного подземного стока в реки эта величина составляет всего 1,7%.

[1] См. главу 2.

Поэтому увеличение питания подземных вод, связанное с ростом ресурсов почвенной влаги, не учитывается в этом прогнозе преобразований водного баланса. Если оно и произойдет, то пойдет на компенсацию потерь воды, которые, вероятно, неизбежны при создании подземных водохранилищ. Другими словами, эта неучтенная прибыль ресурсов устойчивого стока пойдет в запас на тот случай, если в сделанных допущениях преувеличен коэффициент полезного действия магазинированных подземных вод.

Характер преобразований водных ресурсов СССР (табл. 32) в общем тот же, что и для всей суши: устойчивый сток увеличится приблизительно на 1000 км³ путем регулирования паводочного (720 км³) и магазинирования подземных вод (280 км³), в результате чего уменьшается поверхностный (паводочный) сток; последний еще сократится на 200 км³ за счет расходования воды на транспирацию в связи с увеличением биологической продуктивности пахотных земель и лесов; поэтому, а также в результате магазинирования подземных вод возрастает валовое увлажнение территории. Это, конечно, очень грубая прикидка, но она характеризует тенденцию и представляется вполне реальной, а необходимость в преобразованиях такого масштаба появится, возможно, уже в начале будущего столетия.

Таблица 32

Прогноз преобразования водного баланса СССР на отдаленную перспективу (в км³)

Элемент баланса	Водный баланс	
	современный	преобразованный
Осадки	10 960	10 960
Полный речной сток	4 350*	4 200*
Устойчивый сток	1 550**	2 550**
В том числе:		
подземный сток и магазинированные подземные воды	1 020	1 300
сток, зарегулированный водохранилищами	530	1 250
Поверхностный (паводочный) сток	3 330	2 800
Валовое увлажнение территории	7 630	8 160
Испарение	6 610	6 960

* Не учитывая транзитного стока и безвозвратного расхода воды на хозяйственные нужды.

** Включая сток, зарегулированный озерами и водохранилищами.

Преобразования, которые мы учитываем в прогнозе на перспективу, не являются предельными. Данные, приведенные в табл. 32, предусматривают изменения водных ресурсов, возможно, в течение ближайших десятилетий. В более отдаленном будущем возможны дальнейшие преобразования.

Весь речной сток земного шара, исключая сток с полярных ледников и некоторый объем наиболее высоких паводков сверх полезной емкости водохранилищ, т. е. примерно 7 тыс. км³, в принципе может быть зарегулирован водохранилищами и путем магазинирования подземных вод. Мировой устойчивый сток, включая магазинированные подземные воды, составит тогда около 20—22 тыс. км³, т. е. будет примерно в 2 раза больше современного естественного. По всей вероятности, откроются возможности регулирования ресурсов почвенной влаги с помощью искусственных дождей. Тогда этот метод в какой-то мере дополнит орошение земель.

Но об этих преобразованиях можно теперь говорить лишь весьма предположительно. Ни их масштаб, ни время их осуществления не могут быть пока оценены с какой-либо достоверностью. В принципе они возможны, и, учитывая прогресс науки и техники, несомненно удастся осуществить преобразования водного баланса еще более глубоко и в большем масштабе.

2. Современное состояние и прогноз использования и охраны водных ресурсов на перспективу

При обобщенной характеристике современного состояния и будущего использования водных ресурсов мира и их охраны особое внимание обращено на водоотведение, которое необходимо всемерно уменьшать в промышленности и энергетике, вплоть до его полного прекращения в отдаленной перспективе. Основой для решения проблемы в таком направлении является перестройка промышленности на замкнутое оборотное водоснабжение на основе локальной регенерации, которая должна привести к отключению от канализации и усовершенствованию технологии производства. Такова цель и при выработке теплоэнергии.

Решение этой проблемы отражено в табл. 33. Труднее решить эту задачу для сточных вод при хозяйственно-бытовом водоснабжении, но их сброс в реки и водоемы также должен быть прекращен. Этого можно достигнуть двумя основными путями: полным извлечением биогенных элементов с утилизированием их для удобрения и использованием городских сточных вод для орошения кормовых культур. Первый из этих путей, конечно, предпочтительнее, так как с применением второго неизбежно некоторое загрязнение почвы неорганическими элементами, содержащимися в городских сточных водах. По всей вероятности, появится и третий путь — перевод городского водоснабжения на замкнутый оборотный цикл.

Одна из весьма актуальных задач будущего — обеспечение всего населения питьевой водой надлежащего качества. Важность решения этого вопроса связана с тем, что, по данным ВОЗ, почти половина населения мира в настоящее время пользуется недостаточно доброкачественной водой.

На рисунках 28 и 29 представлены совмещенные схемы естественного речного звена круговорота воды и хозяйственного круго-

Таблица 33

Приближенный прогноз мирового расходования водных ресурсов (км³/год)

Вид расходования	Современное состояние (1980 г.)				Близкая перспектива (~2000 г.)				Отдаленная перспектива («конечная» цель)			
	Водозабор из источников	Безвозвратный расход	Сточные воды	Объем речного стока, загрязненного сточными водами	Водозабор из источников	Безвозвратный расход	Сточные воды	Объем речного стока, загрязненного сточными водами	Водозабор из источников	Безвозвратный расход	Сточные воды	Объем речного стока, загрязненного сточными водами
Водоснабжение (все виды)	917	224	693	7 080	1 292	443	849****	7 170	>1 985*****	>973*****	1 012******	0
Орошение *	2 810	2 340	470	1 410	3 040	2 610	430	1 290	3 250	3 000	250	750
Неорошаемое земледелие **	600 / 0	600 / 0	0	0	800 / 200	800 / 200	0	0	1 200 / 600	1 200 / 600	0	0
Гидроэнергетика и судоходство ***	180	180	0	0	350	350	0	0	550	550	0	0
Рыборазведение и спортивное рыболовство	65	15	50	0	110	45	65	0	175	85	90	0
Всего	4 572	3 359	1 213	8 490	5 592	4 248	1 344	8 460	>7 160	>5 808	1 352	750
То же с округлением	4 600	3 400	1 200	8 500	5 600	4 300	1 300	8 500	>7 200	>5 800	1 400	750

* В графе «Сточные воды» имеются в виду возвратные воды после орошения, требующие трехкратного разбавления чистой водой.

** В числителе — прибавка воды, расходуемой на неорошаемых землях, за счет поверхностного (паводочного) речного стока в сравнении со стоком за прошлое время (приблизительно до 1980 г.); в знаменателе — то же в сравнении с современным стоком.

*** Потери воды на испарение с акватории гидроэнергетических водохранилищ + расход воды на шлюзование.

**** Очистка всех сточных вод будет производиться в 2 раза эффективнее, чем в настоящее время; половина их обезвреживается полностью при расходовании на орошение кормовых культур и путем извлечения биогенных элементов для использования в качестве удобрений.

***** Не включая расход воды в теплоэнергетике, который трудно оценить с такой заблаговременностью.

****** Все сточные воды полностью обезвреживаются.

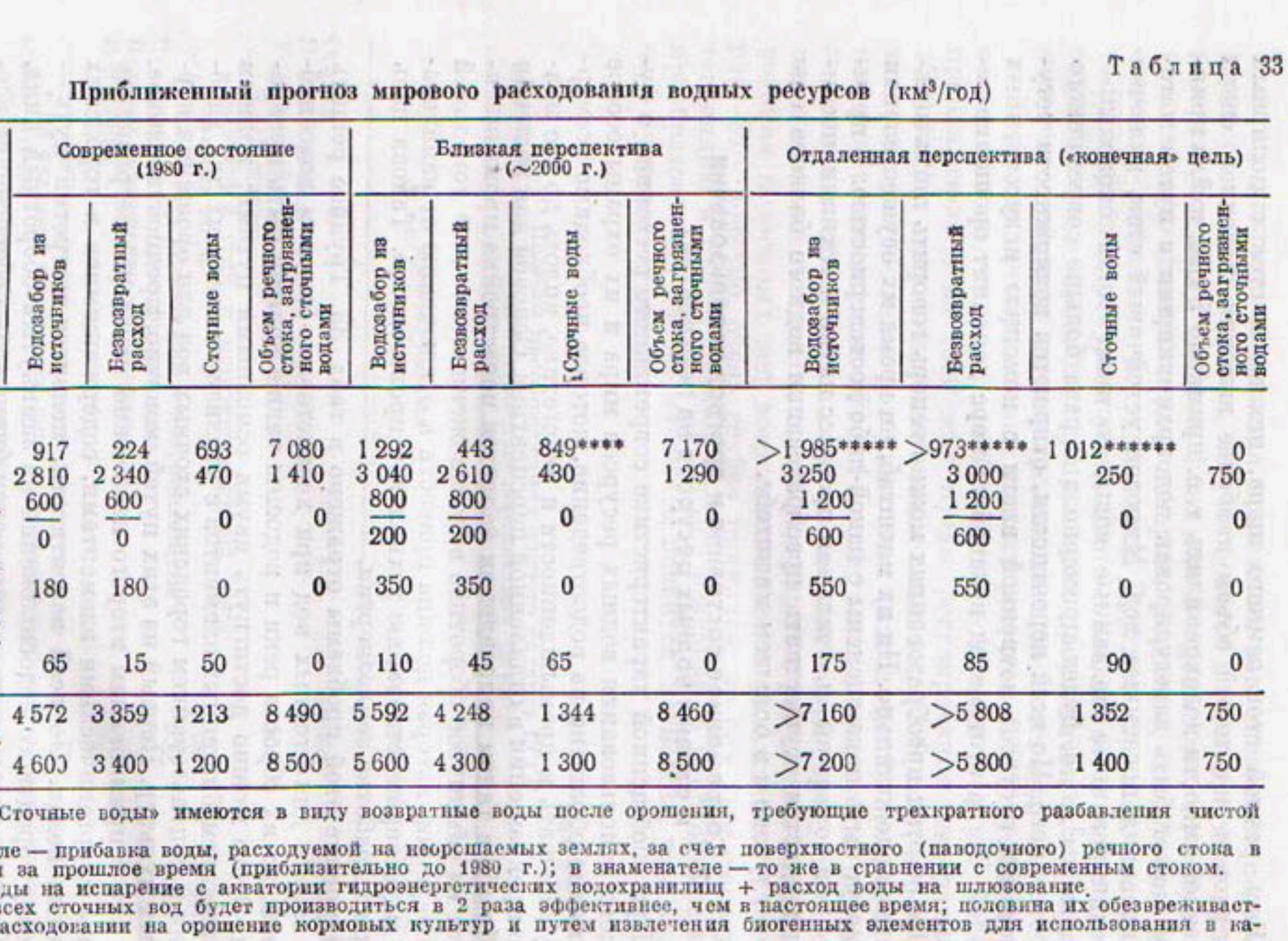


Рис. 28. **Схема современного (1980 г.) речного и хозяйственного звеньев круговорота воды. Данные на входе и выходе схемы даны с округлением км³/год. [Условные обозначения см. на рис. 29]**

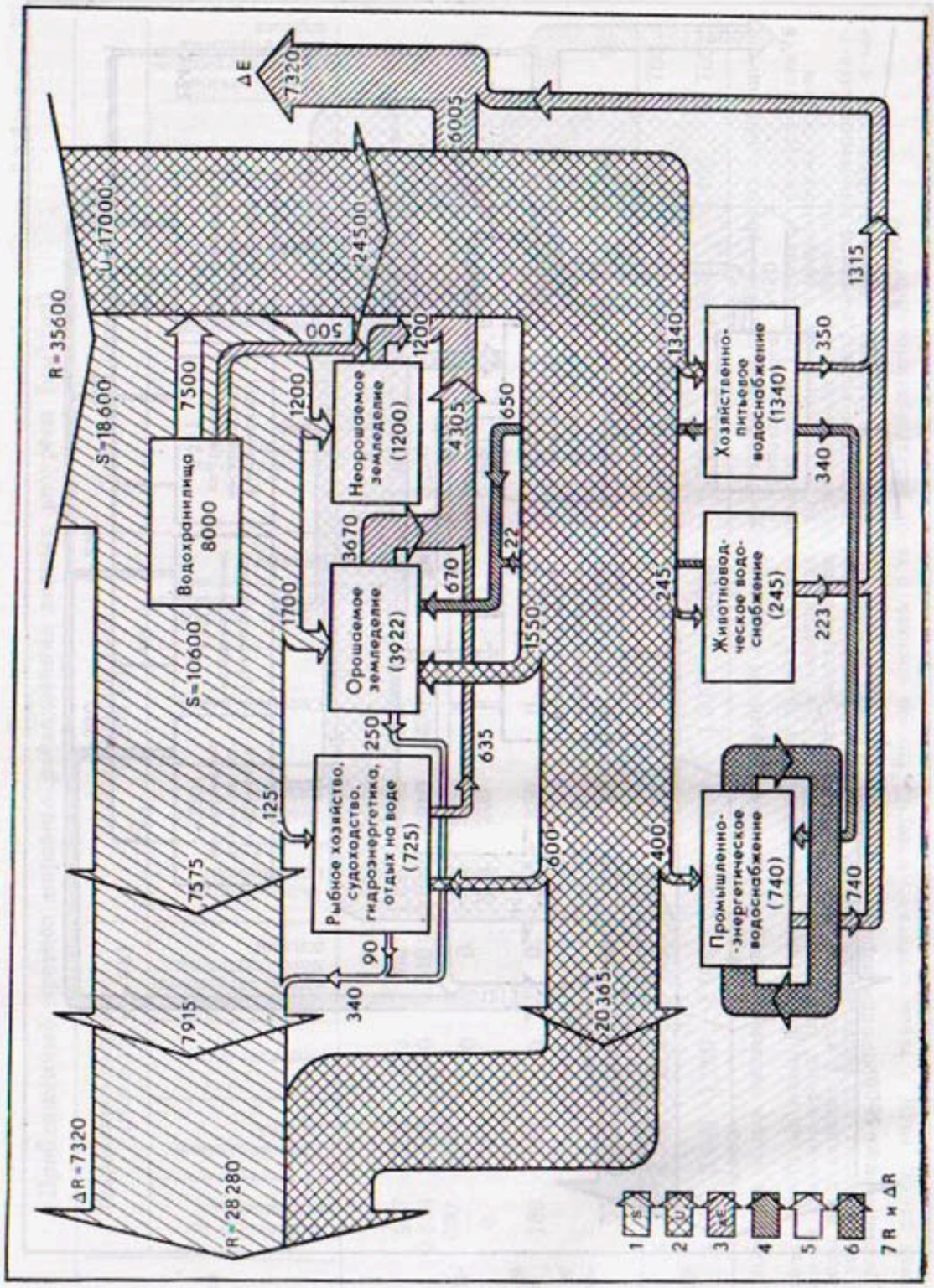


Рис. 29. Схема перспективного [при населении мира приблизительно 10 млрд. человек] речного и хозяйственного звеньев круговорота воды. Данные на входе и выходе схемы даны с округлением км³/год:

1 — поверхностный (паводочный) сток (S); 2 — подземный (устойчивый) сток в реки (U); 3 — увеличение испарения (ΔE) за счет безвозвратного расходования воды на хозяйственные нужды; 4 — сточные воды и речной сток, загрязненный ими; 5 — возвратные воды после орошения, 6 — замкнутое оборотное водоснабжение, 7 — R — полный речной сток, ΔR — изменение речного стока под влиянием хозяйственной деятельности (безвозвратный расход воды)

ворота. Речное звено круговорота на рисунках показано двумя полосами: поверхностного (паводочного) стока (S) и подземного стока в реки (U). Количественные характеристики этих двух составляющих полного речного стока (R), так же как и их сумма, учитывают безвозвратный расход воды на хозяйственные нужды. В соотношении объемов поверхностного и подземного стока учитываются результаты его регулирования водохранилищами. Водозабор на различные хозяйственные нужды за счет поверхностного и подземного стока в реки распределен условно: для всех видов водоснабжения отъем воды предусмотрен из подземного стока в реки, а на орошение, неорошаемое земледелие, так же как на судоходство, рыбное хозяйство и отдых, — за счет обеих составляющих речного стока.

Безвозвратный расход отмечен особыми стрелками, сумма которого показана с правой стороны схем: ΔE — суммарный безвозвратный расход.

Принципиально важно, что на схемах показаны сточные воды, которые являются неблагоприятным последствием современного водного хозяйства. В настоящее время значительная часть загрязнения попадает в реки в виде остаточных загрязнений после не вполне совершенной очистки или в результате сброса неочищенных сточных вод. В итоге на минимальное обезвреживание сточных вод в настоящее время расходуется около 8500 км³ речной воды, или 23% полного речного стока, исключая из него воду, использованную на хозяйственные нужды.

Схема на отдаленную перспективу (рис. 29) исключает этот фактор из речного звена круговорота воды. Меры, которые подробно охарактеризованы выше, при переориентации принципов водоотведения на профилактические основы позволяют использовать «загрязнения», так как они состоят из ценных биогенных элементов и неорганических веществ.

На рис. 30 приведена диаграмма, характеризующая динамику основных показателей использования и водоотведения по прогнозам на близкую и отдаленную перспективу; для сравнения на нем даны сведения о росте населения и численность той ее части, которая не обеспечена доброкачественной водой. Один из важных показателей «конечной» цели отдаленной перспективы — обеспечение всего населения мира доброкачественной водой. Диаграмма наглядно демонстрирует увеличение мирового водопотребления по всем трем показателям (водозабору из источников, безвозвратному расходу и сточным водам) и отставание его от роста населения. Это, как отмечено выше, достигается не за счет интересов населения, а путем рационализации использования водных ресурсов: перевода водоснабжения промышленных предприятий на замкнутые циклы и безотходное производство, усовершенствования технологии поливов в орошаемом земледелии и ряда других освещенных выше мер. Следует отметить также, что хозяйственно-бытовое и питьевое водопотребление при хорошем водообеспечении всего на-

селения мира составляет небольшую часть всего мирового водопотребления: оно в 10 раз меньше расходования воды орошаемым земледелием.

Но сточные воды в результате сброса их в реки и водоемы в настоящее время в основном после использования промышленными предприятиями загрязняют приблизительно 7000 км³/год речного стока, что составляет более 80% от общего загрязнения всеми видами мирового водопотребления. На близкую перспективу эти показатели, вероятно, останутся неизменными, но при резком возрастании той части населения мира, которая пользуется централизованными водопроводом и канализацией. «Конечная» цель (на отдаленную перспективу) предусматривает практически полное обезвреживание сточных вод. В результате образуются так называемые ножницы: население существенно возрастает, а загрязнение речного стока резко падает.

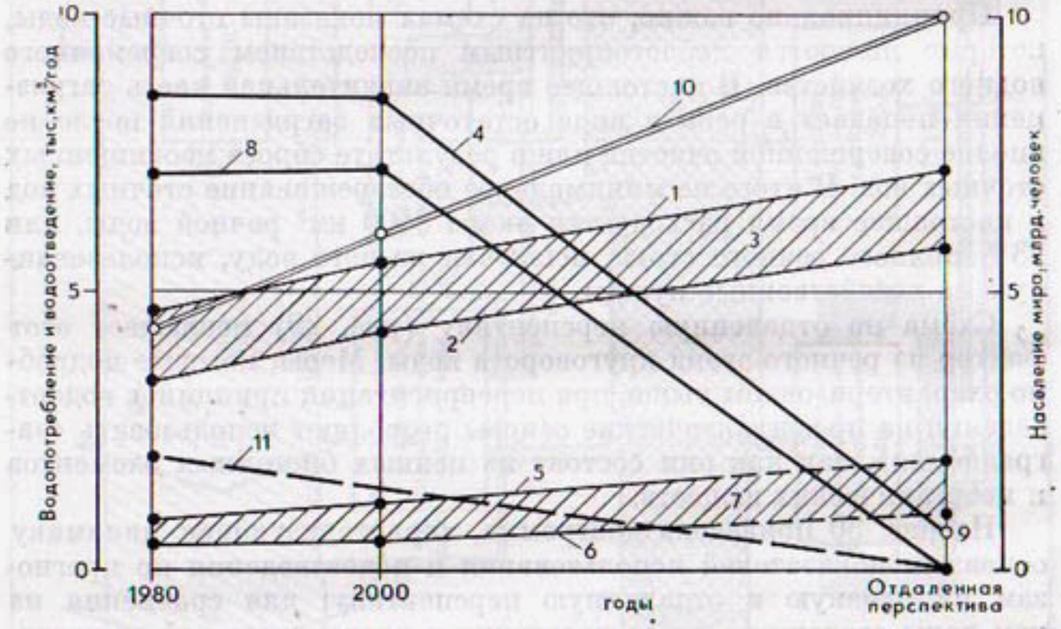


Рис. 30. Использование и охрана водных ресурсов мира. Современное состояние (1980 г.), близкая перспектива (~ 2000 г.), отдаленная перспектива (при населении мира 10 млрд. человек — «конечная» цель)

Все виды водопользования: 1— водозабор из источников; 2— безвозвратный расход воды; 3 — сточные воды; 4 — объем речного стока, загрязненного сточными водами.
Все виды водоснабжения: 5 — водозабор из источников; 6 — безвозвратный расход воды; 7 — сточные воды; 8 — объем речного стока, загрязненного сточными водами; 9 — возвратные воды после орошения; 10 — население мира; 11 — в том числе не обеспеченное доброкачественной питьевой водой

Положение о «конечной» цели не лишено условности, о которой говорилось выше. Однако ее анализ показывает, что имеющиеся водные ресурсы могут обеспечить потребности 10-миллиардного населения мира и соответствующего объема хозяйства, но при условии их более рационального использования. Следует еще отметить, что «конечная» цель будет достигнута в странах разного социального и экономического развития не одновременно.

Интересно сравнить полученные автором этой книги расчеты современного (на уровне 1980 г.) водопотребления с аналогичным расчетом, приведенным на 1977 г. в Статистическом ежегоднике ООН (United Nations, Statistical Yearbook, 1977). Эти данные сравнимы не по всем показателям в связи с тем, что в указанном источнике использование водных ресурсов дано по четырем видам: на выработку энергии, орошение, промышленное и бытовое водоснабжение. В приведенных же здесь расчетах виды расходования воды и другие показатели даны более дифференцированно. В соответствии с задачами этой книги нам важно знать не только общее расходование воды, но также водозабор из источников, безвозвратный расход и водоотведение — количество сточных вод.

Общий мировой итог использования воды по указанному справочнику составляет 2838 км³/год. По моим расчетам, исключая повышение расходования воды по мере роста продуктивности неорошаемого земледелия и включая потери на испарение с водохранилищ гидроэлектростанций, безвозвратный расход воды составляет 2520 км³/год. Разница в 300 км³, или немного более 10%, невелика, что говорит об удовлетворительном совпадении результатов расчетов. Нельзя, конечно, претендовать на более высокую точность двух независимых расчетов. В этой работе вопрос современного расходования воды рассматривается как исходный для прогноза на ближайшую и отдаленную перспективу. Целый ряд положений и методических подходов должны быть едиными для расчетов современного состояния и для прогнозов на перспективу. В указанном справочнике для нас интересна дифференциация водопотребления по странам света:

	Европа	Азия	Африка	Северная Америка	Южная Америка	Австралия с Океанией	Мир
км³/год	516	1597	88	551	57	29	2 838
%	18,2	56,0	3,1	19,4	2,1	1,2	100

Эти данные показывают, что более половины водных ресурсов мира расходуется в Азии, где на 1977 г. проживало более половины населения мира (56%); в Европе и Северной Америке — 18 и 19%; суммарно в остальных странах света — 6%. Относительные значения этой таблицы можно, вероятно, использовать для приближенной оценки распределения по странам света суммарного безвозвратного расходования воды (2520 км³/год).

Чрезвычайно важно иметь в виду, что современный подход к охране водных ресурсов, венчающий процесс использования воды, уже становится анахронизмом. Огромное количество воды, используемой в промышленности и в городском хозяйстве, появление многих сот самых разнообразных загрязнений привели к тому, что существующие методы очистки сточных вод уже недостаточно эффективны. Это относится как к пропускной способности очистных сооружений, так и к полноте, качеству очистки сточных вод. Конечно, без такой очистки положение было бы гораздо хуже. Сложившиеся в прошлом методы охраны все в меньшей степени спо-

собствуют улучшению качества водных ресурсов, не кардинально решают проблему. Действительно, весьма трудно создать такие универсальные методы очистки, которые полностью освобождали бы сточные воды от всех загрязнений и доводили их до состояния «живой» воды, т. е. воды, в которой возможны продуктивные биологические процессы. А именно такие процессы — надежные признаки чистоты воды.

Современные очистные сооружения выросли до размеров гигантских предприятий и, несмотря на это, в полной мере не оправдывают возлагаемых на них надежд. На таких предприятиях сточные воды подвергаются существенной очистке, но очистка при всей тщательности остается неполной, и 5—20% загрязнений, оставшихся после очистки, сбрасывается обратно в реки и водоемы. В целом пропускная способность очистных сооружений отстает от роста их объема, а методы очистки сточных вод — от степени загрязненности. В итоге после сброса уже очищенных сточных вод большое количество чистой речной воды расходуется на их разбавление и доочистку в естественных условиях. При этом во многих районах земного шара чистой речной воды уже не хватает, чтобы естественная доочистка дала ощутимые результаты. Вместе с тем огромное количество воды, расходуемой на разбавление сточных вод и доочистку в естественных условиях, не принимается во внимание в водохозяйственных расчетах. Таким образом, часто признается, что расходования воды на этот процесс не происходит. Наиболее эффективен путь борьбы с абсолютным количеством загрязнений, а не разбавление их чистой водой, которой во многих районах мира не хватает для водоснабжения и орошения.

В некоторых работах, посвященных излагаемой здесь проблеме (см., например, The global 2000 report..., 1980), высказывается мнение о том, что прогноз использования и охраны водных ресурсов не требует внесения чего-либо нового и может строиться на принципах и опыте, освоенных в прошлом. Конечно, при прогнозах на короткие сроки такой подход в какой-то мере оправдан. Гораздо сложнее предвидеть принципиальные изменения, необходимые при прогнозах с большой заблаговременностью. Но они не исключаются и из них на короткие сроки. Прогнозы мер стратегического масштаба, особенно на большие сроки, чрезвычайно важны, хотя и сложны.

Рисунки и таблица, помещенные в этой главе, дают ясное представление о тенденции будущего охраны водных ресурсов в процессе использования.

Принципы, положенные в их основу, особенно ориентирование на прекращение сброса сточных вод, в том числе и обработанных современными недостаточно совершенными способами биологической очистки, являются главными в охране вод в условиях будущего. В ряде случаев их применение стало необходимым уже в настоящее время. Это связано с распространением многих видов трудно окисляемых загрязнений. Для их устранения требуется применение физико-химических методов регенерации. Замкнутое оборотное водоснабжение в промышленности на основе локальной регенерации отработанной воды, содержащей один вид загрязнений, позволяет, как показано выше, регенерировать сточную воду лучше и при меньших затратах, чем при содержании в ней многих разнообразных загрязнений. Следует также иметь в виду, что некоторые загрязнения представляют собой ценные продукты самого производства. Яркой иллюстрацией этого является приведенный в главе 11 пример из практики целлюлозно-бумажного производства, усовершенствование технологии которого позволило уменьшить расходование воды и вместе с тем резко снизить потери трудно окисляемой ценной целлюлозы. Важно, что такой регенерационный процесс не только повышает уровень технологии самого производства, но и существенно уменьшает объем водопотребления в промышленности. Он является эффективным путем стабилизации расходования водных ресурсов, особенно необходимой в условиях будущего. Важный критерий прогресса — снижение расходования воды на единицу (тонну) промышленной продукции и на тонну сельскохозяйственной.

Что касается хозяйственно-бытовых сточных вод, то первичной задачей является отделение их от промышленных. Этот процесс постепенно будет происходить по мере распространения замкнутого оборотного водоснабжения в промышленности. Другая важная задача — извлечение содержащихся в них элементов, преимущественно биогенных, методами микробиологической промышленности для последующего использования в качестве удобрений. Вместе с тем возможно использование специально подготовленных хозяйственно-бытовых сточных вод на орошение кормовых культур, преимущественно многолетних трав. Эта мера дает высокий эффект в системе культурного луговодства (Андреев, 1979).

Биогенные элементы, извлеченные из почвы при производстве сельскохозяйственных продуктов, исключительно важно возвращать обратно в почву. Следует подчеркнуть, что метод орошения кормовых культур городскими сточными водами тщательно изучен в санитарном, агрономическом и экономическом отношениях (А. Львович, 1979). Все эти вопросы более подробно изложены в главах 11 и 12, но здесь мы хотим подчеркнуть основные пути ослабления и в конце концов ликвидации неблагоприятных влияний на окружающую среду.

В заключение следует подчеркнуть, что приведенные конкретные данные, особенно относящиеся к прогнозам, носят приближенный характер. Но числовые характеристики прогнозов для нас интересны, поскольку являются отражением некоторых новых принципов использования и охраны водных ресурсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует подчеркнуть, что перспективные прогнозы, приведенные в этой книге, отличаются от тех, которые были даны в прежних моих публикациях. Они дополнены идеей о «конечной» цели, к достижению которой необходимо стремиться, чтобы кардинально решить задачу охраны водных ресурсов в процессе их использования. Эта цель рассматривается с точки зрения современных представлений о научно-техническом прогрессе в условиях будущего. Поэтому, по мнению автора, она носит динамический характер: время от времени она может корректироваться в зависимости от хода реализации намеченных мер, а также от новых достижений науки и техники. В приведенных в настоящей книге прогнозах в соответствии с методическими основами ленинского плана ГОЭЛРО преобладают принципы решения задач охраны водных ресурсов, их расширенного воспроизводства. Современные представления о «конечной» цели и ее достижение невозможны без ориентировочной временной вехи. В качестве таковой, как уже было отмечено, принимается население мира в 10 млрд. человек, что, по расчетам демографов, можно ожидать в первые десятилетия второй половины XXI в., т. е. через 70—80 лет.

Главное назначение таких прогнозов заключается в определении современных путей эффективной охраны водных ресурсов. Будущее определяет собой меры, которые необходимо осуществить сегодня. Подчеркнем еще раз, что эти прогнозы носят, конечно, ориентировочный характер. 25 лет работы над концепцией защиты вод от загрязнения позволили шаг за шагом определить круг вопросов охраны водных ресурсов, разрешение которых даст возможность достигнуть кардинальных результатов по этой важной для людей проблеме. Выдвинутые принципы и методы охраны получают все большее признание, что служит свидетельством их реальности и эффективности.

К числу таких принципов относятся:

— профилактический подход к охране водных ресурсов, устранение причин загрязнения вод взамен преобладающей ныне борьбы с последствиями;

— подчинение в хозяйственном звене круговорота воды обмена биогенных элементов естественному процессу возврата их почве в целях поддержания ее высокого плодородия и наиболее эффективного их обезвреживания;

— переключение предприятий основных отраслей водоемкой промышленности на замкнутое, безотходное оборотное водоснабжение с вторичным использованием веществ, содержащихся в использованной воде; основой такой меры является локальная регенерация воды, отработанной в одной производственной линии, что обеспечивает наиболее полное извлечение из нее одного вида загрязнений;

— усовершенствование технологии производства тех промышленных предприятий, например целлюлозно-бумажного производства, в которых локальный принцип не может дать необходимого эффекта;

— перевод на замкнутый цикл охлаждения водой теплоэлектростанций и аналогичных им промышленных предприятий, использование для этой цели морской воды и переход на воздушное охлаждение.

Определенную перспективу представляет ныне уже достигнутая очистка (регенерация) хозяйственно-бытовых сточных вод до состояния питьевой воды, что в будущем откроет возможность перевода и городского водоснабжения на замкнутый цикл. Необходим также поиск путей извлечения биогенных элементов из хозяйственно-бытовых сточных вод микробиологическими методами. Впредь, до всеобщего применения этих методов, возможно также эффективное использование городских сточных вод для орошения кормовых культур.

Главным итогом применения перечисленных мероприятий является *прекращение сброса сточных вод в реки и водоемы*. Это первая важнейшая задача. Таким путем решается проблема всемерного отделения хозяйственного звена круговорота воды, процесса водоотведения от естественного круговорота. Вместе с тем биогенные элементы возвращаются почве, как это происходит в естественных условиях, взамен их сброса в реки и водоемы, где они являются причиной развития неблагоприятного процесса — эвтрофирования озер и водохранилищ. В этом заключается одна из основных целей охраны водных ресурсов в будущем.

Прекратить сток снеговых и ливневых вод в реки и водоемы с территории городов, промышленных предприятий, сельских населенных пунктов весьма трудно и вряд ли возможно даже в отдаленной перспективе. Поэтому в целях максимального его снижения требуются соответствующая планировка городов, позволяющая уменьшить объем стока с их территории, и создание прудов-отстойников, в которых они будут освобождаться от наносов, а содержащиеся в них загрязнения — частично окисляться. Поддержание городов в чистоте является мерой для устранения неблагоприятного их влияния на водный компонент окружающей среды. Подчеркиваю, что в каких-то пределах регулирование этого процесса возможно соответствующей планировкой городов.

Другая важная задача — обеспечить все население мира доброкачественной питьевой водой. Это не простая задача, так как в настоящее время около 2 млрд. человек на планете не обеспечены кондиционной водой. Решение этого вопроса необходимо в возможно более короткий срок, но для обеспечения всего населения мира

надлежащей питьевой водой потребуется, вероятно, несколько десятилетий.

Эффективность охраны водных ресурсов тесно связана с их экономией во всех отраслях хозяйственного звена круговорота воды. Особенно это относится к орошаемому земледелию, требующему уже в настоящее время более 70% мирового безвозвратного расхода воды на все хозяйственные нужды. Количество расходуемой на орошение воды существенно зависит от технологии орошения, от коэффициента полезного действия оросительных систем. В мировой практике ирригации получили широкое применение механические методы поливов, не только повышающие производительность труда, но и позволяющие уменьшить количество расходуемой воды. Капельное орошение, например, дает 3—4-кратную экономию воды по сравнению с ручным орошением. Но применение столь прогрессивного метода пока еще весьма ограниченно. Однако в условиях будущего и этот метод, а также аналогичные методы внутрипочвенного орошения, несомненно, получат большое распространение. Задача заключается в том, чтобы при увеличении площади орошаемых земель в отдаленной перспективе в 2 раза не допустить роста безвозвратного расхода воды приблизительно более чем на $^1/_3$. Такое соотношение принимается из необходимости стабилизации расходования воды самой водоемкой отраслью водного хозяйства. Можно полагать, что подобная стабилизация должна быть достигнута в первые десятилетия будущего столетия. Тогда дальнейший рост площади орошения будет происходить в основном в результате прогресса технологии поливов, а не за счет наращивания количества воды.

Весьма актуален вопрос о возвратных после орошения водах, чаще всего содержащих большое количество солей. По этой причине возвратные воды при сбросе в реки повышают соленость речных водных ресурсов, а при сбросе в пустынные районы образуют соры и служат источниками засоления окружающей местности. Решение этого вопроса пока сложно, так как засоление возвратных вод часто является неизбежной издержкой орошаемого земледелия. Если, однако, не будут найдены пути ликвидации засоленных возвратных вод в процессе совершенствования технологии орошения, то, по всей вероятности, возникнет необходимость их рассоления физико-химическими методами.

Орошение — весьма эффективный способ преобразования природы там, где ресурсы почвенной влаги в естественных условиях недостаточны. Но его эффективность еще в большей мере повышается при сочетании с осушением, чем достигается строгое управление ресурсами почвенной влаги в соответствии с потребностями данной сельскохозяйственной культуры. Этот метод применим главным образом в зоне избыточного и оптимального увлажнения в сочетании с осушением, когда в отдельные периоды почвенной влаги может оказаться недостаточно.

Проблеме преобразования водных ресурсов посвящена значительная часть книги. В соответствии с комплексным характером освещения преобразований в этой книге расширен круг рассмотрения средств преобразования водного баланса и водного режима рек. Кроме орошения из мелиоративных средств рассмотрено преобразующее действие осушения. Специальная глава посвящена основам гидротехнических преобразований, в том числе гидрологической роли водохранилищ, которые играют большую роль в умножении водных ресурсов в засушливые периоды, особо выделены антропогенные землетрясения, вызываемые наполнением водохранилищ и подкачкой воды в буровые скважины. Управление водным балансом внутренних морей рассмотрено на примере Аральского моря. Большое значение для снижения стоимости гидротехнических сооружений (плотин и мостов) имеют географические подходы в расчетах максимального речного стока. Специальная глава посвящена общим научным основам, теоретическим вопросам и принципам предвычисления разных видов преобразований как средству расширенного воспроизводства водных ресурсов.

Регулирование почвенной влаги в ограниченных пределах практикуется и в неорошаемом земледелии путем применения ряда приемов обработки почвы, специальных севооборотов, систем защитных лесных полос в виде клеток, ограждающих поля не очень большой площади, и т. д. Все эти меры с точки зрения водных ресурсов делятся на две группы: 1) регулирование водного баланса путем соответствующей обработки почвы, усиливающей ее инфильтрационную способность и перевод поверхностного стока в ресурсы почвенной влаги, а также управление испарением с помощью лесных полос; 2) адаптация сельскохозяйственных культур к засушливым условиям.

Проблема влияния неорошаемого земледелия и сведения лесов была поставлена в первой трети прошлого века, но только в последние десятилетия она получила теоретическое обоснование, была подкреплена экспериментальными полевыми исследованиями и разработанным методом предвычисления этого вида преобразований водного баланса территории. Заложены основы гидрологии городов. В числе высокоэффективных способов расширенного воспроизводства водных ресурсов необходимо назвать регулирование речного стока водохранилищами, умножающими речной сток маловодных периодов. И в этом виде водных преобразований не обходится без издержек, к числу которых относятся затопление ценных земель, неизбежные потери воды на испарение, бóльшая вероятность эвтрофирования водоемов, чем незарегулированных рек. Тем не менее водохранилища приносят огромную пользу, которая перекрывает издержки. Но и их в ряде случаев возможно уменьшить. Автор считает, что в условиях будущего большее распространение получат подземные водохранилища, объем которых достигнет масштаба поверхностных. Они, по-видимому, явятся основным источником хозяйственно-бытового и питьевого водоснабжения.

В книге, посвященной преобразованиям вод и охране водных ресурсов, нельзя обойтись без хотя бы краткой характеристики естественных процессов и географических закономерностей их формирования, а также балансовой оценки водных ресурсов суши. В одной из работ, опубликованной в 40-х годах, мне удалось показать, что на основании интерполяционных методов можно получить достоверную картину мирового распределения речного стока, который тогда был изучен не более чем на половине площади суши. Таким образом появилась первая мировая карта речного стока. Теперь гидрометеорологические станции есть даже во многих развивающихся странах, но неизученной или крайне недостаточно изученной все же остается $^1/_3$ суши, не считая Гренландии и Антарктиды.

Позже появилась серия карт, составленная по шестикомпонентному методу, который был предложен автором взамен применявшегося почти три столетия трехкомпонентного метода изучения водного баланса. Этот метод, получающий все большее распространение, позволил лучше обосновать методы пространственной интерполяции элементов и глубже решать проблемы антропогенных изменений водного баланса суши. С этим методом в гидрологии появилась возможность решать ряд задач на более высоком теоретическом уровне в соответствии с круговоротом воды в природе, который является теоретической основой гидрологической науки и основным предметом ее изучения. Изучение естественного водообмена в масштабе земного шара показало, что для составления карт распределения элементов водного баланса на суше нет необходимости ждать, когда появятся гидрологические станции во всех странах и районах мира. Предложенные на основе зональных закономерностей водного баланса методы показали, что достоверные результаты можно получить, не располагая данными непосредственных наблюдений по всей суше. Географические подходы и методы восполняют недостаток фактических гидрологических наблюдений.

Сформировалось географическое направление в гидрологии, расширились и углубились возможности решения задач этой наукой.

Фундаментальной основой этого направления является созданное автором в последние десятилетия учение о гидрологической роли почвы, пришедшее на смену преимущественному развитию гидрологии климатического направления. Изучение почвенного фактора существенно обогатило науку, позволило теоретически обосновать решение задач генезиса гидрологических явлений и процессов, поскольку метеорологические явления трансформируются в гидрологические, преломляясь главным образом через посредство почвы, а также растительности как важного фактора почвообразования. На этой основе были впервые получены теоретические кривые зависимости элементов водного баланса территории, включая и речной сток, от инфильтрационной способности почвы, а также зональные структурные зависимости водного баланса (более подробно — для СССР и более схематично — для всей суши земного шара).

Теория гидрологической роли почвы послужила также основой методов изучения антропогенных изменений водного баланса территории под влиянием земледелия и лесного хозяйства.

Значительные результаты исследований на основе географического направления в гидрологии дает применение указанного выше шестикомпонентного метода изучения водного баланса и балансовой оценки водных ресурсов, разработанного автором в 1950 г. С его помощью были составлены первые мировые карты элементов водного баланса суши. Для ликвидации «белых пятен» — неизученных в гидрологическом отношении частей суши — служат зональные, комплексные, интерполяционные зависимости. Аналогичные карты составлены для СССР и ряда других стран, часть из которых отличается крайне недостаточной гидрологической изученностью, вплоть до полного отсутствия необходимой информации для $^1/_3$ территории. Для восполнения недостающих данных в этих случаях применяются интерполяционные зависимости на зональной и внутризональной основе, а также высотные зависимости для горных районов.

Важный раздел географического направления в гидрологии — изучение влияния на окружающую среду антропогенных воздействий на воды, включая и гидротехническое строительство. Разработаны подходы для решения этой проблемы. Ряд предложений, вытекающих из установленных принципов, учтен в практической работе.

Географическая концепция охраны водных ресурсов также является одной из ведущих составных частей географического направления в гидрологии.

В заключение следует отметить, что при использовании содержащихся в ней рекомендаций человечеству не будет угрожать водный кризис. Но для того чтобы реализовать это утверждение, следует целенаправленно, более широким фронтом, чем это осуществляется в настоящее время, неотложно проводить в жизнь мероприятия, намечаемые на будущее. И в этом случае для кардинального решения поставленной водной проблемы необходимы десятилетия. По моему мнению, нет других эффективных путей в деле использования и охраны водных ресурсов. Вода — это жизнь.

ЛИТЕРАТУРА

Материалы XXV съезда КПСС. М., 1976.

Материалы XXVI съезда КПСС. М., 1981.

Материалы Пленума ЦК КПСС (23 октября 1984 г.). М., 1984.

Абрамов Л. С. О роли водной компоненты в развитии системы «общество — природа».— В кн.: Система «общество — природа»: проблемы и перспективы. М., 1983.

Авакян А. Б., Шарапов В. А., Салтанкин В. И., Фортунатов М. А. Водохранилища мира. М., 1979.

Авакян А. Б. Современные проблемы создания, комплексного использования и исследования водохранилищ. — Водные ресурсы, 1982, № 6.

Авсюк Г. А. Искусственное усиление таяния горных ледников с целью увеличения стока рек Средней Азии. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1962, № 5.

Авсюк Г. А., Котляков В. М. Изучение возможности усиления таяния ледников путем зачернения их поверхности. — Межд. геогр. конгресс 1976 г. «Межд. гидролог. программа». — Преобразования водного баланса под влиянием хозяйственной деятельности. Л., 1976.

Авсюк Г. А., Котляков В. М., Ходаков В. Г., Голубев Г. Н. Проблемы гидрологии ледников и ледниковых районов. — Водные ресурсы, 1973, № 2.

Алекин О. А. Евтрофирование озер. — Водные ресурсы, 1979, № 4.

Алекин О. А. и *Бражникова Л. В.* Сток растворенных веществ с территории СССР. М., 1964.

Андреев Н. Г. (ред. и соавтор). Культурные пастбища на орошаемых землях. М., 1979.

Андреев Н. Г., Львович А. И. Роль земледельческих полей орошения (ЗПО) в охране водных ресурсов от загрязнения. — В кн.: Мат-лы комиссии по подготовке предложений об использовании коммунальных сточных вод в сельском хозяйстве. М., 1963.

Аполлов Б. А. Каспийская проблема и пути ее решения. — Тр. океанограф. комиссии АН СССР, т. V. Проблемы Каспийского моря. М., 1959.

Армад Д. Л. Физико-географические основы проектирования сети полезащитных лесных полос. М., 1961.

Аткарская Т. Н. Возвратные воды орошаемых земель Ферганской долины. — Метеорология и гидрология, 1970, № 10.

Байнхауэр Х., Шмакке Э. Мир в 2000 г. М., 1973.

Барымова Н. А., Чернышев Е. П. Состав поверхностного стока городской территории и качество речных вод. — Сб. Взаимодействие хозяйства и природы в городских и промышленных геосистемах. М., 1982.

Басс С. В. Внутризональные особенности весеннего поверхностного стока в лесной зоне. М., 1963.

Безотходные промышленные узлы. — Наука и жизнь, 1984, № 2.

Беляев А. В. Метод составления карт элементов водного баланса на основе зональных комплексных зависимостей. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1978, № 4.

Беляев А. В. Сравнительная оценка водобалансовых карт, построенных различными методами. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1980, № 3.

Беннет Х. Х. Основы охраны почвы (пер. с англ.). М., 1958.

Берг Е. В. Сведения о весенних половодьях на реках Волге и Оке в районе г. Горького в XVIII и XIX столетиях. — Учен. зап. ЛГУ. Сер. геогр., 1955, вып. 10.

Берг Е. В. О высоте весеннего половодья р. Волги у г. Горького. — Вестн. ЛГУ, 1956, № 6.

Берг Л. С. Климат и жизнь. М., 1947.

Бердышев В. Д., Радько А. Ф., Шейкин Г. Ю. Исследование подпочвенного орошения. — В кн.: Некоторые вопросы развития мелиорации в СССР. М., 1975.

Бернал Д. Возникновение жизни (пер. с англ.). М., 1969.

Бертокс П., Радд Д. Стратегия защиты окружающей среды от загрязнений. М., 1980.

Биосфера и ее ресурсы (ред. В. А. Ковда). М., 1971.

Болт Б. Землетрясения. М., 1981.

Бородавченко И. И. Охрана окружающей среды при осуществлении ирригационных, дренажных и противопаводковых мелиораций. — В кн.: Некоторые вопросы развития мелиорации в СССР. М., 1975.

Бородавченко И. И., Зарубаев П. В., Васильев Ю. С., Вельнер Х. А. Охрана водных ресурсов. М., 1979.

Брикнер Э. Я. Баланс круговорота воды на Земле. — Почвоведение, 1905, т. III, № 3.

Бронфман А. М., Дубинина В. Г., Макарова Г. Д. Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря. М., 1979.

Брук С. И. Население мира. Этнодемографический справочник. М., 1981.

Будаговский А. И. Впитывание воды в почву. М., 1955.

Будыко М. И. Климат и жизнь. М., 1971.

Будыко М. И., Дроздов О. А., Львович М. И. и др. Изменение климата в связи с планом преобразования природы в засушливых районах СССР. М.—Л., 1952.

Булавко А. Г. Водный баланс речных водосборов. Л., 1971.

Великанов М. А. Водный баланс суши. М., 1940.

Великанов М. А., Львович М. И. Типовая программа для стоковой станции. — Изв. Гос. гидрол. ин-та, 1932, № 49.

Вендров С. Л., Дьяконов К. Н. Водохранилища и окружающая среда. М., 1976.

Вендров С. Л. Проблемы преобразования речных систем СССР. Л., 1979.

Вербицкий Т. З. О влиянии напряженного состояния и трещиноватости очаговых зон в прогнозе землетрясений и геодинамики, АН СССР. М., 1979.

Вернадский В. И. История природных вод. — История минералов земной коры, т. 2, ч. 1, вып. 1. Л., 1933.

Виноградов А. П. Рассеянные химические элементы в подземных водах

разного происхождения. — Тр. лабор. гидрогеол. проблем. АН СССР, 1948, т. 1.

Владимиров Л. А. Водный баланс Большого Кавказа. Тбилиси. 1970.

Водный баланс СССР и его преобразование (ред. и соавтор — М. И. Львович). М., 1969.

Воейков А. И. Климаты земного шара, в особенности России. СПб., 1884.

Воейков А. И. Воздействие человека на природу. — Землеведение, т. 1, кн. 2 и 4. СПб., 1894; Избранные статьи. М., 1949.

Воропаев Г. В., Косарев А. Н. О современных проблемах Каспийского моря. — Природа, 1981, № 1.

Воропаев Г. В., Герасимов И. П., Кибальчич О. А., Коронкевич Н. И. Проблема перераспределения водных ресурсов в срединном регионе. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1982, № 6.

Высоцкий Г. Н. Избранные труды. М., 1960.

Гангардт Г. Г. Водные ресурсы СССР. М., 1968.

Гвоздев В. С. Обсуждение доклада М. И. Львовича. — Тр. III Всесоюзн. гидрол. съезда. Л., 1959, т. VII.

Гельмерсен Ф. и *Вильд Г.* Донесение комиссии, рассматривавшей записку г. Векса об уменьшении количества воды в источниках и реках. — Зап. АН, 1876, XXVII.

География на България. — Физическа география. София, 1966 (на болг. яз.).

Георгиади А. Г. Подходы к изучению максимального весеннего стока. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1981, № 3.

Герарди И. А. и *др.* Оптимизация водопотребляющих производств (на примере сельского хозяйства страны). — Водные ресурсы, 1977, № 3.

Герасимов И. П. Советская географическая наука и проблемы преобразования природы. — В сб.: Советская география в наши дни. М., 1961.

Герасимов И. П. Нужен генеральный план преобразования природы нашей страны. — Коммунист, 1968, № 2.

Герасимов И. П. Советская конструктивная география. Задачи, подходы, результаты. М., 1976.

Герасимов И. П., Вендров С. Л., Куницын Л. Ф., Нейштадт М. И. Влагооборот на равнинах Западной Сибири, его роль в формировании природы и пути преобразования. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1966, № 5.

Герцен А. И. Письма об изучении природы. — Избр. философ. соч., т. 1. М., 1959.

Гигинейшвили Г. Н. Карстовые воды Большого Кавказа и основные проблемы гидрологии карста. Тбилиси — М., 1979.

Глушков В. Г. Перспективы и пути развития гидрологии в СССР. — Изв. Гос. гидрол. ин-та, 1934, № 65.

Глушков В. Г. Вопросы теории и методы гидрологических исследований. М., 1961.

Голубев Г. Н. Гидрология ледников. Л., 1976.

Григорьев А. А. Режим тепла и влаги и географическая зональность. — Мат-лы к III съезду геогр. об-ва СССР. Л., 1959.

Григорьев А. А., Будыко М. И. О периодическом законе географической зональности. — Док. АН СССР, 1956, т. 110, № 1.

Грин А. М. Динамика водного баланса Центральночерноземного района. М., 1965.

Гуревич М. И. Влияние лесных полос на снегозадержание в условиях Каменной Степи. — Тр. Гос. гидрол. ин-та, вып. 34 (88). Л., 1952.

Давыдов Л. К. Гидрография СССР, ч. 1. Общая характеристика вод. Л., 1955.

Давыдов Л. К., Дмитриева А. А., Конкина Н. Г. Общая гидрология. Л., 1973.

Джамалов Р. Г., Зекцер И. С., Месхетели А. В. Подземный сток в моря и Мировой океан. М., 1977.

Дмитриев Г. В. Схема переброски стока северных рек в бассейн Камы и Волги. — Тр. океанограф. комиссии АН СССР, т. V. Проблемы Каспийского моря. М., 1959.

Дмитревский Ю. Д. Внутренние воды Африки и их использование. Л., 1967.

Докучаев В. В. Наши степи прежде и теперь. СПб., 1892.

Дрейер Н. Н. Водный баланс. — В кн.: Кавказ. Природные условия и естественные ресурсы СССР. М., 1966.

Дрейер Н. Н. Водный баланс Северной Америки. — Серия монографий «Водный баланс материков земного шара». М., 1978.

Дружинин И. П., Сазонов Б. И., Ягодинский В. Н. Космос — Земля — Прогнозы. М., 1974.

Дубах А. Д. Гидрология болот. Свердловск — М., 1944.

Дукич Д. Гидротехническая система Дунай — Тиса — Дунай и ее влияние на природу и хозяйство автономной области Воеводино. — В кн.: Новые идеи в географии, вып. 5. М., 1981.

Дукич Д., Львович М. И. Водные ресурсы Европы и пути их совместного использования (по проблеме Европейской региональной конференции МГС). М., 1971.

Дунин-Барковский Л. В. Физико-географические основы ирригации. М., 1976.

Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева, 1972, т. XVII, № 2. (Номер посвящен очистке промышленных сточных вод.)

Зайков Б. Д. Водный баланс Каспийского моря. — Тр. Каспийской комиссии, вып. XII. М.—Л., 1941.

Зайков Б. Д. Водный баланс Каспийского моря в связи с причинами понижения его уровня. — Тр. научн.-исслед. учрежд. ГУГСМ СССР. Сер. IV. Гидрология суши, вып. 38. Л., 1946.

Зайков Б. Д. Высокие половодья и паводки на реках СССР за историческое время. Л., 1954.

Зекцер И. С. Закономерности формирования подземного стока и научно-методические основы его изучения. М., 1977.

Зекцер И. С., Джамалов Р. Г., Месхетели А. В. Подземный водообмен суши и моря. Л., 1984.

Зимина Р. П., Герасимов И. П. Физико- и биогеографические наблюдения в Кении. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1978, № 3, 6.

Зонн И. С., Носенко И. П. Современный уровень и перспективы мелиорации земель в странах мира. — Гидротехника и мелиорация, 1981, № 1.

Иванов К. Е. Теоретическое и экспериментальное обоснование метода расчета водного баланса болотных массивов. — Тр. Гос. гидрол. ин-та, вып. 39 (93). Л., 1953.

Иванов К. Е. Водообмен в болотных ландшафтах. Л., 1975.

Иванов К. Е., Новиков С. М., Романов В. В. Некоторые основные положения методики исследования влияния осушительных мелиораций на водные ресурсы и водный режим территории. — Тр. Гос. гидрол. ин-та, вып. 298. Л., 1973.

Измаильский А. А. Как высохла наша степь. Полтава, 1893.

Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния окружающей среды. Л., 1979.

Калинин Г. П. Проблемы глобальной гидрологии. Л., 1968.

Калинин Г. П., Макарова Т. Т. Гидрометеорологические условия формирования половодья на равнинных реках европейской территории СССР. Л., 1957.

Калинин Г. П., Шикломанов И. А. Использование водных ресурсов Земли. — В кн.: Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л., 1974.

Каминский В. С. Промышленное воспроизводство водных ресурсов в глобальном круговороте. — Водные ресурсы, 1982, № 3.

Карасик Г. Я. Водный баланс Африки. — Серия монографий «Водный баланс материков земного шара». М., 1970.

Карасик Г. Я. Водный баланс Южной Америки. — Серия монографий «Водный баланс материков земного шара». М., 1974.

Карасик Г. Я., Николаева Г. М., Цигельная И. Д. Карты речного стока высокогорных районов мира. — Водные ресурсы, 1983, № 6.

Караушев А. В. Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод. Л., 1981.

Кашкай Р. М. Водный баланс Большого Кавказа (в пределах Азербайджанской ССР). Баку, 1973.

Келлер Р. Воды и водный баланс суши. М., 1965.

Кесь А. С., Кренке А. Н., Минаева Е. Н., Решеткина Н. М., Цигельная И. Д. Состояние и перспективы использования местных водных ресурсов Средней Азии и Южного Казахстана. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1981, № 4.

Клиге Р. К. Тенденции в изменении поверхностных вод гидросферы. — Водные ресурсы, 1982, № 3.

Комаров В. Д. Весенний сток равнинных рек европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. Л., 1959.

Коммонер Б. Замыкающийся круг. Л., 1974.

Константинов А. Р., Струзер Л. Р. Лесные полосы и урожай. 2-е изд. Л., 1974.

Коплан-Дикс И. С. Эволюция антропогенного круговорота биогенных элементов и водные проблемы. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1978, № 6.

Коронкевич Н. И. Преобразование водного баланса. М., 1973.

Коронкевич Н. И., Юревич Р. А. Структура стока половодья в северо-западные части Русской равнины. — Водные ресурсы, 1975, № 6.

Косарев А. Н. Гидрология Каспийского и Аральского морей. М., 1975.

Костандов Л. А. Сточные воды и рациональное использование водных ресурсов в химической промышленности. — Ж. Вс. химич. об-ва им. Д. И. Менделеева, 1972, т. XVII, № 2.

Костычев Н. А. О борьбе с засухой в Черноземной области посредством обработки полей и накопления в них снега. СПб., 1893.

Котляков В. М. Снежный покров Земли и ледники. Л., 1968.

Котляков В. М. Роль ледников в жизни современного человека. — В кн.: Проблема человека в системе географических наук. М., 1977.

Котляков В. М. Будущее природной среды и глобальные проблемы гляциологии. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1980, № 1.

Кочерин Д. И. Вопросы инженерной гидрологии. М.—Л., 1932.

Кренке А. Н., Ходаков В. Г. О связи поверхностного таяния ледников с температурой воздуха. — В сб.: Мат-лы гляциологических исследований. Хроника. Обсуждения, 1966, вып. 12.

Кренке А. Н. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л., 1982.

Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Расчеты речного стока. Л., 1934.

Куделин Б. И. Принципы региональной оценки ресурсов подземных вод. М., 1968.

Кузнецов Н. Т. Воды Центральной Азии. М., 1968.

Кузнецова Л. И. и *Шарова В. Я.* (ред. О. А. Дроздова). Количество осадков (мировая карта). — Физико-географический атлас мира. Листы 42—43. М., 1964.

Кузник И. А. Обоснование гидрологических расчетов при проектировании водохозяйственных мероприятий в Поволжье. Саратов, 1958.

Кунин В. Н. Местные воды пустыни и вопросы их использования. М., 1959.

Кунин В. Н. О питании подземных вод в Нью-Йорке. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1972, № 5.

Кунин В. Н., Лещинский Г. Т. Временный поверхностный сток и искусственное формирование грунтовых вод в пустыне. М., 1960.

Куприянов В. В. Гидрологические аспекты урбанизации. Л., 1977.

Ландсберг Г. Г., Фишман Л. Л., Фишер Д. Л. Ресурсы США в будущем (пер. с англ.), т. I, II. М., 1965.

Ласкорин Б. Н., Болотина О. Т., Каминский В. С. Качество и охрана воды в бассейне реки Волги. — Водные ресурсы, 1975, № 4.

Львович А. И. Охрана водных ресурсов. — В кн.: Комплексное использование водных ресурсов. — Международный семинар ООН в Фергане в 1966 г. Ташкент, 1966.

Львович А. И. Защита вод от загрязнения. Л., 1977.

Львович М. И. Проблема гидрозолота и ее значение. — Советская золотопромышленность, 1934, № 6.

Львович М. И. Опыт классификации рек СССР. — Тр. Гос. гидролог. ин-та. Л., 1938, вып. 6.

Львович М. И. Элементы режима рек земного шара. Свердловск — М., 1945.

Львович М. И. Гидрометеорологическое действие лесных полос в прин-

ципы их размещения на полях колхозов и совхозов. — Тр. Гос. гидрол. ин-та, 1950а, вып. 23.

Львович М. И. О методике расчетов изменения питания рек подземными водами. Методика расчетов ожидаемых изменений режима рек под влиянием осуществления планов лесонасаждений. — Докл. АН СССР, 1950б, т. 75, № 1, 2.

Львович М. И. О преобразовании стока рек степных и лесостепных районов европейской части СССР. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1952, № 5.

Львович М. И. Регулирование водного баланса орошаемых полей при помощи лесонасаждений как средство уменьшения норм орошения. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1954, № 2.

Львович М. И. О методике оценки изменений речного стока. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1955, № 6.

Львович М. И. Физико-географические факторы речного стока. — Вопросы географии. Сб. статей для XVIII Международного геогр. конгресса. М.—Л., 1956.

Львович М. И. Комплексный географический метод в гидрологии и задачи его развития. — Тр. III Всесоюзн. гидрол. съезда, т. VII. Л., 1959.

Львович М. И. Изменения речного стока под влиянием земледелия. — В кн.: Колебания и изменения речного стока. М., 1960.

Львович М. И. О комплексном использовании и охране водных ресурсов. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1961, № 2.

Львович М. И. Водный режим Волги, ее твердый сток и их преобразование. Проблемы развития хозяйства, основные предпосылки. — В кн.: Проблемы хозяйственного освоения Волго-Ахтубинской поймы и дельты Волги. М., 1962.

Львович М. И. Человек и воды. М., 1963.

Львович М. И. Водные ресурсы земного шара и их будущее. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1967, № 6.

Львович М. И. Водные ресурсы будущего. М., 1969.

Львович М. И. Реки СССР. М., 1971.

Львович М. И. Основные пути использования и охраны водных ресурсов в перспективе. — Ж. Вс. химич. об-ва им. Д. И. Менделеева, 1972, т. XVII.

Львович М. И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М., 1974.

Львович М. И. Почвенный фактор в гидрологии. — В кн.: Проблемы гидрологии. М., 1978.

Львович М. И. Географические закономерности мировых водных ресурсов. — Сб.: Природные ресурсы и территориальная организация хозяйства. М., 1979.

Львович М. И. Охрана водных ресурсов в условиях будущего. — Водные ресурсы, 1982, № 1.

Львович М. И. Водные ресурсы. Основные принципы охраны. — В кн.: Город, природа, человек. М., 1982.

Львович М. И., Назаров Г. В., Разумихин Н. В. Исследования влияния обработки почвы на сток в Южном Заволжье. — Сб.: Колебания и изменения речного стока. М., 1960.

Львович М. И., Дрейер Н. Н. Распределение элементов водного баланса

(на территории СССР). — Физико-географический атлас мира. Лист 226. М., 1964.

Львович М. И., Коронкевич П. И. Ориентировочный прогноз использования и охраны водных ресурсов СССР на уровне 2000 г. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1971, № 2.

Львович М. И., Черногаева Г. М. Изменение водного баланса территории под влиянием урбанизации. — В кн.: Проблемы гидрологии. М., 1978а.

Львович М. И., Цигельная И. Д. Управление водным балансом Аральского моря. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1978 б, № 1.

Львович М. И., Цигельная И. Д. Потенциальные возможности многолетнего регулирования речного стока в горной части бассейна Аральского моря. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1980, № 1.

Львович М. И., Беляев А. В. Методика географических исследований водного баланса территории и картографирования ее элементов. — Водные ресурсы, 1982, № 3.

Львович М. И., Чернышев Е. П. Закономерности водного баланса и вещественного обмена в условиях города. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1983, № 3.

Львович М. И., Георгиади А. Г. Географический принцип расчетов максимального речного стока. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1983, № 4.

Львович М. И., Коронкевич Н. Н. Географические подходы к изучению влияния переброс стока на природные условия. — Водные ресурсы, 1983, № 6.

Малик Л. К., Нейштадт М. И. и *др.* Географический прогноз изменений природы Западной Сибири в связи с перебросками части стока сибирских рек. — География и природные ресурсы, 1981, № 2.

Матарзин Ю. М., Богословский Б. Б., Мацкевич И. К. Гидрологические процессы в водохранилищах. Пермь, 1977.

Матарзин Ю. М., Богословский Б. Б., Мацкевич И. К. Специфика водохранилищ и их морфометрия. Пермь, 1977.

Мезенцев В. С. Мировой водный и теплоэнергетический баланс и тепловлагооборот на Земле. — Водные ресурсы, 1982, № 3.

Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л., 1974.

Мустонен С. Е., Сеуне И. Влияние лесомелиорации на гидрологию открытых болот Финляндии. — Международный симпозиум по гидрологии заболоченных территорий. Минск, 1972.

Назаров Г. В. Изменение стока рек Украины под влиянием земледелия. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1966, № 1.

Назаров Г. В. Зональные особенности водопроницаемости почв СССР. Л., 1970.

Назаров Г. В. Гидрологическая роль почвы. Л., 1981.

Нейштадт М. И. Мировой природный феномен — заболоченность Западно-Сибирской равнины. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1971, № 1.

Нейштадт М. И., Малик Л. К. и *др.* Преобразование природы Западной Сибири в связи с изъятием части стока рек и перспективной мелиорацией территории. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1982, № 4.

Николаева Г. М. Сезонные изменения водного баланса в условиях тро-

пического муссона Юго-Восточной Азии. — В кн.: Проблемы гидрологии. М., 1978.

Николаева Г. М., Черногаева Г. М. Водный баланс Азии. — Серия монографий «Водный баланс материков земного шара». М., 1977.

Николаева Р. В. Краткий обзор схем и предложений по стабилизации и регулированию уровня Каспийского моря. — Тр. Океаногр. комиссии АН СССР, т. 5. Проблемы Каспийского моря. М., 1959.

Онианго Огембо В. Водный баланс и использование водных ресурсов Кении. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1980, № 1.

Оппоков Е. В. Вопрос об обмелении рек в его современном и прошлом состоянии. Краткий гидрологический очерк с некоторыми данными для Днепра и Волги. — Сельское хозяйство и лесоводство. СПб., 1900.

Орошение и осушение в странах мира. М., 1974.

Пенчев П. Обща хидрология. София, 1972 (на болг. яз.).

Плотины и землетрясения. — Тр. конференции. Лондон, 1—2 окт. 1980 г.— Реферативный журнал. Геофизика. Физика Земли, вып. сводного тома М., 1982, № 7.

Поляков Б. В. Гидрологический анализ и прогнозы. Л., 1946.

Попов Е. Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. М., 1963.

Попов О. В. Подземное питание рек. Л., 1968.

Преображенский В. С. Беседы о современной физической географии. М., 1972.

Преображенский В. С., Абрамов Л. С. Становление конструктивной географии. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1976, № 1.

Проблема Аральского моря. — В сб.: Проблемы регулирования и использования водных ресурсов. М., 1973.

Разумихин Н. В. Урбанизация и охрана окружающей среды в СССР. Л., 1977.

Разумихин Н. В. Прогноз состояния водных ресурсов урбанизированных территорий. — В кн.: Охрана окружающей среды от загрязнения промышленными выбросами. Л., 1981.

Раткович Д. Я. Об управлении режимом колебаний уровня Каспийского моря с помощью разделительной дамбы. — Водные ресурсы, 1975, № 2.

Раткович Д. Я. Проблема Каспийского моря. — Водные ресурсы, 1980, № 5.

Раткович Д. Я. Методические основы управления гидрологическим режимом внутренних морей и озер. — Водные ресурсы, 1982, № 6.

Ремизова С. С. Водный баланс Азовского моря. — Водные ресурсы, 1984, № 1.

Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М., 1979.

Розин Л. Е., Базилевич Н. И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М.—Л., 1965.

Романов В. В. Гидрофизика болот. Л., 1961.

Рубинова Ф. А. Изменение структуры водного баланса бассейна реки Сырдарьи (выше Чардары) под влиянием водохозяйственного строительства. — Тр. Гос. гидрол. ин-та, вып. 208. Л., 1973.

Рябчиков А. М. Структура и динамика геосферы, ее естественное развитие и изменение человеком. М., 1972.

Сванидзе Г. Г. Математическое моделирование гидрологических рядов. Л., 1977.

Светицкий В. П. Дополнительные водные ресурсы Ферганской долины. — Сб.: Вопросы гидротехники, вып. 20. Ташкент, 1964.

Симпозиум ЕЭК по вопросам окружающей среды. Европейская экономическая комиссия ООН. Нью-Йорк, 1979.

Сиренко Л. А. Основные факторы естественного и антропогенного евтрофирования водохранилищ и его последствия. — Водные ресурсы, 1979, № 4.

Соколов А. А. Гидрография СССР (Воды суши). Л., 1964.

Соколовский Д. Л. Применение кривых вероятностей к расчетам годового и максимального стока. Л.—М., 1934.

Соседов И. С. Исследование баланса снеговой влаги на горных склонах. Алма-Ата, 1967.

Субботин А. И. Сток талых и дождевых вод. М., 1966.

Субботин А. И. Структура половодья и территориальные прогнозы весеннего стока рек в черноземной зоне европейской части СССР. Л., 1978.

Сус Н. И. (ред.) Агролесомелиорация. М., 1956.

Тиздель Р. Р. О сейсмических явлениях, вызванных созданием крупных водохранилищ. — Гидротехническое строительство, 1972, № 8.

Указания по определению расчетных гидрологических характеристик. — СН-435-72. Л., 1972.

Фаворин Н. П. Искусственное питание подземных вод и роль в нем ирригационных мероприятий. — В кн.: Управление поверхностными и подземными водными ресурсами и их использование. М., 1961.

Федосеев И. А. Развитие знаний о происхождении, количестве и круговороте воды. М., 1967.

Физико-географический атлас мира. М., 1964.

Фюрон Р. Проблемы воды на земном шаре (пер. с франц.). Л., 1966.

Харченко С. И. Исследование влияния орошения на водные ресурсы и водный баланс речных бассейнов, разработка методики определения возвратных вод и безвозвратных потерь. — В кн.: Исследование влияния орошения и осушения земель на водные ресурсы. — Тр. Гос. гидрол. ин-та, вып. 208. Л., 1973.

Цигельная И. Д. Водный баланс Средней Азии. — Тр. IV Всесоюзн. гидрол. съезда, 1976, т. 2.

Цигельная И. Д. Изучение водного баланса горных территорий. — В кн.: Проблемы гидрологии. М., 1978.

Черногаева Г. М. Водный баланс Европы. — Серия монографий «Водный баланс материков земного шара». М., 1971.

Чернышев Е. П. Изменение водного баланса и состава вод под воздействием города. — Сб.: Курская модельная область. М., 1979.

Чернышев Е. П., Беляев А. В. Воздействие земледелия на водный баланс и интенсивность эрозии. — Сб.: Изучение и оценка воздействия человека на природу. М., 1980.

Швебс Г. И. Теоретические основы эрозиоведения. Киев — Одесса, 1981.

Швец Г. И. Выдающиеся явления на юго-западе СССР. Л., 1972.

Шебеко В. Ф. Гидрологический режим осушаемых территорий. Минск, 1970.

Шигорин Г. Г. Способы определения загрязненности поверхностного стока населенных мест. — Науч. тр. Академии коммунального хозяйства, 1963, вып. 20.

Шикломанов И. А. Гидрологические аспекты проблемы Каспийского моря. Л., 1976.

Шикломанов И. А. Антропогенные изменения водности рек. Л., 1979.

Шнитников А. В. Реконструкция водного баланса озера Балхаш. — Изв. ВГО, 1973, т. 105, вып. 3.

Штепа Б. Г., Кудрин Б. А. и *др.* Мелиорация земель в СССР. М., 1975.

Штернов П. П. Охрана водоемов от загрязнения. — Водные ресурсы, 1972, № 1.

Шульц В. Л. Водный баланс Аральского моря. — Тр. САРНИГМИ, 1975, вып. 23.

Шумский П. А., Кренке А. Н. Современное оледенение Земли. — Геофизический бюллетень, 1965, № 14.

Щеглова О. П. Питание рек Средней Азии. Ташкент. 1960.

Эльпинер Л. И., Васильев В. С. Водные ресурсы, современные особенности и перспективы водопотребления в США. — Водные ресурсы, 1983, № 1.

Яковлев С. В. Охрана водных ресурсов. М., 1979.

Ярвекюльг А. А. Проблемы евтрофирования морей. — Водные ресурсы, 1979, № 4.

Belgrand E. La Seine, Paris, 1869.

Berghaus H. Länder- und Völkerkunde, 1837, v. 11.

Benson M. A. Use of historical data in flood frequency analysis. — "Trans. Amer. Geophys. Union", 1950, v. 31.

Brown L. A. Planning for nonpoint pollution control in North Carolina. — "Journ. of Soil and Water Conservation", 1978, v. 34, N 1.

Biswas A. K. (Editor). Models for Water Quality Management. — McGrow-Hill, 1981.

Dreyer N. N., Nikolayeva G. M., Tsigelnaya I. D. Maps of streamflow resources of some highmountains areas in Asia and North America. Hydrological Aspects an High Mountains. JANS Publ. N 138, 1982.

Demographic yearbook, 1979, N. Y., 1980.

Dubrowin T., Roginski S. Oddzialywanie rolnictwa i lesnictwa na bilans wodny zlewni rz. Noteci po ujscie Gwdy. — "Gospod. wodna", 1954, vol. 14, N 11.

Dukic D. Hidrologija kopna. Beograd, 1984.

Falkenmark M. Water in Sweden. National Report to the United Nations Water Conference. — Stockholm, 1977a.

Falkenmark M. Reduced Water Demand—Result of Swedish Anti—Pollution Programme. "AMBIO", a Journal of the Human Environment. Research and Management. A Special Issue "Water". Vol. VI, N 1, 1977b.

Falkenmark M. Integrated View of Land and Water. Geografiska Annaler, 63—A, 1981, N 3—4.

FAO Production Yearbook—1980. Vol. 39. Rome, 1981.

Framji K., Mohajan I. Irrigation and drainage in the World. ICID, New Delhi, 1969.

Holeman I. N. The sediment yield of major rivers of the World. — "Water Resources Research", 1968, vol. 4, N 4.

Horton R. E. Hydrologic conditions as affecting the results of the applications of methods of frequency analysis to flood records. U. S. Geol. Surv. Water Supply Paper N 771, 1936.

Keller R. Water balance in the Federal Republic of Germany. — "Symposium on World Water Balance", IASH, 1970, vol. II, publ. N 93.

Lvovitch M. I. The water balance and its zonal characteristics. — "Soviet Geography". New York, 1962, vol. III, N 10.

Lvovitch M. I. Scientific principles of the complex utilization and conservation of water resources. — "Soviet Geography: Review and Translation". New York, 1969, March.

Lvovitch M. I. World Water balance (General Report). "Symposium on World Water Balance", IASH-UNESCO, 1970, vol. II, N 93.

Lvovitch M. I. The Global Water Balance. "US IHO Bull.", N 23, 1973 a.

Lvovitch M. I. The World's Water Today and Tomorrow. "Mir" Publ., Moscow, 1973b.

Lvovitch M. I. World Water Resources, Present and Future. "AMBIO", A Journ. of the Human Envir. Res. and Manag. A Special Issue "Water", vol. VI, N 1, 1977.

Lvovitch M. I. World Water Resources and their Future. Transl. by the Amer. Geophys. Union. 1979.

Lvovitch M. I. Soil trend in hydrology. — Hydrological sciences Bul., 25, 1, 3/1980.

Lvovitch M. I. and *Tsigelnaya I. D.* Control of Water Balance of Drainless Lakes in the Future. Inter. Assoc. Hydrologycal Sciences Publication, N 109, 1973.

Manabe S., Holloway J. L. The Seasonal variation on the hydrologic cycle as simulated by a global model of the atmosphere. — "Journal of Geophisical Research", vol. 80, N 12, April 20, 1975.

Monografia Geografica a Republicii Populare Romine. — I, "Geografia fizica", 1960.

Mustonen S. E. Water Balance Transformation of Meliorated Areas. General report. — "Man-Made Transformation of Water Balance". International Geographical Union. Freiburg, 1976.

Nace R. L. Water of the world. U. S. Depart. of the Interior. — "Geological Survey", 1968 July.

Nace R. L. World hydrology: status and prospects. "Symposium on World Water Balance". — IASH-UNESCO, 1971, vol. I, Publ. N 92.

National Atlas of Kenya. Nairobi, 1970.

Newell F. H. Results of streams measurements. — "XIV Annual Report of the U. S. Geological Survey", 1892/93.

Nosenko P. P., Zonn I. S. Land Drainage in the World. — "ICID Bull.", January, 1976.

Oltman R. E. Reconnaissance investigations of the discharge and water

quality of the Amazon. — "Atlas do Simposio a Biota Amazonica", Rio de Janeiro, 1967, vol. 3 (Limnologia).

Parde M. Fleuves et Rivers. Paris, 1955, 3 ed.

Patterns of urban and rural population growth. — United Nations. New York, 1980.

Popov E. G. Continental precipitation and evaporation. A review of problems related to hydrological cycle and water balance studies. — "Symposium on World Water Balance", IASH—UNESCO, 1970, Publ. N 92.

Roche M. Hydrologie de surface. Paris, 1963.

Rodier J., Roche M. Deficit d'ecoulement anuel en pays tropicaux. — "Journees de l'hydraulique", 3-es, Alger, 1954, Gren., 1954.

Szesztay K. The hydrosphere and the human environment. — "Paper presented IASH Symposium". Wellington, 1970.

Statistical Yearbook 1979/80. United Nations. N. Y., 1981.

The Nation's Water Resources. United States Water Resources Council. — Washington, 1968.

The global 2000 report to the president. Entering the 21st century. Prop. by Council of Environmental Quality and the Depart. of State. Washington, 1980, vol. 1, p. 47, vol. 2.

Ujvari I. Hidrografia Republicii Populare Romine. Bucuresti, 1959.

Ujvari J. Geografia apelor Romaniei. Bucuresti, 1972.

United Nations, Statistical Yearbook, 1977. New York.

Wex G. Über die Wasserabnhame in die Quellen, Flüssen und Strömen. — "Zeitsch. d. Oster. Ing. und Arch. Vereins", 1873.

White G. F. Water Resource Adequacy: Illusion and Reality. — Natural Resources Forum Un. Nations. N. Y., 1983.

Wilgat T., Wojciechowski K. Rio Aconcangua.—"Document. geogr., Z. 4/5", Warszawa, 1971.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОТ АВТОРА 3

ВВЕДЕНИЕ 5

Часть I. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ МИРА И ПРОЦЕССЫ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

Глава 1. КРУГОВОРОТ ВОДЫ И МИРОВОЙ ВОДНЫЙ БАЛАНС 14

Глава 2. ШЕСТИКОМПОНЕНТНЫЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ ВОДНОГО БАЛАНСА ТЕРРИТОРИИ 19

Глава 3. КАРТЫ ВОДНОГО БАЛАНСА 35

1. Мировые карты зонального масштаба . . . . . —
2. Карты местного водного баланса 40

Глава 4. РЕСУРСЫ ПРЕСНЫХ ВОД МИРА 46

1. Количество пресных вод . . . . . —
2. Обеспеченность населения стран мира ресурсами . . . 50
3. Географические закономерности водного баланса . . 59

Часть II. АНТРОПОГЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВОДЫ

Глава 5. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИХ ИЗУЧЕНИЯ (РАСШИРЕННОЕ ВОСПРОИЗВОДСТВО ВОДНЫХ РЕСУРСОВ) 64

Глава 6. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВОД ГИДРОТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ 74

1. Гидрологическая роль водохранилищ . . . . . —
2. Вода и землетрясения 86
3. Паводки на реках 93

Глава 7. УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМ БАЛАНСОМ И РЕЖИМОМ СОЛЕНОСТИ ВОД ЮЖНЫХ МОРЕЙ 106

1. Общие принципы управления . . . . . —
2. Преобразование Аральского моря 112

Глава 8. ГИДРОМЕЛИОРАТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ . . . 120

1. Влияние орошения на водные ресурсы 121
2. Осушение как гидрологический фактор 134

Глава 9. ПОЧВА — ПОСРЕДНИК МЕЖДУ АТМОСФЕРОЙ И ГИДРОСФЕРОЙ 139

1. Гидрологическая роль почвы . . . . . —
2. Влияние неорошаемого земледелия на водный баланс 146
3. Воднобалансовая роль полезащитных лесонасаждений 154

Глава 10. ГИДРОЛОГИЯ ГОРОДОВ 163

Часть III. ОХРАНА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ В УСЛОВИЯХ БУДУЩЕГО

Глава 11. ПРИНЦИПЫ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ОХРАНЫ ВОД 181

Глава 12. ОХРАНА ВОД В ПРОЦЕССЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ . . . 200
1. Хозяйственно-бытовое водоснабжение и водоотведение —
2. Животноводство 204
3. Электроэнергетика 207
4. Промышленность 212
5. Суммарный расход воды на водоснабжение 216
Глава 13. МИРОВЫЕ ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В БУДУЩЕМ 219
1. Прогноз водного баланса мира и СССР на перспективу 220
2. Современное состояние и прогноз использования и охраны водных ресурсов на перспективу 223
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 232
ЛИТЕРАТУРА 237

CONTENTS

FROM THE AUTHOR 3
INTRODUCTION 5
Part I. WORLD WATER RESOURCES AND PROCESSES OF THEIR FORMATION
Chapter 1. THE HYDROLOGIC CYCLE AND GLOBAL WATER BALANCE 14
Chapter 2. THE SIX—COMPONENT METHOD OF STUDYING THE WATER BALANCE OF AN AREA 19
Chapter 3. WATER—BALANCE MAPS 35
1. World maps with a zonal scale . . . . . —
2. Maps of local water balances 40
Chapter 4. WORLD FRESH WATER RESOURCES 46
1. The quantity of fresh water . . . . . —
2. Per—capita fresh water resources in different countries of the world 50
3. Geographical regularities of water balance 59
Part II. ANTHROPOGENIC EFFECT ON WATER
Chapter 5. SCIENTIFIC PRINCIPLES OF HYDROLOGIC TRANSFORMATIONS AND METHODS OF STUDYING THEM (EXTENDED REPRODUCTION OF WATER RESOURCES) . . . 64
Chapter 6. WATER TRANSFORMATION WITH THE HELP OF HYDROTECNICAL MEANS 74
1. The hydrologic role of water reservoirs . . . . . —
2. Water and earthquakes 86
3. Floods on rivers 93
Chapter 7. MANAGING THE WATER BALANCE AND SALINITY OF SOUTHERN SEAS 106
1. General principles of management . . . . . —
2. The transformation of the Aral Sea 112
Shapter 8. MELIORATION TRANSFORMATIONS OF WATER BALACE 120
1. The effect of irrigation on water resources 121
2. Drainage as a hydrologic factor 134
Chapter 9. SOIL AS AN ACTIVE LINK BETWEEN ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE 139
1. The hydrologic role of soil . . . . . —
2. The effect of non—irrigated agriculture 146
3. The water—balance role of protection forest belts . . 154
Chapter 10. URBAN HYDROLOGY 163
Part III. WATER RESOURCE CONSERVATION IN FUTURE
Chapter 11. PRINCIPLES AND THEORETICAL MATTERS OF WATER CONSERVATION 181

Chapter 12. WATER CONSERVATION IN THE PROCESS OF WATER SUPPLY 200
1. Domestic water supply . . . . . —
2. Cattle—breeding 204
3. Electric power 207
4. Industry 212
5. The total water use 216
Chapter 13. THE GLOBAL WATER RESOURCES IN FUTURE . . . 219
1. Long—term forecasting the water balance of the world and USSR in perspective 220
2. The modern state of water use and conservation and their forecast in perspective 223
Conclusion 232
References 237

Львович М. И.

Л 89 Вода и жизнь: (Водные ресурсы, их преобразование и охрана). — М.: Мысль, 1986. — 254 с., граф., карт., табл.

В пер.: 2 р.

Вода — источник жизни, необходимый ресурс для многих отраслей хозяйства. Чтобы он не истощился, надо знать не только о происхождении в качестве ресурсов пресных вод, но и об их антропогенных изменениях и мерах охраны. В книге излагаются проблема преобразования водных ресурсов в результате хозяйственной деятельности и концепция их охраны в процессе современного и будущего их использования.

Л $\frac{1905010000\text{-}017}{004(01)\text{-}86}$ 55-86

ББК 26.22
551.49

Water—the source of life, is a necessary resource for many sectors of the economy. One should know not only about the origination and quality of the resources of fresh water, but also about the anthropogenic changes and methods of control in order not to let the resource to deplete. The problem of the transformation of water resources due to economic activities and the conception of preserving them in the process of utilization now and in the future are considered in the book.

Марк Исаакович Львович

ВОДА И ЖИЗНЬ

Заведующий редакцией Ю. Л. Мазуров
Редактор М. И. Макарова
Редактор карт Д. Г. Фаттахова
Младший редактор С. И. Ларичева
Оформление художника Т. К. Самигулина
Художественный редактор С. М. Полесицкая
Технический редактор Л. В. Барышева
Корректор Ч. А. Скруль

ИБ № 2923

Сдано в набор 29.03.85. Подписано в печать 10.11.85. А04085. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага тип. № 1. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать. Усл. печатных листов 16,0. Усл. кр.-отт. 16,0. Уч.-изд. л. 18,18. Тираж 9000. Заказ № 1021. Цена 2 р.

Издательство «Мысль». 117071. Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Московская типография № 11 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, 113105, Нагатинская, 1.