

И. А. Шикломанов

**Исследование  
водных  
ресурсов**



**суши:**

**итоги**

**проблемы**

**перспективы**

Гидрометеиздат 1988



**И. А. Шикломанов**

**Исследование  
водных  
ресурсов  
суши:**

---

**итоги  
проблемы  
перспективы**



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1988

Рецензент: д-р геогр. наук, проф. А. А. Соколов

Обобщены результаты исследований, выполненных в СССР по проблеме оценки водных ресурсов, их колебаний во времени и по территории, изменений под влиянием хозяйственной деятельности. Приведены характеристики естественных водных ресурсов основных речных бассейнов, союзных республик и экономических районов СССР, анализируется динамика годового стока рек под влиянием хозяйственной деятельности в их бассейнах; рассматривается проблема уровня Каспийского моря. Освещаются вопросы динамики водопотребления, водных ресурсов и водообеспеченности в глобальном масштабе по природно-экономическим регионам и континентам мира за 1900–2000 гг. Большое внимание уделено проблеме взаимодействия водных ресурсов и климата.

Рассчитана на научных работников и специалистов в области гидрологии и водного хозяйства, охраны водных ресурсов.

I. A. Shiklomanov. Investigations of Land Water Resources: Results, Problems and Prospects. The research results on the problem of water resources evaluation, their space-time variations and water resources changes under the effects of man's activity for the USSR have been generalized. The characteristics of natural water resources of the main river basins, of Union Republics and of economic areas of the USSR are given; annual river runoff dynamics under the effects of man's activity in river basins is analysed; the water level problem in the Caspian Sea is discussed. The problems of the dynamics of water consumption, water resources and water availability in the global scale according to physiographic and economic regions and continents for 1900–2000 are described.

The book is intended for scientists and specialists in hydrology, water management and water resources conservation.

Ш 1805040700-098  
069 (02)-88 :КБ-16-12-1988

ISBN 5-286-00247-1

© Гидрометеиздат,  
1988 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Еще в начале текущего столетия, на первых этапах развития гидрологической науки основные исследования гидрологов были посвящены вопросам оценки водных ресурсов. В настоящее время, когда роль водных ресурсов в развитии экономики и вообще в жизни человеческого общества неизмеримо возросла, надежная количественная оценка их приобретает особо важное значение. Особое место занимает количественная оценка и расчеты годового стока рек, его колебаний во времени и по территории. Это обусловлено тем, что среднегодовой сток, который собственно и составляет ежегодно возобновляемые водные ресурсы, практически повсюду обеспечивает основной объем водопотребления на хозяйственные нужды и главным образом определяет степень водообеспеченности того или иного региона.

Современные исследования водных ресурсов, особенно в части прогнозирования водных ресурсов и водообеспеченности на будущее, теснейшим образом связаны с проблемами постоянно увеличивающегося влияния хозяйственной деятельности на сток рек, на глобальный климат и влагооборот.

Для нашей страны изучение колебаний водности рек и их антропогенных изменений имеет большое значение не только для оценки водообеспеченности тех или иных бассейнов и регионов, но и для решения проблем важнейших внутренних водоемов (Черного, Каспийского, Азовского и Аральского морей, озер Балхаш и Иссык-Куль), гидрологический режим которых во многом зависит от водности впадающих в них рек. Количественные характеристики водообеспеченности и водных ресурсов будущего являются основой для разработки мероприятий по регулированию и региональному перераспределению речного стока, по управлению водным режимом внутренних водоемов.

За последние 10–15 лет в нашей стране достигнут значительный прогресс в изучении водных ресурсов суши: получены надежные количественные характеристики возобновляемых водных ресурсов по основным речным бассейнам, областям, республикам и экономическим районам СССР, ведутся разработки по сбору, обработке и обобщению оперативных данных в рамках автоматизированной информационной системы Государственного водного кадастра, даны прогнозы антропогенных изменений годового стока главных рек СССР и притока во внутренние моря. Произведены капитальные обобщения по водным ресурсам и водному балансу континентов Земли, по динамике водопотребления и водообеспеченности природно-экономических регионов мира. Для оценки водных ресурсов будущего особенно важное значение имеют полученные в самые последние годы прогнозы антропогенных изменений глобального и регионального климата и данные по возможному воздействию климатических изменений на водные ресурсы и гидрологический режим речных водосборов.

В предлагаемой читателю книге в сжатой форме представлены основные результаты исследований по всем перечисленным выше аспектам изучения водных ресурсов, дан научный анализ полученных выводов, намечены перспективы дальнейших исследований. Вопросы изучения водных ресурсов рассматриваются в историческом плане, однако главное внимание уделено современному состоянию проблемы, анализу итогов, полученных в самые последние годы.

В монографии используется отечественная и зарубежная литература, но в основном книга базируется на результатах исследований Государственного гидрологического института.

### МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И РАЗВИТИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ

В начальный период развития гидрологии при крайней недостаточности гидрологических наблюдений и значительно более полной метеорологической изученности основное внимание при оценке водоносности рек уделялось возможности расчета годового стока по метеорологическим факторам. Методической основой такого расчета явилось простейшее уравнение среднего за многолетний период водного баланса крупного речного бассейна, впервые сформулированное еще в конце прошлого века в работах А. И. Воейкова /27/ и А. Пенка /114/,

$$Y = P - E, \quad (1)$$

где  $Y$  — годовой сток;  $P$  — годовые осадки;  $E$  — годовое испарение.

Из уравнения следует, что для речных бассейнов, не имеющих водообмена с соседними бассейнами и дренирующих все категории подземных вод, норма стока определяется только климатическими факторами — осадками и испарением. Все остальные особенности водосбора — морфология, растительность, характер грунтов и почв и т. п. — отражаются на норме стока через осадки и испарение.

Указанная концепция, вытекающая из уравнения водного баланса (1), еще в начале XX в. реализовывалась посредством разработки практических методов расчета среднегодового стока неизученных в гидрометрическом отношении речных бассейнов по следующим трем основным направлениям:

- путем отыскания зависимостей стока от осадков и других метеорологических факторов;
- путем расчета стока по норме осадков и испарения непосредственно по уравнению (1);
- путем картирования нормы стока и определения ее с использованием приемов географической интерполяции.

По первому направлению делались попытки установить связи стока только от осадков, причем первоначально в виде линейных зависимостей; таковы, например, уравнения А. Пенка /114/, В. Уле /128/, Г. Келлера /105/, относящиеся к концу XIX — началу XX в., а также формулы многих других авторов, полученные в последующие годы. Однако линейные зависимости не нашли широкого применения на практике, поскольку они не отражали физических процессов взаимодействия осадков и стока и имели в основном чисто локальное значение только для определенного диапазона изменения осадков (например, для северных, избыточно увлажненных районов, где испарение невелико и мало изменяется от года к году).

Еще в самом начале XX в. немецкий ученый Р. Шрейбер /119/ и известный русский гидрометеоролог Э. М. Ольдекоп /64/, рассматривая взаимосвязи между элементами водного баланса в различных физико-географических условиях, установили, что в общем виде зависимость стока от осадков имеет нелинейный характер. Исследования указанных авторов имели многочисленных последователей в различных странах, предложивших в том или ином виде зависимости стока от осадков, дефицита влажности или температуры воздуха (в СССР, например, М. А. Великанов и Д. Л. Соколовский, С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель, В. В. Поляков и др.). Эти формулы также имели весьма ограниченное применение, поскольку не отвечали в полной мере физическим представлениям о взаимосвязи между элементами водного баланса во всем диапазоне их изменений и не обеспечивали достаточную надежность расчетов стока, особенно в зонах недостаточного увлажнения.

Следует отметить, что разного рода линейные и нелинейные зависимости стока от осадков и других метеорологических факторов находили практическое применение для оценки водных ресурсов до 30–40-х годов XX в. В последующие десятилетия они уже имели вспомогательное значение и применялись чаще всего лишь для удлинения рядов и восстановления пропусков в наблюдениях за речным стоком. Однако в последние 10–20 лет практическая значимость указанных зависимостей резко возросла — они стали широко использоваться для восстановления естественных характеристик стока речных водосборов, подверженных интенсивной хозяйственной деятельности /85/.

Для расчета водных ресурсов непосредственно по уравнению водного баланса (1) требовалось прежде всего разработать надежную методику определения нормы суммарного испарения. Впервые наиболее фундаментальное решение этого вопроса было найдено Р. Шрейбером и Э. М. Ольдекопом.

Применительно к расчету испарения Е формула Р. Шрейбера имеет вид

$$E = P \{1 - e^{-K/P}\}, \quad (2)$$

а применительно к стоку У ее можно записать в виде

$$y = P e^{-K/P}, \quad (3)$$

где  $K = 2,303a$  — максимально возможное испарение. Параметр  $a$  для верховьев рек и для равнин принимается, по Р. Шрейберу, равным 200–350 мм; для среднего течения реки — 350–500 мм. Таким образом, значение  $K$  колеблется от 460 до 1500 мм.

Наиболее тщательное исследование о взаимосвязи климатических характеристик (осадков и испарения) и характеристики водных ресурсов — речного стока, не потерявшее своего значения до настоящего времени, проведено Э. М. Ольдекопом. Для расчета испарения и годового

стока им предложены широко известные формулы:

$$E = E_0 \operatorname{th}(P/E_0), \quad (4)$$

$$Y = P - E_0 \operatorname{th}(P/E_0), \quad (5)$$

где  $E_0$  — максимально возможное испарение при увлажненном состоянии или испаряемость почвы. По Ольдекопу, формулы (4) и (5) применяются отдельно для зимнего и летнего полугодия, при этом  $E_0$  оценивается по эмпирическим зависимостям от среднего недостатка насыщения в летний и зимний периоды. Формулы Ольдекопа в течение многих десятилетий успешно применялись в различных странах, оставаясь практически без изменений. В 50-х годах они нашли дальнейшее развитие в работе известного советского климатолога М. И. Будыко /13/, который для оценки испаряемости предложил использовать отношение радиационного баланса увлажненной поверхности  $R_0$  к удельной теплоте испарения  $L$

$$E_0 = R_0/L, \quad (6)$$

впервые увязав уравнения водного и теплового балансов.

Таким образом, по Ольдекопу—Будыко, зависимость среднего многолетнего значения водных ресурсов любого региона в зависимости от основных климатологических параметров может быть представлена в следующем виде:

$$Y = P - \frac{R_0}{L} \operatorname{th} \frac{PL}{R_0}, \quad (7)$$

или

$$\alpha = 1 - \frac{R_0}{PL} \operatorname{th} \frac{PL}{R_0}, \quad (8)$$

где  $\alpha$  — коэффициент стока;  $R_0/(LP)$  — индекс сухости, он является достаточно надежной комплексной характеристикой общей увлажненности территории и широко применяется в различного рода обобщениях и зависимостях.

Проверка уравнений (7) и (8) на примере хорошо изученной в гидрометрическом отношении Европейской части СССР показала /75/, что они с достаточной точностью отражают природную зональную закономерность изменения элементов водного баланса по территории. В количественном отношении хорошее совпадение наблюдаемых значений стока и рассчитанных по уравнению (7) достигается, однако, при введении поправок

на недоучет осадков современными осадкомерами, что еще раз подтверждает острую необходимость совершенствования совместными усилиями метеорологов и гидрологов существующих осадкомеров и методов измерения атмосферных осадков и их унификации на мировой осадкомерной сети.

В последующие годы для расчета нормы испарения были предложены в разных странах многие другие методы. В СССР, например, особенно широкое практическое применение нашли предложенные в 1934 г. П. С. Кузиным /52/ графики зависимости испарения (по месяцам) от температуры воздуха; метод оказался весьма простым и довольно точным для районов достаточного и избыточного увлажнения. В те же годы была разработана методика Б. В. Полякова /67/. Из зарубежных методов расчета испарения с суши следует отметить предложенные в 40–50-е годы методы Х. Пенмана /115/, С. Торнвайта /126/ и Л. Тюрка /127/, которые широко используются во многих странах мира и до настоящего времени.

В последние 25–30 лет в СССР разработано много методов определения испарения с поверхности речных бассейнов, позволяющих рассчитывать не только многолетние характеристики, но и испарение за отдельные годы и месяцы. Среди них наиболее известны методы М. И. Будыко /13/ и Л. И. Зубенок /43/, А. Р. Константинова /48/, А. И. Будаговского /12/, В. С. Мезенцева /57/, В. Г. Андреевского и В. И. Бабкина /1/; первые два метода наиболее широко используются в нашей стране и за рубежом.

Нужно отметить, что, начиная с 40-х годов методы расчета испарения разрабатываются в основном не для оценки нормы годового стока, а для изучения динамики испарения и для расчетов водного баланса речных бассейнов и отдельных участков суши в различных физико-географических условиях. Это объясняется тем, что расчеты нормы стока по уравнению водного баланса оказались малоприменимыми для аридных районов, где сток мал и по абсолютной величине близок к погрешности определения осадков и испарения. Для хорошо увлажненных районов с редкой гидрометрической сетью климатические данные и в настоящее время вполне эффективно могут применяться для изучения пространственных изменений характеристик речного стока и общей увлажненности, о чем свидетельствуют, например, исследования в СССР Мезенцева и его последователей для территории Западной Сибири /57/. Этот же климатологический метод определения стока по разности осадков и испарения был весьма успешно использован в ФРГ Баумгартнером и Рейхелем /92/ для всех континентов Земли. Такой подход позволил им довольно просто определить соотношения между осредненными за многолетний период элементами водного баланса отдельных континентов и океанов, северного и южного полушария, различных крупных территорий, однако при этом такой важнейший компонент баланса, как речной сток, определяющий возобновляемые водные ресурсы суши, указанным способом оценивается довольно грубо, особенно для районов недостаточного



увлажнения и аридных.

Для многих регионов мира использование уравнения водного баланса (1) оказалось более продуктивным для решения обратной задачи, т. е. для оценки по осадкам и стоку нормы испарения и его распределения по территории. Так, например, нашли широкое практическое применение карты нормы испарения с суши, полученные в ГГИ А. П. Бочковым /25/ на основе уравнения водного баланса.

В самые последние годы интерес к воднобалансовому направлению оценки водных ресурсов резко возрос в связи с поставленной проблемой водных ресурсов будущего, обусловленной необходимостью изучения изменений водных ресурсов в тех или иных крупных регионах Земли под влиянием воздействия человека на основные климатические характеристики — температуру воздуха и осадки (см. главу 6).

Третье направление оценки возобновляемых водных ресурсов при отсутствии данных наблюдений, получившее развитие в 20-х годах XX в. — картографическое; оно основано также на уравнении многолетнего водного баланса (1). Действительно, если распределение по территории осадков и испарения имеет зональный характер, то таково же должно быть и распределение нормы стока, т. е. ее можно картировать и по картам определять необходимые характеристики для неизученных бассейнов и регионов. Впервые вопрос о картировании норм стока был поставлен на I Всесоюзном гидрологическом съезде (1924 г.) П. Н. Лебедевым в его докладе „О нормах стока“. Автор считал, что создание какой-то универсальной зависимости стока от всех обуславливающих факторов ввиду их многообразия и сложности определения нерационально и потому предложил картировать удельные (на единицу площади водосбора) характеристики стока в виде изолиний. В качестве иллюстрации применяемости предполагаемого подхода Лебедев демонстрировал составленные им карты среднего годового и меженного стока отдельных регионов /70/.

Несколько позднее (1927 г.) известный русский гидролог Д. И. Кочерин на основании тщательного анализа всех имевшихся тогда данных наблюдений за стоком обосновал применимость метода гидрологического картирования для оценки нормы стока и построил первую карту среднего многолетнего стока Европейской части СССР /50/. Эта карта имела большое научно-методическое и практическое значение; начиная с работ Кочерина, картографическое направление стало главным в методике оценки нормы стока неизученных рек. Первая карта Кочерина была составлена по данным наблюдений всего на 34 створах, тем не менее она довольно правильно показывает распределение модуля среднегодового стока по территории Европейской части СССР. Однако оцененные Кочериным на основе полученной карты суммарные водные ресурсы Европейской части СССР ( $658 \text{ км}^3/\text{год}$ , в том числе северный склон  $348 \text{ км}^3/\text{год}$  и южный склон  $310 \text{ км}^3/\text{год}$ ) оказались весьма неточными. По данным современных оценок, эти значения составляют соответственно (местный сток: 1043, 574 и  $469 \text{ км}^3/\text{год}$ ). Столь низкая точность была обусловлена крайней не-

достаточностью имеющихся в то время рядов наблюдений за стоком, и, естественно, для повышения точности оценки водных ресурсов страны и отдельных регионов прежде всего была необходима достаточно густая сеть гидрометрических наблюдений.

Сеть гидрологических станций, ведущих в течение многих лет систематические наблюдения за водным режимом рек и озер, нужна не только для оценки динамики водных ресурсов. Она является основой для развития многих направлений гидрологической науки, связанных с расчетами и прогнозами речного стока, необходимыми для проектирования, строительства и эксплуатации самых различных гидротехнических сооружений на реках и озерах. От уровня развития гидрологической сети во многом зависит прогресс всей гидрологической науки. Это хорошо понимали ведущие ученые отечественной гидрологии еще в самом начале столетия. Однако до Великой Октябрьской Социалистической революции в России гидрологическая сеть была крайне редкой и существовала в основном в виде простейших уровенных постов на больших судоходных реках и озерах. Система регулярных гидрологических наблюдений, осуществляемых по единой методике, была создана в нашей стране лишь после революции.

Впервые вопрос о создании такой системы обсуждался в Российском гидрологическом институте в 1921 г., когда была выдвинута идея создания общегосударственной опорной сети гидрологических станций и постов, предназначенных для научных гидрологических обобщений и обслуживания запросов всех отраслей народного хозяйства. На I и II гидрологических съездах обсуждались конкретные предложения по принципам размещения и функционирования опорной сети, которые были представлены в докладах М. А. Лукашина и Н. А. Копылова.

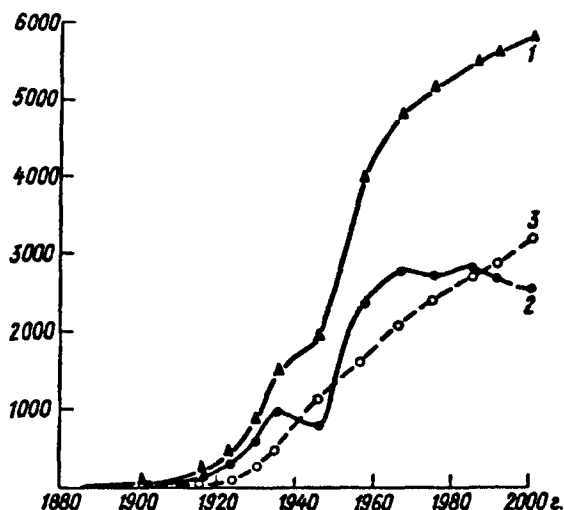
В формировании основных задач гидрологической сети, принципов ее размещения, состава и методов наблюдений *ведущая* роль принадлежит выдающемуся советскому ученому-гидрологу В. Г. Глушкову — одному из создателей и первому директору ГГИ. Разработанное Глушковым /35/ в 20-е годы географо-гидрологическое направление в расчетах речного стока, включающее в себя методы географической интерполяции и гидрологической аналогии, явилось научно-методологической основой создания гидрологической системы наблюдений в нашей стране. Суть этого направления заключается в том, что в любом регионе стационарные гидрологические наблюдения организуются на сравнительно небольшом числе характерных створов, а необходимые для проектирования водохозяйственных мероприятий характеристики стока на любом неизученном водотоке региона определяются косвенными методами, основанными на изучении зависимостей стока от физико-географических факторов, интерполяции и гидрологической аналогии. При необходимости детального изучения слабоосвоенных районов со сложным водным режимом в помощь опорной сети, по мнению Глушкова, должны организовываться „временные посты и измерения, создаваемые экспедициями, позволяющие делать коли-

чественные сопоставления и интерполяции между редкими опорными пунктами" /34/.

Идеи и предложения Глушкова, отраженные в принципах размещения и функционирования гидрологической сети, оказались очень плодотворными и, пожалуй, единственно правильными для условий нашей страны с ее огромной территорией, крайне разнообразными физико-географическими условиями и слабой гидрологической изученностью. Реализация их не только позволила в кратчайшие сроки с наименьшими материальными затратами резко улучшить гидрологическую изученность огромной территории страны и обеспечить необходимыми гидрологическими данными интенсивно развивающееся народное хозяйство, но и на долгие годы стимулировала развитие в СССР географических методов в гидрологии – гидрологического картирования и районирования, гидрологической аналогии, изучения влияния на сток физико-географических факторов. До настоящего времени важнейшей отличительной чертой и достоинством советской школы гидрологии по сравнению с зарубежной является способность советских гидрологов к широким территориальным обобщениям и разработке надежных методов гидрологических расчетов в условиях недостаточности или отсутствия данных наблюдений.

Интенсивный рост числа гидрологических станций и постов в нашей стране начался в 20-е годы. Уже к 1929 г. число их почти в 2,5 раза превысило дореволюционный уровень. Начиная с 30-х годов гидрологические посты, принадлежавшие различным ведомствам, передаются в Гидрометслужбу, созданную в 1929 г., и с этого времени они рассматриваются как составная часть опорной государственной сети, действующей в составе Единой гидрометеорологической службы СССР. К 1940 г. общее число постов на реках достигло 5800; таким образом, дореволюционный уровень был превышен почти в 4 раза по общему количеству постов, а по числу створов, учитывающих сток воды, в 10 раз.

Рост опорной гидрологической сети по измерению стока воды на реках СССР (в том числе в Европейской и Азиатской частях) за период текущего столетия показан на рис. 1. К настоящему времени число пунктов наблюдений за стоком и уровнями воды на реках СССР превышает 6300, причем примерно половина из них размещена на Европейской части СССР (ЕЧС). Следует отметить, что в пределах наиболее населенных районов Европейской части СССР сеть пунктов наблюдений уже в 70–80-е годы достигла достаточного развития и с учетом накопленных весьма продолжительных рядов и разработанных географо-гидрологических методов обобщения вполне удовлетворительно освещает пространственные и временные колебания гидрологического режима, что позволяет достаточно надежно обеспечить гидрологическими данными различные отрасли народного хозяйства. Поэтому в составленных в настоящее время перспективных планах развития гидрологической сети до конца столетия (рис. 1) предусматривается создать оптимально сбалансированную сеть, позволяющую получать достаточно полную достоверную информацию о



**Рис. 1.** Количество пунктов регулярных наблюдений за стоком рек в СССР (опорная гидрологическая сеть).

1 — СССР, 2 — Европейская часть СССР, 3 — Азиатская часть СССР.

водных ресурсах, режиме рек и водоемов, надежно обеспечивать гидрологическими данными существующие и вводимые в строй народнохозяйственные объекты.

В соответствие с этими планами на Европейской части СССР количество пунктов наблюдений даже несколько сокращается. Однако одновременно планируется существенно повысить информативность сети путем рационализации размещения гидростворов, лучшего технического оснащения, использования новых, более совершенных методических и организационных мероприятий по их обслуживанию, сбору, контролю и обобщению получаемой информации. В Азиатской части СССР крайне необходим и количественный рост гидрологической сети.

Следует отметить, что густота современной гидрологической сети во многих странах мира, особенно в США и странах Европы (табл.1), во много раз превышает соответствующие показатели в нашей стране. Тем не менее высокий уровень развития географических методов в отечественной гидрологии позволяет советским гидрологам успешно решать задачи гидрологического обеспечения народного хозяйства.

Помимо опорной сети Госкомгидромета СССР большое значение для оценки изменений водных ресурсов имеет сеть пунктов наблюдений по учету использования вод, организованная в системе Минводхоза и Минэнерго СССР, а также в других министерствах и ведомствах. Этот учет осуществляется более чем в 30 тыс. пунктах забора воды из источников и сброса ее в водотоки и водоемы. В общей сложности учет использова-

Таблица 1

## ЧИСЛО ПУНКТОВ НАБЛЮДЕНИЙ НА РЕКАХ В СТРАНАХ МИРА

| Страна    | Площадь,<br>тыс. км <sup>2</sup><br>(округ-<br>ленно) | Число пунктов <sup>1</sup> |          |       | Густота сети наблю-<br>дений, км <sup>2</sup> /пункт |       |
|-----------|-------------------------------------------------------|----------------------------|----------|-------|------------------------------------------------------|-------|
|           |                                                       | уровен-<br>ных             | стоковых | всего | стоковой                                             | общей |
| СССР      | 23452                                                 | 746                        | 5506     | 6252  | 4300                                                 | 3800  |
| Канада    | 9976                                                  | 461                        | 1998     | 2459  | 5000                                                 | 4060  |
| Китай     | 9561                                                  | 10000                      | 3300     | 16300 | 2900                                                 | 5900  |
| США       | 9356                                                  | 10979                      | 10941    | 21920 | 860                                                  | 430   |
| Бразилия  | 8512                                                  | 1804                       | 1472     | 3276  | 5800                                                 | 2600  |
| Австралия | 7686                                                  | 757                        | 2991     | 3748  | 2600                                                 | 2000  |
| Индия     | 3280                                                  | 74                         | 829      | 903   | 4000                                                 | 3600  |
| Мексика   | 1973                                                  | 240                        | 978      | 1218  | 2000                                                 | 1600  |
| Индонезия | 1904                                                  | 32                         | 420      | 452   | 4500                                                 | 4200  |
| Иран      | 1648                                                  | —                          | 828      | 828   | 2000                                                 | 2000  |
| Ангола    | 1247                                                  | 46                         | 128      | 174   | 9700                                                 | 7200  |
| Мозамбик  | 783                                                   | 268                        | 192      | 460   | 4100                                                 | 1700  |
| Турция    | 780                                                   | 86                         | 806      | 892   | 970                                                  | 870   |
| Франция   | 547                                                   | —                          | —        | 2564  | —                                                    | 210   |
| Испания   | 504                                                   | 262                        | 505      | 767   | 1000                                                 | 760   |
| ФРГ       | 249                                                   | 1200                       | 1800     | 3000  | 140                                                  | 80    |
| Англия    | 244                                                   | —                          | 720      | 720   | 340                                                  | 340   |
| ГДР       | 108                                                   | 900                        | 700      | 1600  | 150                                                  | 70    |

<sup>1</sup> В СССР — на 1/1 1986 г., в остальных странах — на конец 70-х — начало 80-х годов.

ния вод в народном хозяйстве охватывает около 200 тыс. объектов. Наблюдения за режимом подземных вод ведутся сетью гидрогеологических станций и постов Министерства геологии СССР, насчитывающих в своем составе около 37 тыс. пунктов наблюдений; к концу столетия намечается довести их число до 80 тыс.

Одновременно должно произойти резкое повышение уровня автоматизации всего комплекса наблюдений за режимом подземных вод.

Быстрый рост гидрологической сети, применение в отечественной гидрологии в качестве методологической основы географо-гидрологического метода и появление в результате успешной его практической реализации первой карты годового стока Д. И. Кочерина стимулировали проведение систематизации всех имеющихся в стране материалов гидрометрических наблюдений и региональных исследований годового стока рек. В 30–40-е годы появилось большое количество карт норм стока для различных регионов страны, прежде всего интенсивно развивающихся в хозяйственном отношении. Для всей территории СССР первая карта нормы годового стока рек в масштабе 1:15 000 000 была составлена в 1937 г. в ГГИ Б. Д. Зайковым и С. Ю. Белинковым /41/; для этого были использованы данные наблюдений по 1280 створам. По этой карте впервые оценены суммарные ресурсы речного стока СССР, они составили

3750 км<sup>3</sup>/год. В 1946 г. Зайковым /42/ с учетом более полных материалов наблюдений и усовершенствованной методики картирования была опубликована более подробная карта нормы стока Европейской части СССР в масштабе 1:5 000 000 и СССР в целом в масштабе 1:10 000 000. Для построения карты использованы данные по 2360 пунктам наблюдений. Водные ресурсы рек страны по этой карте оценивались в 3940 км<sup>3</sup> в год.

Следующее существенное уточнение нормы стока СССР было выполнено в 1962 г. К. П. Воскресенским. Построенная им наиболее детальная карта была основана уже на материалах 5690 пунктов наблюдений. Она позволила уточнить водные ресурсы недостаточно изученных районов Сибири и Дальнего Востока. По карте Воскресенского суммарный годовой сток рек СССР составил 4480 км<sup>3</sup>/год; это значение было получено путем суммирования годового стока основных рек, впадающих непосредственно в моря, и стока, рассчитанного по карте с межводораздельных территорий.

Вместе с уточнением карт норм стока за счет привлечения большого количества исходной информации проводились исследования по изучению закономерностей формирования нормы стока, влиянию на нее различных физико-географических факторов, оценке применимости и надежности определения нормы стока по картам для малых водосборов. Было установлено, например, что положенное в основу составления карт зональное изменение нормы стока отчетливо проявляется лишь на достаточно больших речных водосборах, в пределах которых влияние местных аazonальных факторов несущественно. С уменьшением площади водосбора влияние аazonальных факторов увеличивается, поэтому для составления карты целесообразно использовать лишь данные по средним рекам, сток которых определяется главным образом зональными факторами, а водосборы полностью расположены в одной географической зоне. Для определения нормы стока неизученных малых рек необходимо в полученные по картам зональные характеристики вводить весьма существенные корректирующие поправки. Наиболее полно этот вопрос был исследован К. П. Воскресенским /29/, который установил, что поправочные коэффициенты  $K_y$  для зон достаточного и избыточного увлажнения должны быть меньше единицы, а для засушливых районов — больше единицы. Введение поправочных коэффициентов для увлажненных районов обусловлено неполным дренированием подземных вод малыми реками, а для южных, засушливых районов с плоским рельефом — значительно большей долей бессточных понижений в пределах больших речных бассейнов. Для практического использования разработаны приближенные значения поправочных коэффициентов для разных зон в зависимости от площадей водосборов /29/.

Наличие детальных карт нормы стока СССР дало реальную возможность оценки водных ресурсов не только для всей территории страны, но и для крупных природно-экономических регионов, союзных республик,

административных областей и территориально-производственных комплексов. Настоятельная необходимость в такой оценке появилась в 60-е годы, когда стали разрабатываться долгосрочные перспективные планы комплексного использования и охраны водных ресурсов, включающие в качестве исходных данных сведения о водных ресурсах и водном балансе не только для речных бассейнов, но и для различных административных районов. Наиболее полные данные по водным ресурсам и водному балансу СССР и всех основных административных районов приведены в 1967 г. в монографии „Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза” /25/. Общее значение водных ресурсов СССР оказалось равным  $4714 \text{ км}^3/\text{год}$ ; выполненные в последующие годы оценки /8, 10/ позволили заметно уточнить ресурсы слабоизученных районов Северо-Востока, но практически полностью подтвердили общее значение — суммарные средние за многолетний период ресурсы речного стока СССР оцениваются в настоящее время в  $4740 \text{ км}^3/\text{год}$ .

В последние 10 лет стало очевидным, что данные о средних значениях водных ресурсов отдельных регионов явно недостаточны для эффективного планирования мероприятий по их использованию и охране, для изучения колебаний во времени и по территории, для оценки их изменений под влиянием хозяйственной деятельности. Для решения всех этих задач необходима ежегодная и даже сезонная оценка водных ресурсов регионов за возможно длительный многолетний период, которая позволила бы провести анализ многолетних колебаний водных ресурсов, выявить периоды малой и повышенной водности, экстремальные значения, изучить синхронность и асинхронность колебаний стока рек в пределах различных территорий, оценить фактическую и ожидаемую водообеспеченность того или иного региона. Именно эти данные лежат в основе разработки перспективных мероприятий по повышению водообеспеченности южных районов, в том числе путем переброски части стока северных и сибирских рек, по регулированию водного и солевого режима внутренних водоемов, наконец, с использованием этих данных решается важнейшая современная научная проблема гидрологии — изучение водных ресурсов будущего.

К настоящему времени ежегодные оценки водных ресурсов по всем регионам страны выполнены в ГГИ за единый период, начиная с 1930 г. За последние годы эти характеристики оперативно оцениваются в рамках автоматизированной информационной системы Государственного водного кадастра (АИС ГВК). На основании полученных данных рассчитаны самые различные пространственные и временные характеристики многолетних колебаний значений водных ресурсов. Методические подходы такой оценки и основные результаты приведены в главе 3.

### ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ВОДНЫЙ КАДАСТР СССР И ИЗУЧЕНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Государственный водный кадастр (ГВК), представляющий собой систематизированный свод сведений о водных ресурсах страны, является важнейшей формой обобщения данных наблюдений и результатов гидрологических исследований для обеспечения запросов различных отраслей народного хозяйства, связанных с использованием и охраной водных ресурсов, защитой городов и населенных пунктов от наводнений, гидрологическими расчетами при строительном проектировании.

Использование рек и озер для судоходства, водоснабжения, орошения, строительства гидротехнических сооружений обуславливает необходимость иметь систематизированные за многолетний период сведения о гидрологическом режиме водных объектов. В связи с этим с давних пор проводятся работы по обобщению и систематизации данных гидрологических наблюдений и экспедиционных исследований и их публикации в различного рода официальных справочниках. В нашей стране первым таким изданием были „Сведения об уровне воды на внутренних водных путях“, которые публиковались Министерством путей сообщения. В этих изданиях опубликованы данные гидрологических наблюдений с 1881 по 1915 г.

Однако практика требовала более полных и оперативных сведений о водных объектах и их гидрологическом режиме. Поэтому первые предложения о создании водного кадастра нашей страны были выдвинуты уже в первые годы советской власти; это была одна из важнейших, первоочередных задач, которые были поставлены перед созданным в 1919 г. Российским гидрологическим институтом. Необходимость скорейшего создания водного кадастра страны подчеркивалась в 1923 г. на Конференции по изучению естественных производительных сил России. В 1924 г. на I Всероссийском гидрологическом съезде в докладе Н. А. Копылова „О водном кадастре“ были изложены предложения о составе кадастра и единых формах обобщения имеющихся во многих ведомствах разрозненных данных о режиме вод СССР. Вопрос о практической реализации Водного кадастра со всей остротой был поставлен при осуществлении первых пятилетних планов, когда наша страна встала на путь интенсивного промышленного и сельскохозяйственного развития и потребность в надежных данных о водных ресурсах и гидрологическом режиме водных объектов резко возросла.

В 1931 г. В. Г. Глушков, формулируя ближайшие задачи в области гидрологии, обусловленные требованиями развивающегося социалистического хозяйства, в числе одной из первой назвал „приступ к составлению водного кадастра, имеющего цель просуммировать материа-



лы всех исполненных исследований в систематической, удобной для использования форме, и как предшествующая стадия составление списков и каталогов объектов и материалов" /34, 35/. Он подчеркивал, что кадастр должен явиться ведущим и организующим предприятием для всей гидрологии ближайших пятилеток. Тогда же были определены общие положения, принципы и структура кадастровых работ; в частности, отмечались преимущества создания водного кадастра в виде отдельных выпусков,готавливаемых по единой форме, методам и редакции.

В 1931 г. специальное постановление Президиума Госплана СССР обязало Гидрометслужбу СССР подготовить и в течение семи лет издать Водный кадастр. Работы были широко развернуты под руководством ГГИ совместно с местными органами Гидрометслужбы СССР; к их выполнению были привлечены наиболее крупные специалисты нашей страны в области гидрологии, гидрогеологии, океанологии и других смежных дисциплин.

Основные работы по кадастру были завершены только в 1940 г.; к этому времени большая часть материалов была опубликована. При этом в изданиях Водного кадастра были систематизированы данные с начала наблюдений по 1935 г. включительно, причем при составлении кадастра были собраны и проанализированы рассредоточенные в различных ведомствах материалы гидрологических наблюдений и исследований.

Материалы первого Водного кадастра СССР были исключительно обширны, охватывали все виды вод и состояли из четырех основных разделов: 1) кадастр поверхностных вод; 2) кадастр подземных вод; 3) морской кадастр; 4) гидрометеорологический кадастр.

Кадастр поверхностных вод включал и специальные серии:

- „Сведения об уровне воды на реках и озерах СССР“;
- „Материалы по режиму рек СССР“;
- порайонные „Справочники по водным ресурсам СССР“, а также „Кадастр озер“ и „Кадастр болот“.

Кадастр поверхностных вод содержал 77 выпусков общим объемом 7510 авторских листов, большая часть их (80 %) была опубликована. Морской кадастр был опубликован в виде серийных изданий: „Материалы по режиму морей СССР“ и „Справочники по морям СССР“.

Гидрометеорологический кадастр содержал сведения о годовых, месячных, суточных и ливневых осадках на территории СССР, высоте и плотности снежного покрова, дефиците влажности воздуха и испарении с водной поверхности и суши.

Кадастр подземных вод в виде каталога подземных вод СССР и порайонных монографий по ресурсам подземных вод был завершен уже в послевоенный период Министерством геологии СССР.

Работы по Водному кадастру СССР планировалось завершить составлением сводных изданий — „Справочника по водным ресурсам СССР“ и „Гидрологического атласа СССР“, однако начавшаяся война помешала осуществить эти планы.

Материалы Водного кадастра, составленные за период с 1931 по 1940 г., сыграли огромную роль в обеспечении гидрологическими данными народного хозяйства страны в ходе первых пятилеток, в годы Великой Отечественной войны и в послевоенный период. Вместе с тем они способствовали развитию гидрологической науки в нашей стране; на их основе были выполнены фундаментальные исследования по годовому стоку рек, испарению, расчетам максимальных и минимальных расходов воды.

В период подготовки Водного кадастра стало очевидным, что существующий порядок публикации материалов гидрологических наблюдений по 10-леткам не оправдывает себя, поскольку до заинтересованных организаций они доходят с большим опозданием. Этот вопрос был пересмотрен и, начиная с 1936 г., материалы наблюдений на опорной сети станций и постов стали публиковаться за каждый год в виде гидрологических ежегодников, состав которых был значительно расширен по сравнению с более ранними публикациями. В последующие годы в дополнении к гидрологическим ежегодникам стали регулярно публиковаться материалы наблюдений на специализированной сети станций; воднобалансовых, озерных, болотных, а также данные по испарению с водной поверхности и суши. Все эти регулярные публикации, продолжающиеся до настоящего времени и составляющие огромный фонд систематизированной информации (объемом до 2000 авторских листов ежегодно) о гидрологическом режиме, представляют собой крупнейшее достижение советской гидрологии. Эта информация является основным исходным материалом для проведения научных исследований, разработки методов гидрологических расчетов и прогнозов, гидрологического обоснования строительного проектирования.

В конце 50-х годов по мере накопления новых данных встал вопрос о втором издании Водного кадастра СССР. Работы по его созданию велись с 1960 по 1973 г. под научно-методическим руководством ГГИ. В соответствии с утвержденной программой в состав второго Водного кадастра были включены три серии изданий, обобщающие материалы наблюдений по 1965 г. включительно: 1) „Гидрологическая изученность“; 2) „Основные гидрологические характеристики“; 3) региональные монографии „Ресурсы поверхностных вод СССР“.

Серия „Гидрологическая изученность“ (46 выпусков) включает информацию по гидрографии рек и озер, сведения о гидрологических станциях и постах, экспедиционных исследованиях. В этих выпусках впервые были даны наиболее полные списки рек и озер, составленные по крупномасштабным картам. Основные результаты всей этой инвентаризации обобщены в отдельном издании „Реки и озера СССР“.

Серия „Основные гидрологические характеристики“ (42 выпуска) содержит сведения о стоке рек за весь период наблюдений (по годам), об уровне, ледовом и термическом режиме рек и озер, материалы по стоку наносов и гидрохимии.

Серия региональных монографий „Ресурсы поверхностных вод

СССР" (42 выпуска) представляет собой не только комплексное научное обобщение данных по гидрографии и водному режиму региона, но и содержит практические рекомендации по расчетам элементов гидрологического режима, которые могут быть использованы при строительном проектировании; в этом их принципиальное отличие от „Справочников по водным ресурсам", входящим в состав изданий первого Водного кадастра.

Материалы второго Водного кадастра СССР охватывали в основном поверхностные водные ресурсы, однако по детальности и полноте обобщений эти данные не имеют себе равных в других странах мира. Общий объем изданий второго Водного кадастра, состоящий из 180 выпусков, превысил 10 000 авторских листов. Публикация второго Водного кадастра СССР явилась важнейшим этапом в развитии советской гидрологии и, в частности, в изучении водных ресурсов страны. Обобщающим итогом работ по второму Водному кадастру в части оценки водных ресурсов явилось издание в 1967 г. упомянутой выше (см. главу 1) капитальной монографии „Водные ресурсы и водный баланс территории СССР", материалы которой были положены в основу разработки ведущими проектными и водохозяйственными организациями страны „Генеральной схемы комплексного использования водных ресурсов СССР до 1980 г."

Накопленный советскими гидрологами в ходе подготовки Водного кадастра опыт обобщений гидрологических данных широко использован при разработке программы и проведении международного сотрудничества по гидрологии в рамках так называемого Международного гидрологического десятилетия (МГД) ЮНЕСКО (1964—1974 гг.).

Одновременно с работами по Водному кадастру управлениями Гидрометслужбы СССР под руководством ГГО была завершена подготовка Справочников по климату СССР, а Министерством геологии СССР подготовлена и опубликована капитальная серия обобщений по подземным водам СССР.

Несмотря на большую работу, выполняемую в нашей стране по изданию обобщающих справочных изданий по водным ресурсам, уже в ходе подготовки второго Водного кадастра стало очевидным, что эта работа имеет существенные организационно-методические недостатки, а публикуемые издания по составу приводимых материалов не в полной мере удовлетворяют возросшим требованиям научно-обоснованного планирования комплексного использования и охраны водных ресурсов, а также мероприятий по защите от вредного воздействия вод.

В связи с огромным объемом гидрологических данных и сложностью их обработки, выполнявшейся практически вручную без применения современной вычислительной техники, обобщение материалов в виде многотомных кадастровых изданий требовало труда большого коллектива специалистов и длительного срока выполнения (10—15 лет), в результате чего данные кадастра к моменту публикации в значительной мере оказывались устаревшими. Помимо этого, наиболее существенными недостатками второго Водного кадастра было отсутствие в нем надежных данных

по водопотреблению и водоотведению, недостаточная увязка материалов по поверхностным и подземным водам, ограниченность данных по качеству поверхностных и подземных вод. Между тем при резко возросшем в 70-е годы объеме водохозяйственного проектирования и строительства требовались оперативные надежные данные по всем видам водных ресурсов в том или ином регионе, из использования по количественным и качественным показателям, тенденции изменений под влиянием климатических факторов и хозяйственной деятельности.

Большое значение для стимулирования дальнейшего изучения водных ресурсов страны и совершенствования системы их обобщения для обеспечения современных потребностей народного хозяйства имели утвержденные Верховным Советом СССР 10 декабря 1970 г. „Основы водного законодательства Союза ССР и союзных республик“, которые, в частности, предусматривают ведение Государственного водного кадастра СССР (ГВК) /49, 77/. В соответствии с „Основами водного законодательства Союза ССР и союзных республик“ Государственный водный кадастр ведется на основе данных государственного учета вод и представляет собой ежегодно пополняемый систематизированный свод сведений о водных ресурсах (поверхностных и подземных), их количестве и качестве, а также использовании для отдельных природно-экономических регионов, бассейнов и для страны в целом. От первого и второго водных кадастров он отличается следующими принципиальными возможностями:

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

- материалы ГВК являются единственными официальными данными о водных ресурсах, обязательными для использования при решении всех задач, связанных с гидрологическим обеспечением народного хозяйства;

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

Данные ГВК должны удовлетворять требованиям:

- текущего и перспективного планирования использования вод и водных объектов, согласования и увязки рационального развития и размещения производительных сил на территории страны с водными ресурсами;

- составления генеральной и региональных схем комплексного использования и охраны водных ресурсов, водохозяйственных балансов;

- проектирования водохозяйственных, транспортных, промышленных и других предприятий и сооружений, связанных с использованием вод и водных объектов;

- прогнозирования изменений гидрологических условий, водности рек и качества вод;

- оперативного управления водными ресурсами и разработки мероприятий по повышению эффективности работы водохозяйственных

систем;

- разработки мероприятий по предупреждению и устранению вредного воздействия вод;

- осуществления государственного контроля за выполнением мероприятий по охране и рациональному использованию водных ресурсов;

- регулирования взаимоотношений между водопользователями, а также между водопользователями и другими организациями.

Разработка новой системы ведения ГВК была начата в 1972 г., а в 1977 г. Советом Министров СССР было принято постановление, обязывающее Госкомгидромет СССР совместно с Минводхозом СССР и Мингео СССР приступить, начиная с 1978 г., к ведению Государственного водного кадастра СССР. В основу ведения ГВК положен принцип единства природных вод, предполагающий обобщение в кадастровых материалах данных о поверхностных и подземных водах, а также об их использовании.

Ведение ГВК предусмотрено по трем разделам: „Поверхностные воды“ (ответственный Госкомгидромет СССР), „Подземные воды“ (ответственный Мингео СССР) и „Использование вод“ (ответственный Минводхоз СССР).

К настоящему времени разработаны и утверждены на междуведомственном уровне состав данных ГВК, структура его публикуемой части и периодичность изданий, методические указания по его ведению. Структура публикуемой части ГВК предусматривает издание каталожных ежегодных и многолетних данных по всем трем ведомствам (табл. 2). Боль-

Таблица 2

**СТРУКТУРА И ПЕРИОДИЧНОСТЬ ИЗДАНИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ВОДНОГО КАДАСТРА**

| Наименование издания                                                | Периодичность публикаций                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>РАЗДЕЛ 1. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДЫ</b>                                 |                                                                                                           |
| <b>Серия 1. Каталогные данные</b>                                   |                                                                                                           |
| Каталог рек, каналов, озер и водохранилищ                           | Разовые издания. В дальнейшем по мере необходимости публикуются дополнения или осуществляется переиздание |
| Каталог селевых бассейнов и очагов на территории СССР               |                                                                                                           |
| Каталог ледников СССР                                               |                                                                                                           |
| Каталог морей и морских устьев рек                                  |                                                                                                           |
| <b>Серия 2. Ежегодные данные</b>                                    |                                                                                                           |
| Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши         | Издаются ежегодно за предшествующий год                                                                   |
| Ежегодные данные о качестве поверхностных вод суши                  |                                                                                                           |
| Ежегодные данные о селевых потоках                                  |                                                                                                           |
| Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек |                                                                                                           |

| Наименование издания                                                           | Периодичность публикаций                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Серия 3. Многолетние данные</b>                                             |                                                                                                           |
| Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши                  | Издаются 1 раз в 5 лет (на уровень лет, кратных пяти)                                                     |
| Многолетние данные о качестве поверхностных вод суши                           |                                                                                                           |
| Многолетние данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек          |                                                                                                           |
| <b>РАЗДЕЛ 2. ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ</b>                                                |                                                                                                           |
| <b>Серия 1. Каталогные данные</b>                                              |                                                                                                           |
| Каталог подземных вод                                                          | Разовые издания. В дальнейшем по мере необходимости публикуются дополнения или осуществляется переиздание |
| <b>Серия 2. Ежегодные данные</b>                                               |                                                                                                           |
| Ежегодные данные о запасах и качестве подземных вод                            | Издаются ежегодно за предшествующий год                                                                   |
| Ежегодные данные о режиме подземных вод                                        |                                                                                                           |
| <b>Серия 3. Многолетние данные</b>                                             |                                                                                                           |
| Многолетние данные о запасах и качестве подземных вод                          | Издаются 1 раз в 5 лет (на уровень лет, кратных пяти)                                                     |
| Многолетние данные о режиме подземных вод                                      |                                                                                                           |
| <b>РАЗДЕЛ 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОД</b>                                             |                                                                                                           |
| <b>Серия 1. Каталогные данные</b>                                              |                                                                                                           |
| Каталог водопользователей                                                      | Разовые издания. В дальнейшем по мере необходимости публикуются дополнения или осуществляется переиздание |
| <b>Серия 2. Ежегодные данные</b>                                               |                                                                                                           |
| Ежегодные данные об использовании вод                                          | Издаются ежегодно за предшествующий год                                                                   |
| <b>Серия 3. Многолетние данные</b>                                             |                                                                                                           |
| Многолетние данные об использовании вод                                        | Издаются 1 раз в 5 лет (на уровень лет, кратных пяти)                                                     |
| <b>ОБЪЕДИНЕННЫЕ ИЗДАНИЯ</b>                                                    |                                                                                                           |
| Водные ресурсы СССР и их использование (оценка водных ресурсов и их изменений) | Издаются применительно к срокам водохозяйственного планирования                                           |

шинство этих изданий уже публикуются или подготавливаются к печати /31/. Начиная с 1981 г., оперативно (в текущем году за предшествующий год) публикуется объединенное межведомственное ежегодное издание „Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество“, которое содержит данные по территории речных бассейнов, их участ-

ков, экономических районов, союзных республик и СССР в целом.

Наряду с подготовкой публикуемой части кадастра создается автоматизированная информационная система ГВК (АИС ГВК). АИС ГВК представляет собой основанную на применении современных технических, информационных программных средств, единую для СССР систему сбора, контроля, хранения и обработки данных о водных объектах, водных ресурсах, режиме, качестве и использовании вод, а также доведения этих данных и результатов их обработки и обобщения до потребителей. Основные цели создания АИС ГВК следующие:

- повышение оперативности в обеспечении народного хозяйства гидрологическими данными за счет уменьшения времени между появлением данных и возможностью их использования, а также за счет сокращения времени ответа на запрос;
- увеличение информативности ГВК за счет расширения состава применяемых методов и повышения уровня обработки и обобщения данных;
- высвобождение части трудовых ресурсов, занятых систематизацией, поиском, контролем, выборкой, обработкой и обобщением данных как в организациях, осуществляющих ведение ГВК, так и в организациях-потребителях кадастровой информации.

АИС ГВК является межведомственной системой. По видам собираемой, принимаемой, обрабатываемой и выдаваемой информации, а также по распределению ответственности за ведение ГВК по его различным разделам АИС ГВК состоит из трех ведомственных подсистем: „Поверхностные воды“, „Подземные воды“, „Использование вод“. Ответственными за создание, функционирование и развитие указанных подсистем являются соответственно: Госкомгидромет СССР (ГГИ), Мингео СССР (ВСЕГИНГЕО) и Минводхоз СССР (ЦНИИКИВР). Ответственным за создание системы в целом является Госкомгидромет СССР, научно-методическое руководство разработкой осуществляет ГГИ.

Подсистема „Поверхностные воды“ делится в свою очередь на шесть видовых подсистем или банков данных и так называемый обобщенный специализированный банк данных „Государственный водный кадастр“, содержащий материалы комплексной оценки водных ресурсов. Указанное деление обусловлено существенно различными типами водных объектов и характером наблюдаемых на них явлений и процессов, которые в системе Госкомгидромета СССР традиционно изучаются различными организациями. В составе подсистемы „Поверхностные воды“ разрабатываются следующие видовые подсистемы второго порядка или банки данных (рис. 2):

- „Государственный водный кадастр“ — данные комплексной оценки водных ресурсов; ответственный ГГИ;
- „Реки и каналы“ — данные о гидрологическом режиме водотоков; ответственный ВНИИГМИ–МЦД;
- „Озера и водохранилища“ — данные о гидрометеорологическом режиме водоемов; ответственный ГГИ;

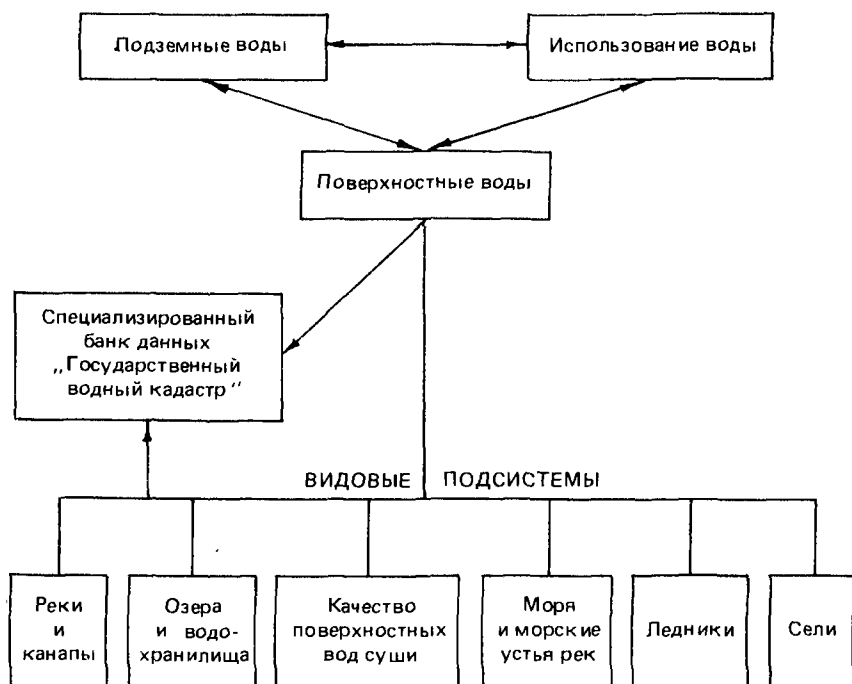


Рис. 2. Организационная структура АИС ГВК.

– „Качество поверхностных вод суши“ – гидрохимические показатели качества вод водотоков и водоемов; ответственный Гидрохимический институт;

– „Моря и морские устья рек“ – данные о гидрометеорологическом режиме и гидрохимических показателях качества вод прибрежной части морей, внутренних морей и морских устьев рек; ответственные ГОИН и ААНИИ – по арктическим морям и устьям рек;

– „Ледники“ – каталожные сведения о ледниках; ответственный САНИГМИ;

– „Сели“ – характеристики селеопасных районов и прошедших селей; ответственный КазНИГМИ.

Указанные подсистемы второго порядка осуществляют одни и те же общесистемные функции применительно к различным видам информации и должны быть тесно связаны между собой, обмениваясь в случае необходимости необходимой информацией.

По функциональному признаку в каждой ведомственной или видовой подсистеме АИС ГВК можно выделить три функциональные подсистемы:



- подготовка информации (сбор, контроль информации, ее первичная обработка и занесение на машинные носители) ;

- ведение информационной базы (накопление и учет информации, обеспечение сохранности первично-обработанных и достоверных данных);

- доведение информации до потребителей (прием, регистрация и анализ запросов потребителей, поиск и обработка данных с целью получения запрашиваемой информации, тиражирование данных, передача данных потребителям) .

Функции подсистем в значительной степени автоматизируются путем применения современных технических и программных средств. Участие человека остается необходимым при сборе информации, занесении ее на технические носители, в процессе контроля и принятия решения, при приеме и анализе запросов, при тиражировании и редактировании материалов.

Работы по созданию АИС ГВК завершились сдачей в 1985 г. в опытную эксплуатацию ее первой очереди, включающей информационную базу, программные и технические средства, организационные структуры и рабочую документацию. В составе пускового комплекса первой очереди функционируют (правда, в ограниченном объеме) все девять подсистем или банков данных по разделам ГВК, осуществляющих сбор, контроль, накопление, обработку информации и ее выдачу потребителю.

В рамках подсистемы „Поверхностные воды” сданы в эксплуатацию семь банков данных, шесть из которых соответствуют видовым подсистемам (рис. 2), а седьмой банк является специализированным и обеспечивает получение обобщенных данных о ежегодных водных ресурсах основных речных бассейнов и административных районов, а также расчетных гидрологических характеристик по большому числу гидрометрических створов.

В составе первой очереди подсистемы (банки данных) по поверхностным водам обеспечивают выдачу по запросам следующих данных:

- информацию о водных ресурсах административно-территориальных единиц, экономических районов и крупных речных бассейнов, различных характеристик речного стока по выборочной сети пунктов наблюдений, а также информацию о запасах воды в крупнейших водоемах СССР;

- информацию об элементах гидрологического режима водотоков в виде трех основных таблиц гидрологического ежегодника;

- информацию об элементах гидрометеорологического режима водоемов в виде пяти таблиц гидрологического ежегодника по выборочной сети пунктов наблюдений УГКС;

- информацию об элементах гидрометеорологического режима и о гидрохимических показателях качества вод морей СССР в виде восьми таблиц многолетних данных и результатов специальной статистической обработки наблюдений;

- первичных и обобщенных во времени и пространстве данных наблюдений за гидрохимическими показателями качества вод водотоков и

водоемов, включая таблицы гидрохимического ежегодника и результаты многомерного статистического анализа;

- каталожных характеристик ледников;
- каталожных характеристик селевых бассейнов, врезов и рытвин Казахской ССР.

Всего подсистема „Поверхностные воды“ охватывает около 30 000 водных объектов и выдает потребителю около 250 видов информации.

Первая очередь подсистемы (банка данных) „Подземные воды“ обеспечивает выдачу по запросам данных о месторождениях подземных вод, ресурсах, режиме и качестве подземных вод по выборочной сети крупнейших на Европейской части СССР Московского и Днепровского артезианских бассейнов. Подсистема охватывает 50 объектов подземных вод и выдает потребителю 32 вида информации.

Первая очередь подсистемы „Использование вод“ обеспечивает выдачу по нерегламентированным запросам фактических данных о водопользовании по бассейнам, административным запросам фактических данных о водопользовании по бассейнам, административным территориям, отраслям и ведомствам, отдельным организациям. По широте охвата водопользователей (свыше 80 тыс.) и номенклатуре выдаваемых сведений (несколько тысяч видов выходных документов) указанная подсистема превосходит действующие аналогичные зарубежные информационные системы (США, Франция, ЧССР и др.) /31/. Она обеспечивает выдачу следующих материалов по использованию вод:

- сведений о местоположении и основных параметрах водохозяйственных объектов;
- обобщения ежегодных данных о фактическом водопользовании;
- ежегодных данных об объемах забираемой и сбрасываемой воды за месячные интервалы времени по крупным водохозяйственным объектам.

Информационное обслуживание предусматривает выдачу потребителю как исходной информации, содержащейся в информационной базе, так и обобщенной по различным признакам (бассейновый, территориальный, отраслевой и др.). В последнем случае выдаются данные об использовании водных ресурсов по речным бассейнам, их участкам или расчетным створам; по административным районам, отраслям народного хозяйства, министерствам и ведомствам, отдельным организациям и предприятиям.

Перечисленные достижения в области ГВК весьма значительны — сделан первый важный шаг по пути создания принципиально нового, межведомственного кадастра по всем видам вод, в решении весьма сложной задачи перехода к автоматизированному сбору, обработке и выдаче потребителям кадастровых материалов. Вместе с тем в этой работе все еще имеется немало недостатков и проблем, которые ждут своего решения.

В подсистемах по поверхностным и подземным водам в составе информационных баз содержится пока достаточно ограниченный объем данных даже по опорной сети станций, отсутствуют гидрологические и гидрогеологические данные по многим пунктам наблюдений, в том числе данные

за исторический период. Специальные виды гидрологической информации, включая данные воднобалансовых станций и экспедиционные материалы, пока не включены в систему АИС ГВК.

Основной недостаток подсистемы „Использование вод” обусловлен не столько ее организационно-техническими и программными возможностями, сколько несовершенством самой системы учета использования вод в стране, а именно, низкой точностью исходных данных по водопотреблению и водоотведению на этапе ручной обработки информации до ввода ее в ЭВМ. Улучшение организации учета использования вод, совершенствование измерительной техники, внедрение полной автоматизации процесса получения, обработки и выдачи информации — основные направления дальнейшего совершенствования этой подсистемы.

До настоящего времени не все издания ГВК, предусмотренные структурой, своевременно публикуются. Возможности АИС ГВК пока ограничены и не могут в полной мере удовлетворить потребителей по составу выходной продукции, по полноте и достоверности хранимых данных, по времени ответа и способам доступа к материалам. Обмен информацией между банками данных АИС ГВК и тем более со смежными банками данных в составе первой очереди не налажен, что затрудняет комплексное использование разнородной информации. Следует отметить также, что в настоящее время эффект от банков данных достигается только на центральном уровне — в головных институтах соответствующего профиля. На региональном уровне, где обеспечивается создание и пополнение информационной базы, банки данных отсутствуют.

Для устранения имеющихся недостатков и дальнейшего развития АИС ГВК представляется необходимым решить следующие основные задачи:

- расширение и пополнение информационной базы, особенно подсистем „Поверхностные воды” и „Подземные воды”;
- обеспечение более высокого уровня достоверности данных, повышение эффективности и качества обслуживания потребителей;
- расширение состава выходной информации с обеспечением получения в автоматизированном режиме всех основных публикуемых характеристик ГВК;
- обеспечение регулярного обмена данными между подсистемами с целью совместной обработки и обобщения информации различного видового состава;
- повышение оперативности получения кадастровых данных средствами АИС ГВК.

На основании научного обобщения материалов ГВК и результатов выполненных в последние годы исследований назрела настоятельная необходимость в подготовке и публикации капитальной монографии „Водные ресурсы СССР и их будущее”, в которой целесообразно подвести многолетние итоги изучения водных ресурсов страны и их изменений под влиянием хозяйственной деятельности и климатических факторов на современном этапе и в перспективе.

В заключение настоящей главы отметим, что системы водного кадастра, помимо СССР, разработаны или разрабатываются во многих других развитых странах мира (США, Канаде, ФРГ, Австралии и др.). Наибольший опыт в этой области накоплен в США и Канаде, где системы водного кадастра функционируют с начала 70-х годов. Технология сбора, обработки, накопления и выдачи информации о водных ресурсах в этих странах характеризуется, во-первых, высокой степенью автоматизации, территориальным рассредоточением центров обработки и выдачи информации при наличии головного центра ведения водного кадастра, и, во-вторых, сравнительно ограниченным набором гидрологических характеристик, представленных в информационных базах. Так же как и в СССР, несмотря на широкое внедрение компьютерной технологии при сборе, обработке и выдаче данных о водных ресурсах, их использовании и качестве, в США и Канаде сохраняется традиционная форма подготовки кадастровых материалов в виде публикации различного рода справочников. В США, например, публикуются каталоги данных о водных ресурсах, издания ежегодного национального водного кадастра, ежегодные доклады о водных ресурсах в виде выпусков по территориям штатов, в Канаде ежегодно публикуется справочник-указатель размещения пунктов наблюдений за поверхностными водами, ежегодник поверхностных вод; 1 раз в 3 года издается краткая историческая справка о среднемесячных, годовых и экстремальных расходах воды и исторический обзор об уровнях воды на всех уровнях постах страны. В США все издания водного кадастра осуществляются Геологической службой, в Канаде – Директоратом о внутренних водах.

## ЕСТЕСТВЕННЫЕ ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТЬ СССР

Вода, как известно, особый вид природных ресурсов. В отличие от других природных ресурсов, она очень динамична и в процессе круговорота находится в постоянном движении в атмосфере, литосфере, биосфере. При этом ее количество и качество непрерывно меняется в течение года и от года к году. Основная масса воды сосредоточена в водных объектах — морях, озерах, водохранилищах, реках, каналах, ледниках, водоносных слоях земной коры, составляющих, в соответствии с „Основами водного законодательства Союза ССР и союзных республик“, единый государственный водный фонд.

Все воды единого водного фонда хотя и тесно связаны между собой в процессе круговорота, тем не менее они резко различаются прежде всего по своей динамичности, в качестве показателя которой обычно принимают скорость полного возобновления. По скорости возобновления природные воды принято подразделять на две группы: медленно возобновляемые — вековые или статистические запасы и ежегодно возобновляемые, под которыми обычно и понимают водные ресурсы. В количественном отношении они оцениваются речным стоком. Потребность народного хозяйства в пресной воде в основном удовлетворяется именно за счет возобновляемых водных ресурсов. При современном водохозяйственном планировании обычно не предусматривается (или предусматривается крайне редко) интенсивное использование вековых запасов пресных вод, так как это неизбежно влечет за собой нарушение установившегося равновесия в природе с самыми серьезными экологическими последствиями. Следует отметить, однако, что разделение природных вод на статистические запасы и возобновляемые ресурсы весьма условно. Между ними нет какого-то резкого различия, они тесно взаимосвязаны. Ежегодно возобновляемые водные ресурсы являются динамической частью статистических запасов, поэтому интенсивное количественное и качественное истощение речного стока прямо (например, если река впадает в бессточный водоем) или косвенно (через влагооборот) воздействует на вековые запасы.

Вековые запасы пресных вод условно подразделяют на поверхностные и подземные, тесно связанные между собой в процессе круговорота воды в природе. Среднегодовые объемы вековых запасов поверхностных вод СССР, по данным ГГИ /10/, представлены в табл. 3. Суммарное значение запасов поверхностных вод составляет около 120 тыс. км<sup>3</sup>, причем большая часть из (74 %) — соленые и солоноватые воды внутренних водоемов. На долю пресных вод приходится примерно 42,8 тыс. км<sup>3</sup>, из которых 64 % сосредоточено в озерах и 33 % в ледниках арктической

Таблица 3

## ЗАПАСЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД СССР

| Вид запасов            | Количество объектов | Объем воды, км <sup>3</sup> | Средняя продолжительность водообмена |
|------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| В озерах               | 2 854 000           | 104 000                     | 200–300 лет                          |
| в т. ч. пресных        | —                   | 27 500                      | 150 лет                              |
| В реках                | 2 963 000           | 200                         | 20 сут                               |
| В ледниках             | —                   | (14 000)                    | около 10 000 лет                     |
| в т. ч. горных         | —                   | 1 170                       | около 1 500 лет                      |
| В водохранилищах       | 1 000               | 1 070                       | 2 года                               |
| в т. ч. полезный объем | —                   | 506                         | —                                    |

зоны и горных районов. Продолжительность полного водообмена ледниковых вод исчисляется тысячелетиями (табл. 3). Единовременные запасы воды в руслах рек невелики и составляют всего 200 км<sup>3</sup>, однако ввиду очень высокой скорости водообмена они обеспечивают (как уже указывалось выше) основной объем потребления воды на хозяйственные нужды (примерно 90 %).

Запасы подземных вод (пресных и соленых) на территории СССР (до глубин 2000 м) составляют, по оценкам гидрогеологов [10], около 3 млн. км<sup>3</sup>, их которых примерно 0,55 млн. км<sup>3</sup> сосредоточено в верхней зоне активного водообмена (до глубин 100 м). Значительный объем пресных вод (17 тыс. км<sup>3</sup>) содержится в подземных льдах районов вечной мерзлоты. Таким образом, запасы подземных вод во много раз превышают запасы поверхностных вод, однако возможности их использования принципиально различны. Из огромных общих запасов воды, сосредоточенной под землей, объем пресных подземных вод, пригодных для практического пользования, составляет лишь незначительную часть, причем последняя в существенной мере дренируется реками и входит в состав речного стока.

Интегральной характеристикой возобновляемых водных ресурсов является речной сток, среднегодовое значение которого и определяет объем возобновляемых водных ресурсов того или иного бассейна или региона. Как показано в главе 2, наиболее надежно годовой сток определяется по данным гидрометрических наблюдений на многолетний период.

Для речного водосбора при наличии многолетних рядов гидрометрических наблюдений надежное определение характеристик водных ресурсов — сезонных и годовых значений, нормы и изменчивости и их погрешностей — не представляет затруднений и производится с использованием обычных статистических приемов. При этом в районах избыточного и достаточного увлажнения, где сток формируется на всей территории бассейна и увеличивается вниз по течению реки, в качестве водных ресурсов бассейна принимается сток в самом нижнем створе. Если вниз по течению сток уменьшается, что часто имеет место в аридных районах, то вод-

ные ресурсы бассейна оцениваются по створу, где годовой сток наибольший. В южных районах нашей страны (Закавказье, Средняя Азия, Южный Казахстан), где речной сток формируется в горной зоне, а расходует-ся на равнинах и низменностях, в качестве водных ресурсов бассейна принимается суммарный сток рек в зоне формирования.

При недостаточности или отсутствии данных наблюдений средние водные ресурсы бассейна определяются чаще всего по картам изолиний модуля годового стока (в качестве которой обычно принимается наиболее детальная карта годового стока К. П. Воскресенского /29/), а их ежегодные значения и изменчивость — с использованием метода гидрологической аналогии. Значения водных ресурсов основных речных бассейнов СССР и их изменчивость за многолетний период приведены в табл. 4.

Таблица 4

**ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ОСНОВНЫХ РЕК СССР**

| Река                     | Площадь водосбора, км <sup>2</sup> | Водные ресурсы, км <sup>3</sup> /год |       |       | Коэффициент вариации $C_v$ |
|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-------|-------|----------------------------|
|                          |                                    | норма                                | наиб. | наим. |                            |
| Волга                    | 1 380 000                          | 254                                  | 391   | 161   | 0,18                       |
| Дон                      | 422 000                            | 28,1                                 | 52,0  | 11,7  | 0,38                       |
| Днепр                    | 504 000                            | 53,9                                 | 77,8  | 20,5  | 0,26                       |
| Днестр                   | 71 800                             | 10,7                                 | 16,9  | 4,47  | 0,27                       |
| Кура <sup>1</sup>        | 188 000                            | 28,1                                 | 37,9  | 16,6  | 0,17                       |
| Терек—Сулак <sup>1</sup> | 58 400                             | 15,7                                 | 20,7  | 11,4  | 0,15                       |
| Кубань                   | 57 900                             | 13,5                                 | 17,6  | 8,60  | 0,17                       |
| Сырдарья <sup>1</sup>    | 219 000                            | 37,0                                 | 65,0  | 26,1  | 0,21                       |
| Амударья <sup>1</sup>    | 309 000                            | 69,5                                 | 110   | 52,1  | 0,15                       |
| Или <sup>1</sup>         | 129 000                            | 18,1                                 | 24,4  | 12,5  | 0,18                       |
| Печора                   | 322 000                            | 130                                  | 162   | 99,5  | 0,13                       |
| Нева                     | 281 000                            | 78,5                                 | 116   | 36,3  | 0,18                       |
| Северная Двина           | 357 000                            | 109                                  | 171   | 58,1  | 0,20                       |
| Западная Двина           | 87 900                             | 20,3                                 | 31,7  | 11,6  | 0,25                       |
| Обь                      | 2 990 000                          | 404                                  | 530   | 284   | 0,17                       |
| Енисей                   | 2 580 000                          | 630                                  | 777   | 528   | 0,08                       |
| Лена                     | 2 490 000                          | 532                                  | 642   | 424   | 0,10                       |
| Амур                     | 1 855 000                          | 344                                  | 554   | 209   | 0,20                       |
| Урал                     | 237 000                            | 10,1                                 | 26,0  | 2,92  | 0,60                       |

<sup>1</sup> Водные ресурсы определены по речному стоку в зоне формирования.

Для надежной оценки водных ресурсов экономических районов, территориально-производственных комплексов, союзных и автономных республик, краев и областей, границы которых, как правило, не совпадают с бассейновыми водоразделами и гидростворами, данных по стоку в отдельных створах рек недостаточно, поэтому для их определения используются специально разработанные методы: изолиний, линейных уравнений стока, комплексной регрессии, интегрального осреднения уравнений поверхности стока /8, 10/.

Водные ресурсы любого административного региона определяются сочетанием следующих основных стоковых характеристик: местный сток, приток и отток речных вод. Местный сток региона представляет собой сток всех рек и временных водотоков, формирующихся на его территории; приток речных вод – суммарный объем стока, приносимого в пределы региона со смежных территорий; отток речных вод – суммарный объем стока, выносимого за пределы границ региона всеми реками и временными водотоками. Сумма значений местного стока и притока речных вод представляет собой суммарные или общие ресурсы речных вод административного региона.

Средние за многолетний период характеристики водных ресурсов административных регионов – местный сток, приток и отток речных вод – при наличии детальной карты годового стока для всей территории страны нетрудно определять путем планиметрирования. В ГГИ эта работа выполнена с использованием карты годового модуля стока Воскресенского /29/.

Для оценки ежегодных характеристик водных ресурсов региона по данным наблюдений за расходами воды используется метод линейных уравнений стока и метод интегрального осреднения уравнений поверхности стока.

По первому методу расчеты для каждого административного региона производятся по линейным уравнениям стока с использованием ежегодных значений стока на гидростворах и с учетом весовых коэффициентов, представляющих собой отношение объема стока в створе наблюдений к объему стока, отнесенному к границе рассматриваемого региона. Значения весовых коэффициентов принимаются обычно постоянными для всех лет расчетного периода и определяются по значениям стока, полученным по картам модуля нормы годового стока /59/ или путем отношения соответствующих площадей водосборов /8/.

По второму методу оценка характеристик водных ресурсов для каждого административного региона сводится к определению двойного интеграла от функции поверхности стока /7/ с учетом координат водосборов и высоты местности. Уравнение поверхности стока обычно принимается в виде полинома некоторой степени. Методика, в принципе, позволяет при осреднении учитывать не только координаты и высоту местности, но и другие факторы, определяющие речной сток (например, факторы подстилающей поверхности). Основная трудность широкого практического применения указанного метода состоит в необходимости установления для всех регионов надежных зависимостей стока от высоты местности и других факторов, что представляет собой весьма нелегкую задачу. Поэтому до настоящего времени в ГГИ наибольшее практическое применение получили методы оценки водных ресурсов по линейным уравнениям стока.

Линейные уравнения стока со всеми необходимыми коэффициентами получены для расчета на ЭВМ суммарных водных ресурсов местного сто-



Таблица 5

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТЬ СОЮЗНЫХ РЕСПУБЛИК  
НА УРОВЕНЬ 1980 г.

| Республика          | Площадь,<br>тыс. км <sup>2</sup> | Водные ресурсы             |                |                      | Обеспеченность речным стоком, тыс. м <sup>3</sup> /год |           |                                                     |                |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------|----------------------|--------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------|----------------|
|                     |                                  | местного формиро-<br>вания | C <sub>v</sub> | км <sup>3</sup> /год | одного жителя в<br>средний год                         |           | одного жителя в год<br>95 %-ной обеспечен-<br>ности |                |
|                     |                                  |                            |                |                      | местного<br>формиро-<br>вания                          | суммарным | местного<br>формиро-<br>вания                       | суммар-<br>ным |
|                     |                                  | км <sup>3</sup> /год       |                | км <sup>3</sup> /год |                                                        |           |                                                     |                |
| РСФСР               | 17075,4                          | 4043                       | 0,048          | 4270                 | 29,2                                                   | 30,9      | 26,3                                                | 28,4           |
| Украинская ССР      | 603,7                            | 52,4                       | 0,25           | 210                  | 1,05                                                   | 4,20      | 0,61                                                | 3,02           |
| Белорусская ССР     | 207,6                            | 34,1                       | 0,21           | 55,8                 | 3,55                                                   | 5,81      | 2,43                                                | 4,10           |
| Узбекская ССР       | 447,3                            | 9,5                        | 0,27           | 108                  | 0,60                                                   | 6,82      | 0,38                                                | 5,38           |
| Казахская ССР       | 2717,3                           | 69,4                       | 0,28           | 125                  | 4,67                                                   | 8,44      | 2,81                                                | 5,26           |
| Киргизская ССР      | 198,5                            | 48,7                       | 0,19           | 48,7                 | 13,3                                                   | 13,3      | 10,6                                                | 10,6           |
| Таджикская ССР      | 143,1                            | 47,4                       | 0,13           | 95,3                 | 12,2                                                   | 24,4      | 9,79                                                | 19,9           |
| Туркменская ССР     | 488,1                            | 1,13                       | 0,22           | 70,9                 | 0,40                                                   | 25,1      | 0,34                                                | 19,4           |
| Молдавская ССР      | 33,7                             | 1,31                       | 0,47           | 12,7                 | 0,33                                                   | 3,20      | 0,07                                                | 1,79           |
| Латвийская ССР      | 63,7                             | 15,2                       | 0,25           | 31,9                 | 6,01                                                   | 12,6      | 3,99                                                | 8,50           |
| Литовская ССР       | 65,2                             | 12,8                       | 0,23           | 23,2                 | 3,74                                                   | 6,78      | 2,39                                                | 4,86           |
| Эстонская ССР       | 45,1                             | 10,9                       | 0,26           | 15,6                 | 7,39                                                   | 10,6      | 4,76                                                | 6,98           |
| Грузинская ССР      | 69,7                             | 53,3                       | 0,13           | 61,2                 | 10,6                                                   | 12,1      | 8,74                                                | 9,85           |
| Армянская ССР       | 29,8                             | 6,19                       | 0,12           | 8,96                 | 2,01                                                   | 2,69      | 1,57                                                | 1,95           |
| Азербайджанская ССР | 86,6                             | 7,78                       | 0,15           | 28,0                 | 1,27                                                   | 4,58      | 0,96                                                | 3,63           |
| СССР                | 22274,9                          | 4414                       | 0,046          |                      | 16,7                                                   | 17,9      | 15,3                                                | 16,4           |

ка, притока и оттока речных вод для всех краев и областей, автономных и союзных республик, природно-экономических регионов и широко используются для оперативной ежегодной оценки и анализа динамики многолетних колебаний естественных водных ресурсов в рамках Государственного водного кадастра СССР /8/.

На основе самых последних обобщений этих данных за многолетний период /10/ средний суммарный объем ежегодно возобновляемых водных ресурсов территории СССР оценивается в  $4740 \text{ км}^3/\text{год}$ , в том числе  $4414 \text{ км}^3/\text{год}$ , или 93 % формируется на территории нашей страны. Распределение указанных величин по союзным республикам и крупным экономическим районам приведено в табл. 5 и 6. Средний годовой сток

Таблица 6

**СРЕДНИЕ ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ЭКОНОМИЧЕСКИХ РАЙОНОВ СССР**

| Экономический район    | Площадь,<br>тыс. км <sup>2</sup> | Водные ресурсы<br>км <sup>3</sup> /год |                |
|------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|----------------|
|                        |                                  | местного<br>формиро-<br>вания          | суммар-<br>ные |
| Северный               | 1466,3                           | 494                                    | 512            |
| Северо-Западный        | 196,5                            | 47,7                                   | 89,4           |
| Центральный            | 485,1                            | 88,6                                   | 113            |
| Центрально-Черноземный | 167,7                            | 16,1                                   | 21,0           |
| Волго-Вятский          | 263,3                            | 47,8                                   | 152            |
| Приволжский            | 536,4                            | 31,5                                   | 270            |
| Северо-Кавказский      | 355,1                            | 44,0                                   | 69,3           |
| Уральский              | 824,0                            | 123                                    | 129            |
| Западно-Сибирский      | 2427,2                           | 513                                    | 585            |
| Восточно-Сибирский     | 4122,8                           | 1097                                   | 1132           |
| Дальневосточный        | 6215,9                           | 1538                                   | 1812           |
| Прибалтийский          | 189,1                            | 41,6                                   | 70,9           |
| Белорусский            | 207,6                            | 34,1                                   | 55,8           |
| Юго-Западный           | 269,4                            | 39,2                                   | 77,0           |
| Южный                  | 113,4                            | 1,97                                   | 194            |
| Донецко-Приднепровский | 220,9                            | 11,2                                   | 65,9           |
| Закавказский           | 186,1                            | 67,3                                   | 77,7           |
| Казахстанский          | 2717,3                           | 69,4                                   | 125            |
| Среднеазиатский        | 1277,1                           | 107                                    | 131            |
| Молдавский             | 33,7                             | 1,31                                   | 12,7           |

рек СССР составляет примерно 10 % суммарного стока рек земного шара. По объему речного стока Советский Союз занимает второе место в мире после Бразилии. По удельным водным ресурсам, отнесенным на единицу территории ( $200 \text{ тыс. м}^3/\text{год на } 1 \text{ км}^2$ ), наша страна имеет показатели, близкие таким государствам, как США, КНР, Канада, но значительно уступает многим другим странам: например, в 5 раз Бразилии, в 6 раз Норвегии, в 5 раз Югославии, в 2,5 раза Индии и т. д.

Речной сток того или иного региона зависит главным образом от климатических факторов и определяется соотношением осадков и испарения. Обобщение наблюдаемых данных показывает /8, 10/, что на территории СССР выпадает ежегодно  $11\,300\text{ км}^3$  атмосферных осадков. Таким образом, средний для нашей страны коэффициент годового стока  $\alpha = 0,39$ , т. е. более 60 % осадков испаряется и около 40 % идет на формирование речного стока. В различных районах СССР в зависимости от климатических условий коэффициент стока колеблется практически от нуля (пустынные районы) до 0,90–0,95 (субарктическая зона). Наиболее благоприятными условиями формирования речного стока характеризуются горные районы Киргизской, Таджикской и Грузинской ССР, а также северные районы Сибири и Дальнего Востока, где средние значения коэффициентов стока составляют  $\alpha = 0,5–0,7$  и более.

Вследствие природных особенностей распределение водных ресурсов по территории СССР крайне неравномерно и не согласуется с размещением населения, промышленности и сельского хозяйства (табл. 7). В наи-

Таблица 7

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ  
ПО БАССЕЙНАМ ОКЕАНОВ, МОРЕЙ, ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ СССР**

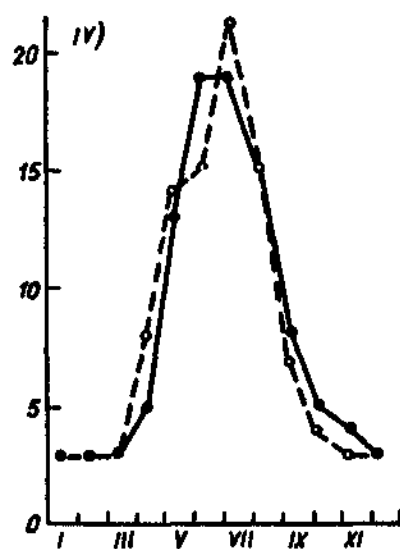
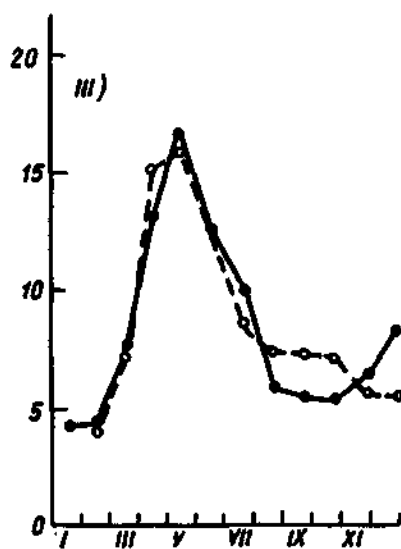
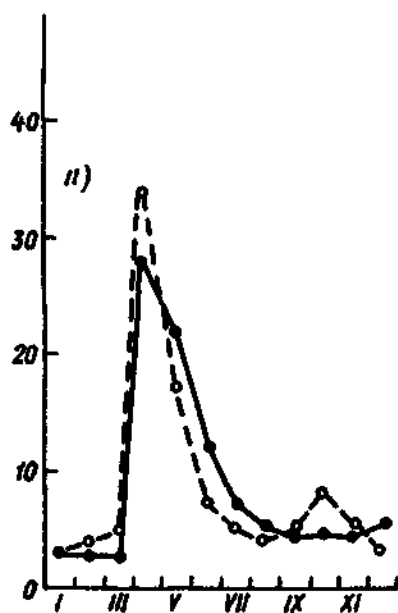
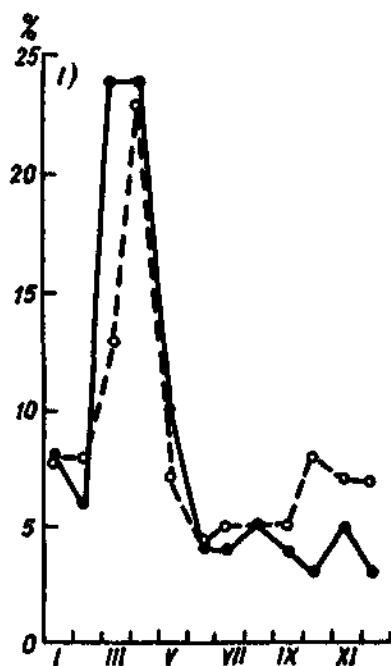
| Бассейн                             | Объем годового стока |     |
|-------------------------------------|----------------------|-----|
|                                     | км <sup>3</sup> /год | %   |
| Северного Ледовитого океана         | 2980                 | 63  |
| Тихого океана                       | 1010                 | 21  |
| Атлантического                      | 330                  | 7   |
| в том числе: Балтийского моря       | 190                  | —   |
| Черного и Азовского морей           | 140                  | —   |
| Внутренний Арало-Каспийский бассейн | 420                  | 9   |
| в том числе Каспийского моря        | 294                  | —   |
| Аральского моря                     | 106                  | —   |
| Всего                               | 4410                 | 100 |

более обжитых районах, где проживает около 80 % населения, производится 80 % всей промышленной продукции и находится около 90 % пригодных для сельского хозяйства земель, водные ресурсы составляют только 24 % их суммарной величины. В наиболее засушливых районах страны, суммарная площадь которых равна 27 % территории СССР, водные ресурсы составляют лишь 2 % общего их объема. Почти все (кроме Волги) наиболее крупные реки СССР (Енисей, Лена, Обь, Амур, Печора, Колыма, Северная Двина, Хатанга) протекают в экономически менее развитых и слабообжитых районах, 82 % речных вод стекает с бассейнов Северного Ледовитого и Тихого океанов. В областях внутреннего стока (южные районы), где потребность в воде особенно велика, формируется лишь 10 % речного стока СССР (около  $470\text{ км}^3/\text{год}$ ).

Внутригодовое распределение речного стока СССР весьма неравномерно. Устойчивый базисный сток в естественных условиях составляет примерно 25 % всего речного стока. На большей части страны в весенний период в течение 2–3 месяцев формируется 50–80 % годового стока. В лесостепной и степной зонах доля весеннего стока в годовом составляет 75–95 %. В горных районах Кавказа, Средней Азии и Южного Казахстана распределение водных ресурсов внутри года тоже неравномерно, но в целом благоприятно для использования вод на нужды орошения – здесь 60–80 % всего речного стока приходится на весенне-летний период. На рис. 3 представлены полученные в ГГИ под руководством В. И. Бабкина данные по внутригодовому (по месяцам) распределению водных ресурсов речного стока для ряда экономических районов СССР (для маловодных и многоводных лет).

Весьма существенные колебания водных ресурсов имеют место не только внутри года, но и в многолетнем разрезе – от года к году. Суммарное значение водных ресурсов СССР ввиду огромной территории и асинхронности колебаний стока в отдельных районах колеблется от года к году весьма незначительно (коэффициент вариации  $C_v = 0,046$ ). За период с 1890 г. наибольшее годовое значение суммарных водных ресурсов составляло 1,09, наименьшее – 0,88 от среднемноголетней нормы; осредненные за пятилетние периоды отклонения от нормы не превышали  $\pm 4–6$  % (рис. 4 и 5). Характеристики многолетней изменчивости водных ресурсов основных рек СССР и союзных республик приведены в табл. 4 и 5, а на рис. 4 и 5 показаны осредненные за пятилетние периоды многолетние колебания водных ресурсов речных бассейнов, крупных природных регионов и страны в целом в виде модульных коэффициентов  $K_Q$ . Наименьшей изменчивостью характеризуются колебания стока крупнейших рек Сибири – Енисея и Лены ( $C_v = 0,08 \div 0,10$ ), а также других крупных рек, основной сток которых формируется в зонах избыточного и достаточного увлажнения севера ЕТС, Сибири и Дальнего Востока, в высокогорной зоне юга страны ( $C_v = 0,13 \div 0,20$ ). Наибольшая изменчивость годового стока характерна для рек южной Европейской части СССР, значительная часть стока которых формируется в лесостепной и степной зонах. В целом для территории СССР имеет место достаточно четко выраженная закономерность: чем больше площадь водосбора и удельная водоносность реки, тем меньше многолетняя изменчивость колебаний годового стока. Эта же закономерность в общем характерна и для изменчивости местных водных ресурсов союзных республик, для которых коэффициенты вариации находятся в пределах от 0,048 до 0,47 (табл. 5).

Многолетние колебания водных ресурсов речных бассейнов и природно-экономических регионов нашей страны, так же как и других регионов мира, имеют циклический характер, выражающийся в чередовании групп многоводных и маловодных лет. Продолжительность циклов и значение водности изменяются в широких пределах даже для одних и тех же регионов; наиболее вероятны группировки маловодных, средних по водности



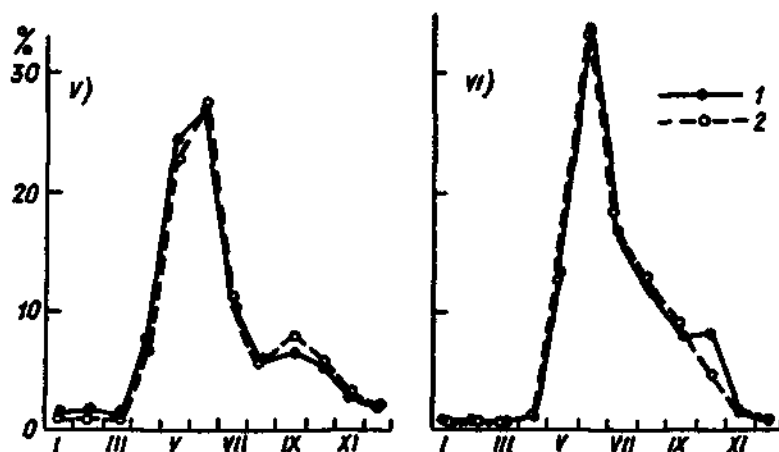


Рис. 3. Внутригодовое распределение водных ресурсов территорий экономических регионов СССР (в % от годовых водных ресурсов).

1 — маловодный год 75 %-ной обеспеченности, 2 — многоводный год 25 %-ной обеспеченности; I — Прибалтийский экономический район, II — Центральный, III — Закавказский, IV — Среднеазиатский, V — Западносибирский, VI — Дальневосточный).

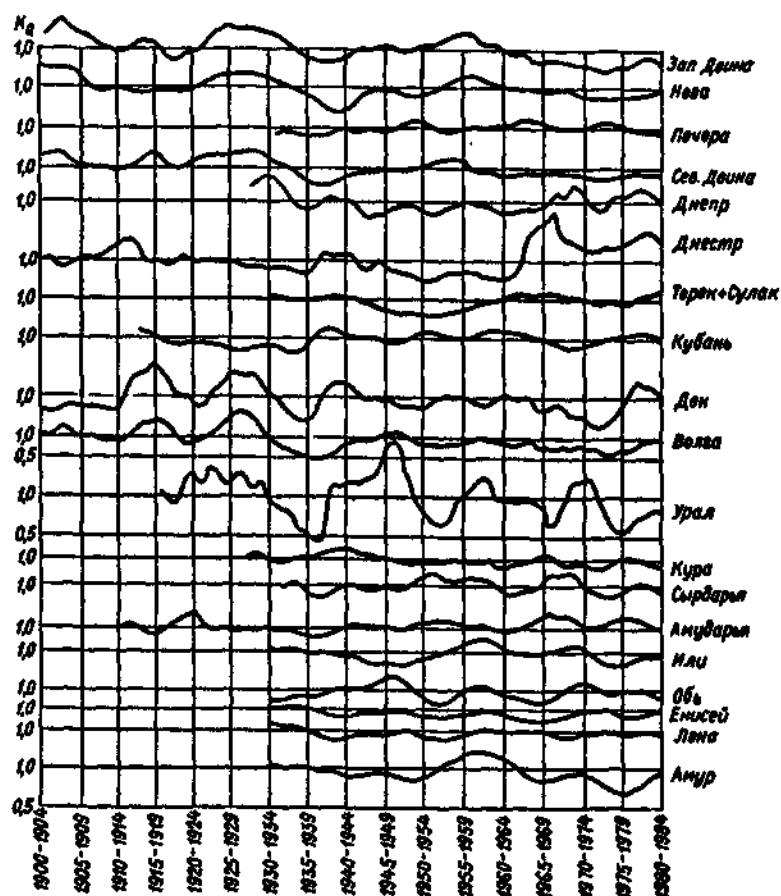


Рис. 4. Многолетние колебания водных ресурсов основных рек СССР (скользящие пятилетние осреднения).

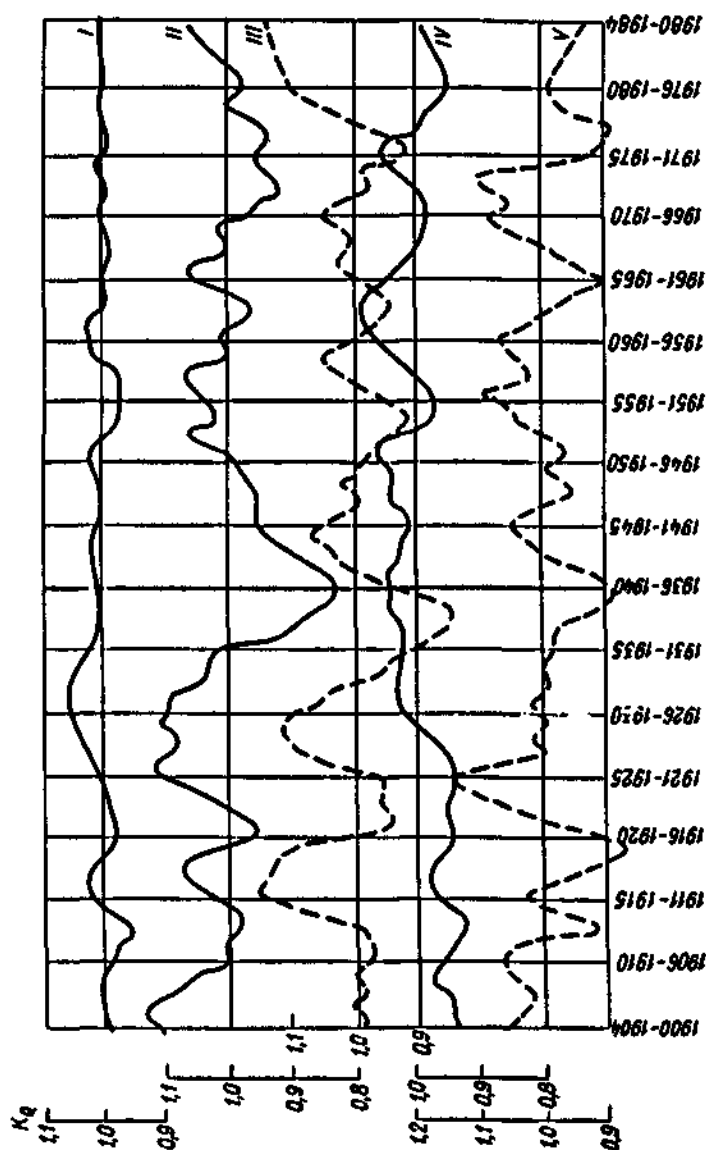


Рис. 5. Многолетние колебания водных ресурсов СССР.  
 I — СССР,  $\Sigma Q = 4740 \text{ км}^3$ ; II — северный склон ЕТС,  $\Sigma Q = 600 \text{ км}^3$ ; III — южный склон ЕТС,  $\Sigma Q = 600 \text{ км}^3$ ; IV — северный склон АТС,  $\Sigma Q = 3370 \text{ км}^3$ ; V — южный склон АТС,  $\Sigma Q = 170 \text{ км}^3$ .



и многоводных лет продолжительностью от 2 до 10–14 лет. При этом группировки маловодных лет, как правило, имеют значительно большую продолжительность, чем многоводных.

Несмотря на большие различия в природных условиях районов СССР, водные ресурсы многих крупных рек и природно-экономических районов имеют в среднем за многолетний период слабовыраженные синхронные колебания. Например, довольно высокую положительную корреляцию ( $r = 0,25 \div 0,61$ ) имеют за многолетний период водные ресурсы Волги с Западной и Северной Двиной, с Доном, Днепром, Уралом, Обью; Енисея с Леной и Сырдарьей. Корреляция суммарного стока северного и южного склонов Европейской части СССР  $r = 0,30$ , северного склона Азиатской части СССР и южного Европейской части СССР  $r = 0,13$ .

Указанные обстоятельства являются следствием преобладания на большей части территории СССР западного переноса влаги с Атлантического океана. Синхронные колебания стока в отдельные годы охватывают огромные территории. Выполненное в ГГИ исследование территориального распределения маловодных и многоводных периодов показало /10, 30/, что за 1900–1980 гг. площадь, где отмечалось маловодье, в отдельные годы (1910, 1920, 1939) превышала 95 % всей территории СССР. Особенно маловодным был 1939 г., когда на 99 % всей площади страны отмечалось маловодье; повышенная водность была отмечена лишь в Закавказье. В 1920 г. на 98 % площади СССР отмечалось маловодье и лишь на реках Северного Кавказа наблюдался повышенный сток. Исключительно маловодными были также 1921 и 1975 гг., однако в эти годы маловодье охватило меньшие территории. В 1921 г. несколько повышенную водность имели реки Поволжья, Казахстана и Средней Азии, а в 1975 г. — Белоруссии, Западной и Восточной Сибири.

Повышенная водность рек в отдельные годы также наблюдалась на большей части территории СССР, например, в 1908 г. на 97 % всей площади, в 1914 г. на 92 % и в 1931 г. на 85 % и т. д. Не только в отдельные годы, но и в течение довольно продолжительных многолетних периодов группировки маловодных и многоводных лет могут отмечаться одновременно на многих крупных речных бассейнах и природно-экономических регионах. Например, исключительно длительное и глубокое маловодье 30-х годов наблюдалось на всех реках южного и северного склонов ЕТС, в Средней Азии, в бассейнах Енисея и Лены (рис. 5). В то же время нередко имели место в течение довольно продолжительных периодов асинхронные колебания водных ресурсов тех или иных регионов. Например, очень высокая водность рек Европейской части СССР в 20-е годы сопровождалась малой водностью рек Азиатской части СССР и в этот период суммарные водные ресурсы страны были ниже нормы (рис. 5).

Приведенные выше данные показывают, что выдвигаемая иногда идея создания в нашей стране в перспективе единой водохозяйственной системы, позволяющей по мере необходимости перераспределять водные ресурсы между бассейнами, вряд ли может быть обоснована с позиций есте-

ственных многолетних колебаний стока рек СССР.

Неравномерность распределения водных ресурсов по территории страны и их несоответствие с распределением населения и экономики особенно наглядно может быть показана путем сопоставления водообеспеченности тех или иных регионов, под которой обычно понимается удельная величина естественных водных ресурсов, приходящаяся на одного жителя. Водообеспеченность союзных республик местным стоком и с учетом стока, поступающего со смежных территорий, представлена в табл. 5. Последние величины (с учетом транзитного стока) являются в значительной мере условными и завышенными, поскольку здесь одна и та же вода может фигурировать одновременно в нескольких соседних республиках.

Водообеспеченность одного жителя нашей страны на уровень 1980 г. составляла 16,7 тыс. м<sup>3</sup>/год, наибольшая (в РСФСР) – 29,2 тыс. м<sup>3</sup>/год, наименьшая (в Молдавской ССР и Туркменской ССР) – соответственно 0,33 и 0,40 тыс. м<sup>3</sup>/год. 8 маловодные годы водообеспеченность уменьшается в 1,5–2,0 раза. Отметим, что приведенные в табл. 5 значения водообеспеченности отнесены к естественным водным ресурсам. В южных районах страны реальная водообеспеченность жителей падает от года к году ввиду уменьшения стока за счет хозяйственной деятельности и интенсивного прироста населения.

### ВЛИЯНИЕ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ СССР И ПРОБЛЕМА УРОВНЕЙ КАСПИЙСКОГО И АРАЛЬСКОГО МОРЕЙ

#### 4.1. Изменение стока рек СССР под влиянием хозяйственной деятельности

Приведенные в главе 3 значения водных ресурсов, их колебания во времени и по территории за многолетний период отражают естественные соотношения между теплом и влагой в тех или иных районах и речных бассейнах. Эти соотношения могут не только существенно колебаться от года к году, нередко обуславливая возникновение засух в умеренных широтах или повышенную увлажненность в южных районах, но и испытывать направленные изменения, обусловленные хозяйственной деятельностью человека.

Антропогенные факторы начали оказывать заметное влияние на водные ресурсы крупных рек СССР где-то с 50-х годов текущего столетия. Различные аспекты проблемы влияния хозяйственной деятельности на речной сток в нашей стране и за рубежом с давних пор привлекали внимание исследователей. Еще в конце XIX в. А. И. Воейков высказывал предположение, что сток крупных рек (в частности, р. Волги) претерпевает заметные изменения в результате вырубки лесов в бассейне.

Более полувека тому назад крупнейший ученый-гидролог В. Г. Глушков, на многие годы определивший основные направления развития гидрологической науки, одной из важнейших задач гидрологии считал изучение влияния хозяйственной деятельности человека на водные ресурсы и водный баланс. По мнению Глушкова, по мере экономического и социального развития общества и преобразования окружающей среды гидрологическая наука будет все более превращаться в „гидрологию от человеческой деятельности“.

Уже в конце 20-х — начале 30-х годов ведущие ученые ГГИ, учитывая возрастающую роль гидрологии в социалистическом строительстве, своими трудами вносили большой вклад в научное обоснование разрабатываемых в те годы проектов крупных водохозяйственных мероприятий. Среди последних — грандиозный проект Большой Волги, предусматривающий создание каскада гигантских водохранилищ, которые неизбежно должны были привести к коренному изменению гидрологического режима реки, сокращению суммарного притока воды в Каспийское море. В качестве основных компенсационных мероприятий для восполнения дефицита притока воды в Каспийское море уже в те годы рассматривались переброски части стока северных рек и р. Дона в р. Волгу.

В работах Глушкова /34, 35/ были поставлены конкретные первоочередные задачи, решение которых необходимо для научного обоснования крупнейших водохозяйственных мероприятий в бассейнах Каспийского и Азовского морей. Большое значение имели также работы известных ученых ГГИ Д. Л. Соколовского и Н. М. Книповича по водному балансу и солевому режиму Азовского моря, в которых рассматривались вопросы, связанные с оценкой изменения гидрологических и гидрохимических характеристик моря при планируемом изъятии части стока р. Дон, а также фундаментальные исследования Б. Д. Зайкова и П. С. Кузина по водному балансу Каспийского моря, и оценке его возможных антропогенных изменений.

С 30-х годов в ГГИ были начаты исследования воздействия на водный режим и водный баланс строительства и эксплуатации водохранилищ, вырубок леса и лесовосстановления, агротехнических мероприятий, осушения болот и орошения засушливых земель.

Большое значение для решения вопросов испарения с водной поверхности и других аспектов гидрологии водоемов имели работы С. И. Руденко по бассейну р. Волги, В. К. Давыдова и Б. Д. Зайкова по изучению гидрологического режима оз. Севан по материалам известной Севанской экспедиции (1926—1930 гг.). После Великой Отечественной войны эти исследования были продолжены и развиты И. В. Молчановым, Е. М. Селюк, А. П. Браславским, З. А. Викулиной, Д. В. Коренистовым, В. Г. Андреевым, А. А. Соколовым, выполнившими обширные исследования Рыбинского, Веселовского, Цимлянского и других водохранилищ, а также озер Иссык-Куль, Ладожского, Чудского и др.

В 1955—1957 гг. были выполнены исследования О. Н. Борсука по влиянию прудов на сток рек СССР, не потерявшие научного и практического значения до настоящего времени.

Несмотря на принципиально правильные подходы к исследованию влияния водохранилищ на годовой сток рек, использованные указанными авторами, до последних лет в количественной оценке этого эффекта даже применительно к таким важнейшим объектам, как Волжско-Камский и Днепровский каскады водохранилищ, имеются существенно различные толкования и проектные организации при составлении водохозяйственных балансов часто используют недостаточно обоснованные данные /В5/.

Исследованиями влияния леса и лесотехнических работ на сток рек, начиная с 30-х годов, занимались Б. В. Поляков и П. С. Кузин, а в последующие годы Д. Л. Соколовский, В. В. Рахманов, А. П. Бочков, П. Ф. Идзон, А. А. Молчанов, С. Ф. Федоров и др. В 40-х годах П. С. Кузин убедительно показал, что мнение А. И. Воейкова о существенном изменении стока р. Волги из-за вырубки лесов не подтвердилось. Что касается учета возможных изменений речного стока и водного баланса при рубках и посадках леса применительно к различным бассейнам и природным зонам, то, несмотря на обширную литературу по этой проблеме в нашей

стране и за рубежом /51, 71/, до настоящего времени многие аспекты проблемы являются недостаточно изученными.

Начало дискуссии по влиянию агротехнических мероприятий на гидрологический режим и особенно на годовую сток рек, продолжающейся до настоящего времени, положил Б. В. Поляков, который в 1939 г. высказал предположение о том /66/, что под влиянием агролесотехнических мероприятий в степных и лесостепных районах страны, особенно в связи с коллективизацией и внедрением машинной пахоты, возможно уменьшение годового стока крупных рек. В частности, по Полякову, глубокое маловодье, охватившее в 30-е годы многие реки юга ЕТС, в значительной мере объясняется этими факторами. Однако в 40-е годы учеными ГГИ (П. С. Кузин, Б. Д. Зайков) была показана несостоятельность этих выводов.

В послевоенные годы в связи с интенсификацией сельского хозяйства и, в частности, массовым развитием зяблевой пахоты и сложного комплекса других агротехнических мероприятий интерес к этой проблеме особенно возрос, появились новые экспериментальные данные, но дискуссия от этого не уменьшилась.

Точки зрения значительного влияния агротехнических мероприятий на сток крупных рек придерживались Б. А. Аполлов, М. И. Львович и его последователи из ИГ АН СССР. Ведущие ученые-гидрологи (прежде всего из ГГИ) такие, как Д. Л. Соколовский, П. С. Кузин, А. В. Огиевский, А. И. Чеботарев, С. И. Харченко, А. П. Бочков, Г. Р. Юнусов, А. П. Булаково, 8. В. Рахманов, наоборот, убедительно доказывали, что развитие агролесомелиораций и повышение урожайности очень незначительно сказывается на речном стоке средних и больших рек и никак не может привести к заметному истощению водных ресурсов на больших территориях.

Выполненные в последние годы обобщения экспериментальных данных воднобалансовых станций (В. Е. Водогретский, Н. И. Коронкевич и др.) способствовали значительному сближению точек зрения и формированию достаточно обоснованных и полных представлений на изменения процессов стока под влиянием агротехнических мероприятий, хотя отдельные аспекты проблемы еще далеки от окончательного решения.

Многолетняя дискуссия о гидрологической роли болот и о возможных изменениях водного режима и характеристик речного стока в связи с их осушением возникла более 100 лет назад с началом массовых осушительных работ в Полесье, предпринятых известной экспедицией И. И. Жилинского. В какой-то степени (во всяком случае применительно к отдельным элементам речного стока) эта дискуссия продолжается до настоящего времени. Большое внимание изучению проблемы уделяли известный почвовед В. В. Докучаев и Е. В. Оппоков; капитальные исследования гидрологии болот и их влияния на сток рек были выполнены в 30-е годы в ГГИ А. Д. Дубахом, который в отношении влияния осушения на речной сток придерживался взглядов, весьма близких современным. В послевоенные годы большой вклад в решение проблемы внесли

исследования В. В. Романова, К. Е. Иванова, В. Ф. Шебеко, А. Г. Булавко, К. А. Ключевой, которые заложили надежные основы для разработки методов и выполненных ГГИ в последние годы количественных оценок по влиянию осушения болот и заболоченных земель на годовой сток рек и другие характеристики гидрологического режима.

О важности изучения влияния орошения на гидрологический режим и окружающую среду неоднократно еще в начале XX в. указывал В. Г. Глушков, деятельность которого как ученого и практика началась с изучения гидрологического режима рек, интенсивно используемых на орошение в Туркестане. В 1932 г. он писал /35/: „Проектируя орошение, мы должны предвидеть те последствия в области климата, почв, гидрологии..., какие повлечет за собой появление воды. В этой именно области... с целевой установкой на прогнозы и лежит сейчас наша основная трудность”. Однако основные исследования по влиянию орошения на сток начались в нашей стране в послевоенные годы и нужно сказать, что еще 10–15 лет назад в вопросах влияния орошения на сток крупных рек среди ученых-гидрологов и мелиораторов не было единого мнения.

Дискуссия по этому вопросу была начата в 1955 г. Л. В. Дуниным-Барковским, который высказал предположение, что развитие орошения не обязательно сопровождается уменьшением речного стока. Эти предположения несколько позднее нашли поддержку в работах В. И. Кузнецова и Г. Р. Юнусова. В то же время многие исследователи (Н. Н. Аткарская, И. Я. Шимельмиц, С. И. Харченко, Т. М. Гельбух и др.), изучая динамику водопотребления, безвозвратных потерь воды и возвратных вод на орошаемых землях, всегда приходили к выводу, что развитие орошения должно неизбежно уменьшать суммарный сток рек. Выполненные в 70-е годы в ГГИ и в ряде других организаций комплексные экспериментальные исследования водного, теплового и солевого балансов орошаемых земель в различных районах традиционного и перспективного орошения, а также анализ многолетних колебаний характеристик речного стока и метеорологических факторов в связи с развитием орошаемого земледелия в бассейнах практически всех крупных рек СССР, где орошение является основным фактором хозяйственной деятельности, позволили достигнуть значительного прогресса в области гидрологии орошаемых земель, в частности, разработать методы оценки влияния орошения на речной сток.

Анализируя итоги исследований влияния хозяйственной деятельности на речной сток за период с 20-х до 70-х годов, можно сделать следующие основные выводы.

Сделан значительный вклад в изучение процессов влияния водохранилищ и прудов, агротехнических мероприятий, леса и его вырубок, болот и их осушения на годовой сток и гидрологический режим рек; проведены крупные исследования по оценке и расчету отдельных элементов водного баланса, включая водно-солевой баланс орошаемых земель; организованы постоянно действующие воднобалансовые станции и проведе-

ны экспедиционные работы в различных районах страны, которые накопили ценнейшие экспериментальные данные, необходимые для изучения влияния различных видов хозяйственной деятельности на водный режим и разработки методов их оценки и прогноза.

Наряду с использованием материалов экспериментальных исследований широкое применение нашли данные сетевых гидрологических наблюдений на опорной сети Госкомгидромета СССР за многолетний период, которые в интегральном виде отражают влияние на режим стока климатических условий, естественных физико-географических факторов и развития хозяйственной деятельности на водосборах.

Несмотря на достигнутые успехи, следует констатировать, что к началу 70-х годов изученность проблемы влияния хозяйственной деятельности на речной сток была явно недостаточной для надежных оценок, а тем более прогнозов изменений гидрологического режима для бассейнов, находящихся в различных физико-географических условиях. Выводы по влиянию вырубок леса, агротехнических мероприятий, осушения и орошения на сток оставались противоречивыми, дискуссионными и не могли быть использованы в практических целях. Даже в отношении количественной оценки влияния водохранилищ на годовой сток применительно к таким хорошо изученным рекам, как Волга и Днепр, выводы различались в несколько раз. К тому времени не было выработано единых методических подходов к учету и прогнозу влияния деятельности человека на сток рек, находящихся в различных физико-географических условиях, и, что самое главное, не было выполнено оценок происшедших и ожидаемых в перспективе антропогенных изменений стока основных рек страны и бассейнов внутренних морей, которые позволили бы подойти к оценке динамики водных ресурсов страны в целом. Именно эти данные потребовались в 70-е годы, когда стали разрабатываться долгосрочные перспективные планы развития народного хозяйства, в том числе отраслей, требующих огромного количества воды (главным образом для орошения). Со всей остротой были поставлены проблемы территориального перераспределения водных ресурсов, начались работы над Генеральной схемой комплексного использования и охраны водных ресурсов страны до 1990 и 2000 гг.

Гидрологическая наука в те годы не была готова ответить на все многочисленные вопросы, возникающие при этих разработках. Ученые вели жаркие споры, как влияет агротехника и зяблевая пахота на годовой сток, каковы последствия осушения на гидрологический режим, ведут ли они к снижению или увеличению стока, будет ли уменьшаться норма стока в связи с развитием орошения в Средней Азии или останется неизменной и т. д. Между тем практика требовала однозначных количественных ответов не только в отношении того, как изменился сток наших главных рек, но и каким он будет в перспективе при осуществлении намечаемых долгосрочных планов развития народного хозяйства страны.

Ввиду отсутствия надежных научно обоснованных выводов по оценке

сток

изменений речного стока под влиянием хозяйственной деятельности планирование водохозяйственных мероприятий стало базироваться только на данных водохозяйственных балансов речных бассейнов и экономических районов. В этих балансах естественные ресурсы речного стока различной обеспеченности сравнивались с водозаборами и безвозвратными потерями воды на хозяйственные нужды, которые по существу из-за весьма ориентировочных данных по водопотреблению и практически полного отсутствия таковых по водоотведению представляли собой лишь требования, заявки потребителей на воду и далеко не всегда характеризовали фактическое изменение стока реки под влиянием хозяйственной деятельности в бассейне /85/.

Широкий комплекс исследований по влиянию хозяйственной деятельности на речной сток, начиная с 70-х годов, был развернут под руководством автора в ГГИ и во многих других организациях в связи с постановкой этой проблемы в плане важнейших работ Государственного Комитета СССР по науке и технике. Исследования велись применительно к основным речным бассейнам СССР и касались в первую очередь годового стока как основной характеристики, определяющей объем и дефицит водных ресурсов в тех или иных районах.

Основными задачами исследований являются:

- разработка общих методических подходов к оценке происшедших и прогнозу ожидаемых в перспективе изменений годового стока больших рек;

- разработка конкретных методов оценки влияния всего комплекса и отдельных видов хозяйственной деятельности на сток в различных физико-географических условиях;

- количественная оценка динамики происшедших изменений стока главных рек, притока во внутренние моря и суммарного речного стока страны в целом под влиянием всего комплекса и отдельных видов хозяйственной деятельности;

- прогноз антропогенных изменений стока рек на перспективу в соответствии с имеющимися долгосрочными планами развития народного хозяйства и для различных климатических условий.

Уже к 1976 г. был сделан значительный шаг к решению указанных задач. В ходе исследований были разработаны единые принципы комплексной оценки влияния хозяйственной деятельности на сток крупных рек СССР, в основу которых было положено, во-первых, широкое использование материалов многолетних наблюдений на опорной сети Госкомгидромета СССР по стоку рек, осадкам, температуре воздуха и другим естественным метеорологическим факторам, определяющим колебания стоковых характеристик; во-вторых, данные по динамике развития различных видов хозяйственной деятельности в бассейнах рек; в-третьих, материалы экспериментальных воднобалансовых станций и экспедиций.

Для реализации указанных принципов были разработаны методические приемы количественной оценки изменений стока под влиянием ком-



плекса факторов хозяйственной деятельности для рек, расположенных в различных физико-географических условиях:

- для горных рек, в бассейнах которых отчетливо выделяются зоны формирования и использования стока /79, 85/;
- для больших равнинных речных систем типа Волги и Днепра, бассейны которых расположены в нескольких природных зонах /80, 85/;
- для средних рек, сток которых формируется в пределах одной природной зоны /85/.

Одновременно разработаны и усовершенствованы воднобалансовые методы оценки влияния на сток отдельных видов хозяйственной деятельности, предназначенные в основном для средних и больших рек.

Среди них отметим следующие:

1. Методика оценки влияния существующих, строящихся и проектируемых водохранилищ на сток рек, которая учитывает потери воды на дополнительное испарение с водной поверхности и с зон подтопления, уменьшения испарения в результате снижения затопляемости поймы в нижних бьефах, затраты на аккумуляцию воды в чаше водохранилища, пополнение подземных вод за счет поступления части речного стока в берега и дно водохранилища /83/. Предлагаемая методика, в полной мере используя имеющиеся данные по водному балансу водохранилищ, значительно уточняет применявшиеся до последнего времени в практике проектирования сугубо ориентировочные схемы расчета потерь воды на испарение с водохранилищ.

2. Методика оценки влияния агротехнических мероприятий на сток рек /58/, основанная на обобщении материалов воднобалансовых станций и учитывающая различные условия подстилающей поверхности, механический состав почвогрунтов, уклоны склонов, уровни залегания грунтовых вод и водность года, а также характер обработки почв. Рассчитанное по этой методике уменьшение стока рек под влиянием агротехнических мероприятий оказалось в общем незначительным, но существенно различным для разных природных условий и водосборов /26/.

3. Способы оценки влияния орошения на сток рек, основанные, с одной стороны, на использовании материалов полевых экспериментальных исследований ГГИ на орошаемых землях в различных районах страны /76/, а с другой, на данных многолетних наблюдений за стоком рек с интенсивным развитием орошения в бассейнах /79, 85/.

4. Схема оценки влияния осушения на сток больших рек, учитывающая улучшение условий дренирования и сработки подземных вод при проведении осушительных мелиораций, а также изменение суммарного испарения в бассейне в результате осушения и освоения осушенных земель под сельскохозяйственное производство /62/. В первые годы после осушения первый фактор способствует временному повышению стока, второй, как правило, снижает сток за счет некоторого увеличения испарения с осушенных и освоенных земель при создании оптимальных условий для развития сельскохозяйственных культур.

5. Схема оценки влияния промышленно-коммунального и сельскохозяйственного водоснабжения на годовой сток крупных рек, дифференцированная по природным зонам и учитывающая данные современного учета водопотребления и водоотведения в различных отраслях промышленности и тенденции их развития.

6. Методика оценки изменения элементов водного баланса (испарения и стока) залесенных участков и речных водосборов для различных типов лесоз, возраста и класса бонитета. На ее основе разработана схема расчета изменений речного стока залесенных водосборов под влиянием вырубок леса, естественного и искусственного лесовосстановления /51/. Выполненные исследования, в частности, показали, что имеющее место в гидрологической литературе разноречивые толкования и выводы о влиянии леса и его вырубок на сток рек во многом объясняются недостаточным учетом таких факторов, как тип леса, его возраст, бонитет, характер вырубок и лесовосстановления. В зависимости от времени, прошедшего после вырубки, годовой и сезонный сток может изменяться в достаточно больших пределах и быть большим, практически равным и существенно меньшим по отношению к стоку в естественных условиях (до вырубки).

Использование разработанных общих принципов и конкретных методических приемов позволило впервые оценить динамику происшедших (с 1936 г.) и ожидаемых в перспективе до конца столетия изменений годового стока основных рек СССР под влиянием всего комплекса и отдельных видов хозяйственной деятельности. Эта работа первоначально была выполнена в 1975 г. для основных речных водосборов СССР, значения водных ресурсов которых приведены в табл. 4; результаты оценок и прогнозов опубликованы в работах автора /84, 85/.

Для речных бассейнов, сток которых наиболее интенсивно используется в хозяйственном отношении, основные результаты приведены на рис. 6. Анализ приведенных данных показывает, что на всех основных речных бассейнах страны годовой сток в довоенный период практически оставался естественным (уменьшение нигде не превышало 3–7 %); заметное уменьшение стока началось после 1955 г., и к 1971–1975 гг. на всех реках южного склона СССР (за исключением р. Волги) годовой сток уменьшился на 17–40 %, а сток р. Сырдарьи — на 60 % по отношению к стоку в устье в естественных условиях. На реках севера Европейской части СССР, Сибири и Дальнего Востока сколько-нибудь значительных изменений стока не произошло. Изменения годового стока в пределах 2–3 % имели место на реках Оби, Енисее, Амуре и были обусловлены главным образом временными затратами воды на заполнение крупных водохранилищ в их бассейнах.

Помимо количественных оценок динамики изменения стока рек в связи с хозяйственной деятельностью, которые сами по себе имеют большое научное и практическое значение для изучения водных ресурсов страны и разработки перспективных мероприятий по их комплексному

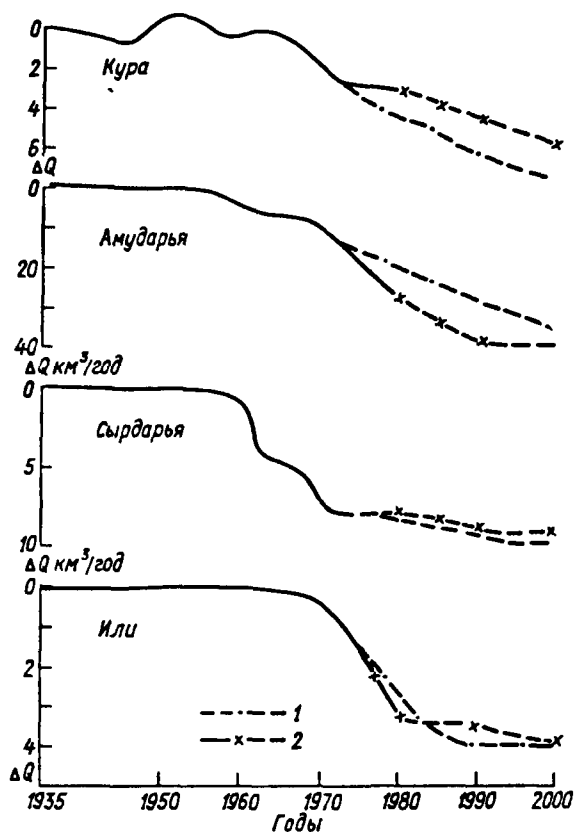
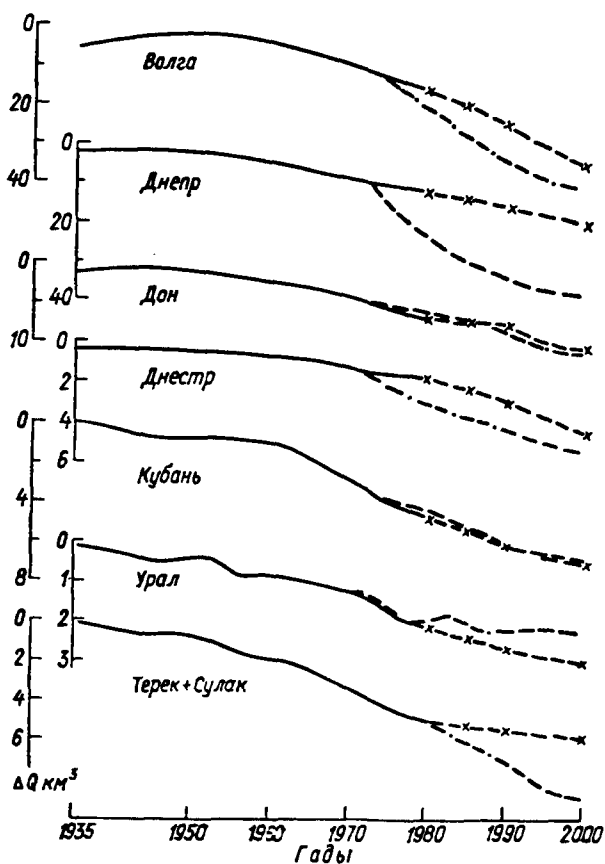


Рис. 6. Изменения годового стока рек СССР под влиянием хозяйственной даны для средних климатических условий (стационарная климатическая 1 — расчеты и прогнозы изменений, выполненные в 1975 г., 2 — то же в 1985 г.

использованию и охране, в ходе исследований в ГГИ были получены новые научные выводы в отношении процессов воздействия человека на гидрологический цикл.

Первый вывод касается особенностей динамики стока в связи с развитием орошения. Как показали исследования, для целого ряда крупных речных бассейнов, расположенных в южных районах страны, в зоне традиционного развития орошения (Амударья, Сырдарья, Кура, Или и др.) рост безвозвратных потерь воды на орошаемых землях до определенного предела может компенсироваться снижением непродуктивного испарения в бассейне и тогда даже при больших дополнительных потерях воды на орошение не происходит уменьшения общей водности реки в замыкающем створе. Указанные процессы особенно наглядно могут быть



деятельности  $\Delta Q_{\text{хоз}}$  км<sup>3</sup> за 1936–2000 гг., прогнозы на перспективу (ситуация)

показаны на примере бассейнов Сырдарьи и Амударьи, для которых на рис. 7 по результатам исследований, выполненных в последние годы в ГГИ [28], приведена динамика осредненных за десятилетние периоды значений водных ресурсов в зоне формирования  $Y_{\text{зф}}$ , естественных  $U_{\text{ест}}$  и антропогенных  $U_{\text{ант}}$  потерь стока в зоне использования, фактического притока к вершинам дельт  $Q_{\text{д}}$ , а также уровня бессточного Аральского моря  $H_{\text{Ар}}$  как интегральной характеристики процессов, происходящих в его бассейне. На этом же рисунке показан рост орошаемых площадей  $F_{\text{ор}}$  в бассейне Аральского моря.

В соответствии с приведенными данными с 1930 по 1960 г. площади орошения в бассейне Аральского моря увеличилась примерно на 2 млн. га, ежегодные затраты воды на хозяйственные нужды (главным

образом на орошение) возросли на  $20 \text{ км}^3$ , но одновременно с этим в зоне использования стока только до вершины дельт уменьшились естественные годовые потери на испарение примерно на  $15 \text{ км}^3$ , что вместе со значительным уменьшением потерь в дельтах указанных рек /85/ полностью компенсировало дополнительные затраты воды на орошение. Приток в море не уменьшился и уровень последнего оставался стабильным.

После 1960 г. начался особенно интенсивный прирост орошаемых площадей в бассейне, отвод значительной части стока рек за пределы бассейна, что привело к резкому увеличению антропогенных потерь водных ресурсов. В условиях, когда компенсационные ресурсы бассейна оказались практически исчерпанными, рост потерь стока обусловил примерно такое же уменьшение притока в Аральском море и уровень моря начал интенсивно падать (рис. 7); уже к 1980 г. падение уровня превысило 7 м, а к 1986 г. составило около 10 м.

Большая роль непродуктивного испарения в динамике антропогенных изменений стока в устье обнаружена в бассейне р. Куры /79, 86/, а также в той или иной степени имеет место во многих других бассейнах или их частях, расположенных в аридных зонах нашей страны и за рубежом. Выполненный в последние годы в ГГИ анализ результатов исследований влияния орошения на сток южных рек не только позволил приблизительно оценить компенсационные ресурсы в их бассейнах, но и показал, что они прежде всего зависят от объема общих потерь водных ресурсов в бассейне, представляющих собой разность суммарных водных ресурсов бассейна и среднего годового стока реки в устье. Указанное положение хорошо иллюстрируется данными, представленными в табл. 8 и на рис. 8 для ряда

Таблица 8

**ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЧНОГО СТОКА И ОБЪЕМА МАКСИМАЛЬНЫХ  
КОМПЕНСАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ  
В БАСЕЙНАХ НЕКОТОРЫХ РЕК СССР**

| № бассейна | Название бассейна | Водные ресурсы бассейна, $\text{км}^3/\text{год}$ | Сток в устье за условно-естественный период, $\text{км}^3/\text{год}$ | Суммарные потери стока $\Sigma U_{\text{пот}}$ $\text{км}^3/\text{год}$ | Макс. компенсационные ресурсы $\Delta E_{\text{комп}}$ $\text{км}^3/\text{год}$ |
|------------|-------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 1          | Амударья          | 77                                                | 40,0                                                                  | 37                                                                      | 26                                                                              |
| 2          | Сырдарья          | 37                                                | 15                                                                    | 22                                                                      | 10                                                                              |
| 3          | Волга             | 254                                               | 240                                                                   | 14                                                                      | 4                                                                               |
| 4          | Кура              | 28                                                | 18                                                                    | 10                                                                      | 4                                                                               |
| 5          | Или               | 18                                                | 13                                                                    | 5                                                                       | 2                                                                               |
| 6          | Терек + Сулак     | 17,2                                              | 13,4                                                                  | 3,8                                                                     | 1,5                                                                             |
| 7          | Урал              | 11,4                                              | 10,6                                                                  | 0,8                                                                     | 0,3                                                                             |

крупных рек южной зоны страны. Отметим, что даже ориентировочная оценка максимальных компенсационных ресурсов бассейна крайне важна для прогноза изменений стока в устье в связи с планируемым развитием хозяйственной деятельности в бассейне. Она показывает пределы возможности увеличения безвозвратного водопотребления в бассейне без уменьшения суммарного годового стока в устье.

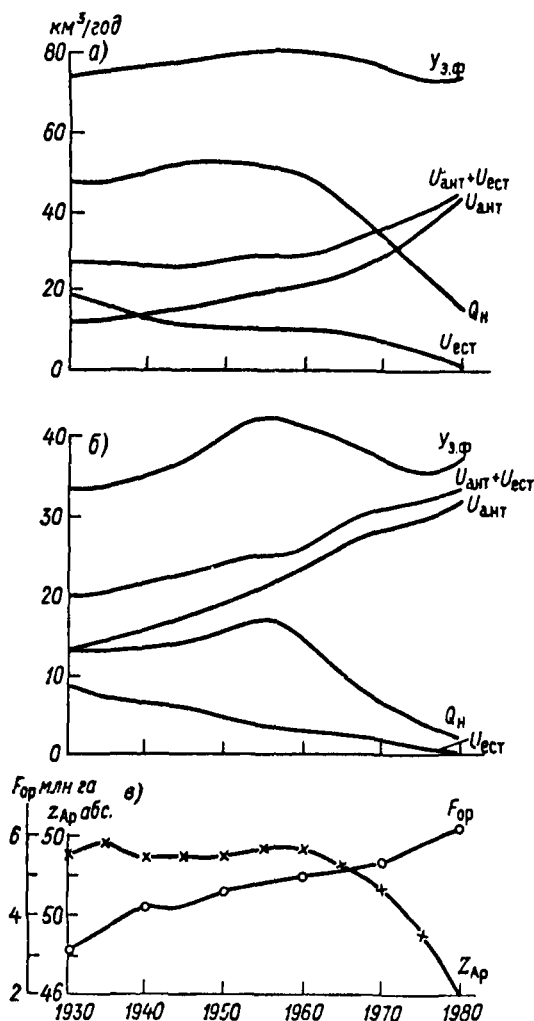


Рис. 7. Динамика значений водных ресурсов в зоне формирования  $U_{3.ф}$  стока в замыкающем створе  $Q_H$ , естественных  $U_{ест}$  и антропогенных  $U_{ант}$  потерь стока для р. Амударья — Чатлы (а) и р. Сырдарья — Казалинск (б), уровней Аральского моря и суммарных площадей в его бассейне (в)

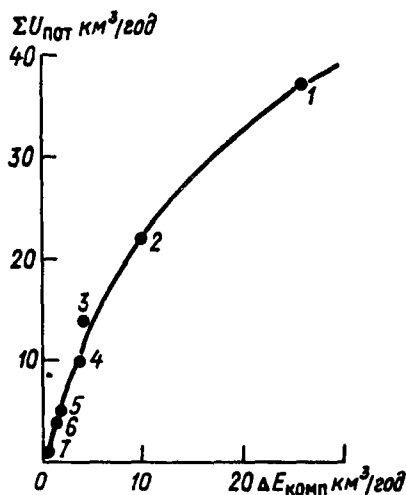


Рис. 6. Зависимость объема „компенсационных ресурсов“  $\Delta E_{\text{комп}}$  от суммарных потерь стока в бассейне  $\Sigma U_{\text{пот}}$ .  
Цифры — номера бассейнов по табл. 8.

Для рек нашей страны наибольшие значения компенсационных ресурсов имели место для рек Амударьи и Сырдарьи (соответственно 26\* и 10 км³/год), что дало возможность развивать орошение в бассейне Аральского моря до 5 млн. га без заметного уменьшения притока и падения его уровня (см. рис. 7). Объем компенсационных ресурсов для любого бассейна  $\Delta E_{\text{комп}}$  (рис. 8) нетрудно приблизительно оценить по естественным суммарным потерям водных ресурсов  $\Sigma U_{\text{пот}}$ . Для районов избыточного и достаточного увлажнения эта величина обычно близка нулю и соответственно пренебрежительно малы здесь и компенсационные ресурсы и их можно не учитывать при прогнозе антропогенных изменений стока.

Следует отметить, что для большинства крупных водосборов южной зоны СССР компенсационные ресурсы были исчерпаны еще в 60–70-е годы и на всех реках к настоящему времени имеет место резкое уменьшение речного стока под влиянием хозяйственной деятельности.

Другой важный научный вывод, полученный в результате исследований, сводится к тому, что для всех водосборов в условиях жаркого и сухого теплого периода года (а это чаще всего совпадает с малой водностью), абсолютное уменьшение стока под влиянием хозяйственной деятельности оказывается значительно большим, чем в холодные и достаточно увлажненные годы, причем разница может быть весьма значи-

\* С учетом изменения непродуктивного испарения в устьевых областях; в то время как на рис. 7 приведена динамика естественных потерь до вершин дельт.

тельной. Этот вывод, хорошо подтверждаемый анализом гидрологических процессов и материалами наблюдений, часто не учитывается проектными организациями при составлении водохозяйственных балансов и при оценках дефицитов водных ресурсов; даже, наоборот, чаще принимается, что в маловодные годы безвозвратные потери воды на хозяйственные нужды уменьшаются.

Для иллюстрации указанного положения весьма показателен бассейн р. Урала, для которого получена достаточно надежная обратная зависимость потерь воды на дополнительное испарение с водохранилищ от годового стока в замыкающем створе (рис. 9).

В маловодные годы, когда водные ресурсы этого бассейна крайне малы, уменьшение стока за счет дополнительных потерь на испарение с водохранилищ в 5–8 раз больше, чем в многоводные влажные годы.

Для больших водосборов, охватывающих различные природные зоны, этот эффект не столь велик, но также весьма значителен. Например, для р. Волги у г. Волгограда в средние годы, когда естественные водные ресурсы составляют  $250 \text{ км}^3/\text{год}$ , антропогенное уменьшение стока в замыкающем створе на уровень 70-х годов оценивается в  $14 \text{ км}^3/\text{год}$ , или 6 %, а в очень сухие годы, которые могут совпасть с естественным маловодным периодом, когда водные ресурсы составляют  $180\text{--}190 \text{ км}^3/\text{год}$ , антропогенное уменьшение будет  $22\text{--}24 \text{ км}^3/\text{год}$ , или 12–14 % водных ресурсов.

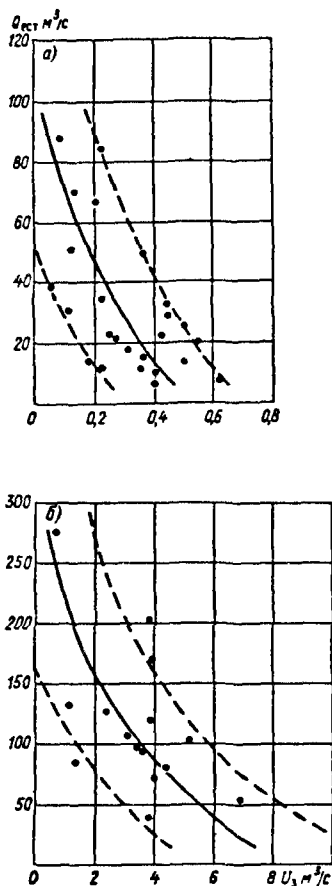
По мнению автора, в значительной степени именно этим обстоятельством объяснялась необычайная острота в водообеспечении народного хозяйства в периоды 1971–1978 гг., когда имела место очень малая естественная водность на многих реках страны (Волга, Дон, Урал, Сырдарья, Амударья), сопровождающаяся особенно значительным уменьшением стока за счет хозяйственной деятельности.

В исследованиях антропогенных изменений речного стока особенно большое практическое значение имеют прогнозы их изменений на перспективу. Еще В. Г. Глушков более полувека назад, рассматривая задачи, как он называл „искусственной гидрологии“, считал, что гидрологи должны не только оценивать, какие изменения вносит хозяйственная деятельность в гидрологический режим, не только пассивно фиксировать, что произошло с реками, но и давать как обязательную часть гидрологических работ варианты прогнозы изменений стока на перспективу. Он считал такие прогнозы главной задачей „гидрологии от хозяйственной деятельности, ...венцом научной гидрологии“ /35/.

Первая попытка детального прогноза антропогенных изменений стока основных рек до 2000 г. была сделана в ГГИ в 1975 г. В основу прогноза был положен один из наиболее вероятных в то время планов долгосрочного развития народного хозяйства страны до конца столетия, детализированный по территории речных бассейнов.

Основные исходные данные и предпосылки такого прогноза изложены в работе автора /85/; полученные результаты приведены на рис. 6 для





**Рис. 9.** Зависимость потерь воды на испарение с водохранилищ в бассейне  $U_3$  от естественного годового стока реки  $Q_{\text{ест}}$ .

*а* — р. Урал — с. Кизильское ( $F = 17200 \text{ км}^2$ ), *б* — р. Урал — г. Оренбург ( $F = 82300 \text{ км}^2$ ).

средних климатических условий (прогнозы рассчитывались, кроме того, для аномальных условий водности в бассейнах — для исключительно сухих и жарких, влажных и холодных лет /85/). В соответствии с выполненными прогнозами предполагалось в перспективе резкое уменьшение годового стока рек Волги, Днепра, Днестра, Терека и Сулака, Амударьи и Сырдарьи, главным образом за счет планируемого в те годы особенно интенсивного роста орошаемых площадей в их бассейнах. При составлении указанных прогнозов автором отмечалось, в частности /82/, что резуль-

таты оценок на перспективу из-за ряда принятых допущений следует рассматривать как ориентировочные, соответствующие современной изученности проблемы и точности положенных в основу вариантов развития народного хозяйства; прогнозы изменения водности рек под влиянием антропогенных факторов на отдаленную перспективу имеют условный характер и не только из-за их малой точности, но и потому, что для отдельных объектов они в принципе не могут оправдываться, так как должны быть приняты меры для предотвращения ожидаемых особо неблагоприятных изменений речного стока.

Таким образом, прогноз изменений водности рек являлся обоснованием для проведения мероприятий по регулированию речного стока во времени и по территории, охране его от истощения и загрязнения.

Со времени первых прогнозов антропогенных изменений водности рек прошло 10 лет. Представляет несомненный интерес провести анализ, насколько оправдались прогнозы за прошедшее время и каковы современные тенденции и представления об ожидаемых изменениях стока. На рис. 6 приведены результаты уточненных расчетов и прогнозов изменений стока рек СССР, выполненных в ГГИ в конце 1985 г. под руководством В. Ю. Георгиевского. Сопоставление результатов исследований 1975 и 1985 гг. показывает, что неоправдавшимся к 1985 г. нужно считать прогноз только по Днепру и Днестру, хотя и по некоторым другим бассейнам (Волга, Кура и Амударья) отклонения весьма существенны и достигают 25–30 %. По рекам Севера Европейской части СССР, Сибири и Дальнего Востока результаты прогнозных оценок 1975 и 1985 гг. практически совпали.

Анализ наибольших отклонений прогнозируемых значений антропогенных изменений стока показал, что основная причина – неточное прогнозирование роли орошаемого земледелия, обусловленное или изменившимися планами расширения орошаемых площадей в бассейнах, или значениями принимаемых на перспективу оросительных норм. Например, в соответствии с планами 1975 г. в бассейне Днепра предполагалось за 10 лет резко увеличить затраты воды на орошение за счет особенно интенсивного роста орошаемых площадей в самом бассейне и прилегающих территориях, а также за счет больших удельных затрат воды на 1 га. По данным 1975 г. на эти цели планировалось израсходовать на уровень 1985 г. примерно  $18 \text{ км}^3$  воды в год, по оценкам же 1985 г. эти затраты составили всего  $5 \text{ км}^3$ /год, что полностью объясняет расхождение, приведенные на рис. 6. Оказался существенно завышенным (хотя и не в такой степени, как в бассейне Днепра) план 1975 г. по увеличению орошаемых площадей и в бассейнах Волги, Днестра, Куры и Терека, что, естественно не могло не отразиться на результатах прогнозных оценок (см. рис. 6). Например, начиная с 1986 г. в бассейне р. Терек практически не ожидается расширения орошаемых площадей, хотя еще 10 лет назад интенсивный прирост их планировался до конца столетия, что и нашло отражение в прогнозе.

Обратная картина имеет место в бассейне Амударьи, где в 1975 г. прогнозировалось менее интенсивное уменьшение стока в устье, чем это оказалось на самом деле. В прогнозах 1975 г. динамики стока Амударьи ввиду крайне острого дефицита водных ресурсов в бассейне Аральского моря предполагалось, что в перспективе будут приняты действенные меры по ограничению роста орошаемых площадей и более экономному использованию водных ресурсов. Этого, к сожалению, не произошло и сток реки уменьшался еще более интенсивно, чем в предшествующие годы, что привело, как известно, к исключительно неблагоприятной экологической ситуации в районах дельты и побережья Аральского моря.

В соответствии с результатами прогнозов 1985 г. (см. рис. 6), несмотря на то, что в ряде бассейнов были уменьшены перспективные планы роста орошаемых площадей и предприняты меры по сокращению удельных затрат воды на нужды орошения, тем не менее на всех реках южного склона СССР до конца столетия ожидается прогрессирующее уменьшение годового стока за счет хозяйственной деятельности, что может привести к крайне неблагоприятным экологическим последствиям, особенно в низовьях этих рек и в режиме внутренних водоемов, куда они впадают.

Выполненные исследования, расчеты и прогнозы по влиянию хозяйственной деятельности на сток больших рек СССР и на приток во внутренние водоемы имеют большое практическое и научное значение, однако они не могут в полной мере дать ответы на многочисленные вопросы, связанные с планированием использования водных ресурсов на перспективу. Каким может быть режим стока в устьях больших рек при различных вариантах развития хозяйственной деятельности в бассейне, территориального размещения основных водопотребителей, при различных сочетаниях метеорологических условий в разных частях бассейна, при различных режимах функционирования водохозяйственных комплексов, да еще в условиях возможного перераспределения стока между бассейнами? Для ответа на все эти вопросы требуется оценка не только годового и сезонного стока, а также всего годового гидрографа за более короткие интервалы времени. Расчеты требуется вести многократно при самых различных сочетаниях естественных и антропогенных факторов с использованием огромного количества исходной гидрометеорологической информации. Для решения всех этих задач в последние годы в ГГИ разработана математическая модель формирования и использования водных ресурсов крупного речного бассейна на примере бассейна р. Волги /61/. Модель позволяет рассчитывать сток в различных створах реки за декадные интервалы времени при самых разнообразных сочетаниях метеорологических условий в бассейне и хозяйственной деятельности. При этом работа модели осуществляется в нескольких режимах. Исходный режим — расчеты естественных гидрографов стока, для чего используются естественные гидрографы стока бассейнов-индикаторов и фактическая гидрометеорологическая информация по всему бассейну за каждый год с 1959 по 1980 г., которые приняты в качестве возможных моделей распределения

гидрометеорологической ситуации в бассейне.

Все необходимые параметры и коэффициенты модели рассчитаны для каждого участка реки по фактическим данным наблюдений до 1940 г., когда режим стока Волги можно было считать естественным. Последующие режимы предполагают подключение различных блоков модели, учитывающих те или иные факторы хозяйственной деятельности — регулирование и потери стока на испарение существующими и строящими водохранилищами, орошение, промышленно-коммунальное и сельскохозяйственное водоснабжение, поступление воды из других бассейнов и отвод части стока в другие бассейны, динамику потерь воды в Волго-Ахтубинской пойме и дельте реки.

На модели нетрудно, имея плановое распределение хозяйственной деятельности в бассейне на любой расчетный уровень (1990, 2000, 2010), по естественным гидрометеорологическим данным любого модельного года (с 1959 по 1980 гг.) рассчитать гидрограф стока в различных створах реки.

В качестве примера на рис. 10 приведены рассчитанные по модели гидрографы стока р. Волги в Каспийское море при уровне развития хозяйственной деятельности, планируемом на конец столетия ( $F_{op} = 5,1$  млн. га) и при естественных гидрометеорологических условиях в бассейне, приня-

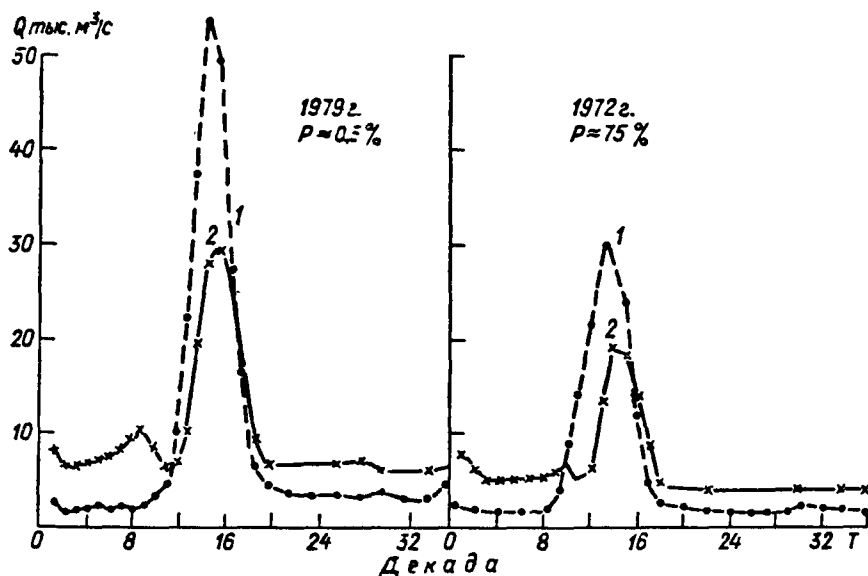


Рис. 10. Гидрографы стока р. Волги в устье, рассчитанные на модели по гидрометеорологической ситуации 1979 и 1972 гг.

1 — естественные, 2 — прогнозируемые на уровень 2000 г. ( $F_{op} = 5,1$  млн. га).

тых по модели 1972 г., который был близок к маловодному ( $P \approx 75\%$ ) и по модели самого многоводного 1979 г. ( $P \approx 0,5\%$ ) (расчеты велись при условии, что регулирование стока водохранилищами Волжско-Камского каскада будет осуществляться по правилам, действующим в настоящее время). В первом случае уменьшение годового стока составило всего  $17 \text{ км}^3$ , во втором  $41 \text{ км}^3$ , что показывает исключительно большую роль гидрометеорологических условий и характера регулирования стока в суммарном изменении стока реки под влиянием хозяйственной деятельности.

Используя гидрометеорологическую ситуацию выбранного модельного ряда (1959–1980 гг.), имеющего самые различные сочетания метеорологических условий в бассейне, путем расчетов по модели нетрудно получить для каждого уровня развития хозяйственной деятельности набор гидрографов и значений антропогенных изменений стока в замыкающем створе  $\Delta Q_{\text{хоз}}$ , соответствующих той или иной метеорологической ситуации. Расчеты показали, что величины  $\Delta Q_{\text{хоз}}$  могут изменяться в весьма больших пределах, о чем свидетельствуют полученные на модели и приведенные на рис. 11 кривые обеспеченности потерь стока р. Волги за счет орошения и за счет дополнительного испарения с водохранилищ Волжско-Камского каскада. При площадях орошения  $F_{\text{ор}} = 5,1 \text{ млн. га}$  (планируется на конец столетия) годовой сток реки в замыкающем створе может уменьшиться (в пределах обеспеченности  $P = 5\div 95\%$ ) от  $14$  до  $29 \text{ км}^3$ , за счет дополнительного испарения с водохранилищ уменьшение годового стока может составлять от  $2,8$  до  $10 \text{ км}^3$ .

Исследования, выполненные на модели, показали, что при оценке на перспективу влияния хозяйственной деятельности на речной сток необходимо на каждый расчетный уровень определять не фиксированное значение антропогенных изменений стока, а кривую обеспеченности этих величин, обусловленную колебаниями естественных климатических факторов. При этом коэффициент вариации указанных кривых обеспеченностей может иметь значения для больших рек Европейской части СССР  $C_v_{\Delta Q_{\text{хоз}}} = 0,15\div 0,20$ .

Разработанная на примере бассейна Волги типовая модель может быть использована и для других крупных речных бассейнов. По мнению автора, разработка таких моделей представляет собой большой шаг вперед в проблеме оценки и прогноза антропогенных изменений стока больших рек. Практическую значимость таких прогнозов трудно переоценить; с их помощью, проигрывая на модели различные варианты, можно оперативно давать планирующим органам рекомендации по размещению в бассейне тех или иных водопотребителей и по проведению крупных водохозяйственных мероприятий, имея в виду наиболее благоприятный с точки зрения охраны окружающей среды режим стока в различных створах по длине реки и в устье при разных сочетаниях метеорологических условий в бассейне. Это особенно важно в связи с возможными уже в ближайшей

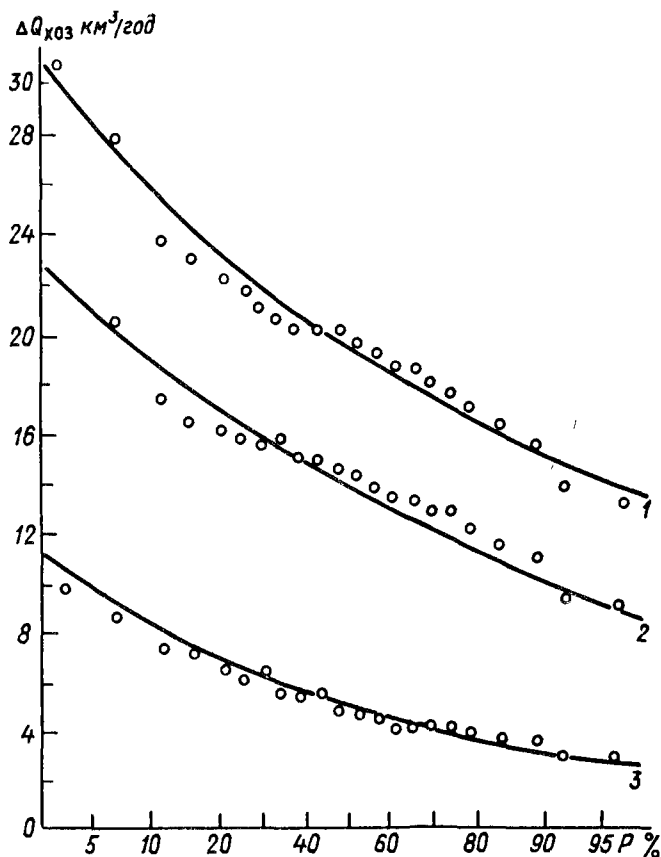


Рис. 11. Кривые обеспеченности потерь стока р. Волги.

1 — потери на орошение при  $F_{ор} = 5,1$  млн. га, 2 — то же при  $F_{ор} = 3,6$  млн. га, 3 — потери на дополнительное испарение апрель—ноябрь с водохранилищ Волжско-Каспийского каскада.

перспективе антропогенными изменениями климата (см. главу 6).

Дальнейшая оценка водных ресурсов и их антропогенных изменений прежде всего заключается в детальном изучении элементов водного баланса речных бассейнов, особенно испарения с различных угодий, совершенствовании системы использования вод на различные хозяйственные нужды, разработке новых более совершенных методов оценки и прогноза влияния на сток различных антропогенных факторов (особенно орошения, агротехнических мероприятий, урбанизации) на основе математического моделирования процессов формирования стока малых, средних и больших рек. Требуется дальнейшее совершенствование методов расчета и прогноза многолетних колебаний уровней бессточных водоемов

с учетом влияния деятельности человека на процессы влагооборота и глобальный климат.

Перед учеными-климатологами и гидрологами поставлена важнейшая проблема надежной и детальной оценки антропогенных изменений климата на ближайшую и отдаленную перспективу и водных ресурсов будущего для речных бассейнов и природно-экономического районов. Последние во многом будут определять общую стратегию перспективного водообеспечения и планирования крупномасштабных мероприятий по территориальному перераспределению речного стока, решения проблем важнейших внутренних водоемов страны.

#### 4.2. Проблема уровней Каспийского и Аральского морей

Выполненные в ГГИ в 1975 г. расчеты и прогнозы антропогенных изменений стока крупных рек СССР позволили более обоснованно подойти к прогнозу возможных изменений уровней бессточных водоемов, прежде всего Каспийского и Аральского морей. Результаты таких прогнозных оценок приведены, в частности, в работах автора /81, 85/. Насколько соответствуют прогнозные значения уровня Аральского моря фактическому их положению до 1986 г., нетрудно видеть по данным, представленным на рис. 12. Как видим, прогноз снижения уровня, составленный автором по материалам 1975 г., в общем оправдывается. Фактическое положение уровня находится в пределах прогнозируемых изменений, прав-

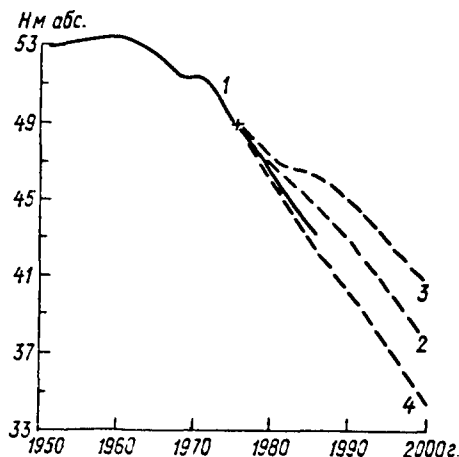


Рис. 12. Динамика уровня Аральского моря.

1 — наблюдаемый уровень, 2—4 — прогноз 1975 г. для разных условий водности и интенсивности безвозвратного водопотребления.

да, ближе не к средним, а к минимальным значениям. Последнее объясняется главным образом очень интенсивным уменьшением стока р. Амударьи. В перспективе следует ожидать не менее интенсивного падения уровня, поскольку к настоящему времени (на уровень 1986–1987 гг.) приток в море по руслам Амударьи и Сырдарьи составляет 4–6 км<sup>3</sup>/год, а в маловодные годы он практически прекращается (до 1960 г. приток в море составлял в среднем 54, 5 км<sup>3</sup>/год). При такой ситуации к концу столетия уровень моря понизится еще на 8–10 м.

Для уменьшения интенсивности падения и в дальнейшем стабилизации уровня Аральского моря и улучшения экологической ситуации в прилегающих к морю районах необходимо принятие в ближайшее время самых решительных мер по экономии воды в бассейне, более рациональному ее использованию и охране от загрязнения с доведением гарантированного притока в море до 20–25 км<sup>3</sup>/год.

Проблема прогнозирования уровня Каспийского моря более сложная. В последние годы в связи с резким повышением уровня Каспийского моря и постановлением ЦК КПСС и Совета Министров от 14 августа 1986 г. „О прекращении работ по переброске части стока северных и сибирских рек“ проблема прогнозирования на отдаленную перспективу уровня Каспийского моря приобрела особую остроту и широкое общественное звучание. Поэтому интересно остановиться на этой проблеме более обстоятельно с учетом результатов последних исследований, выполненных в ГГИ.

Состояние уровня бессточного Каспийского моря в перспективе зависит от характера колебаний естественных климатических факторов, определяющих общую увлажненность бассейна, режим испарения и осадков на акватории; от хозяйственной деятельности в бассейне и от возможных в перспективе мероприятий по переброске части стока р. Волги в соседние бассейны и, наоборот, части стока соседних рек в Волгу или в другие реки, впадающие в море. В некоторой степени уровень моря будет зависеть также от возможных мероприятий на его акватории и, в первую очередь, от оттока воды в Кара-Богаз-Гол. При этом возможные колебания климатических факторов могут привести как к снижению, так и к повышению уровня моря по отношению к современным отметкам, в то время как хозяйственная деятельность внутри бассейна, уменьшая суммарный сток рек, неизбежно способствует снижению уровня. В последнее время выявлены возможности воздействия на уровни Каспийского моря в ближайшие десятилетия и антропогенных изменений климата, причем столь значительных, что не учитывать их невозможно. Указанное обстоятельство еще более осложняет проблему сверхдолгосрочного прогнозирования уровня Каспийского моря.

В этих условиях для определения положения уровня моря в перспективе наиболее правильным было бы дать сначала сверхдолгосрочный прогноз его изменений под влиянием естественных климатических факторов, а затем скорректировать полученные результаты за счет влияния хо-



зяйственной деятельности на климатические условия и гидрологический режим в бассейне, а также с учетом эффекта различных мероприятий на акватории моря и по территориальному перераспределению стока между речными бассейнами.

Следует отметить, что роль изменчивости естественных климатических факторов в колебании уровня Каспийского исключительно велика, о чем свидетельствуют, например, данные об уровнях моря за исторический период, полученные по материалам Р. К. Клиге /47/ (рис. 13).

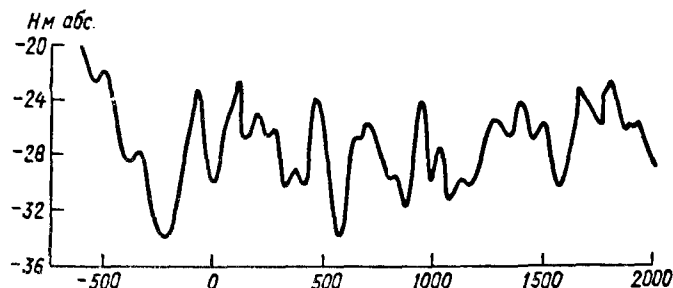


Рис. 13. Изменение уровня Каспийского моря за последние 2,0–2,5 тыс. лет (по Р. К. Клиге).

В соответствии с приведенными данными колебания уровня носят довольно четко выраженный циклический характер. За последние 2200 лет можно выделить 7 циклов повышенного и пониженного уровня моря продолжительностью каждый 300–400 лет. В периоды низкого стояния уровня моря опускались до отметок –30, –33 м абс. и поднимались в периоды трансгрессий до отметок –23, –24 м, т.е. максимальная амплитуда колебаний уровня составила примерно 8–10 м. Есть основание полагать, что самое низкое положение уровня моря за историческое время (–30, –33 м абс.) имело место в VI в., а наиболее высокое (–23, –24 м абс.) – в самом начале нашей эпохи и в конце XVIII – начале XIX в. (рис. 13). При этом регрессия и трансгрессия моря были обусловлены общей климатической ситуацией в умеренных и высоких широтах северного полушария. При потеплении климата, по Р. К. Клиге, имело место, как правило, понижение уровня моря, при похолодании – повышение. По данным работы /21/ примерно 5,5 тыс. лет назад в период оптимизации голоцена уровень Каспийского моря был выше современного на 6–10 м, а примерно 125 лет назад в период оптимума микулинского межледникового уровня моря повышался до 40 м. При этом в первом случае среднегодовая глобальная температура воздуха была на 1 °С, а во втором на 2 °С выше современной, т.е. выводы прямо противоположны Р. К. Клиге. Эти вопросы требуют дальнейшего изучения.

Если ориентироваться на циклический характер вековых колебаний уровня Каспийского моря (рис. 13), то вполне определенно, что в настоящее время мы находимся где-то в самом конце стадии регрессии моря,

продолжающейся почти 200 лет, после чего следует ожидать трансгрессионной стадии. Однако, когда закончится эта стадия регрессии, определенно сказать трудно, за последние 2,5 тыс. лет продолжительность стадий регрессий была от 150 до 500 лет.

Инструментальные наблюдения за уровнем моря были начаты в 1830 г на посту г. Баку; в конце прошлого — начале текущего столетия были открыты водомерные посты во многих других пунктах побережья; в настоящее время наблюдения за уровнем Каспийского моря ведутся в 26 пунктах (в пределах советской части побережья).

Хронологический график колебаний среднегодового уровня моря и годовых значений притока с 1830 по 1986 г. представлен на рис. 14. За первые 100 лет рассматриваемого периода колебания уровня были незна-

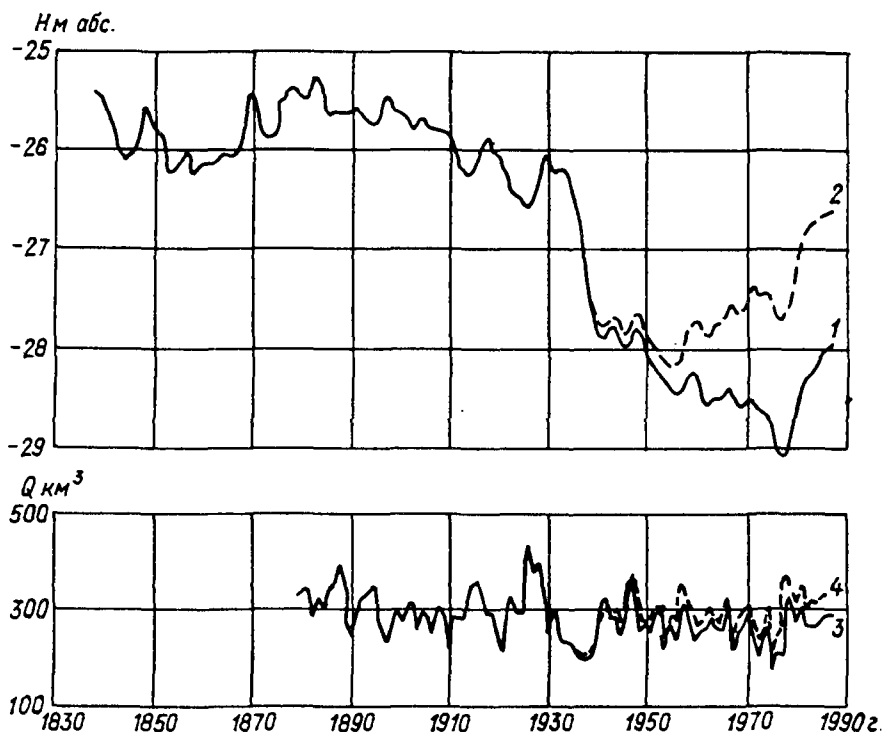


Рис. 14. Колебания уровня Каспийского моря и притока за 1837–1986 гг.

1, 3 — соответственно наблюдаемый уровень и приток, 2, 4 — уровень и приток восстановленные с учетом хозяйственной деятельности в бассейне.

чительными: максимальный уровень наблюдался в 1882 г. и имел абсолютную отметку  $-25,22$  м БС, а минимальный — в 1925 г. и имел отметку  $-26,69$  м, т.е. максимальная амплитуда колебаний не превышала  $1,37$  м. С 1933 г. началось интенсивное падение уровня, которое к 1941 г. составило  $1,70$  м. В дальнейшем снижение уровня продолжалось, хотя и не так интенсивно, и к 1956 г. уровень достиг отметки  $-28,46$  м. В последующие 18–20 лет уровень колебался в пределах амплитуды  $0,5$  м около отметки  $-28,5$  м, а в 1977 г. отметка уровня составила  $-29,10$  м, что является его самым низким положением за все годы инструментальных наблюдений. С 1978 г. началось повышение уровня моря. К 1986 г. оно составило более  $1$  м, отметка уровня на 1/1 1987 г. составляла  $-27,9$  м, что близко к отметкам конца 40-х годов текущего столетия. На рис. 14, кроме наблюдаемого, приведен ход уровня, восстановленного с учетом влияния всего комплекса хозяйственной деятельности в бассейне, т. е. ход уровней, которые имели бы место, если режим притока в море был бы естественным. Приведенные данные свидетельствуют о весьма значительной в последние десятилетия роли хозяйственной деятельности в многолетних колебаниях уровня Каспийского моря.

Катастрофическое снижение уровня с 1933 по 1940 г. на  $168$  см было обусловлено на  $94\%$  ( $158$  см) климатическими причинами и только на  $6\%$  ( $10$  см) влиянием хозяйственной деятельности в бассейне. Начиная с 50-х годов роль антропогенных факторов резко возрастает; если бы их не было, то, начиная с 1956 г., наблюдалась бы устойчивая фаза подъема уровня и в настоящее время уровень был бы на  $1,5$  м выше его современных отметок.

Таким образом, для надежной оценки будущего положения уровня Каспийского моря прежде всего необходимо дать прогноз его изменений под влиянием климатических факторов и оценить роль планируемой хозяйственной деятельности в бассейне.

Наибольшие трудности возникают в решении первой проблемы, а именно в отношении прогнозирования естественных колебаний уровня моря с заблаговременностью до 10–15 лет и более. Этой проблеме было посвящено немало работ, выполненных в основном в 60–70-е годы, в которых давались характеристики средних значений уровня моря на перспективу или прогнозировался ход уровня на каждый год с заблаговременностью от 5 до 30 лет.

Все методы сверхдолгосрочного прогноза уровня Каспийского моря основываются на следующем:

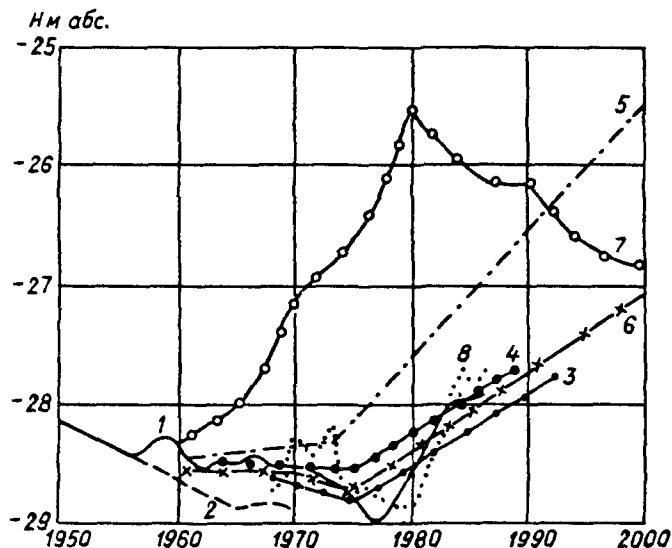
- на установлении различного рода зависимостей характеристик уровня от солнечной активности, чаще всего выраженной в виде чисел Вольфа /4, 5, 6, 72, 89/;

- на установлении связей хода уровней с различными формами атмосферной циркуляции, выраженных чаще всего в виде индексов Вангенгейма и Вительса /2, 11, 33, 69/;

- на выявлении тем или иным способом периодичности в рядах мно-

голетних колебаний уровня и ее экстраполировании на перспективу /88/.

Не останавливаясь на детальном анализе основных методических положений указанных прогнозов, их преимуществах и недостатках, отметим, что по ним прогнозировали уровень Каспийского моря с 1955 по 1972 г. на 10–15 лет вперед, а часть из них и до конца текущего столетия. Результаты этих прогнозов приведены на рис. 15; сопоставляя уровни по



**Рис. 15.** Уровни Каспийского моря по сверхдолгосрочным прогнозам различных авторов под влиянием естественных климатических факторов.

1 — наблюдаемый уровень, прогнозы: 2 — Б. А. Аполлов, 3 — А. Н. Афанасьев, 4 — И. М. Соскин, 5 — В. С. Антонов, 6 — Б. А. Шлямин, 7 — Е. Г. Архипова и др., 8 — К. И. Смирнова.

прогнозу с фактическим ходом уровня до 1986 г., нельзя не заметить, что только прогноз Е. Г. Архиповой не оправдался. Прогнозы всех остальных авторов довольно хорошо соответствуют наблюдаемому или восстановленному с учетом хозяйственной деятельности (рис. 14) ходу уровня. Самое любопытное, что большая часть авторов (А. Н. Афанасьев, И. М. Соскин, В. С. Антонов, Б. А. Шлямин, К. И. Смирнова) в общем довольно правильно дали прогноз интенсивного подъема уровня, начавшегося в 1978 г. (по данным упомянутых авторов подъем уровня должен был начаться в период с 1973 по 1980 г.). Добавим, что, по мнению А. А. Гирса, общее повышение уровня Каспийского моря должно было

начаться в 1958 г., а, по М. С. Эйгенсону, период с 1970 по 2000 г. должен характеризоваться относительно высоким стоянием уровня моря. Может быть 70-е годы и являются началом новой, продолжительной трансгрессии в вековом цикле колебаний уровня Каспийского моря (рис. 13)?

Несмотря на довольно одинаковые выводы большинства прогнозистов (рис. 15), по мнению автора, вряд ли они могут служить надежным основанием для принятия ответственных решений по проблеме Каспийского моря.

Анализируя использованные методические приемы и результаты климатических прогнозов уровня моря, следует отметить, что такого рода прогнозы являются частью огромной и сложной проблемы сверхдолгосрочного прогнозирования осредненных климатических условий на обширных территориях (в данном случае значительной территории Европейской части СССР, составляющей бассейн Каспийского моря), которая как известно, еще далека от своего решения и достоверность прогнозируемых на столь отдаленную перспективу уровней еще очень мала.

Многие исследователи справедливо отмечают, что корреляционные зависимости между уровнем моря и характеристиками атмосферной циркуляции содержат систематические погрешности, являются неустойчивыми и не позволяют давать эффективные прогнозы в течение длительного времени. Другим принципиальным недостатком такого подхода является отсутствие надежных способов прогнозирования самих форм атмосферной циркуляции, так как такой прогноз дается на основе метода аналогий, который, по мнению прогнозистов, является весьма условным, поскольку ход атмосферных процессов в прошлом далеко не всегда сохраняет аналогию в будущем. Добавим к этому, что антропогенные изменения климата уже в ближайшие десятилетия могут весьма существенно повлиять на характер процессов атмосферной циркуляции.

Использование для долгосрочного прогнозирования так называемых солнечно-земных связей до настоящего времени не имеет достаточно надежной физической и экспериментальной основы, что, конечно, снижает их достоверность; кроме того, устойчивость этих связей также невелика.

Тем более проблематичным представляется наличие в многолетних рядах наблюдений над уровнями замкнутых водоемов устойчивых дальних связей, которые можно было бы использовать для более или менее достоверных прогнозов на отдаленную перспективу.

Хорошей иллюстрацией указанных положений, по мнению автора, могут служить результаты исследований, выполненных в ГГИ В. Ю. Георгиевским [32], в которых анализируются различного рода коррелятивные связи уровня Каспийского моря с индексами солнечной активности и атмосферной циркуляции с учетом их устойчивости во времени.

Прежде всего анализировалась возможность использования для прогнозов взаимной корреляционной функции вида

$$H_{t+\tau} = \psi(J_t), \quad (9)$$

где  $\bar{H}_{t+\tau}$  — средний уровень за год  $(t + \tau)$ ;  $J_t$  — индекс атмосферной циркуляции или солнечной активности за год  $t$ ;  $\tau$  — временной сдвиг в годах между значениями уровней и индексов.

В качестве характеристики атмосферной циркуляции принималась повторяемость западного, восточного и меридионального типов циркуляции Вангенгейма, а также индекс атлантической циркуляции Вительса; солнечная активность характеризовалась числами Вольфа.

Выполненные по зависимости (9) многочисленные расчеты показали, что связи годовых уровней (наблюденных и восстановленных) с годовыми значениями различных индексов при разных  $\tau$  довольно слабые (максимальные значения коэффициентов корреляции не превышают 0,5–0,6) и их невозможно использовать для надежного прогнозирования годового хода уровней.

Далее исследовалась зависимость вида

$$\bar{H}_{(t+\tau), T} = \psi(\bar{J}_{t, T}), \quad (10)$$

где  $\bar{H}_{(t+\tau), T}$  — средний уровень за период  $T$  лет от года  $(t + \tau)$ ;  $\bar{J}_{t, T}$  — среднее значение индекса за период  $T$  лет от года  $t$ ;  $\tau$  — временной сдвиг между периодами осреднения уровней и индексов.

Зависимости (10) рассчитывались для различных индексов атмосферной циркуляции и солнечной активности при разных значениях осреднения  $T$  и сдвига  $\tau$  применительно к ряду уровней с 1837 по 1975 г.

В результате анализа было выявлено несколько наиболее надежных прогностических зависимостей, расчеты по которым довольно хорошо соответствуют фактическому (до 1955 г.) и восстановленному (после 1955 г.) ходу уровня Каспийского моря. Эти зависимости использовались для прогноза средних уровней на перспективу до конца столетия и для анализа полученных результатов.

В частности, наиболее удачными оказались зависимости:

- среднего за 6 лет уровня и западного индекса атмосферной циркуляции со сдвигом  $\tau = 6$  лет ( $r = 0,90$ );
- среднего 18-летнего значения уровня и восточного индекса атмосферной циркуляции со сдвигом  $\tau = 18$  лет ( $r = -0,95$ );
- среднего 11-летнего значения уровня и чисел Вольфа при  $\tau = 0$  ( $r = -0,87$ ).

Несмотря на высокие коэффициенты корреляции, прогнозы по полученным зависимостям среднего уровня Каспийского моря привели к различным и даже прямо противоречивым результатам. Так, если прогнозировать 18-летние значения уровня по восточному индексу атмосферной циркуляции, то в среднем за 1976–1993 гг. он должен быть ниже на 1,7 м среднего уровня за период 1958–1971 гг., если же прогнозировать по числам Вольфа (прогнозные данные), то уровень 1976–1986 гг. оказывается почти на 2 м выше среднего уровня за 1965–1975 гг. Расчеты среднего уровня по связи с западным индексом атмосферной циркуля-

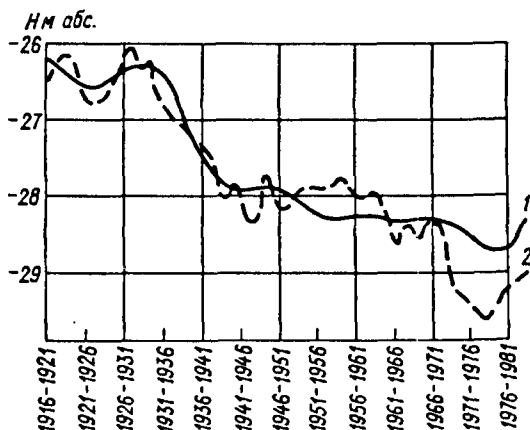


Рис. 16. Фактические (1) и рассчитанные (2) по западному индексу атмосферной циркуляции Вангенгейма средние 6-летние значения уровня Каспийского моря (заимствован из работы /32/).

ции (со сдвигом 6 лет) давали хорошие результаты до 1967 г., но затем характер зависимости резко нарушился и по ней стало невозможным давать прогноз (рис. 16).

Как показал анализ временных рядов уровня Каспийского моря, индексов атмосферной циркуляции и чисел Вольфа за многолетний период, приведенные столь разноречивые результаты объясняются главным образом неустойчивым во времени характером связи между уровнями и указанными факторами. Об этом весьма убедительно свидетельствуют данные, представленные на рис. 17, где показан ход во времени уровня Каспийского моря и чисел Вольфа (по 11-летним скользящим средним) за период с 1837 г. За 139 лет (с 1837 по 1975 г.) в течение отдельных многолетних периодов неоднократно изменялось не только значение, но и знак коэффициента корреляции между уровнем и числами Вольфа (с 1837 по 1862 г. связь положительная, с 1862 по 1874 г. — отрицательная, с 1874 по 1924 г. связь близка к нулю, с 1924 г. связь отрицательная).

Выполненные в ГГИ исследования убедительно показали, что необходимо крайне осторожно относиться к результатам сверхдолгосрочных прогнозов уровня Каспийского моря, даже если в основу прогнозирования положены связи с весьма высокими коэффициентами корреляции. В зависимости от того, какой выбран для анализа многолетний период и какие анализируются факторы, можно получить существенно различные и даже прямо противоположные выводы в отношении колебания уровня моря в будущем.

Приведенные выводы, конечно, не означают полной бесперспективности решения проблемы сверхдолгосрочного прогнозирования уровней замкнутых водоемов. По-видимому, связи между элементами водного ба-

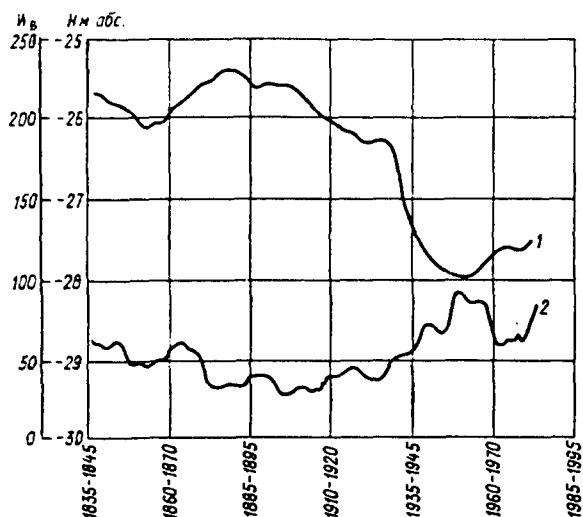


Рис. 17. Колебания уровня Каспийского моря (1) и чисел Вольфа (2) по 11-летним скользящим средним.

ланса моря и факторами космического и геофизического происхождения носят более сложный характер, и выявление их и физическая интерпретация представляют собой не простую задачу, которая до настоящего времени не решена.

Исследования в этом направлении должны продолжаться и являться частью более широкой, комплексной проблемы сверхдолгосрочного прогнозирования климата на обширных территориях. Что касается прогнозирования положения уровня Каспийского моря на перспективу, то, по мнению автора, при современном состоянии изученности проблемы, необходимо ориентироваться прежде всего на варианты вероятностные расчеты с учетом влияния хозяйственной деятельности в бассейне и возможных антропогенных изменений климата. При этом прогнозируемое многими авторами повышенное положение уровня моря до конца столетия (рис. 15) можно учесть, принимая во внимание в качестве одного из основных вариантов при планировании водохозяйственных мероприятий ситуации, когда естественный приток в море будет выше, а испарение ниже нормы.

В основе вероятностных расчетов будущего положения уровня Каспийского моря, которые выполнялись многими авторами (анализ полученных результатов приведен в работе /85/), лежит предположение, что естественные климатические условия являются стационарными, а годовые значения притока, испарения и осадков в хронологической последовательности представляют собой простые марковские цепи.

Отметим, кстати, что аналогичные предпосылки лежат в основе всех



методов расчета основных характеристик стока для строительного и водохозяйственного проектирования. Объективность этих предпосылок подтверждена многолетней практикой расчетов стока и опытом эксплуатации самых разнообразных водохозяйственных объектов.

Вероятностный подход допускает как аналитический расчет уровней по методу С. Н. Крицкого и М. Р. Менкеля, так и численные решения, основанные на моделировании методом Монте-Карло многолетних рядов составляющих водного баланса. Оба этих метода, как показал анализ, дают в общем близкие результаты, тем не менее, по мнению автора, второй из них предпочтительнее, поскольку он более физически обоснован, не требует предварительных допущений и позволяет давать не только оценку среднего положения уровня, но и возможных отклонений при любой доверительной вероятности.

Используя уточненные данные по водному балансу и полученные оценки изменений стока рек под влиянием хозяйственной деятельности, автор в 1975 г. рассчитал будущее положение уровня (рис. 18) при разной климатической ситуации [81, 85]. Согласно этим оценкам, при средних климатических условиях и при рассчитанных в 1975 г. изменениях на перспективу притока под влиянием хозяйственной деятельности  $\Delta Q_{\text{хоз}}$

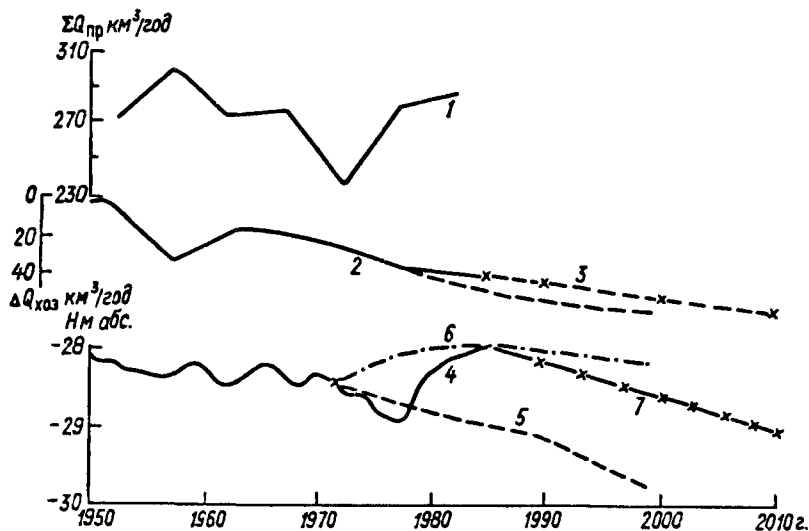


Рис. 18. Приток и уровни Каспийского моря за 1950–2010 гг.

1 — фактический приток, осредненный за 5-летние периоды, 2 — изменение притока за счет хозяйственной деятельности по данным 1975 г., 3 — то же по расчетам 1985 г., 4 — наблюдаемые уровни, 5 — уровни, рассчитанные в 1975 г. для средней водности, 6 — то же, но для притока на 10 % выше нормы.

(рис. 18, линия 2) предполагалось снижение уровня к 1990 г. до  $-29,20$  м абс. и к 2000 г. до  $-29,90$  м абс. или соответственно на 0,5 и на 1,4 м. При тех же условиях хозяйственной деятельности, но при притоке на 10 % выше нормы ожидалось повышение уровня к 1986 г. до  $-28,00$  м абс. и к 2000 г. до  $-28,25$  м абс. (рис. 18, линия б). По данным наблюдений, с 1973 по 1977 г. имело место резкое падение уровня моря (до  $-29,00$  м абс.), обусловленное исключительно низким притоком, а с 1978 по 1986 г. уровень моря стал повышаться и достиг отметки  $-27,90$  м абс. Как показал выполненный в ГГИ и ГОИНе анализ водного баланса Каспийского моря за последние годы, имевшее место особенно резкое повышение уровня моря с 1978 по 1981 г. (уровень поднялся на 0,9 м) было обусловлено особенно благоприятным сочетанием элементов водного баланса в этот период, а именно увеличением стока р. Волги (на 10 %) и осадков на акваторию моря (на 11 %) в результате повышения общей увлажненности бассейна при несколько пониженных (на 6 %) значениях испарения с водной поверхности; некоторую роль сыграло и перекрытие залива Кара-Богаз-Гол, осуществленное в начале 1980 г. Следует отметить, что за многолетний период наблюдений неоднократно бывали случаи такого же и даже более повышенного притока и осадков и пониженного испарения в течение 4 лет и более, но никогда эти процессы не совпадали во времени, как это произошло с 1978 по 1981 г. Последнее и вызвало столь маловероятный подъем уровня Каспийского моря.

Таким образом, рассчитанный автором в 1975 г. ход уровня можно считать к 1986 г. вполне оправдавшимся — он в полной мере соответствовал одному из вариантов расчета. Конечно, наиболее вероятным за 1976–1986 гг. было бы понижение уровня, что соответствовало бы средним климатическим условиям и это неоднократно подчеркивалось. Однако, начиная с 1978 г. в бассейне имели место исключительно аномальные условия, которые привели к резкому повышению уровня. Вероятность такой ситуации очень мала, но именно она и случилась.

Каким же следует ожидать уровень Каспийского моря в перспективе? Это важнейший вопрос, от которого во многом зависят пути решения проблемы Каспийского моря, необходимость и целесообразность планирования тех или иных весьма дорогостоящих водохозяйственных мероприятий в бассейне и на акватории моря, в том числе мероприятий по территориальному перераспределению водных ресурсов.

Для ответа на этот вопрос в самое последнее время в ГГИ разработана наиболее совершенная методика вероятностного прогноза с учетом влияния хозяйственной деятельности и антропогенных изменений климата и выполнены расчеты положения уровня моря на перспективу<sup>1</sup>.

Расчеты будущего положения уровня моря производятся по уравнению водного баланса

---

<sup>1</sup> Разработки выполнены В. Ю. Георгиевским, А. В. Ежовым, А. И. Моисеевым.

$$H_{i+1} = H_i + \frac{\Sigma Q_{\text{пов}} - \Delta Q_{\text{хоз}} + Q_{\text{под}}}{F_i} 10^5 + P_i - E_i - \frac{Q_{\text{КБГ}}}{F_i} 10^5, (11)$$

где  $H_i$  и  $H_{i+1}$  — уровни моря  $i$ -го и  $(i+1)$ -го года, см;  $\Sigma Q_{\text{пов}}$  — суммарный поверхностный приток в море, км<sup>3</sup>;  $P_i$  — слой осадков на поверхность моря, см;  $Q_{\text{под}}$  — подземный приток в море, принимаемый за все годы постоянным и равным 5 км<sup>3</sup>/год;  $E_i$  — слой испарения с водной поверхности, см;  $Q_{\text{КБГ}}$  — сток в залив Кара-Богаз-Гол, км<sup>3</sup>;  $F_i$  — средняя площадь водной поверхности моря, км<sup>2</sup>, определяется по зависимости от уровня  $H_i$ .

Основная приходная составляющая, от которой во многом зависит положение уровня — поверхностный приток  $\Sigma Q_{\text{пов}}$  — определяется как сумма стока по р. Волге — г. Волгоград, р. Уралу — с. Тополи, р. Терек — с. Каргалинская, р. Куре — устье; суммарного стока рек Сулака, Самура, малых рек Западного побережья и иранских рек. Отдельно учитываются естественные потери в Волго-Ахтубинской пойме и дельте р. Волги, в устьевых областях рек Урала и Терека по установленным в ГГИ зависимостям от водности в указанных створах.

Изменение стока под влиянием хозяйственной деятельности  $\Delta Q_{\text{хоз}}$  принимается отдельно для всех указанных выше рек (групп рек) по последним оценкам ГГИ с учетом водности каждого года.

Осадки на поверхность моря  $P_i$  определены с учетом их распределения по акватории по данным не только береговых и островных станций, но и судовых измерений. В среднем за 1880—1985 гг. слой осадков составляет 240 мм при  $C_v = 0,165$ . По данным различных авторов, средний слой осадков на Каспийское море изменяется от 180 до 240 мм. Испарение с водной поверхности  $E$ , определенное как остаточный член водного баланса, составляет в среднем за многолетний период  $\bar{E} = 970$  мм при  $C_v = 0,07$ . Для контроля указанных значений, анализа невязок водного баланса моря и объяснения причин его изменений за различные многолетние периоды была выполнена оценка испарения независимым путем по формулам, учитывающим гидрометеорологические факторы. В этом случае испарение  $\bar{E}$  получено равным по разным формулам от 910 до 973 мм /46, 65/. Из-за имеющих место расхождений в оценках испарения и осадков видимое испарение с моря  $(\bar{E} - \bar{P})$  при расчетах на перспективу также может приниматься различным — от 730 до 780 мм. Первое значение, по мнению автора, более обосновано — оно подтверждается расчетами всех составляющих водного баланса за период наблюдений /81, 85/, тем не менее при расчетах на перспективу в качестве одного из вариантов оценка уровня производится и при значении видимого испарения  $(\bar{E} - \bar{P}) = 780$  мм.

Отток в Кара-Богаз-Гол  $Q_{\text{КБГ}}$  принимался равным 2 км<sup>3</sup>/год, рассмотрен также вариант при  $Q_{\text{КБГ}} = 0$ .

За исходный уровень при расчетах на перспективу взят уровень 1987 г..

равный  $H = -27,9$  м абс.; многовариантные расчеты выполнены с 1988 по 2020 гг., т. е. за 33 года. Моделировались 33-летние ряды (по 200 реализаций) стока рек Волги, Урала, Терека, Куры, суммарного притока по всем остальным рекам, видимого испарения с учетом их взаимной зависимости; т. е. проводилось статистическое моделирование по методу Монте-Карло многомерного марковского процесса с заданным законом распределения. В качестве модельных характеристик процесса приняты естественные нормы, коэффициенты вариации и автокорреляции каждого ряда, эмпирическая корреляционная матрица. Для каждой из 200 полученных реализаций моделируемых величин по уравнению (11) для каждого года с 1988 по 2020 г. определялся уровень моря, после чего вычислялись его средние значения и амплитуда возможных колебаний.

Все расчеты выполнялись многовариантно с учетом двух основных гипотез:

- гипотеза стационарности климатической ситуации до 2020 г.;
- гипотеза нестационарности климатических условий за счет влияния человека на климат.

При принятии гипотезы стационарности климата в расчетах непосредственно использовались эмпирические данные по всем перечисленным выше компонентам баланса, полученным с 1880 г. Суммарное уменьшение притока речных вод в море за счет хозяйственной деятельности составило, по последним оценкам ГГИ (в  $\text{км}^3/\text{год}$ ): 1987 г. — 39,2, 1990 г. — 46 2000 г. — 55; 2010 г. — 60; 2020 г. — 65 ( $\Delta Q_{\text{хоз}}$  на каждый год принимались отдельно для указанных выше водосборов с учетом водности реки).

Кроме того, рассчитывался вариант переброски части стока р. Волги в р. Дон в объеме  $5 \text{ км}^3/\text{год}$ , начиная с 1992 г. Учитывая результаты прогнозирования уровня моря по связи с солнечной активностью и атмосферной циркуляцией (см. рис. 15), а также выводы, полученные Г. С. Голицыным /36/, в качестве одного из вариантов рассчитано положение уровня моря на перспективу при условии, что до 1996 г. естественный приток в море будет на 5 % выше нормы, а видимое испарение — на 5 % ниже нормы (условия, близкие к периоду 1978–1985 гг.). Указанные условия в общем отвечают и результатам последних исследований, выполненных в ГГИ Е. А. Леоновым, который считает, что период до 1996 г. должен характеризоваться повышенным естественным стоком в бассейне р. Волги.

При гипотезе нестационарности климатических условий предстоящего периода (до 2020 г.) учитывались прогнозы антропогенных изменений климата на ближайшие десятилетия, основанные на увеличении концентрации в атмосфере Земли углекислого газа и малых газовых составляющих (см. главу 6). При этом количественные оценки предполагаемых изменений климатических параметров в бассейне Каспийского моря (температуры воздуха, осадки) и на его акватории (осадки, испарение) приняты по данным исследований, полученным в 1987 г. в ГГИ под руководством М. И. Будыко; возможные изменения притока речных вод в

море приняты по двум крайним вариантам оценок: максимальные и минимальные изменения. Последние соответствуют приближенным оценкам, выполненным в лаборатории водных ресурсов ГГИ под руководством В. И. Бабкина (см. главу 6).

Ожидаемые изменения элементов водного баланса Каспийского моря за счет влияния человека на климат, по данным ГГИ, приведены в табл. 9.

Таблица 9

**ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА  
КАСПИЙСКОГО МОРЯ  
ЗА СЧЕТ АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА**

| Элемент баланса                            | Год  |      |      |      |
|--------------------------------------------|------|------|------|------|
|                                            | 1987 | 2000 | 2010 | 2020 |
| Суммарный приток,<br>км <sup>3</sup> /год: |      |      |      |      |
| вариант макс.                              | 0    | -40  | -20  | -2   |
| вариант мин.                               | 0    | -18  | 4    | 25   |
| Осадки, мм                                 | 0    | 100  | 120  | 150  |
| Испарение, мм                              | 0    | 15   | 20   | 30   |

В соответствии с представленным и данными следует ожидать заметно-го уменьшения притока речных вод в море к концу столетия (главным образом за счет уменьшения стока р. Волги), которое в дальнейшем (к 2020 г.) становится практически незначимым или даже, наоборот, сменяется увеличением притока. Особенно существенным предполагается увеличение осадков на акваторию моря (до 60 % в 2020 г.); изменение испарения ожидается очень незначительным (до 3 %). Моделирование составляющих водного баланса при нестационарной ситуации проводилось по той же методике, но с учетом данных табл. 9; при этом ввиду не-изученности влияния антропогенных изменений климата на вероятност-ные характеристики гидрометеорологических рядов в качестве первого приближения вид кривых распределения, изменчивость составляющих водного баланса, коэффициенты их авторегрессии и взаимной корреля-ции приняты по данным наблюдений за прошлый период. Отдельно был рассчитан вариант при увеличенной изменчивости составляющих водного баланса в условиях антропогенных изменений климата.

В условиях нестационарной климатической ситуации на основе специ-ально проведенных исследований учтено влияние возможных антропо-генных изменений климатических характеристик на потери стока в бас-сейне за счет хозяйственной деятельности. Оно оказалось незначитель-ным и составляло от 5 до 8 %  $\Delta Q_{\text{х.оз.}}$ , полученных при стационарных усло-виях (см. главу 6).

В соответствии с изложенными выше исходными данными и предпо-сылками в ГГИ составлена математическая модель расчета на ЭВМ буду-щего положения уровня Каспийского моря, позволяющая производить

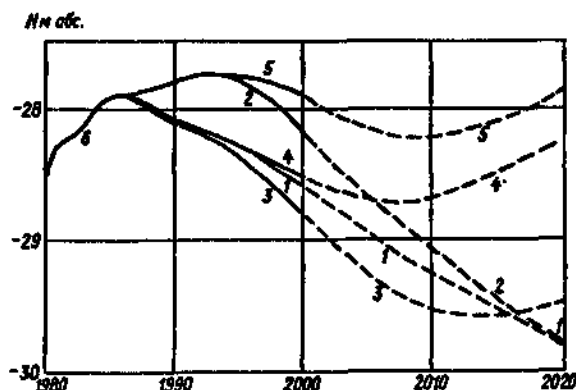


Рис. 19. Уровни Каспийского моря до 2000–2020 гг. для разных вариантов стационарной и нестационарной климатической ситуации (линии 1–5).

6 – наблюдаемый уровень по 1986 г. (описание вариантов см. по тексту).

расчеты до 2020 г. для самых различных вариантов стационарной и нестационарной климатической ситуации предстоящего периода. Некоторые результаты расчетов представлены в табл. 10 и на рис. 19 для следующих пяти основных вариантов:

1) стационарная климатическая ситуация, средние климатические условия;

Таблица 10.

**ОЖИДАЕМЫЕ УРОВНИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ  
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ  
ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА  
(В М ПО ОТНОШЕНИЮ К ОТМЕТКЕ –28,0 М АБС.)**

| Вариант | Год   |       |       |       |
|---------|-------|-------|-------|-------|
|         | 1990  | 2000  | 2010  | 2020  |
| 1       | –0,10 | –0,62 | –1,27 | –1,84 |
| 2       | 0,17  | –0,24 | –1,11 | –1,84 |
| 3       | –0,10 | –0,80 | –1,54 | –1,49 |
| 4       | –0,10 | –0,54 | –0,68 | –0,25 |
| 5       | 0,17  | 0,05  | –0,24 | 0,07  |

2) то же, но до 1996 г. естественный приток на 5 % выше нормы, а видимое испарение на 5 % ниже нормы;

3) с учетом антропогенных изменений климата при варианте максимума изменения притока в море;

4) то же, но при варианте минимума изменения притока в море;

5) комбинация второго и четвертого вариантов, т. е. до 1996 г. естественный приток на 5 % выше, а естественное испарение на 5 % ниже нормы плюс антропогенные изменения климата по варианту 4.

Как следует из данных табл. 10 и рис. 19, в условиях средних климатических условий и антропогенных изменений климата (рис. 19, линии 1, 3 и 4) до конца столетия следует ожидать снижения уровня Каспийского моря на 0,6–0,9 м по отношению к современным отметкам. При наступлении маловодного периода снижение будет еще более значительным. При особо благоприятных сочетаниях приходных и расходных элементов водного баланса моря (приток выше, а испарение ниже нормы) уровень до конца столетия будет находиться на отметках, близких к современным (на рис. 19, линия 2). В условиях нестационарной климатической ситуации, обусловленной предстоящими антропогенными изменениями климата, следует ожидать начала интенсивного подъема уровня моря (рис. 19, линии 3 и 4) в период с 2005 по 2015 г. (в зависимости от оценок влияния изменения климата на приток). Это может произойти главным образом за счет очень существенного увеличения осадков на акваторию моря (см. табл. 9). Если антропогенные изменения климата (особенно значимые на уровень 2000 г. и в последующие годы) наложатся на особо благоприятные естественные сочетания элементов водного баланса моря до 2000 г., то уровень может колебаться около современных отметок (рис. 19, линия 5) до конца расчетного периода.

Следует отметить, что на результаты расчетов будущего уровня моря при антропогенных изменениях климата может очень существенно сказаться влияние последних на вероятностные характеристики моделируемых гидрометеорологических рядов. Этот вопрос требует дальнейшего изучения, и насколько он важен, свидетельствуют результаты расчетов уровня на перспективу при увеличении изменчивости вдвое стока Волги и видимого испарения в условиях нестационарной климатической ситуации: к концу расчетного периода приращение уровня изменилось на 20 %, его возможные отклонения от среднего увеличились вдвое. Не меньшее значение, по всей видимости, могут оказывать на уровень возможные в отдельные периоды изменения связи между рядами основных элементов водного баланса. Например, в целом за весь период наблюдений связь между видимым испарением и притоком в море очень мала, однако в периоды особенно интенсивных изменений уровня (1933–1940, 1978–1987 гг.) отмечалась четкая обратная корреляция между этими величинами. От того, как будет меняться эта зависимость в перспективе, особенно в условиях антропогенного воздействия человека на климат, во многом будет зависеть будущий уровень моря.

Таким образом, приведенные на рис. 19 и в табл. 10 результаты расчетов будущего уровня Каспийского моря, соответствующие современной изученности рассматриваемой проблемы, свидетельствуют о возможном весьма широком диапазоне положения уровня по отношению к современным отметкам в зависимости от климатических условий предстоящего периода, что следует принимать во внимание при долгосрочном планировании крупномасштабных водохозяйственных мероприятий. Наиболее вероятное положение уровня до конца столетия следует ожидать от  $-27,7$  до  $-28,6$  м абс.

Более определенные и надежные значения уровня моря в перспективе могут быть получены лишь при наличии уточненного во времени и по площади сверхдолгосрочного прогноза изменений климатических характеристик в бассейне за счет естественных факторов и хозяйственной деятельности.



### ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕ И ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТЬ В МИРЕ

В последние десятилетия советскими гидрометеорологами внесен крупный вклад в изучение водных ресурсов и водного баланса в глобальном масштабе. В период международного гидрологического десятилетия ЮНЕСКО (МГД 1965–1974 гг.), по поручению Национального Комитета СССР по МГД, учеными Государственного гидрологического института совместно с Главной геофизической обсерваторией, Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом и Институтом водных проблем АН СССР были выполнены крупные научные исследования по водному балансу, водным ресурсам и влагообороту земного шара, обобщенные в монографии „Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли“ /60/ с Атласом карт, опубликованной на русском языке в 1974 г. под редакцией В. И. Корзуна, А. А. Соколова, Г. П. Калинина, М. И. Будыко и других известных советских ученых в качестве вклада в международное сотрудничество ученых по водной проблеме.

Монография вызвала большой научный интерес и, в соответствии с пожеланиями стран-участниц МГД, в 1978 г. ЮНЕСКО опубликовало ее на английском языке под редакцией Р. Нейса, а в 1980 г. Национальный Комитет по МГД Испании издал монографию на испанском языке. Основные авторы и составители монографии стали лауреатами Государственной премии СССР в области науки за 1981 г.

В монографии рассмотрен широкий круг вопросов, касающихся гидрографии земной поверхности, оценки общих запасов воды на Земле, процессов их естественного расходования и возобновления, закономерностей круговорота воды в системе „океан–атмосфера–суша–океан“, расчета влагооборота в пределах континентов и Мирового океана, водного баланса речных бассейнов, континентов, Мирового океана и земного шара в целом. Приведены обширные сведения о водных ресурсах и водообеспеченности континентов, динамике современного и перспективного использования водных ресурсов в мире, путях устранения дефицита водных ресурсов в различных районах Земного шара.

В Атласе к „Мировому водному балансу и водным ресурсам Земли“, состоящем из 65 карт, представлено распределение осадков, испарения и речного стока по территории континентов, Мировому океану и всему земному шару. При составлении Атласа использована обширная гидрометеорологическая информация, основанная на данных более чем 50 000 метеорологических и 18 000 гидрологических станций мира.

Следует отметить, что исследованиям водного баланса и оценке водных ресурсов земного шара и отдельных континентов посвящены работы ученых ряда стран (М. И. Будыко, Г. П. Калинин, М. И. Львович, Р. Нейс,

А. Баумгартнер, Е. Рейхель и др.) . В отличие от ранее выполненных работ, монография /60/ основана на обобщении и анализе более полных и детальных данных по элементам гидрологического режима и водного баланса основных водных объектов стран, всех континентов, Мирового океана и всего земного шара; в ней использованы современные методы статистической обработки исходных данных расчета и пространственной интерполяции элементов водного баланса. В монографии /60/ впервые были представлены обобщения по динамике и прогнозу водопотребления по континентам за период текущего столетия, по влиянию хозяйственной деятельности на водные ресурсы.

В последние годы в ГГИ под руководством автора выполнен новый этап исследований водных ресурсов мира, заключающийся прежде всего в более полной и уточненной оценке и анализе динамики водопотребления и водообеспеченности в мире с использованием обширной литературы по многим странам всех континентов. Ниже представлены основные итоги исследований водных ресурсов мира и их использования, полученные в основном в самые последние годы.

Как известно, доля пресных вод из общих запасов воды на Земле невелика и составляет всего 2,5 %, тем не менее в абсолютном исчислении запасы их выражаются громадной цифрой, около 35 млн. км<sup>3</sup>. Из этого количества свыше 99 % находится в твердом состоянии или в виде подземных вод. Наиболее доступные для хозяйственного использования воды пресных озер, водохранилищ и русел рек составляют всего лишь 0,27 % общих запасов пресной воды на Земле (табл.11). Однако именно эти последние категории вод в настоящее время особенно интенсивно используются и претерпевают существенные изменения под влиянием хозяйственной деятельности.

Суммарные единовременные запасы воды в руслах рек мира оцениваются в 2120 км<sup>3</sup>. Несмотря на то, что объем речных вод составляет лишь 0,0002 % общих запасов воды на Земле и только 0,006 % пресных вод, они

*Таблица 11*

**МИРОВЫЕ ЗАПАСЫ ПРЕСНОЙ ВОДЫ**

| Виды воды                           | Объем, тыс. км <sup>3</sup> | % от суммарных запасов |
|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Ледники и постоянный снежный покров | 24012                       | 68,70                  |
| Пресные подземные воды              | 10530                       | 30,10                  |
| Подземные пьды вечной мерзлоты      | 300                         | 0,86                   |
| Почвенная влага                     | 16,5                        | 0,05                   |
| Пресные озера                       | 91,0                        | 0,25                   |
| Водоохранилища                      | 5,0                         | 0,015                  |
| Воды болот                          | 10,3                        | 0,030                  |
| Воды в руслах рек                   | 2,1                         | 0,006                  |
| Биологическая вода                  | 1,7                         | 0,003                  |
| Всего (округленно)                  | 34980                       | 100                    |

имеют очень важное значение для человека, так как являются непрерывно возобновляющимся источником водных ресурсов и обеспечивают основной объем водопотребления.

Суммарный годовой сток рек земного шара составляет  $46\,800\text{ км}^3/\text{год}$ , т. е. вода в руслах рек возобновляется в среднем 22 раза в год (почти каждые 17 сут).

Распределение речного стока по территории крайне неравномерно и, как правило, не согласуется с потребностями в воде со стороны населения, промышленности и сельского хозяйства (табл. 12).

Таблица 12

**РЕСУРСЫ РЕЧНОГО СТОКА В МИРЕ**

| Территория                                 | Годовой сток рек |               | % от суммарного стока | Площадь, тыс $\text{км}^2$ | Модуль стока, л/с $\cdot \text{км}^2$ |
|--------------------------------------------|------------------|---------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------------------|
|                                            | мм               | $\text{км}^3$ |                       |                            |                                       |
| Европа                                     | 306              | 3210          | 7                     | 10500                      | 9,7                                   |
| Азия (с Японией, Филиппинами и Индонезией) | 332              | 14410         | 31                    | 43475                      | 10,5                                  |
| Африка (с Мадагаскаром)                    | 151              | 4570          | 10                    | 30120                      | 4,8                                   |
| Северная и Центральная Америка             | 339              | 8200          | 17                    | 24200                      | 10,7                                  |
| Южная Америка                              | 661              | 11760         | 25                    | 17800                      | 21                                    |
| Австралия (с Тасманией)                    | 45,3             | 348           | 1                     | 7683                       | 1,44                                  |
| Океания                                    | 1610             | 2040          | 4                     | 1267                       | 51,1                                  |
| Антарктида                                 | 160              | 2230          | 5                     | 13977                      | 5,1                                   |
| Вся суша                                   | 314              | 46770         | 100                   | 149000                     | 10,0                                  |

Несмотря на способность речного стока к возобновлению и самоочищению, интенсивное развитие промышленности и сельского хозяйства в мире, рост населения, освоение новых территорий и связанное с этими процессами резкое увеличение водопотребления на всех континентах и преобразование естественного покрова Земли в последние десятилетия стали оказывать существенное влияние на естественные колебания речного стока и состояние ресурсов пресных вод мира.

В наиболее обжитых районах земного шара уже к настоящему времени не осталось сколько-нибудь крупных речных систем с режимом, не нарушенным в той или иной степени деятельностью человека.

Все это определяет настоятельную необходимость в исследовании соотношений между имеющимися естественными водными ресурсами в различных частях Земли и потребностями в них со стороны различных отраслей хозяйства; в выявлении изменений, вносимых в водный баланс и режим речного стока хозяйственной деятельностью человека при различном уровне развития промышленности и сельского хозяйства, а также в прогнозировании водопотребления и в связи с этим изменений вод-

ных ресурсов отдельных бассейнов, районов, континентов и Земли в целом на обозримое будущее.

В пределах крупных речных водосборов и обширных территорий, расположенных в наиболее освоенных в хозяйственном отношении районах Земли, на речной сток обычно влияет одновременно множество антропогенных факторов, оказывающих разное воздействие на характеристики водного режима, суммарный годовой сток, качество вод. По характеру влияния на гидрологические процессы (количественные характеристики режима и качество природных вод) все факторы хозяйственной деятельности можно объединить в следующие группы:

1) факторы, оказывающие главное влияние на сток за счет непосредственных изъятий воды из водоисточников (русловой сети, озер, водохранилищ, подземных горизонтов), использованием этих вод и сбросами их обычно снова в русловую сеть (водозаборы на орошение, промышленное и коммунальное водопотребление, сельскохозяйственное водоснабжение, переброски стока);

2) факторы, оказывающие влияние на гидрологический режим и водные ресурсы за счет преобразований непосредственно русловой сети (создание водохранилищ и плудов, обвалование и спрямление русел, выемки грунта из русел рек и т. п.);

3) факторы, изменяющие условия формирования стока и другие компоненты водного баланса путем воздействия на поверхность речных водосборов (агротехнические мероприятия, осушение болот и заболоченных земель, вырубка и посадка леса, урбанизация и т. п.);

4) факторы хозяйственной деятельности, воздействующие на сток, водный баланс и гидрологический режим посредством изменений общих климатических характеристик в глобальном и региональном масштабах в результате антропогенных преобразований газового состава и загрязнения атмосферы, а также изменения характеристик влагооборота за счет дополнительного испарения, обусловленного проведением крупномасштабных водохозяйственных мероприятий.

Рассматривая антропогенные изменения характеристик суммарных ресурсов речного стока (годового стока рек) в глобальном масштабе, в пределах континентов Земли и крупных природно-экономических регионов практически невозможно количественно оценить роль всех перечисленных выше факторов хозяйственной деятельности, да и вряд ли в этом есть необходимость. Вполне можно пренебречь, на наш взгляд, учетом влияния факторов, действующих на водосборах (третья группа). Эти факторы основное влияние оказывают на сток малых и средних водосборов, причем чаще всего не на годовой сток, а на его внутригодовое распределение, экстремальные характеристики стока, качество вод. При этом в зависимости от конкретных физико-географических условий указанные антропогенные факторы обычно воздействуют на сток в разных направлениях, т. е. в определенных условиях могут способствовать даже увеличению годового стока малых и средних рек путем уменьшения сум-

марного испарения в бассейнах.

Из антропогенных факторов, действующих в русловой сети (вторая группа), применительно к стоку больших бассейнов и регионов вполне можно ограничиться только оценкой роли крупных водохранилищ; остальные факторы имеют узколокальный характер и их воздействие на количественные характеристики водных ресурсов пренебрежительно мало.

Таким образом, для оценки влияния хозяйственной деятельности на состояние водных ресурсов Земли прежде всего необходимо учесть роль антропогенных факторов, связанных с непосредственными изъятиями воды из водных объектов и регулированием стока крупными водохранилищами. Эти факторы, обуславливающие одностороннее уменьшение поверхностного и подземного стока, имеют повсеместное распространение, наиболее интенсивно развиваются и способны оказать особенно большое влияние на состояние водных ресурсов крупных регионов. В связи с этим в настоящей главе основное внимание будет уделено оценке динамики непосредственных затрат пресных вод по континентам и крупным природно-экономическим районам Земли на хозяйственно-бытовые нужды населения, промышленное и сельскохозяйственное производство, а также затрат, связанных с сооружением крупных водохранилищ. Некоторые аспекты возможных изменений водных ресурсов и водного баланса, связанные с воздействием человека на климат и на характеристики глобального и континентального влагооборота, будут рассмотрены в главе 6.

В последние 20 лет в разных странах сделано немало попыток оценки современного и перспективного водопотребления в мире на различные хозяйственные нужды. Полученные результаты, основанные на различных исходных данных, методических принципах и принятых предположениях, трудно сравнимы между собой; нелегко оценить их надежность и достоверность, особенно в отношении прогнозов на перспективу. Тем не менее мы попытались это сделать хотя бы по результатам оценок суммарного водопотребления для Земли в целом.

На рис. 20 представлены результаты оценок динамики суммарного водопотребления в мире по данным различных исследователей, полученные за последние 15 лет. Современное водопотребление (водозабор) в мире различные авторы оценивают в диапазоне от 3000 до 4500 км<sup>3</sup>/год, а на конец столетия — от 5000 до 10000–11000 км<sup>3</sup>/год. Естественно, что точность приведенных значений далеко не одинокова. Наиболее надежные и детальные данные получены в 1974 г. в СССР Государственным гидрологическим институтом (полное и безвозвратное водопотребление по всем континентам Земли и по всем водопотребителям с 1900 г. по 2000 г.) /45/ и в 1980 г. Геологической службой США /124/ (полное водопотребление по всем водопотребителям, континентам и выборочным странам на 1977 г.). Расчеты выполнены, по-видимому, независимо и представляет интерес сопоставить их между собой (табл. 13). Анализируя данные табл. 13, отметим прежде всего, что практически полностью совпадают значения сум-

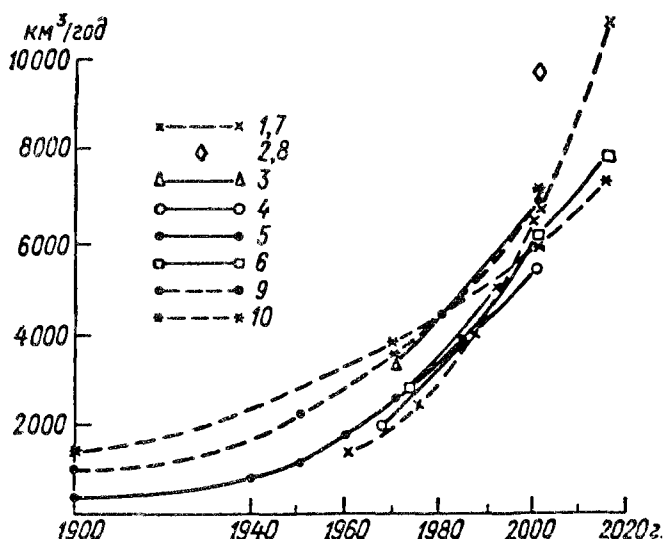


Рис. 20. Суммарное водопотребление в мире по данным различных авторов.

1 — Докснадис, 1967 г. /96/; 2 — Г. П. Калинин, 1968 г. /44/; 3 — М. И. Львович, 1969—1974 гг. /54—56/; 4 — Холи, 1971 г. /101/; 5 — ГГИ, 1974 г. /45/; 6 — Фалькенмарк и Линд, 1974 г. /97/; 7 — Г. П. Калинин и Н. А. Ермолина, 1975 г. /40/; 8 — Геологическая служба США, 1980 г. /124/; 9 — Амброджи, 1980 г. /91/; 10 — Рина, 1982 г. /117/.

марного мирового водопотребления (с точностью 5 %) и в общем очень хорошо соответствуют друг другу водозаборы воды в мире по отдельным потребителям (различия 13—25 %). Нарис. 21 показана зависимость (данные ГГИ и Геологической службы США) водопотребления отдельными потребителями в целом по миру и суммарных водопотреблений по континентам; график проходит через 45° и корреляция между данными в общем достаточно высока.

Значения суммарного водопотребления по отдельным континентам также неплохо совпадают, за исключением Африки и Южной Америки; существенные различия (до 2 раз) имеют место при оценке роли отдельных потребителей для стран и континентов. Отсутствие данных по безвозвратному водопотреблению, по затратам воды на дополнительное испарение с водохранилищ, по анализу динамики и тенденций водопотребления в мире за прошедшие периоды и на перспективу в работе гидрологов США не позволяет, к сожалению, сделать более полное сравнение данных советских и американских гидрологов.

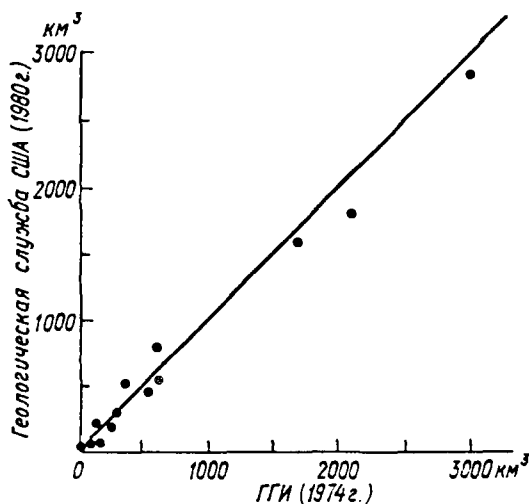
Прогнозы ГГИ 1974 г. в общем неплохо подтверждаются фактическими данными по водопотреблению и результатами обобщений и исследований, выполненных в последующие годы. Тем не менее рассчитанные более 10 лет назад, их, безусловно, требуется уточнить с использованием более полных данных, полученных в последние годы, особенно по таким

Таблица 13

ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕ ПО КОНТИНЕНТАМ И ОТДЕЛЬНЫМ СТРАНАМ В 1978–1977 гг.  
(СОПОСТАВЛЕНИЕ ПРОГНОЗОВ ГГИ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 1974 г. /45/,  
И РАСЧЕТОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБОЙ США В 1980 г. /124/)

| Континент,<br>страна | Промышленно-<br>энергетическое<br>водопотребление,<br>км <sup>3</sup> /год | Орошение            |                                          | Хозяйственно-быто-<br>вое водопотребление,<br>км <sup>3</sup> /год | Водопотребление<br>(всего),<br>км <sup>3</sup> /год |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
|                      |                                                                            | площадь,<br>млн. га | водопотребление,<br>км <sup>3</sup> /год |                                                                    |                                                     |
| Африка               | 6/15,4                                                                     | 10/6,4              | 120/60,8                                 | 6/12                                                               | 170/88                                              |
| Азия                 | 80/98,7                                                                    | 187/147,4           | 1500/1400                                | 50/98                                                              | 1700/1597                                           |
| Австралия и Океания  | 10/13,6                                                                    | 1,8/1,4             | 14/13                                    | 1,5/2                                                              | 30/29                                               |
| Европа               | 196/359,6                                                                  | 24/12,2             | 150/116                                  | 36/40                                                              | 380/616                                             |
| СССР                 | 63/182,8                                                                   | 14/9,9              | 181/94                                   | 14/18                                                              | 290/295                                             |
| Северная Америка     | 340/308,5                                                                  | 27/21,6             | 230/205                                  | 46/38                                                              | 640/551                                             |
| США                  | 305/285,4                                                                  | 21/16,9             | 181/160                                  | 42/32                                                              | 540/477                                             |
| Южная Америка        | 12/10,8                                                                    | 8/3,7               | 60/35                                    | 7/11                                                               | 90/57                                               |
| Итого                | 630/807                                                                    | 260/192,7           | 2100/1830                                | 150/201                                                            | 3020/2838                                           |

Примечание. В числителе — прогнозы ГГИ, в знаменателе — расчеты Геологической службы США.



**Рис. 21.** Сопоставление суммарного водопотребления в мире за 1975–1977 гг. по прогнозам ГГИ 1974 г. и оценкам геологической службы США 1980 г. (данные по суммарному водопотреблению по континентам и по отдельным водопотребителям для мира в целом).

континентам, как Африка и Южная Америка, по которым надежные материалы в те годы практически полностью отсутствовали. Имеющиеся в настоящее время детальные данные по многим странам и континентам дают возможность анализировать соотношения между водопотреблением и имеющимися водными ресурсами не только в целом по континентам, но и внутри них по отдельным природно-экономическим зонам и в динамике во времени.

Значения водопотребления в тех или иных крупных регионах Земли определяются тремя основными факторами: уровнем хозяйственного развития, численностью населения и физико-географическими (прежде всего климатическими) особенностями территории.

Для анализа временной и пространственной изменчивости водопотребления в мире в пределах каждого континента были выделены крупные природно-экономические регионы, характеризующиеся более или менее однородными физико-географическими условиями и уровнем развития хозяйственной деятельности; всего таких регионов выделено 26 — от 3 до 8 внутри каждого континента.

Для каждого региона оценены полное водопотребление и безвозвратные потери воды на нужды городского и сельского населения, промышленности (включая теплоэнергетику), орошения, а также потери воды на дополнительное испарение с водохранилищ. Все оценки выполнены для различных расчетных уровней с 1900 по 2000 г. Это дает возможность исследовать динамику водопотребления в мире в пространстве и



во времени в течение текущего столетия с небольшой экстраполяцией за пределы 2000 г.

Для определения водопотребления в пределах природно-экономических регионов прежде всего были использованы фактические или рассчитанные данные по водопотреблению, которые в настоящее время с различной степенью детальности и надежности имеются для многих стран всех континентов. Наиболее детальные и надежные данные (синтезированные за довольно длительные периоды — несколько десятков лет) опубликованы в международных публикациях или отдельными авторами для следующих стран: СССР, США, практически для всех стран Европы, Канады, Мексики, Кубы, Бразилии, Аргентины, Чили, Египта, ЮАР, Китая, Японии, Турции, Монголии, Австралии; для всех этих стран имеются также прогнозные данные на 1990–2000 гг.

При отсутствии сведений по водопотреблению для каждой крупной страны или для региона в целом расчеты производились с помощью косвенных методов, используя в качестве аналогов данные по странам, находящимся в сходных физико-географических условиях и близких по уровню и особенностям хозяйственного развития.

Водопотребление населением определялось отдельно для городов и сельских населенных пунктов, используя имеющиеся для каждой страны фактические данные по динамике и прогнозу общей численности городского и сельского населения, а также значения удельного водопотребления на одного жителя, полученные по странам-аналогам. При ретроспективных и перспективных оценках учитывались тенденции в изменении удельного водопотребления городским и сельским населением и безвозвратных потерь воды в процентах от полного водопотребления.

Оценка водопотребления на орошение основана на сведениях о площадях орошения и удельном водопотреблении на орошение, полученных для многих стран и осредненных для отдельных регионов. Орошение является основным потребителем воды на Земле. Поэтому от точности учета орошаемых площадей во многом зависит точность определения водопотребления в мире вообще и особенно по таким континентам как Азия, Африка, Южная Америка, где орошение на 70–90 % определяет суммарное водопотребление. Основные орошаемые площади в мире введены в строй начиная со второй половины XX в. К началу XX в. площадь орошения в мире составляла 40 млн. га, в 1975 г. по данным ФАО, 220 млн. га, т. е. за 75 лет она возросла в 5,5 раза. Почти 60 % современных орошаемых площадей сосредоточено в пяти странах мира: Китае, Индии, СССР, США, Пакистане.

Надежная оценка за многолетний период динамики площадей орошения в мире представляет непростую задачу; по многим странам такие данные вовсе отсутствуют, по некоторым — весьма приближенны и разноречивы. Приведенные в разных, часто неофициальных источниках они дают результаты учета за разные годы и по неодинаковому кругу показателей. Более или менее достоверная информация по странам мира публи-

куется ФАО, начиная с 1961—1964 гг., однако и эти данные, представляемые ежегодно отдельными странами, далеко не всегда достаточно надежны. Последнее особенно наглядно можно продемонстрировать на примере Китая, занимающего одно из первых мест в мире по площадям орошения. Согласно всем публикациям ФАО до 1981 г. площадь орошения в Китае с 1963 по 1975 г. принималась от 77 до 85 млн. га, а в публикациях с 1981 г. площадь орошения показана уже от 41 млн. га в 1970 г. до 45 млн. га в 1981 г., или на 40—42 млн. га меньше. Естественно, что на такое же значение (почти на 20 %) уменьшились, по данным ФАО, рассчитываемые суммарные площади орошения в мире. По-видимому, в Китае до 1981 г. принимались в расчет площади так называемого „массового“, или „небесного“ орошения, возникшие в 50-е годы в результате известного „Большого скачка“ и использующие водозаборы из многочисленных мелких прудов, бассейнов и других сооружений, предназначенных для задержания дождевой воды. После 1981 г. стали учитываться площади регулярного орошения в составе инженерных оросительных систем, которых, естественно, намного меньше.

Оценке суммарных площадей орошения в мире, их динамике и прогнозу на отдаленную перспективу уделяется большое внимание исследователями разных стран; основные результаты по площадям, опубликованные за последние 30 лет, представлены на рис. 22. Анализ приведенных данных показывает, что при оценке фактического состояния орошаемых площадей они в общем довольно неплохо соответствуют друг другу; различия в оценках с 1960 по 1980 г. ( $\pm 40$ —50 млн. га) практически полностью можно отнести за счет разных данных по Китаю. Что касается прогнозов развития орошения в мире на перспективу до 2000 г., то, естественно, результаты различных исследователей расходятся весьма значительно.

При расчетах площадей орошения для континентов и природно-экономических регионов мира на перспективу 1990—2000 гг. автором использованы имеющиеся по многим странам долгосрочные прогнозы и планы развития орошения. Для оценки необходимых объемов воды на нужды орошения учитывалось, что удельное водопотребление имеет тенденцию к уменьшению в связи с применяемыми мерами по совершенствованию технологических процессов, технических средств и способов полива, направленных на более экономное использование водных ресурсов. Возвратные воды от орошения принимались равными для различных стран и регионов, в соответствии с имеющимися проработками, от 20 до 50 % водозабора.

Промышленное водопотребление рассчитывалось исходя из динамики промышленного производства в различных районах земного шара, (при этом в качестве аналогов принимались имеющиеся данные по динамике этого вида водопотребления в перечисленных выше странах мира), куда входят страны с различным уровнем экономического развития, расположенные в самых различных физико-географических условиях. Расчеты

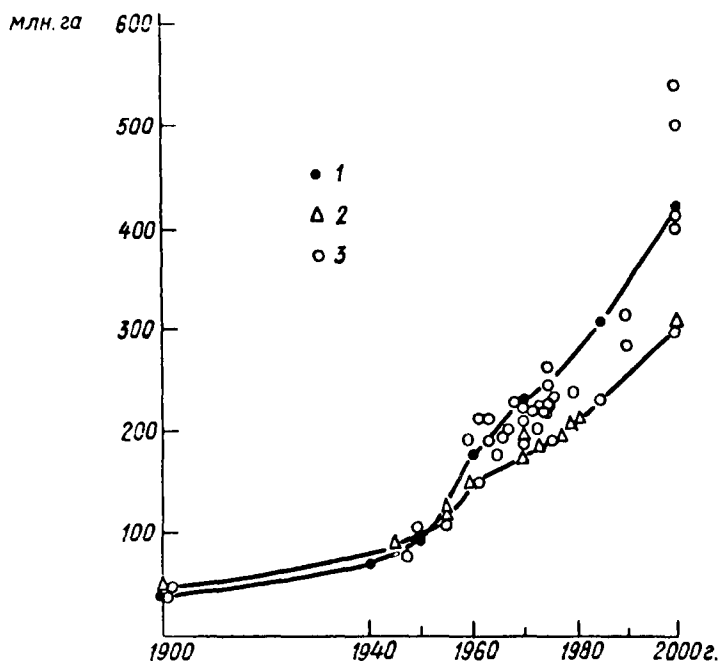


Рис. 22. Динамика орошаемых площадей в мире по данным различных авторов.

1 — данные ГГИ 1974 г., 2 — данные ФАО (1979–1982 гг.), 3 — данные других авторов, опубликованные в 1952–1983 гг.

велись отдельно для теплоэнергетики и всех других отраслей промышленности, имеющих существенно различные тенденции и темпы развития и безвозвратные потери, а затем для каждого региона суммировались. Безвозвратное водопотребление в теплоэнергетике принималось равным от 1 до 4 %, а в других промышленных отраслях от 10 до 40 % в зависимости от уровня развития промышленности, наличия систем оборотного водоснабжения и климатических условий. Учитывалось, что в перспективе промышленное производство и соответственно водопотребление в развивающихся странах будет расти значительно более быстрыми темпами, чем в развитых.

Дополнительные потери на испарение с водохранилищ были рассчитаны для всех крупнейших водохранилищ мира с объемом более  $5 \text{ км}^3$  по разности среднего испарения с водной поверхности и с суши; при этом учитывался коэффициент, показывающий отношение дополнительной площади зеркала водохранилища к общей его площади. Общий объем дополнительных потерь на испарение для каждого региона вычисляется путем суммирования данных по каждому крупному водохранилищу (более  $5 \text{ км}^3$ ) и увеличения полученного результата на 20 %, ввиду того что водохранилища объемом более  $5 \text{ км}^3$  включают в себя примерно

80 % суммарного объема и площади водной поверхности всех водохранилищ мира. На перспективу потери на испарение с водохранилищ каждого региона рассчитывались по тенденции с учетом темпов и планов сооружения крупных водохранилищ в разных странах и районах, их физико-географических особенностей.

Прежде чем перейти к анализу водопотребления по регионам и континентам, интересно рассмотреть динамику водопотребления в двух крупнейших странах мира — в США и СССР, на долю которых приходится большая часть мирового промышленного производства и по которым имеются наиболее детальные проработки по рассматриваемому вопросу, тем более, что намечающиеся тенденции в водопотреблении США и СССР характерны и для многих других развитых стран мира.

В США детальная оценка и долгосрочные (на 2000—2020 гг.) прогнозы водопотребления на различные хозяйственные нужды впервые были выполнены в 60-х годах и опубликованы в 1965 г. /53/, а затем в 1968 г. с учетом первой национальной оценки водных ресурсов /74/. Основные выводы этих оценок и прогнозов с 1965 по 1973 г. опубликованы и хорошо известны специалистам. В частности, анализ динамики водопотребления в США за 1900—2000 гг. приведен в работе ГГИ 1974 г. /45/. Данные по общему и промышленному водопотреблению в США за этот период представлены на рис. 23 а. Согласно прогнозам тех лет, с 1970 по 2000 г. предполагалось увеличение годового водопотребления пресной воды в США в 2—2,5 раза, или до 850—1100 км<sup>3</sup>, причем основной при-

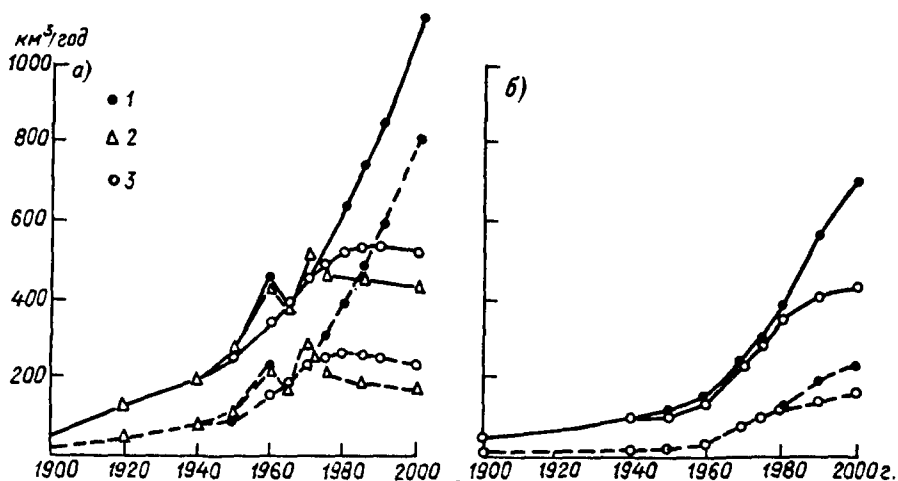


Рис. 23. Динамика водопотребления в США (а) и в СССР (б), рассчитанная и прогнозируемая в различные годы.

1 — расчеты и прогнозы 1965—1970 гг., 2 — то же 1977—1981 гг., 3 — то же 1983—1985 гг., сплошные линии — полное водопотребление, пунктирные — промышленное водопотребление (включая теплоэнергетику).

рост планировался за счет водообеспечения промышленности и теплоэнергетики. Последующие годы в США (после 1975 г.) характеризуются коренными изменениями подхода к использованию водных ресурсов, большим вниманием к вопросам экономии водных ресурсов, повторного использования вод, широкого применения соленой морской воды, переходом от экстенсивного к интенсивному и комплексному использованию водных ресурсов. Все это привело к некоторой стабилизации объема водопотребления и явилось основанием для коренного пересмотра прогнозов водопотребления на будущее. По прогнозам, составленным в 1975—1979 гг., предполагалось существенное уменьшение суммарного водопотребления в США уже в 1980 г. и далее до конца текущего столетия /73, 90/ (рис. 23 а). Предполагалось, в частности, что суммарное годовое водопотребление в США к 2000 г. уменьшится по сравнению с 1970 г. примерно на  $80\text{--}90 \text{ км}^3$  (15—20 %). В основном это должно произойти за счет уменьшения потребления пресной воды промышленностью и теплоэнергетикой.

Новые обнадеживающие тенденции в динамике водопотребления в США и прогнозы его объемов на перспективу до настоящего времени широко дискутируются в печати, однако, опубликованные в последнее время фактические данные по водопотреблению в стране не столь оптимистичны. В 1983 г. /110, 122/ Геологической службой США выполнен детальный анализ трендов фактического водопотребления на различные хозяйственные нужды по всем штатам страны за период 1950—1980 гг.; по-видимому, это наиболее надежные и самые последние данные фактического учета водопотребления в США (рис. 23 и 24, табл. 14). Они свидетельствуют о том, что с 1950 по 1980 г. происходит рост водопотребления в стране по всем видам, включая промышленность и теплоэнергетику, хотя интенсивность роста заметно уменьшилась после 1970 г.

Таким образом, прогнозируемое в 70-х годах заметное снижение водопотребления в США к 1980 г. не оправдалось, за 1970—1980 гг. общее водопотребление пресных вод в стране выросло на 15 %, а безвозвратное на 17 %. Принимая во внимание фактические данные и тенденции в водопотреблении за 1950—1980 гг. и выполненные ранее прогнозные оценки на 2000 г. /73, 90, 110, 122/, уточненный прогноз водопотребления в США до конца столетия может быть охарактеризован данными, представленными на рис. 23 и 24 и в табл. 14.

Аналогичные тенденции в динамике водопотребления и в прогнозах его объемов на перспективу имеют место и в СССР. Так, в 60—70 годах прогнозировалось (см. рис. 23 б) резкое увеличение водопотребления вплоть до конца столетия, с 1970 по 2000 г. примерно в 3 раза, или до  $600\text{--}700 \text{ км}^3/\text{год}$  /45, 54, 55/. Однако в последние годы долгосрочные прогнозы водопотребления в СССР существенно пересмотрены в сторону более экономного использования водных ресурсов, широкого внедрения оборотного водоснабжения в промышленности и теплоэнергетике, применения прогрессивных способов полива при орошении (см. рис. 23 б).

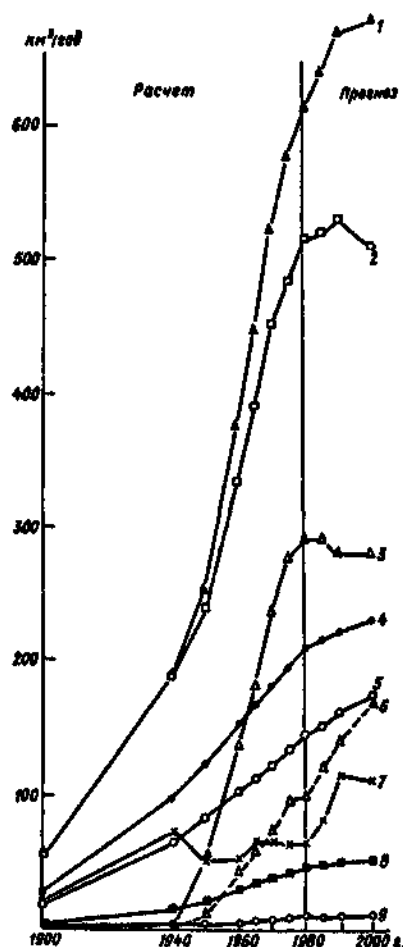


Рис. 24. Динамика водопотребления в США на хозяйственные нужды за 1900–2000 гг.

1 – общее водопотребление, 2 – водопотребление пресных вод, 3 – теплоэнергетика, 4 – орошение, 5 – общее безвозвратное водопотребление, 6 – потребление соленых вод, 7 – промышленность (без теплоэнергетики), 8 – коммунальное хозяйство, 9 – сельскохозяйственное водоснабжение.

Таблица 14

ДИНАМИКА ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ В США, км<sup>3</sup>/год

|                                    | Год  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                    | 1900 | 1940 | 1950 | 1960 | 1965 | 1970 | 1975 | 1980 | 1985 | 1990 | 2000 |
| Водопотребитель и водозабор        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Коммунальное водоснабжение         | 4    | 14   | 19,3 | 29,0 | 33,2 | 37,3 | 40,1 | 47,0 | 48   | 49   | 50   |
| Сельскохозяйственное водоснабжение | 0,8  | 2,8  | 3,8  | 4,8  | 5,8  | 6,5  | 7,0  | 9,8  | 10,2 | 10,6 | 11   |
| Орошение                           | 3    | 4,5  | 5,0  | 5,0  | 5,5  | 6,2  | 6,8  | 7,7  | 7,0  | 8,0  | 8,7  |
|                                    | 2,3  | 3,4  | 3,6  | 3,6  | 3,9  | 4,4  | 4,7  | 5,4  | 5,0  | 6,8  | 7,2  |
|                                    | 27   | 98   | 123  | 152  | 166  | 180  | 193  | 207  | 214  | 220  | 230  |
| Промышленность                     | 16   | 57   | 71   | 88   | 96   | 103  | 110  | 115  | 120  | 126  | 130  |
|                                    | 20   | 72   | 105  | 190  | 244  | 300  | 338  | 352  | 371  | 383  | 390  |
|                                    | 0,6  | 2,1  | 3,3  | 5,6  | 7,5  | 9,5  | 11,0 | 14,4 | 16   | 19   | 24   |
| в том числе теплоснабжение         | —    | —    | 55   | 138  | 180  | 235  | 276  | 290  | 290  | 280  | 280  |
| Общий водозабор                    | 54   | 188  | 263  | 376  | 449  | 524  | 4,1  | 6,2  | 8,0  | 10,0 | 14,6 |
| в том числе соленые воды           | —    | —    | 13,8 | 42,8 | 59,4 | 73,2 | 95,3 | 98,1 | 120  | 140  | 170  |
| пресные воды                       | 54   | 188  | 239  | 333  | 390  | 451  | 483  | 516  | 520  | 530  | 510  |
| Суммарные безвозвратные потери     | 19,7 | 65,3 | 81,7 | 102  | 113  | 123  | 133  | 145  | 151  | 161  | 172  |

Примечание. В числителе — полное водопотребление, в знаменателе — безвозвратное.

и табл. 15). По современным прогнозным оценкам водопотребление к концу столетия должно возрасти по сравнению с 1980 г. в 1,2–1,3 раза и может достигнуть 400–450 км<sup>3</sup>/год.

Более значительный прирост водопотребления в ближайшие десятилетия в СССР по сравнению с США объясняется несколькими факторами: планируемым более интенсивным развитием орошаемого земледелия (в СССР планируется к концу столетия увеличить площади орошения в 1,7 раза, а в США — только в 1,1–1,2 раза), промышленного производства и теплоэнергетики, а также тем обстоятельством, что в США заметную роль в водообеспечении энергетики играют соленые морские воды; в 1980 г. примерно треть общей потребности в воде для теплоэнергетики покрывалось за счет использования соленых вод, к концу столетия предполагается, что доля использования соленых вод в теплоэнергетике составит не менее 60 %.

Динамика водопотребления по континентам и регионам мира за 1900–2000 гг. представлена в табл. 16. Современное (на 1980 г.) общее водопотребление в мире составляет 3300 км<sup>3</sup>/год, безвозвратные потери — 1950 км<sup>3</sup>/год (59 % полного водопотребления). К концу столетия следует ожидать увеличение общего водопотребления до 5200 км<sup>3</sup>/год (примерно в 1,6 раз), а безвозвратного водопотребления — до 2900 км<sup>3</sup>/год (примерно в 1,5 раза). Примерно 60 % общего водопотребления и около 70 % безвозвратных потерь воды приходится на Азию, где расположена основная часть орошаемых земель мира.

Водопотребление по регионам различается очень значительно: например на 1980 г., от 670 км<sup>3</sup> в Южной Азии до 2,4–2,8 км<sup>3</sup> в Центральной Африке и в Океании. Общим для всех регионов является неизменный рост водопотребления в течение всего текущего столетия, причем наибольший прирост водопотребления имел место в 50–60-х годах. Следует отметить, что с 70–80-х годов до 2000 г. в ряде развитых стран северной и западной Европы (Швеция, Великобритания, Нидерланды), а также в США объем полного водопотребления стабилизируется и даже несколько уменьшится к концу столетия. Безвозвратное водопотребление увеличивается во всех странах, в США, например, с 1980 по 2000 г. — на 25 % (см. табл. 14). В целом по земному шару увеличение полного водопотребления с 1980 по 2000 г. ожидается по всем континентам, наименьшее для Северной Америки и Европы (соответственно на 20 и 32 %) и наибольшее для Южной Америки и Африки (на 95 и 70 %).

На рис. 25 и 26 для каждого природно-экономического региона приведены значения водопотребления за отдельные годы по сравнению с естественными водными ресурсами. Штриховка каждого региона на рис. 25 соответствует условной водообеспеченности на 1980 г. (в тыс. м<sup>3</sup> воды на человека в год), полученной как отношение объема естественных водных ресурсов региона за вычетом безвозвратного водопотребления (на уровень 1980 г.) к численности проживающего населения. Штриховка каждого региона на рис. 26 соответствует проценту использования водных



Таблица 15

ДИНАМИКА ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ В СССР, км<sup>3</sup>/год

| Водопотребитель                    | Год  |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
|                                    | 1900 | 1940 | 1950 | 1960 | 1970 | 1975 | 1980 | 1990 | 2000 |  |
| Коммунальное хозяйство             | 1,6  | 3,0  | 3,2  | 5,0  | 9,7  | 14,0 | 20,3 | 30,2 | 34   |  |
| Промышленность                     | 0,6  | 0,8  | 0,8  | 1,1  | 2,0  | 3,3  | 5,7  | 6,6  | 7,0  |  |
|                                    | 1,0  | 10,0 | 15,0 | 29,1 | 70,0 | 85,0 | 110  | 122  | 130  |  |
|                                    | 0,1  | 1,0  | 1,5  | 3,1  | 5,1  | 7,8  | 13,0 | 23,5 | 34   |  |
| в том числе теплоэнергетика        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| Орошение                           | —    | —    | 0,2  | 0,4  | 1,2  | 1,7  | 2,5  | 3,7  | 6,0  |  |
|                                    | 40   | 75   | 71   | 86   | 121  | 143  | 178  | 204  | 220  |  |
| Сельскохозяйственное водоснабжение | 25   | 45   | 46   | 57   | 81   | 93   | 120  | 164  | 190  |  |
|                                    | 1,3  | 2,6  | 2,7  | 3,2  | 4,7  | 6,9  | 8,2  | 10,5 | 13,0 |  |
| Рыбное хозяйство                   | 1,2  | 2,2  | 2,2  | 2,7  | 3,8  | 5,7  | 6,8  | 8,5  | 10,6 |  |
|                                    | 0,3  | 2,0  | 2,2  | 3,4  | 4,8  | 6,0  | 7,4  | 12,9 | 17,5 |  |
| Водохранилища                      | 0,2  | 0,4  | 0,4  | 0,5  | 0,9  | 1,1  | 1,4  | 3,2  | 4,6  |  |
|                                    | 0    | 0,5  | 1,0  | 6,6  | 14,6 | 18,3 | 19,5 | 21,3 | 23,4 |  |
| Общее водопотребление (округлено)  | 44   | 93   | 95   | 133  | 225  | 273  | 343  | 400  | 440  |  |
|                                    | 28   | 50   | 52   | 71   | 107  | 129  | 166  | 226  | 270  |  |

Примечание. В числителе — полное водопотребление, в знаменателе — безвозвратные потери.

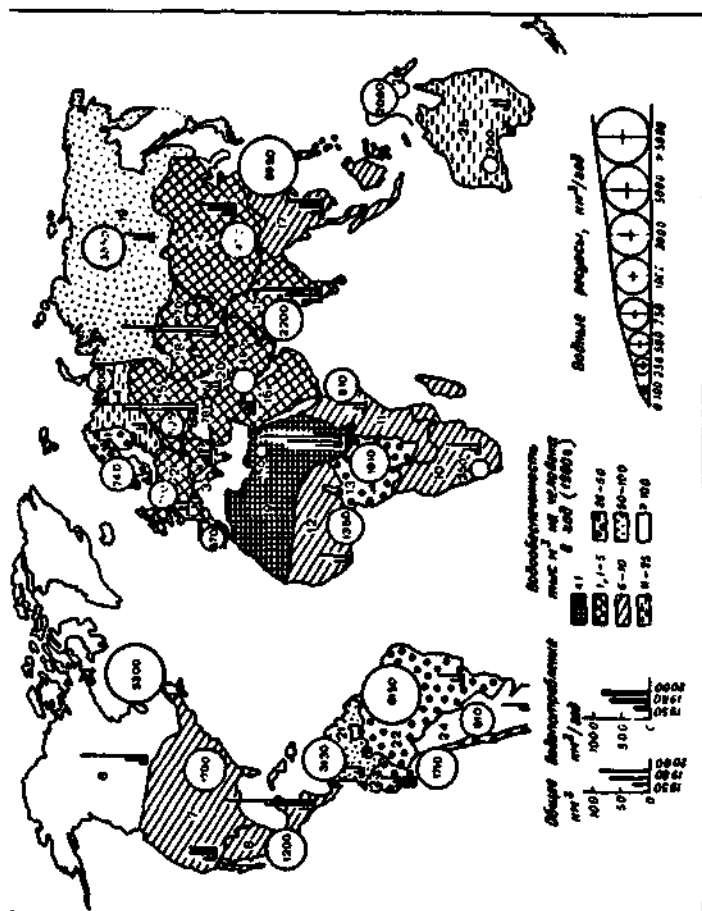


Рис. 25. Водные ресурсы и полное водопотребление по регионам мира на 1950, 1980 и 2000 гг.  
1-25 — номера регионов по табл. 16.

Таблица 16

## ДИНАМИКА ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ПО КОНТИНЕНТАМ И ПРИРОДНО-ЭКОНОМИ

| №<br>региона<br>на<br>рис. 25<br>и 26 | Континент, регион            | Средне-<br>годовой<br>сток, мм | $\frac{R_0}{LP}$ |           |           |
|---------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------|-----------|-----------|
|                                       |                              |                                |                  | 1900      | 1940      |
|                                       | Европа                       | 310                            |                  | 37,5/17,6 | 71,0/29,8 |
| 1                                     | Северная                     | 480                            | 0,6              | 1,4/0,2   | 2,8/0,3   |
| 2                                     | Центральная                  | 380                            | 0,7              | 12,8/2,7  | 21,5/4,2  |
| 3                                     | Южная                        | 320                            | 1,4              | 16,0/11,0 | 27,1/18,4 |
| 4                                     | Север ЕЧС                    | 330                            | 0,7              | 0,3/0,2   | 0,8/0,2   |
| 5                                     | Юг ЕЧС                       | 150                            | 1,5              | 6,9/3,5   | 18,8/6,7  |
|                                       | Северная Америка             | 340                            |                  | 79,4/29,3 | 221/84,0  |
| 6                                     | Канада и Аляска              | 390                            | 0,8              | 2,6/0,5   | 8,8/1,6   |
| 7                                     | США                          | 220                            | 1,5              | 54,0/20,0 | 191/68,2  |
| 8                                     | Центральная Америка          | 450                            | 1,2              | 12,8/8,8  | 20,9/14,2 |
|                                       | Африка                       | 150                            |                  | 41,0/34,0 | 49,3/39,0 |
| 9                                     | Северная                     | 17                             | 8,1              | 37,0/30,4 | 41,0/32,5 |
| 10                                    | Южная                        | 68                             | 2,5              | 1,9/1,5   | 4,4/3,5   |
| 11                                    | Восточная                    | 160                            | 2,2              | 1,0/0,8   | 2,1/1,6   |
| 12                                    | Западная                     | 190                            | 2,5              | 1,0/0,7   | 1,5/1,1   |
| 13                                    | Центральная (экваториальная) | 470                            | 0,8              | 0,1/0,05  | 0,3/0,12  |
|                                       | Азия                         | 330                            |                  | 414/323   | 682/524   |
| 14                                    | Север КНР и МНР              | 160                            | 2,2              | 53,4/42,0 | 97,0/72,7 |
| 15                                    | Южная                        | 490                            | 1,3              | 201/160   | 312/249   |
| 16                                    | Западная                     | 72                             | 2,7              | 42,8/34,0 | 68,8/54,6 |
| 17                                    | Юго-восточная                | 1090                           | 0,7              | 81,8/65,0 | 140/109   |
| 18                                    | Средняя Азия и Казахстан     | 70                             | 3,1              | 29,6/18,9 | 51,2/32,8 |
| 19                                    | Сибирь и Дальний Восток      | 230                            | 0,9              | 0,7/0,4   | 4,3/1,0   |
| 20                                    | Закавказье                   | 410                            | 1,2              | 4,2/2,1   | 8,6/4,1   |
|                                       | Южная Америка                | 660                            |                  | 15,1/11,3 | 27,7/20,6 |
| 21                                    | Северная часть               | 1230                           | 0,6              | 1,6/1,3   | 4,2/3,4   |
| 22                                    | Бразилия                     | 720                            | 0,7              | 1,1/0,52  | 2,1/0,96  |
| 23                                    | Западная                     | 740                            | 1,3              | 8,8/6,9   | 14,9/11,7 |
| 24                                    | Центральная                  | 170                            | 2,0              | 3,6/2,6   | 6,4/4,5   |
|                                       | Австралия и Океания          | 270                            |                  | 1,6/0,6   | 6,8/3,4   |
| 25                                    | Австралия                    | 39                             | 4,0              | 1,6/0,6   | 6,6/3,2   |
| 26                                    | Океания                      | 1560                           | 0,6              | 0,0/0,0   | 0,2/0,17  |
|                                       | Мир (округленно)             |                                |                  | 589/416   | 1060/700  |

Примечание. В числителе — полное водопотребление, в знаменателе — без

**ЧЕСКИМ РЕГИОНАМ МИРА ЗА 1900–2000 ГГ., км³/год**

| Год       |           |           |           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1950      | 1960      | 1970      | 1980      | 1990      | 2000      |
| 93,8/38,4 | 185/53,9  | 294/81,8  | 435/127   | 555/178   | 673/222   |
| 3,8/0,4   | 7,5/0,7   | 9,8/1,2   | 10,0/1,6  | 11,7/2,0  | 13,0/2,3  |
| 32,0/6,0  | 87,2/9,5  | 120/15,1  | 141/22,3  | 176/27,8  | 205/33,0  |
| 37,4/25,2 | 53,9/29,5 | 88,6/39,1 | 132/50,0  | 184/64,4  | 226/73,0  |
| 0,9/0,2   | 1,8/0,4   | 3,4/0,7   | 17,5/2,1  | 23,9/3,4  | 29,2/5,2  |
| 20,2/6,6  | 34,4/13,8 | 72,0/25,7 | 134/50,4  | 159/80,6  | 200/108   |
| 286/107   | 411/145   | 556/183   | 663/224   | 724/255   | 796/302   |
| 13,2/2,3  | 19,2/3,3  | 25,9/4,8  | 41,1/7,8  | 57,1/10,6 | 97,2/14,6 |
| 244/85,9  | 340/108   | 460/132   | 527/155   | 546/171   | 531/194   |
| 28,5/18,8 | 51,5/34,2 | 69,9/45,5 | 95,4/61,2 | 120/72,9  | 168/93    |
| 56,2/44,4 | 86,2/65,7 | 116/88,2  | 168/129   | 232/165   | 317/211   |
| 43,2/34,6 | 65,0/51,0 | 78,0/61,0 | 100/79,0  | 125/97,0  | 150/112   |
| 6,5/5,0   | 10,0/7,2  | 16,0/11,0 | 23,0/16,0 | 36,0/20,0 | 62,0/34,0 |
| 3,7/2,8   | 6,1/4,6   | 12,0/9,3  | 23,0/18,0 | 32,0/23,0 | 45,0/28,0 |
| 2,3/1,7   | 3,8/2,6   | 8,4/6,3   | 19,0/14,0 | 33,0/23,0 | 51,0/34,0 |
| 0,5/0,18  | 1,0/0,29  | 1,6/0,60  | 2,8/1,3   | 4,8/2,1   | 8,4/3,4   |
| 860/654   | 1220/932  | 1520/1120 | 1910/1380 | 2440/1660 | 3140/2020 |
| 141/103   | 241/178   | 316/225   | 395/270   | 527/314   | 677/360   |
| 367/293   | 429/341   | 524/412   | 668/518   | 857/638   | 1200/865  |
| 90,0/71,2 | 135/107   | 158/123   | 192/147   | 220/165   | 262/190   |
| 187/142   | 323/250   | 370/275   | 461/337   | 609/399   | 741/435   |
| 57,3/36,7 | 67,9/43,0 | 99,0/61,2 | 135/86,8  | 157/109   | 174/128   |
| 6,0/1,0   | 10,6/2,8  | 25,9/7,9  | 33,5/11,0 | 39,8/16,8 | 49,3/25,0 |
| 11,4/7,1  | 15,8/10,0 | 21,9/12,1 | 23,8/13,9 | 25,9/18,3 | 32,6/20,8 |
| 59,4/44,7 | 63,5/44,4 | 85,2/57,8 | 111/71,0  | 150/86,5  | 216/116   |
| 6,4/5,0   | 7,7/5,8   | 11,3/8,3  | 15,4/11,0 | 23,2/15,5 | 32,9/19,5 |
| 3,0/1,15  | 7,3/3,0   | 12,1/5,6  | 23,2/10,3 | 33,0/14,1 | 48,1/20,8 |
| 36,7/29,0 | 32,5/25,1 | 35,8/27,3 | 40,0/29,9 | 45,3/32,5 | 64,5/44,4 |
| 13,3/9,6  | 16,0/10,5 | 26,0/16,6 | 32,6/19,7 | 48,1/24,4 | 70,3/31,3 |
| 10,3/5,1  | 17,4/9,0  | 23,3/11,9 | 29,4/14,6 | 37,6/17,4 | 46,8/22,0 |
| 9,7/4,7   | 16,5/8,4  | 21,9/11,1 | 27,0/13,1 | 34,3/15,6 | 42,3/19,7 |
| 0,6/0,4   | 0,9/0,6   | 1,35/0,8  | 2,4/1,5   | 3,3/1,8   | 4,5/2,3   |
| 1360/894  | 1990/1250 | 2590/1540 | 3320/1950 | 4130/2360 | 5190/2900 |

возвратное.

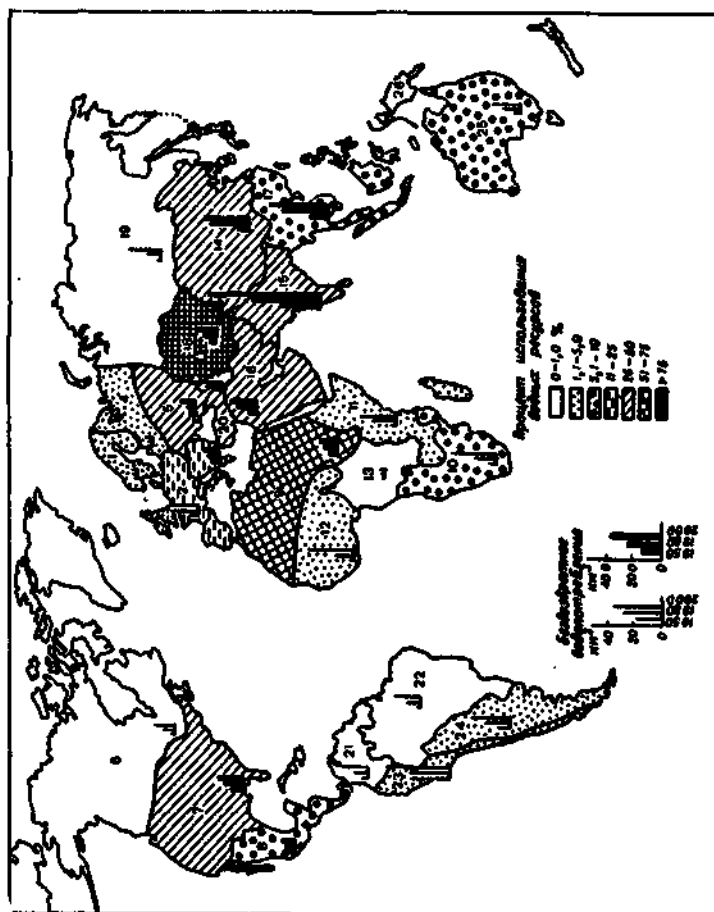


Рис. 26. Безвозвратное водопотребление по регионам мира на 1950, 1980 и 2000 гг.  
1-26 – номера регионов по табл. 16

**Таблица 17**  
**ДИНАМИКА ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ В МИРЕ ПО ВИДАМ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, км<sup>3</sup>/год**

| Водопотребитель                         | Год  |      |      |      |      |         |      |      |         |      |
|-----------------------------------------|------|------|------|------|------|---------|------|------|---------|------|
|                                         | 1980 |      |      |      |      | 2000    |      |      |         |      |
|                                         | 1900 | 1940 | 1960 | 1970 | 1975 | км³/год | %    | 1950 | км³/год | %    |
| Площади орошения,<br>млн. га            | 47,3 | 75,8 | 101  | 142  | 173  | 192     | 217  | 272  | 347     |      |
| Сельское хозяйство                      | 525  | 893  | 1130 | 1550 | 1850 | 2050    | 2290 | 2680 | 3250    | 82,6 |
|                                         | 409  | 679  | 859  | 1180 | 1400 | 1570    | 1730 | 2050 | 2500    | 86,2 |
| Промышленность                          | 37,2 | 124  | 178  | 330  | 540  | 612     | 710  | 973  | 1280    | 24,7 |
|                                         | 3,5  | 9,7  | 14,5 | 24,9 | 38,0 | 47,2    | 61,9 | 88,5 | 117     | 4,0  |
| Коммунальное<br>хозяйство               | 16,1 | 36,3 | 52,0 | 82,0 | 130  | 161     | 200  | 300  | 441     | 8,5  |
|                                         | 4,0  | 9,0  | 14   | 20,3 | 29,2 | 34,3    | 41,1 | 52,4 | 64,5    | 2,2  |
| Водохранилища                           | 0,3  | 3,7  | 6,5  | 23,0 | 66,0 | 103     | 120  | 170  | 220     | 4,2  |
|                                         | 0,3  | 3,7  | 6,5  | 23,0 | 66,0 | 103     | 120  | 170  | 220     | 7,6  |
| Общее водопотреб-<br>ление (округленно) | 579  | 1060 | 1360 | 1980 | 2580 | 2930    | 3320 | 4130 | 5190    | 100  |
|                                         | 417  | 701  | 894  | 1250 | 1540 | 1780    | 1950 | 2360 | 2900    | 100  |

**П р и м е ч а н и е.** В числителе — полное потребление, в знаменателе — безвозвратное.

Таблица 18

## СУММАРНЫЙ ГОДОВОЙ СТОК МИРА И ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕ

| №<br>региона<br>на<br>рис. 25<br>и 26 | Континент, регион     | Средний<br>годовой<br>сток,<br>км³ | Водопотребление, км³ |       |         |       | Водопоглощение, % от стока |       |         |       |
|---------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------------|-------|---------|-------|----------------------------|-------|---------|-------|
|                                       |                       |                                    | 1980                 |       | 2000 г. |       | 1980 г.                    |       | 2000 г. |       |
|                                       |                       |                                    | полн.                | безв. | полн.   | безв. | полн.                      | безв. | полн.   | безв. |
|                                       |                       |                                    | полн.                | безв. | полн.   | безв. | полн.                      | безв. | полн.   | безв. |
| Европа                                |                       |                                    |                      |       |         |       |                            |       |         |       |
| 1                                     | Северная              | 3210                               | 435                  | 127   | 673     | 222   | 13,6                       | 3,9   | 20,9    | 6,9   |
| 2                                     | Центральная           | 737                                | 9,9                  | 1,6   | 13,3    | 2,3   | 1,3                        | 0,2   | 1,8     | 0,3   |
| 3                                     | Южная                 | 705                                | 141                  | 22,3  | 205     | 33,3  | 20                         | 3,2   | 29,1    | 4,7   |
| 4                                     | Север ЕС              | 584                                | 132                  | 50,6  | 226     | 73,1  | 23,4                       | 8,9   | 39,9    | 12,9  |
| 5                                     | Юг ЕС                 | 601                                | 17,5                 | 2,1   | 29,2    | 5,2   | 2,9                        | 0,4   | 4,9     | 0,9   |
|                                       |                       | 525                                | 134                  | 50,4  | 200     | 108   | 25,5                       | 9,6   | 38,1    | 20,6  |
| Северная Америка                      |                       |                                    |                      |       |         |       |                            |       |         |       |
| 6                                     | Канада и Аляска       | 8200                               | 663                  | 224   | 796     | 302   | 8,1                        | 2,7   | 9,7     | 3,7   |
| 7                                     | США                   | 5300                               | 41                   | 8     | 97      | 15    | 0,8                        | 0,2   | 1,8     | 0,3   |
| 8                                     | Центральная Америка   | 1700                               | 527                  | 155   | 531     | 194   | 31                         | 9,1   | 31      | 11,4  |
|                                       |                       | 1200                               | 95                   | 61    | 168     | 83    | 7,9                        | 5,1   | 14      | 7,8   |
| Африка                                |                       |                                    |                      |       |         |       |                            |       |         |       |
| 9                                     | Северная              | 4570                               | 168                  | 129   | 317     | 211   | 3,7                        | 2,8   | 6,9     | 4,6   |
| 10                                    | Южная                 | 154                                | 100                  | 79    | 150     | 112   | 64,9                       | 51,3  | 97,4    | 72,7  |
| 11                                    | Восточная             | 349                                | 23                   | 16    | 63      | 34    | 6,6                        | 4,6   | 18,0    | 9,7   |
| 12                                    | Западная              | 809                                | 23                   | 18    | 45      | 28    | 2,8                        | 2,2   | 5,6     | 3,5   |
| 13                                    | Центральная           | 1350                               | 19                   | 14    | 51      | 34    | 1,4                        | 1,0   | 3,8     | 2,5   |
|                                       |                       | 1909                               | 2,8                  | 1,3   | 8,4     | 3,4   | 0,2                        | 0,1   | 0,4     | 0,2   |
|                                       | Азия                  | 14410                              | 1910                 | 1380  | 3140    | 2020  | 13,3                       | 9,6   | 21,8    | 14,1  |
| 14                                    | Сев. Китай и Монголия | 1470                               | 395                  | 270   | 677     | 360   | 26,9                       | 18,4  | 46,1    | 24,5  |
| 15                                    | Южная                 | 2200                               | 668                  | 518   | 1200    | 865   | 30,4                       | 23,5  | 54,6    | 39,3  |

|    |                          |       |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----|--------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 16 | Западная                 | 490   | 192  | 147  | 262  | 190  | 39,2 | 30   | 53,5 | 38,8 |
| 17 | Юго-Восточная            | 6650  | 461  | 337  | 741  | 435  | 6,9  | 5,1  | 11,1 | 6,5  |
| 18 | Средняя Азия и Казахстан | 170   | 136  | 87   | 174  | 128  | 79,4 | 51,2 | 102  | 75,3 |
| 19 | Сибирь и Дальний Восток  | 3350  | 34   | 11   | 49   | 25   | 1,0  | 0,3  | 1,5  | 0,8  |
| 20 | Закавказье               | 78    | 24   | 14   | 33   | 21   | 30,8 | 17,9 | 42,3 | 26,9 |
|    | Южная Америка            | 11760 | 111  | 71,0 | 216  | 116  | 0,9  | 0,6  | 1,8  | 0,9  |
| 21 | Северная                 | 3126  | 15,4 | 11,0 | 32,9 | 19,5 | 0,5  | 0,4  | 1,1  | 0,6  |
| 22 | Бразилия                 | 6148  | 23,2 | 10,3 | 48,1 | 20,8 | 0,4  | 0,2  | 0,8  | 0,3  |
| 23 | Западная                 | 1714  | 40   | 30,2 | 64,5 | 44,4 | 2,3  | 1,8  | 3,8  | 2,6  |
| 24 | Центральная              | 812   | 32,8 | 19,7 | 70,3 | 31,3 | 4,0  | 2,4  | 8,6  | 3,9  |
|    | Австралия и Океания      | 2390  | 29,4 | 14,6 | 46,8 | 22,0 | 1,2  | 0,6  | 1,9  | 0,9  |
| 25 | Австралия                | 301   | 27   | 13,1 | 42,3 | 19,7 | 8,9  | 4,4  | 13,1 | 6,5  |
| 26 | Океания                  | 2090  | 2,4  | 1,5  | 4,5  | 2,3  | 0,1  | 0,1  | 0,2  | 0,1  |
|    | Суша в целом             | 44540 | 3320 | 1450 | 5190 | 2800 | 7,5  | 3,3  | 11,6 | 6,5  |

Примечания. полн. — полное, безв. — безвозвратное.



(полное водопотребление на 1980 г., отнесенное к естественным водным ресурсам региона).

На рис. 25 и 26 наглядно видна неравномерность в распределении водопотребления и водообеспеченности по территории Земли и их несоответствие с распределением естественных водных ресурсов.

Роль отдельных видов хозяйственной деятельности в динамике общего и безвозвратного водопотребления в мире, а также рост орошаемых площадей приведены в табл. 17, аналогичные данные для каждого континента приведены в работе /87/.

На современном уровне 69 % полного и 89 % безвозвратного водопотребления в мире приходится на сельское хозяйство. В перспективе относительное значение водопотребления в сельском хозяйстве несколько уменьшится в основном за счет увеличения промышленного водопотребления. В суммарных безвозвратных потерях воды в мире заметную роль играет дополнительное испарение с водохранилищ, оно превышает безвозвратное водопотребление промышленностью и коммунальным хозяйством вместе взятыми. По уточненным данным, площадь орошения в мире в 1980 г. составляла 217 млн. га, к концу столетия ожидается увеличение ее до 350 млн. га.

На основе полученных и приведенных в табл. 16 данных выполнено сопоставление современных и перспективных объемов водопотребления по отдельным регионам и континентам с возобновляемыми ресурсами поверхностных вод, выраженными в виде суммарного годового стока рек. Результаты такого сопоставления приведены в табл. 18. Как следует из этой таблицы, для всего земного шара суммарное водопотребление на хозяйственные нужды на 1980 г. составляло 7,5 % общего стока рек; предполагается, что к 2000 г. это значение возрастет до 11,6 %. Указанные значения современного и даже перспективного водопотребления относительно суммарного стока рек мира в общем невелики. Однако водные ресурсы в мире распределены крайне неравномерно, что видно уже при сопоставлении водопотребления и речного стока в среднем по континентам. В настоящее время в Европе и Азии объем водопотребления уже составляет более 13 %, а в недалекой перспективе достигнет 20–25 %. В то же время, например, в Южной Америке используется лишь 0,9 % ресурсов речного стока и в перспективе до конца столетия это значение вряд ли превысит 1,8–2,0 %.

Еще большая неравномерность распределения стока рек и водопотребления имеет место внутри отдельных континентов; во многих крупных регионах мира уже к настоящему времени полное водопотребление составляет 20–65 % годового стока рек (Северная Африка, Средняя Азия, и Казахстан, Западная и Южная Азия, Закавказье, США, Южная и Центральная Европа, юг Европейской части СССР), а в перспективе до конца столетия достигнет 40–100 %, т. е. в некоторых регионах мира практически полностью будет потребляться весь речной сток (табл. 18).

Для количественной оценки изменений водных ресурсов под влиянием

водопотребление, которое непосредственно характеризует объем дополнительных потерь воды (в основном на испарение) в том или ином регионе. По данным табл. 18, современное безвозвратное водопотребление в среднем для Земли и для отдельных континентов относительно невелико и изменяется от 0,6 % (Южная Америка) до 9,6 % (Азия) суммарного годового стока рек; к 2000 г. ожидается увеличение этих значений примерно в 1,5 раза. Однако для отдельных регионов внутри континентов изменчивость указанных значений намного больше и колеблется от 0,07 до 50 % для современного периода и от 0,18 до 75 % для 2000 г. (табл. 18).

Неравномерность распределения водных ресурсов по территории земного шара и их несогласованность с размещением населения и экономики особенно выявляются при сравнении за одни и те же периоды удельной водообеспеченности отдельных регионов на одного жителя. На каждый расчетный уровень удельная (на одного жителя) водообеспеченность регионов определялась путем деления суммарного речного стока региона за вычетом объема безвозвратного водопотребления на число жителей. Последнее определено по данным ФАО и имеющимся прогнозам /87/. Таким образом, под водообеспеченностью понимается остаточное количество воды, которое после использования приходится на одного жителя; т. е. если все ресурсы пресной воды полностью безвозвратно используются на хозяйственные нужды, то удельная водообеспеченность близка к нулю. Полученные значения удельной водообеспеченности (в тыс. м<sup>3</sup>/год на 1 жителя) представлены для всех регионов и континентов Земли на уровни 1950, 1960, 1970, 1980 и 2000 гг. в табл. 19. Для анализа их удобно сгруппировать по следующим градациям (в тыс. м<sup>3</sup>/год на 1 жителя):  $\leq 1$  — чрезвычайно низкая удельная водообеспеченность; 1,1–2,0 — очень низкая; 2,1–5,0 — низкая; 5,1–10,0 — средняя; 10,1–20,0 — выше средней; 20,1–50 — высокая; 50 — очень высокая.

В 1950 г. (табл. 19) на большей части земного шара водообеспеченность была средней или выше и только в Северной Африке, Центральной и Южной Европе, в Китае и Южной Азии водообеспеченность была низкой (от 2,1 до 5,0 тыс. м<sup>3</sup>/год на 1 жителя); ни в одном регионе мира не было очень низкой или чрезвычайно низкой водообеспеченности.

В 1980 г. водообеспеченность резко уменьшилась во многих регионах мира, она стала чрезвычайно низкой в Северной Африке, очень низкой — в Северном Китае и Монголии, в Средней Азии, Азии и Казахстане, низкой — еще в шести регионах мира (табл. 19).

К концу столетия из 26 выделенных регионов мира чрезвычайно низкая водообеспеченность ожидается в двух (Северная Африка, Средняя Азия и Казахстан), очень низкая — в трех (Северный Китай и Монголия, Южная и Западная Азия), низкая — в семи (Центральная и Южная Европа, юг ЕТС, Юго-Восточная Азия, Западная, Восточная и Южная Африка), В то же время во все рассмотренные периоды имеет место высокая или очень высокая водообеспеченность в Северной Европе, на севере Европейской части СССР, в Канаде и Аляске, почти во всей Южной Америке,

Таблица 19

**ДИНАМИКА ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ РАЙОНОВ МИРА,  
тыс. м<sup>3</sup> /год НА 1 ЖИТЕЛЯ**

| №<br>региона<br>на<br>рис. 25<br>и 26 | Континент,<br>регион         | Площадь,<br>млн. км <sup>2</sup> | Год  |      |      |      |      |
|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|------|------|------|------|------|
|                                       |                              |                                  | 1950 | 1960 | 1970 | 1980 | 2000 |
|                                       | Европа                       | 10,28                            | 5,9  | 5,4  | 4,9  | 4,6  | 4,1  |
| 1                                     | Северная                     | 1,32                             | 39,2 | 36,5 | 33,9 | 32,7 | 30,9 |
| 2                                     | Центральная                  | 1,86                             | 3,0  | 2,8  | 2,6  | 2,4  | 2,3  |
| 3                                     | Южная                        | 1,76                             | 3,8  | 3,5  | 3,1  | 2,8  | 2,5  |
| 4                                     | Север ЕТС                    | 1,82                             | 33,8 | 29,2 | 26,3 | 24,1 | 20,9 |
| 5                                     | Юг ЕТС                       | 3,52                             | 4,4  | 4,0  | 3,6  | 3,2  | 2,4  |
|                                       | Северная Америка             | 24,16                            | 37,2 | 30,2 | 25,2 | 21,3 | 17,5 |
| 6                                     | Канада и Аляска              | 13,67                            | 384  | 294  | 246  | 219  | 189  |
| 7                                     | США                          | 7,83                             | 10,6 | 8,8  | 7,6  | 6,8  | 5,6  |
| 8                                     | Центральная                  | 2,67                             | 22,7 | 17,2 | 12,5 | 9,4  | 7,1  |
|                                       | Африка                       | 30,1                             | 20,6 | 16,5 | 12,7 | 9,4  | 5,1  |
| 9                                     | Северная                     | 8,78                             | 2,3  | 1,6  | 1,1  | 0,69 | 0,21 |
| 10                                    | Южная                        | 5,11                             | 12,2 | 10,3 | 7,6  | 5,7  | 3,0  |
| 11                                    | Восточная                    | 5,17                             | 15,0 | 12,0 | 9,2  | 6,9  | 3,7  |
| 12                                    | Западная                     | 6,96                             | 20,5 | 16,2 | 12,4 | 9,2  | 4,9  |
| 13                                    | Центральная                  | 4,08                             | 92,7 | 79,5 | 59,1 | 46,0 | 25,4 |
|                                       | Азия                         | 44,56                            | 9,6  | 7,9  | 6,1  | 5,1  | 3,3  |
| 14                                    | Северный Китай<br>и Монголия | 9,14                             | 3,8  | 3,0  | 2,3  | 1,9  | 1,2  |
| 15                                    | Южная                        | 4,49                             | 4,1  | 3,4  | 2,5  | 2,1  | 1,1  |
| 16                                    | Западная                     | 6,82                             | 6,3  | 4,2  | 3,3  | 2,3  | 1,3  |
| 17                                    | Юго-Восточная                | 7,17                             | 13,2 | 11,1 | 8,6  | 7,1  | 4,9  |
| 18                                    | Средняя Азия<br>и Казахстан  | 2,43                             | 7,5  | 5,5  | 3,3  | 2,0  | 0,7  |
| 19                                    | Сибирь<br>и Дальний Восток   | 14,32                            | 124  | 112  | 102  | 96,2 | 85,3 |
| 20                                    | Закавказье                   | 0,19                             | 8,8  | 6,9  | 5,4  | 4,5  | 3,0  |
|                                       | Южная Америка                | 17,85                            | 105  | 80,2 | 61,7 | 48,8 | 28,3 |
| 21                                    | Северная                     | 2,55                             | 179  | 128  | 94,8 | 72,9 | 37,4 |
| 22                                    | Бразилия                     | 8,51                             | 115  | 86   | 64,5 | 50,3 | 32,2 |
| 23                                    | Западная                     | 2,33                             | 97,9 | 77,1 | 58,6 | 45,8 | 25,7 |
| 24                                    | Центральная                  | 4,46                             | 34   | 27,8 | 23,9 | 20,5 | 10,4 |
|                                       | Австралия<br>и Океания       | 8,95                             | 112  | 91,3 | 74,6 | 64   | 50   |
| 25                                    | Австралия                    | 7,62                             | 35,7 | 28,4 | 23,0 | 19,8 | 15,0 |
| 26                                    | Океания                      | 1,34                             | 161  | 132  | 108  | 92,4 | 73,5 |

деятельности человека особенно важно знать не полное, а безвозвратное в Центральной Африке, в Сибири и Дальнем Востоке, в Океании. При этом важно отметить, что динамика водообеспеченности такова, что интенсивность ее уменьшения особенно значительна в районах с малой водообеспеченностью, т. е. где есть дефицит водных ресурсов. Например, в наименее водообеспеченных регионах (в Средней Азии и Казахстане, а также в Северной Африке) за 1950–2000 гг. водообеспеченность уменьшится в 11 раз, а в наиболее водообеспеченных (Сибирь и Дальний Восток, Северная Европа, Канада и Аляска, Центральная Африка) за тот же период только в 1,5–5 раз. Таким образом, имеющая место на Земле очень большая естественная неравномерность в распределении водообеспеченности со временем за счет хозяйственной деятельности человека увеличивается еще больше, причем весьма быстрыми темпами. В связи с этим актуальность проблемы территориального перераспределения водных ресурсов в глобальном масштабе со временем значительно возрастет.

В заключение, следует отметить, что приведенные выше значения водных ресурсов и объемы водопотребления рассчитаны на перспективу исходя из предположения стационарности климатических колебаний и характерны для средних климатических условий каждого региона, т. е. принималось, что возможные в перспективе до 2000 г. антропогенные изменения климата в глобальном масштабе будут незначительными.

### КЛИМАТ И ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ

Речной сток или возобновляемые водные ресурсы, обеспечивающие основные потребности человека в пресной воде, как известно, в очень значительной степени изменяются по территории и во времени в зависимости в первую очередь от пространственной и временной изменчивости климатических характеристик. Это обуславливает тесную взаимосвязь проблем обеспечения человечества пресной водой с проблемами естественных и антропогенных изменений климата; причем эта взаимосвязь имеет свои особенности в естественных условиях и в период интенсивного воздействия человека на гидрологический цикл.

Проблема взаимодействия климата и водных ресурсов приобретает особую остроту, научную и практическую значимость в последние годы, когда уже на ближайшую перспективу климатологи прогнозируют такие антропогенные изменения глобального климата, каких по своим масштабам не знало прошлое нашей Земли на протяжении многих тысячелетий.

В настоящей главе, подготовленной главным образом по результатам последних исследований ГГИ, рассматривается (в основном в глобальном аспекте) взаимодействие климатических характеристик и водных ресурсов в естественных условиях и при интенсивном хозяйственном использовании вод; приводятся также современные представления об антропогенных изменениях глобального климата и анализируются возможности их воздействия на водные ресурсы будущего.

#### 6.1. Климатические и гидрологические характеристики при естественном гидрологическом цикле

Более 100 лет назад известный русский климатолог и географ А. И. Воейков в своей книге „Климаты земного шара” впервые высказал и обосновал ныне ставшее хрестоматийным положение о том, что реки и озера, все пресные природные воды являются продуктами климата.

Представление о главенствующей роли климата (наряду с ландшафтом, который также в значительной мере определяется климатом) в формировании поверхностных и подземных водных ресурсов составляет прочный теоретический фундамент, на котором выросла и развивалась современная гидрологическая наука.

Тесное взаимодействие климатических и гидрологических характеристик обусловило создание в ряде стран (например, в СССР почти 50 лет назад) единых гидрометеорологических служб, позволяющих в рамках одного ведомства по взаимно согласованным программам осуществлять наблюдения за различными элементами гидрологического цикла, для изучения его динамики в различных пространственных и временных мас-

штабах, для более полного и качественного обеспечения народного хозяйства гидрометеорологической информацией. И хотя, как известно, до сих пор далеко не всеми специалистами признается целесообразность такого объединения, как показывает опыт СССР, функционирование в течение многих десятилетий единых гидрометеорологических сетей, согласованных по территории, составу и по срокам наблюдений метеорологических и гидрологических данных, позволяет наиболее обоснованно подойти к оценке водных ресурсов в различных условиях и к решению острой современной проблемы обеспечения человечества пресной водой.

Тесная взаимосвязь между климатическими и гидрологическими характеристиками оказалась особенно полезной для количественной оценки водных ресурсов в начальный период развития гидрологии в условиях крайней недостаточности гидрологических наблюдений и значительно более полной метеорологической изученности территорий; в тот период необходимые характеристики речного стока обычно рассчитывались по метеорологическим данным. При этом в качестве методической основы использовалось уравнение водного баланса бассейна за многолетний период (1) с определением испарения с суши по формулам Р. Шрейбера (2) и (3), Э. М. Ольдекопа и М. И. Будыко (4) — (8).

В современных условиях, когда в мире существует достаточно густая сеть гидрометрических наблюдений на малых и больших реках, насчитывающая десятки тысяч створов, естественно, более надежно количественная оценка водных ресурсов тех или иных регионов производится непосредственно по данным наблюдений за стоком с использованием методов осреднения или гидрологического картирования. Именно таким образом были оценены водные ресурсы отдельных регионов всех континентов и Земли в целом в монографии советских ученых „Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли“, опубликованной в 1974 г. /60/ одновременно с упомянутой выше монографией Баумгартнера и Рейхела /92/.

Естественные водные ресурсы в виде среднегодового за многолетний период суммарного слоя речного стока, определенные для каждого природно-экономического региона Земли по данным, приведенным в работе /60/, представлены в табл. 16 (см. главу 5). Анализ данных показал, что они очень хорошо отражают основные климатические параметры регионов и имеют вполне надежную зависимость от показателя индекса сухости в виде  $R_0/(LP)$  (рис. 27). Последний был определен для каждого региона приближенно с использованием наиболее детальных мировых карт радиационного баланса и осадков /14, 60/. Границы природно-экономических регионов показаны на рис. 25 и 26, значения индекса сухости для каждого из них приведены в табл. 16.

В соответствии с данными рис. 27 естественные водные ресурсы любого региона в основном определяются климатическими факторами; наибольшему индексу сухости соответствует наименьшее значение водных ресурсов региона, и наоборот, причем характер зависимости (рис. 27) в полной мере отвечает уравнению (7).

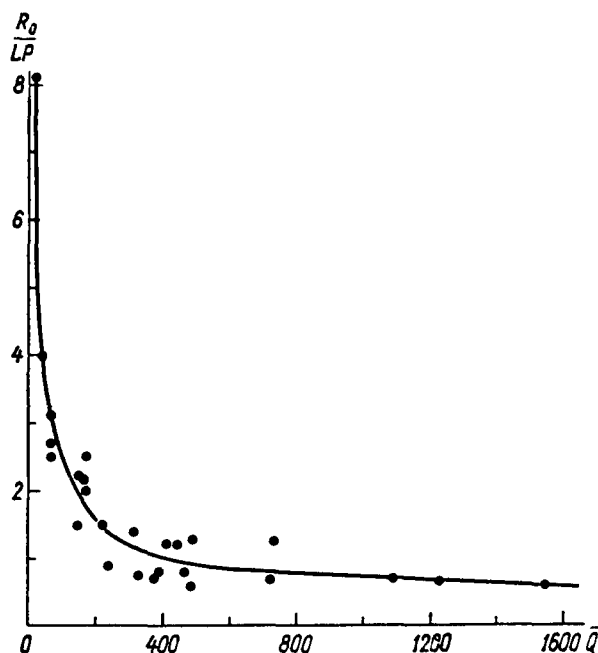


Рис. 27. Зависимость среднего многолетнего речного стока природно-экономических регионов мира от индекса сухости.

Отметим, что климат, и в частности индекс сухости, определяет не только общее количество водных ресурсов, но и, что не менее важно, их изменчивость во времени и пространстве. Как правило, чем больше общее значение водных ресурсов региона, тем меньше ее временная изменчивость (от года к году и внутри года). Значения водных ресурсов, соответствующие наибольшим индексам сухости, обычно имеют очень большую изменчивость от года к году и по сезонам года и крайне неравномерно распределены по территории.

Не только метеорологические данные широко используются для решения гидрологических задач. Развитие гидрологии, безусловно, также во многом способствовало углублению метеорологических знаний, особенно по таким ее элементам, как атмосферные осадки, испарение, влагооборот в атмосфере и др. Хорошо известен большой вклад гидрологических данных в корректировку измеренных атмосферных осадков. Как уже указывалось выше, при наличии детальной гидрологической информации и данных по осадкам строятся наиболее надежные карты многолетних значений суммарного испарения с суши. В немалой степени гидрологические данные используются для детализации моделей глобального климата, а изучение многолетних колебаний водного режима рек и озер способствует решению современных проблем, связанных с антропо-

генным изменением климата.

Современные запросы практики, связанные с необходимостью совершенствования и повышения надежности гидрологических расчетов и прогнозов, естественно, не могут быть удовлетворены использованием водного баланса земной поверхности в упрощенной интегральной форме, а именно в виде уравнений (1) или (7). Для более детального и глубокого изучения гидрологического цикла с использованием математических моделей все процессы обычно рассматриваются в динамике для всех четырех взаимосвязанных зон: для атмосферного звена, для поверхностной зоны, зоны аэрации и зоны насыщения. Такой подход позволяет успешно решать различного рода гидрологические задачи с использованием метеорологической информации.

Большой практический и научный интерес представляет, например, широкое использование аэрологических данных для решения гидрологических задач, связанных с определением водного баланса крупных регионов.

Для атмосферного звена гидрологического цикла уравнение водного баланса региона может быть представлено в виде

$$\overline{\nabla F} - \overline{\Delta W} = (\overline{P} - \overline{E}), \quad (12)$$

где  $\overline{\nabla F}$  — дивергенция потока водяного пара в атмосфере;  $\overline{\Delta W}$  — изменение влагосодержания атмосферы.

Таким образом, осредненное над рассматриваемой территорией значение  $(\overline{P} - \overline{E})$ , или так называемый климатический сток, определяется изменением массы атмосферной влаги  $\overline{\Delta W}$ , заключенной в рассматриваемом объеме атмосферы, и разностью между ее притоком и выносом. Составляющие левой части уравнения (12) определяются по аэрологической информации.

Как известно, для конкретного региона для ограниченного периода времени уравнение водного баланса (1) может быть представлено в виде

$$\overline{Y} + \overline{\Delta S} = (\overline{P} - \overline{E}), \quad (13)$$

где  $\overline{\Delta S}$  — изменение поверхностных и внутрисочвенных влагозапасов.

Очевидно, что совместное решение уравнений водного баланса (12) и (13) с использованием данных наземной сети и аэрологической информации позволяет определять различные компоненты уравнений, в том числе такие трудноопределяемые величины, как  $\overline{E}$  и  $\overline{\Delta S}$ , что может иметь весьма большое практическое значение.

Для многолетнего периода годовой баланс влаги в системе „атмосфера — гидросфера суши” выражается уравнением

$$(\Sigma F^+ - \Sigma F^-) - \overline{P} + \overline{E} = 0, \quad (14)$$

где



$$(\overline{\Sigma F}^+ - \overline{\Sigma F}^-) = \overline{\nabla F} \quad (15)$$

— дивергенция потока влаги, выражённая как разность между притоком ( $\overline{\Sigma F}^+$ ) и выносом ( $\overline{\Sigma F}^-$ ) атмосферной влаги с изучаемой территории.

Как известно, общий вынос атмосферной влаги состоит из приходящей транзитом над исследуемой территорией влаги преимущественно океанического происхождения  $F_a$  и влаги, обусловленной испарением с подстилающей поверхности региона  $F_e$ , т. е.

$$\Sigma F^- = F_a + F_e. \quad (16)$$

В СССР в последние годы накоплен достаточный опыт расчетов элементов водного баланса крупных регионов по уравнениям (12) — (14) с использованием аэрологической и наземной гидрометеорологической информации. Особенно детальные расчеты выполнены в ГГИ Н. Г. Самбуком для Европейской части СССР и бассейна р. Волги, где имеется достаточно густая сеть аэрологических пунктов наблюдений. Для Европейской части СССР использовано 43 станции за период 1961—1970 гг. Расчеты значений коэффициента влагооборота ( $K_{вл}$ ), адвективных ( $P_a$ ) и местных ( $P_e$ ) осадков производились по рекомендациям О. А. Дроздова /37/.

Данные расчетов элементов влагооборота и водного баланса Европейской части СССР (по месяцам) за указанное десятилетие приведены в табл. 20. Приведенные результаты показывают реальную возможность определения с приемлемой точностью годового стока на основе аэрологических данных. Сравнение среднегодовых значений  $(P - E)$ , полученных аэрологическим методом, и среднегодовых значений речного стока  $\bar{Y}$  за один и тот же период для Европейской части в целом и для бассейна р. Волги дало отклонение соответственно 8 и 5% (табл. 20, 211 и 195 мм).

Таблица 20

**ЭЛЕМЕНТЫ ВЛАГООБОРОТА И ВОДНОГО БАЛАНСА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ**

| Элемент                                             | I     | II    | III   | IV    | V     | VI    |
|-----------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\overline{\Sigma F}^+ \text{ км}^3$                | 576   | 475   | 514   | 560   | 810   | 902   |
| $\overline{\Sigma F}^- \text{ км}^3$                | 417   | 327   | 361   | 500   | 730   | 966   |
| $\overline{\nabla F} \text{ мм}$                    | 33,6  | 31,3  | 32,3  | 12,7  | 16,9  | -13,5 |
| $\overline{\Delta W} \text{ мм}$                    | -1,7  | 0,0   | 1,4   | 3,3   | 5,3   | 4,8   |
| $\overline{(P - E)} \text{ мм}$                     | 35,3  | 31,3  | 30,9  | 9,4   | 11,6  | -18,3 |
| $\bar{P} \text{ мм}$                                | 35,5  | 31,5  | 31,7  | 35,1  | 57,0  | 68,6  |
| $\bar{E} = \bar{P} - \overline{(P - E)} \text{ мм}$ | 0,2   | 0,2   | 0,3   | 25,7  | 45,4  | 86,9  |
| $K_{вл}$                                            | 1,001 | 1,001 | 1,003 | 1,109 | 1,146 | 1,228 |
| $\bar{P}_a \text{ мм}$                              | 35,5  | 31,5  | 31,6  | 31,6  | 49,7  | 55,9  |
| $\bar{P}_e \text{ мм}$                              | 0,0   | 0,0   | 0,1   | 3,5   | 7,3   | 12,7  |
| $\bar{F}_a \text{ км}^3$                            | 416   | 326   | 357   | 394   | 550   | 614   |
| $\bar{F}_e \text{ км}^3$                            | 1     | 1     | 4     | 106   | 180   | 352   |
| $\bar{Y} \text{ мм}$                                | 6,5   | 6,1   | 7,9   | 17,7  | 47,6  | 39,0  |
| $\overline{\Delta S} \text{ мм}$                    | 28,8  | 25,2  | 23,0  | -8,3  | -36,0 | -57,3 |

С помощью уравнения (12) выполнена и обратная задача: расчет осадков. Сопоставление измеренных осадков (по данным достаточно густой сети осадкомерных станций) с рассчитанными „аэрологическими методами” свидетельствует о достаточно хорошей их сходимости (коэффициент корреляции  $r = 0,97$ ).

Из расчета элементов водного баланса за 10-летний период получен вывод, что в среднем за год из  $9340 \text{ км}^3$  влаги, поступающей на Европейскую часть СССР, 50 % приходится на западную составляющую, 30 % — на южную и 13 и 7 % — соответственно на восточную и северную. Суммарный вынос атмосферной влаги ( $8340 \text{ км}^3$ ), повторяя в общих чертах годовой ход притока, по границам региона распределен следующим образом: 18 % — через западную границу, 8 % — через северную, 52 % — через восточную и 22 % — через южную. Приток и вынос определяют, естественно, особенности формирования водного режима Европейской части СССР. Таким образом, по расчетам Самбука, количество влаги, проходящей транзитом за год над регионом, составляет значение, почти в 4 раза большее, чем атмосферный сток. Соотношение речного и атмосферного стока ( $\bar{Y}/\bar{F}_e$ ) в целом за год составляет 0,56, а соотношение речного стока и атмосферного притока ( $\bar{Y}/\bar{\Sigma F}^+$ ) равно 0,10, т. е. в виде наземного стока реализуется лишь 10 % адвективной атмосферной влаги, что в общем и определяется коэффициентом влагооборота.

В табл. 20 представлены полученные по аэрологическим данным среднемесячные значения суммарного испарения  $\bar{E}$  и изменений влагозапасов  $\Delta S$ . Суммарное испарение имеют четко выраженный годовой ход с максимумом в июле (107 мм) и минимумом в зимний период; годовое суммарное испарение (434 мм) и его распределение внутри года в общем очень неплохо соответствует значениям, получаемым по существующим расчетным методам, основанным на наземной информации.

#### СССР (1961—1970 гг.)

| VII   | VIII  | IX    | X     | XI    | XII   | IV—X  | XI—III | Год   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 988   | 1074  | 1027  | 934   | 840   | 640   | 6295  | 3045   | 9340  |
| 1034  | 1091  | 967   | 827   | 598   | 473   | 6165  | 2176   | 8341  |
| -20,3 | -3,6  | 12,7  | 22,6  | 51,1  | 35,3  | 27,5  | 183,6  | 211,1 |
| 5,5   | -2,3  | -6,2  | -1,9  | -2,8  | -2,4  | 5,5   | -5,5   | 0,0   |
| -25,8 | -1,3  | 18,9  | 27,5  | 53,9  | 37,7  | 22,0  | 189,1  | 211,1 |
| 80,9  | 75,6  | 64,6  | 63,8  | 60,6  | 39,7  | 445,6 | 199,0  | 644,6 |
| 106,7 | 76,9  | 45,7  | 36,3  | 6,7   | 2,0   | 423,6 | 9,9    | 433,5 |
| 1,256 | 1,170 | 1,106 | 1,022 | 1,019 | 1,008 | 1,158 | 1,006  | 1,11  |
| 64,4  | 64,6  | 58,5  | 53,4  | 59,5  | 39,4  | 383,1 | 197,5  | 580,6 |
| 16,5  | 11,0  | 6,1   | 5,4   | 1,1   | 0,3   | 62,5  | 1,5    | 64,0  |
| 657   | 779   | 779   | 571   | 466   | 4454  | 2135  |        | 6589  |
| 427   | 312   | 188   | 146   | 27    | 8     | 1711  | 41     | 1752  |
| 16,8  | 10,8  | 10,8  | 13,5  | 11,0  | 7,4   | 156,2 | 38,9   | 195,1 |
| -42,6 | -12,1 | 8,1   | 14,0  | 42,9  | 30,3  | 134,2 | 150,2  | 16    |

Рассчитанные значения  $\Delta S$  вполне удовлетворительно описывают процесс накопления и расходования влагозапасов в регионе в течение года.

Приведенный пример расчета потоков влаги над Европейской частью СССР показывает, что при достаточно густой сети наземных гидрометеорологических станций и аэрологических наблюдений открывается перспектива изучения и оценки изменений гидрологического цикла в результате преобразования земной поверхности и изменения суммарного испарения.

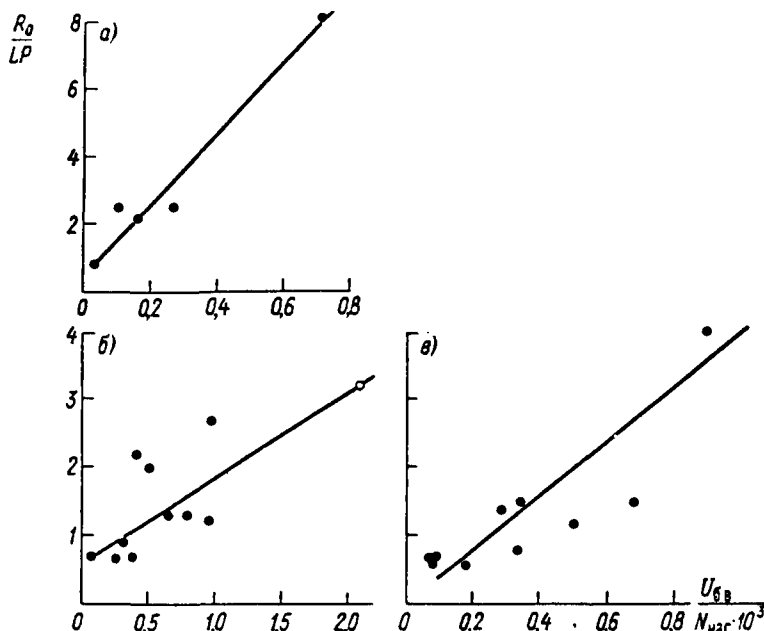
## **6.2. Взаимодействие климата и водных ресурсов в условиях хозяйственной деятельности человека**

В п. 6.1. было показано тесное взаимодействие между климатическими и гидрологическими характеристиками в условиях отсутствия заметного влияния деятельности человека на гидрологический цикл.

В последние десятилетия в мире положение коренным образом изменилось. Интенсивная хозяйственная деятельность и прежде всего резкое увеличение водопотребления стали оказывать заметное воздействие на речной сток и другие элементы гидрологического цикла больших речных бассейнов и природно-экономических регионов. Полученные в последние годы в ГГИ наиболее детальные и полные данные по динамике полного и безвозвратного водопотребления по основным регионам мира приведены в табл. 16. Объем водопотребления в пределах крупных природно-экономических регионов мира определяется тремя основными факторами: климатическими особенностями региона; уровнем экономического и социального развития, численностью проживающего населения. При этом роль климатических характеристик в определении безвозвратного водопотребления особенно велика. Подтверждением этого положения служат графики, представленные на рис. 28, на которых видны довольно определенные прямые зависимости объемов безвозвратного водопотребления (отнесенных на одного жителя) от индекса сухости. Чем больше индекс сухости, тем больше безвозвратное водопотребление в регионе (большой разброс точек на графиках объясняется влиянием указанных выше других факторов, прежде всего особенностями хозяйственного развития).

Анализ зависимостей, представленных на рис. 27 и 28, убедительно показывает, что в условиях сухого жаркого климата, когда водные ресурсы региона минимальны, при прочих равных условиях их водопотребление на хозяйственные нужды резко возрастает, обуславливая дефицит водных ресурсов и исключительно малую реальную водообеспеченность. Обратная картина имеет место во влажных районах, где в естественных условиях имеет место избыток водных ресурсов. Здесь индекс сухости имеет минимальное значение и безвозвратное водопотребление мало.

Таким образом, в условиях интенсивной хозяйственной деятельности влияние климатических факторов на водные ресурсы не ослабевает, а на-



**Рис. 28.** Зависимость удельного безвозвратного водопотребления природно-экономических регионов мира от индекса сухости.

а — Африка, б — Азия и Южная Америка, в — Северная Америка, Европа, Австралия.

против существенно увеличивается, особенно в аридных районах; они определяют не только естественный речной сток, но и в значительной мере степень его уменьшения в результате деятельности человека.

Хозяйственная деятельность человека, выражающаяся в урбанизации, сооружении водохранилищ, орошении засушливых земель, во все возрастающем водопотреблении на нужды населения и промышленности, не только приводит к весьма заметным изменениям локального климата на относительно ограниченных территориях, но и способствует поступлению в атмосферу большого количества дополнительной влаги за счет более интенсивного испарения по сравнению с условиями естественного гидрологического цикла. При этом с некоторыми допущениями можно полагать, что объемы дополнительной влаги, поступающей в атмосферу в результате деятельности человека, соответствуют безвозвратным потерям воды на хозяйственные нужды.

Следует отметить, что значения дополнительного испарения, которые, согласно данным табл. 16 и 17, достигнут к концу столетия примерно  $3000 \text{ км}^3/\text{год}$ , приобретают уже крупномасштабный характер, особенно если учесть, что большая часть их (примерно 90 %), обусловленная главным образом развитием орошения, приходится на засушливые районы,

Таблица 21

## ИЗМЕНЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И СТОКА КОНТИНЕНТОВ ПОД ВЛИЯ

| Континент           | Средний<br>суммарный<br>годовой сток,<br>км <sup>3</sup> | Безвозвратное<br>водо-<br>потребление<br>U <sub>хоз</sub> км <sup>3</sup> /год |         |
|---------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------|
|                     |                                                          | 1980 г.                                                                        | 2000 г. |
| Европа              | 3210                                                     | 127                                                                            | 222     |
| Азия                | 14410                                                    | 1380                                                                           | 2020    |
| Африка              | 4570                                                     | 129                                                                            | 211     |
| Северная Америка    | 8200                                                     | 224                                                                            | 302     |
| Южная Америка       | 11760                                                    | 71,0                                                                           | 116     |
| Австралия и Океания | 2390                                                     | 14,6                                                                           | 22,0    |

где естественное испарение с суши невелико. Наиболее ощутимо влияние хозяйственной деятельности в аридных районах Евразии, где к 2000 г. затраты стока на дополнительное испарение составят более 2200 км<sup>3</sup>/год, что будет способствовать увеличению общего испарения в этих районах примерно в 1,8 раза.

В соответствие с общей теорией влагооборота, дополнительная влага, поступающая в атмосферу, вызовет выпадение дополнительных осадков, которые в какой-то степени могут компенсировать потребление воды на хозяйственные нужды. При этом, учитывая стимулирующий эффект дополнительной влаги, величина дополнительных осадков может быть весьма значительной и для отдельных крупных регионов существенно превышать объемы испарения, обусловленного хозяйственной деятельностью человека. Естественно, что этот эффект может иметь место только для очень больших территорий, для которых коэффициент влагооборота  $K_{вл} \geq 1$ , например для континентов Земли.

Приближенная количественная оценка возможных величин изменений осадков и речного стока континентов за счет дополнительного испарения обусловленного хозяйственной деятельностью на различные расчетные уровни, была впервые выполнена в ГГИ автором совместно с О. А. Дроздовым и О. Г. Сорочан и опубликована в работах /39, 45/.

В последние годы в ГГИ эти оценки были уточнены<sup>1</sup> с учетом новых данных по водопотреблению и воднобалансовым характеристикам, рассчитанным не для континентов, а для значительно меньших по площади природно-экономических регионов мира. Значения, полученные для отдельных регионов, затем осреднялись для континентов Земли. Уточненные результаты расчетов приведены в табл. 21. Аналогичные оценки для природно-экономических регионов мира с интенсивным развитием орошения представлены в табл. 22.

<sup>1</sup> Уточнения выполнены автором совместно с Н. Г. Самбуком.

## НИЕМ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

| Сумма<br>дополнительных<br>осадков<br>$\Delta P$ км <sup>3</sup> /год |         | Объем<br>дополнительного<br>стока<br>$\Delta Y$ км <sup>3</sup> /год |         | $\frac{\Delta Y}{U_{\text{хвз}}} 100 \%$ |         |
|-----------------------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------------------|---------|------------------------------------------|---------|
| 1980 г.                                                               | 2000 г. | 1980 г.                                                              | 2000 г. | 1980 г.                                  | 2000 г. |
| 60                                                                    | 173     | 19                                                                   | 55      | 15,0                                     | 24,8    |
| 790                                                                   | 1320    | 306                                                                  | 512     | 22,2                                     | 25,3    |
| 185                                                                   | 245     | 21                                                                   | 36      | 16,2                                     | 17,1    |
| 110                                                                   | 338     | 34                                                                   | 104     | 15,1                                     | 34,4    |
| 0                                                                     | 0,0     | 0,0                                                                  | 0,0     | 0,0                                      | 0,0     |
| 0                                                                     | 0,0     | 0,0                                                                  | 0,0     | 0,0                                      | 0,0     |

В соответствие с данными табл. 21, в результате безвозвратных потери воды на хозяйственные нужды увеличение суммарных осадков в Европе, Азии, Африке и Северной Америке составило на уровень 1980 г. 47–140 % и на уровень 2000 г. достигнет примерно 60–120 % от соответствующих значений безвозвратного водопотребления. Для Австралии и Южной Америки рост безвозвратных потерь в связи с особенностями влагооборота практически не приводит к увеличению осадков.

По дополнительным осадкам  $\Delta P$  нетрудно ориентировочно подсчитать увеличение среднего годового стока  $\Delta Y$ , используя для этого значения среднего для каждого континента коэффициента стока, которые были заимствованы из работы /60/. Уже на 1980 г. дополнительный сток составил весьма заметную долю от объемов безвозвратного водопотребления (от 15 до 22 %). При дальнейшем увеличении безвозвратного водопотребления существенно возрастает и роль дополнительного стока; на конец столетия их значения уже составят 17–34 % суммарного безвозвратного водопотребления (табл. 21).

В более отдаленной перспективе в принципе возможно такое положение, когда увеличение безвозвратных потерь на хозяйственные нужды в результате изменения характеристик влагооборота будет полностью компенсировано дополнительным стоком и водные ресурсы останутся неизменными. Естественно, однако, что при этом, учитывая огромную протяженность континентов, будет происходить некоторое перераспределение осадков и водных ресурсов по территории. Дополнительное испарение имеет место над районами с основными орошаемыми массивами и водохранилищами, а дополнительные осадки и сток следует ожидать в других частях континентов, как правило, в горных районах на главных путях переноса воздушных масс.

Аналогичная картина будет иметь место и в крупных природно-экономических регионах. По данным табл. 22, для отдельных регионов Земли значения дополнительного стока за счет хозяйственной деятельности мо-

Таблица 22

ВОЗМОЖНЫЕ К 2000 г. ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ  
ДЛЯ РЕГИОНОВ МИРА С РАЗВИТЫМ ОРОШЕНИЕМ

| Регион                                         | № по<br>табл. 16 | Площадь<br>территории<br>млн. км <sup>2</sup> | Средний<br>годовой<br>сток рек,<br>км <sup>3</sup> | Площадь<br>орошения<br>млн. га |
|------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|
| Южная Европа<br>(зарубежная)                   | 3                | 1,76                                          | 564                                                | 10,2                           |
| Европейской части СССР<br>(включая Закавказье) | 5,20             | 3,71                                          | 603                                                | 17,1                           |
| Северный Китай<br>и Монголия                   | 14               | 9,14                                          | 1470                                               | 44,0                           |
| Южная Азия                                     | 15               | 4,49                                          | 2200                                               | 102                            |
| Западная Азия                                  | 16               | 6,82                                          | 490                                                | 18,7                           |
| Северная Африка                                | 9                | 8,78                                          | 154                                                | 11,0                           |
| Западная Африка                                | 12               | 6,96                                          | 1350                                               | 2,8                            |
| Восточная Африка                               | 11               | 5,17                                          | 809                                                | 1,4                            |
| Южная Африка                                   | 10               | 5,11                                          | 349                                                | 3,0                            |
| Центральная Америка                            | 8                | 2,67                                          | 1200                                               | 11,4                           |

гут достигнуть к концу текущего столетия 30–40 % от объемов безвозвратного водопотребления на хозяйственные нужды.

Таким образом, изменение режима испарения в результате хозяйственной деятельности может привести в перспективе к некоторому преобразованию соотношений между элементами водного баланса в разных частях континентов и крупных регионов. Количественная оценка указанных явлений применительно к обширным регионам представляет большое научное и практическое значение для перспективного планирования крупномасштабных мероприятий по рациональному использованию водных ресурсов, имеющих глобальный характер.

Приведенные в табл. 21 и 22 значения величины  $\Delta P$  и  $\Delta U$  для континентов и регионов могут быть несколько завышены из-за следующих принятых допущений:

- дополнительное испарение в результате хозяйственной деятельности не влияет на естественное испарение в регионе;
- безвозвратные потери на хозяйственные нужды приравняются к дополнительному испарению.

Первое допущение, требует обоснований. Действительно, например, в бессточных районах суммарное испарение практически неизменно, поэтому здесь увеличению потерь воды на хозяйственные нужды соответствует такое же уменьшение естественных потерь и никакой дополнительной влаги в атмосферу не поступает.

Для некоторых рек, текущих в океан, также возможно некоторое уменьшение суммарного естественного испарения, обусловленного деятельностью человека, например, в результате регулирования стока и

## ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

| Безвозвратное водопотребление $U_{\text{хоз}}$ км <sup>3</sup> | Дополнительные осадки $\Delta P$ км <sup>3</sup> | Коэффициент стока $a$ | Дополнительный речной сток $\Delta Y$ км <sup>3</sup> | $\frac{\Delta Y}{U_{\text{хоз}}} \cdot 100\%$ | $\frac{\Delta Y}{P} \cdot 100\%$ |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|
| 73                                                             | 61                                               | 0,33                  | 20                                                    | 27                                            | 3,5                              |
| 129                                                            | 66                                               | 0,26                  | 17                                                    | 13                                            | 2,8                              |
| 360                                                            | 319                                              | 0,32                  | 102                                                   | 28                                            | 6,9                              |
| 865                                                            | 612                                              | 0,48                  | 294                                                   | 34                                            | 13,4                             |
| 190                                                            | 172                                              | 0,28                  | 48                                                    | 25                                            | 9,8                              |
| 112                                                            | 95                                               | 0,08                  | 8                                                     | 7                                             | 5,2                              |
| 34                                                             | 55                                               | 0,24                  | 13                                                    | 38                                            | 1,0                              |
| 28                                                             | 60                                               | 0,18                  | 11                                                    | 39                                            | 1,4                              |
| 34                                                             | 35                                               | 0,11                  | 4                                                     | 12                                            | 1,1                              |
| 93                                                             | 110                                              | 0,34                  | 37                                                    | 40                                            | 3,1                              |

уменьшения масштабов и продолжительности затоплений. В этих случаях до определенного уровня использования водных ресурсов безвозвратные потери на хозяйственные нужды в какой-то степени могут компенсироваться сокращением непродуктивного испарения в бассейне /85/.

Приведенные обстоятельства могут иметь большое значение для оценки изменений водного баланса отдельных речных бассейнов. Однако ими вполне можно пренебречь при рассмотрении возможных в перспективе изменений характеристик стока для континентов и крупных регионов. Действительно, сток в бессточных областях составляет всего 2,2 % суммарного речного стока Земли, и, конечно, подавляющая часть безвозвратных потерь на хозяйственные нужды в пределах всех континентов приходится на районы внешнего стока. Что касается роли упомянутых компенсационных факторов, то, как показали исследования для территории СССР /85/, на всех крупных водосборах, интенсивно используемых в хозяйственном отношении, они практически уже исчерпаны и дальнейший рост безвозвратных потерь приведет к соответствующему увеличению суммарного испарения и снижению стока в замыкающих створах. По-видимому, такая же картина характерна (или будет иметь место в ближайшей перспективе) и для других районов Земли с интенсивным использованием водных ресурсов. Тем более можно пренебречь влиянием компенсационных факторов при расчетах изменений характеристик влагооборота на перспективу 15–20 лет.

Второе допущение также не может внести больших погрешностей в расчеты. При использовании воды на нужды промышленности и сельского хозяйства безвозвратные потери складываются из двух частей — затрат



воды на дополнительное испарение и объемов воды, входящих в состав готового продукта. При этом вторая часть пренебрежимо мала по сравнению с первой. При коммунальном водопотреблении также большую часть безвозвратных потерь (более 80 %) составляют потери воды на испарение по пути ее от источника до потребителя и обратно.

В расчетах принимается допущение, способствующее некоторому занижению получаемого эффекта дополнительного стока, а именно при расчетах величин  $\Delta U$  принимается средний многолетний коэффициент стока, в то время как коэффициент стока от дополнительных осадков должен быть, по-видимому, несколько выше среднего.

Следовательно, представленные в табл. 21 и 22 значения в целом представляются достаточно реальными, особенно если учесть приближенность прогнозных оценок водопотребления по регионам земного шара на перспективу.

Приведенные в табл. 21 значения дополнительных осадков и стока весьма значительны по отношению к водопотреблению на континентах. Представляет интерес рассмотреть, хотя бы в первом приближении возможные изменения естественных составляющих влагооборота над континентами за счет водопотребления на хозяйственные нужды. Такие оценки выполнены в ГГИ и приведены для каждого континента в работе /39/. В соответствие с этими данными, ожидаемое за счет водопотребления увеличение средних многолетних осадков к концу столетия будет в общем незначительным и составит для Африки 1 %, Европы и Северной Америки 2 %, Азии 6 %. При этом не следует ожидать заметного изменения режима общей циркуляции атмосферы и скорости переноса водяного пара. Основная характеристика интенсивности влагооборота — коэффициент влагооборота  $K_{\text{вл}}$  — для континентов в целом практически не изменится, поскольку стимулирующий эффект дополнительного испарения проявится в некотором увеличении обеих генетических составляющих атмосферных осадков — адвективных и осадков из водяного пара местного происхождения. Возможное увеличение осадков для природно-экономических регионов мира с развитым орошением приведено в табл. 22, оно составляет 1–13 %.

Таким образом, рост потребления пресных вод вызовет некоторые изменения в соотношениях между отдельными элементами водного баланса континентов и крупных регионов, однако даже в перспективе это вряд ли приведет к сколько-нибудь заметным изменениям глобального климата.

Возможные изменения характеристик влагооборота континентов и регионов вполне поддаются расчету и могут учитываться, например, при проектировании крупномасштабных водохозяйственных мероприятий. Указанные изменения достаточно условны, малозаметны и, видимо, только специалисты смогут знать о них и учитывать их в своей деятельности.

По своим масштабам существенно большее воздействие в будущем на характеристики влагооборота и водные ресурсы следует ожидать от гло-

бального изменения климата, обусловленного влиянием человека на состав атмосферы.

### **6.3. Антропогенные изменения глобального климата и водные ресурсы**

На протяжении всего времени существования гидрометеорологии способы оценки климатических параметров, водных ресурсов, их распределения во времени и по территории, все методы инженерных гидрологических и климатологических расчетов основывались на концепции стационарности климата, т. е. предполагалось, что климатические условия и обусловленные ими колебания водных ресурсов в будущем будут аналогичны тем, которые имели место за период наблюдений в прошлом. До настоящего времени в гидрологии и водном хозяйстве эта концепция в полной мере используется во всем мире не только для оценки водных ресурсов, но и при расчетах максимальных расходов речного стока редкой повторяемости для строительного проектирования.

Многолетний опыт проектирования и эксплуатации самых различных водохозяйственных сооружений в мире показал правильность и надежность указанных предпосылок (во всяком случае, до настоящего времени). Об этом же свидетельствуют исследования колебаний гидрологических и климатических характеристик за многолетние периоды, выполненные различными авторами, в частности, известным американским гидрологом В. Иевджевичем для осадков и годового стока рек мира с наиболее продолжительными рядами наблюдений /78/. Используя методы корреляционного и спектрального анализа, Иевджевич рассмотрел две выборки данных наблюдений за стоком рек и годовыми осадками продолжительностью по 85 лет — одну до 1890 г., другую за 1891—1975 гг. — и пришел к выводу, что результаты его исследования „могут принести утешение тем, кто занят практической деятельностью — проектирует системы и принимает решения, делая заключения на основе лучших данных прошлых лет, предполагая, что будущее будет похоже на прошлое. Те, кто сомневается в этом подходе, могут перенестись мысленно в 1890 г. (располагая данными инструментальных измерений примерно за 85 лет, которые имелись в то время) и строить предположения относительно поведения тех явлений в период 1890—1975 гг. Как бы они удивились точности своих предположений, основанных на временном постоянстве данных о годовых осадках и годовом стоке”.

Однако положительный опыт многолетней эксплуатации водохозяйственных объектов в мире, самые надежные исследования колебаний стока за прошлый период, по-видимому, вряд ли могут служить достаточно убедительным основанием для специалистов, которые сейчас занимаются долгосрочным перспективным планированием и должны обосновывать решения в отношении разрабатываемых в настоящее время очень дорогостоящих крупномасштабных водохозяйственных систем, рассчитанных

на эксплуатацию в весьма отдаленном будущем, через 50, 100 лет и более. И дело здесь прежде всего в том, что в современных условиях хозяйственная деятельность человека достигла таких масштабов, что стала оказывать заметное влияние не только на качество вод и гидрологический режим, но и на суммарные водные ресурсы больших речных бассейнов и регионов и даже на глобальный влагооборот и климат, и с каждым годом это воздействие становится все более значительным.

В предыдущих главах показано, сколь значительные антропогенные изменения водных ресурсов крупных речных бассейнов страны и природно-экономических регионов мира имеют место и особенно ожидаются в перспективе до конца столетия. При этом все прогнозные оценки выполнены исходя из стационарности климатической ситуации, т. е. предполагалось, что климатические характеристики в пределах крупных природно-экономических регионов, континентов и бассейнов больших рек до 2000 г. останутся стабильными и не претерпят сколько-нибудь существенных направленных изменений.

Еще несколько лет тому назад правомерность таких предположений ни у кого из специалистов не вызывала сомнений. Однако полученные в самые последние годы в основном советскими и американскими климатологами результаты исследований по оценке влияния антропогенных факторов на глобальный климат убедительно свидетельствуют о том, что рост концентрации в атмосфере углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и малых газовых составляющих за счет развития промышленности может привести уже в ближайшие десятилетия к столь значительным направленным изменениям климата, что с ними нельзя не считаться при оценке водных ресурсов и водообеспеченности в будущем, особенно при проектировании крупномасштабных водохозяйственных комплексов, которые будут функционировать в следующем столетии.

В последние годы в ГГИ ведутся комплексные исследования по изучению климата и водных ресурсов в глобальном масштабе и особенно для территории СССР в будущем, и уже в настоящее время могут быть сделаны некоторые приближенные выводы, характеризующие направленность и масштабы возможного влияния антропогенных изменений глобального климата на водные ресурсы крупных речных бассейнов и регионов страны, во всяком случае до конца текущего столетия.

Хозяйственная деятельность человека и, в частности, постоянный рост энергетики и вырубка лесов приводят к повышению концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Углекислый газ почти прозрачен для коротковолновой солнечной радиации, но значительно ослабляет длинноволновое излучение, создавая так называемый „парниковый” эффект в атмосфере, способствующий повышению температуры нижнего слоя воздуха. В связи с этим увеличение массы углекислого газа в атмосфере Земли должно приводить к глобальному потеплению. Такое же действие оказывает повышение концентрации в атмосфере малых газовых составляющих (фреоны, соединения азота и др.)

Предположение о возможности потепления климата Земли в результате увеличения в атмосфере углекислого газа антропогенного происхождения было высказано еще в XIX в. Первые количественные оценки этого явления были получены Г. Коллендером еще в 1938 г. /95/; по данным этого автора удвоение количества углекислого газа в атмосфере повышает среднюю температуру воздуха на 2 °С. Только в начале 70-х годов М. И. Будыко /15/ дал первый научно обоснованный прогноз изменения средней глобальной температуры воздуха за счет этого фактора на ближайшее столетие. Было показано, в частности, что в ближайшие десятилетия средняя температура у земной поверхности будет повышаться на 0,2 °С за 10 лет, причем в средних и высоких широтах потепление будет более значительным. В середине 70-х годов этот вывод был поддержан в работах Болина /93/ и Брокера /94/, тем не менее следует отметить, что до начала 80-х годов далеко не многие климатологи мира придерживались указанной точки зрения и верили в реальность прогнозируемого столь значительного потепления климата. Во всяком случае еще в 1979 г. в выводах Всемирной конференции по климату (Женева, февраль 1979 г.) указывалось на огромную важность проблемы и необходимость изучения влияния человека на климат, вместе с тем отмечалось, что в настоящее время (1979 г.) наука не в состоянии однозначно дать ответ, ожидает ли человечество в ближайшие десятилетия потепление или похолодание климата.

И только в 80-е годы в результате фундаментальных исследований, выполненных в СССР, США и некоторых других странах, в ходе дискуссий на проведенных в нашей стране Всесоюзных семинарах по проблеме антропогенных изменений климата и на трех советско-американских совещаниях экспертов по этой проблеме, концепция неизбежного глобального потепления климата в ближайшем будущем стала преобладающей среди ведущих климатологов мира и получила международное признание. Свидетельством последнего являются широко известные выводы Международной конференции, проведенной в октябре 1985 г. в Филлахе (Австрия) Всемирной метеорологической организацией, Международным советом научных союзов и Международной экологической организацией.

В рекомендациях Конференции, в частности, сказано: „В настоящее время принимается много важных экономических и социальных решений по долгосрочным проектам, связанным с планированием производства энергии и управлением водными ресурсами (ирригационные работы, строительство гидроэлектростанций и водохранилищ), использованием сельскохозяйственных угодий, строительством различных сооружений в прибрежных зонах. В основе всех этих решений лежит предположение о том, что данные о климате прошлого могут служить надежным ориентиром на будущее. Однако это предположение более не является правильным, так как возрастание концентрации парниковых газов приведет к значительному потеплению глобального климата в следующем столе-

тии. Уточнение оценок будущих климатических условий для принятия более обоснованных решений является делом чрезвычайной важности."

В соответствие с данными наблюдений и по результатам многочисленных исследований /19, 20/ концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере Земли возросла с 0,00285 %, или 285 млн.<sup>-t</sup> (по объему от общего количества газа) в начале 80-х годов до 0,00345 % (345 млн.<sup>-1</sup>) в 1984 г., т. е. за 100 лет количество  $\text{CO}_2$  в атмосфере увеличилось на 21 %. Причем 25 % всего прироста концентрации приходится на последние 10 лет, т. е. интенсивность прироста постоянно увеличивается.

Дать надежную количественную оценку влияния повышения концентрации  $\text{CO}_2$  на изменения глобального климата оказывается чрезвычайно сложным, так как в общем воздействие  $\text{CO}_2$  еще невелико, а на колебания температуры воздуха действуют самые различные естественные и антропогенные факторы.

Наиболее полные и надежные эмпирические данные об изменении средней температуры приземного воздуха северного полушария, полученные в самые последние годы английскими, американскими и советскими климатологами /22, 103/, указывают на происходивший в течение XX столетия процесс потепления северного полушария. Путем анализа линейного тренда температуры установлено, что с 1881 по 1984 г. средняя температура воздуха северного полушария повысилась примерно на 0,5 °C. При этом за последние 15 лет температура воздуха повысилась на 0,35 °C, т. е. можно считать, что прогноз М. И. Будыко 1972 г. оправдался.

Количественные оценки, полученные для южного полушария, аналогичны /104/, хотя и имеют существенно меньшую надежность: потепление в зоне 0—60° ю. ш. за 1881—1984 гг. оценивается также примерно в 0,5 °C. Однако по данным, полученным в СССР /22/ для этой зоны, имеем несколько меньшее значение потепления.

Приведенные эмпирические данные полностью подтверждаются теоретическими оценками ожидаемых за столетний период изменений средней глобальной температуры воздуха в результате роста содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере, которые оказались равными 0,56 °C при средней квадратической погрешности этой величины 0,17 °C /19/.

Исследования, выполненные в последние годы, позволили не только оценить происшедшие антропогенные изменения глобального климата, но и, что особенно важно в практическом плане, дать предварительные научно обоснованные долгосрочные (до 50—70 лет вперед) климатические прогнозы, которые могут дать общее представление о тенденциях изменений водных ресурсов в будущем.

В настоящее время в исследованиях советских ученых обычно используется следующая общая схема прогнозирования на перспективу климатической ситуации и водных ресурсов:

- 1) прогнозируется развитие энергетики на ископаемом топливе и рассчитываются выбросы  $\text{CO}_2$  в атмосферу;

- 2) оценивается концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере на основе анализа про-

цессов углеродного цикла;

3) по концентрации  $\text{CO}_2$  рассчитывается повышение средней глобальной температуры воздуха, при этом принимается, что увеличение концентрации МГС усиливает воздействие  $\text{CO}_2$  на температуру;

4) по увеличению глобальной температуры оценивают возможные региональные изменения климатических характеристик (температуры воздуха, осадков, испарения);

5) на основе изменений регионального климата производится оценка водных ресурсов будущего и их возможных изменений под влиянием хозяйственной деятельности на водосборах;

6) по изменениям водных ресурсов и других элементов водного баланса регионов оценивается динамика уровня важнейших внутренних водоемов.

Каждый из приведенных этапов представляет собой сложную самостоятельную научную проблему, требующую для своего решения применения надежных исходных данных и самых разнообразных современных методических приемов. При этом, естественно, точность выводов каждого последующего этапа будет зависеть не только от принятых предпосылок и использованных методов, но и в меньшей степени от надежности выводов предшествующего этапа; т. е. выводы последних этапов при прочих равных условиях будут всегда иметь наибольшую погрешность.

Не останавливаясь в деталях на современном состоянии проблемы, приведем лишь основные результаты и выводы, полученные к настоящему времени по каждому из этапов прогнозирования климата и водных ресурсов будущего.

Существует довольно много вполне обоснованных сценариев развития мировой энергетики на ближайшие 50–100 лет, учитывающие самые различные факторы и предпосылки. В зависимости от принятых прогнозов энергетики следует ожидать и различных значений поступления  $\text{CO}_2$  в атмосферу. В соответствии с выполненными различными авторами расчетами [20, 24], которые представляют наибольший практический интерес для прогнозирования, интегральное значение поступления  $\text{CO}_2$  в атмосферу по четырем наиболее обоснованным сценариям развития энергетики в мире изменяется незначительно на ближайшие 30–70 лет. Расчеты, выполненные для указанных вариантов сценария развития энергетики на перспективу и соответствующего им поступления  $\text{CO}_2$  в атмосферу, дали довольно близкие значения концентрации углекислого газа на период до 2050 г.:

|                  |      |      |             |             |               |
|------------------|------|------|-------------|-------------|---------------|
| Год . . . .      | 1959 | 1980 | 1990        | 2000        | 2050          |
| млн. $^{-1}$ . . | 315  | 337  | $360 \pm 6$ | $394 \pm 9$ | $700 \pm 100$ |

Значение остающейся к 2050 г. в атмосфере доли  $\text{CO}_2$  промышленного производства получается близким по всем расчетным вариантам — около 60 % общего поступления. Среднее значение концентрации  $\text{CO}_2$  на 2050 г. по всем сценариям и всем вариантам модели углеродного цикла

оказалось близким к  $700 \text{ млн}^{-1}$ . Отличие результатов за счет различных принятых сценариев развития энергетики составляет  $\pm 80 \text{ млн}^{-1}$ ; погрешность за счет выбора параметров модели углеродного цикла составляет  $\pm 50 \text{ млн}^{-1}$ ; суммарная погрешность результата оценки  $\pm 100 \text{ млн}^{-1}$  /20, 24/.

На приведенных значениях концентрации  $\text{CO}_2$  основываются все современные прогнозы глобального и регионального климата. После первого прогноза Будыко 1972 г. различными авторами опубликовано немало прогнозов глобального потепления антропогенного происхождения.

Важным шагом в решение проблемы прогнозирования глобального климата, в международном признании и осознании наиболее вероятной концепции глобального потепления в ближайшем будущем были итоги советско-американского совещания климатологов по изучению влияния увеличения  $\text{CO}_2$  в атмосфере на климат (Ленинград, июнь 1981 г.). На этом совещании, исходя из приведенного выше наиболее вероятного роста концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере, были получены и опубликованы /24/ следующие оценки возможных изменений средней глобальной температуры воздуха у земной поверхности на перспективу по сравнению с климатом конца XIX в.:

|                               |      |      |      |
|-------------------------------|------|------|------|
| Год . . . . .                 | 2000 | 2025 | 2050 |
| $T^{\circ}\text{C}$ . . . . . | 1—2  | 2—3  | 3—5  |

Прогноз основан на оценке совместного эффекта  $\text{CO}_2$  и других газов, создающих парниковый эффект. Нижние пределы прогнозных оценок получены при предположении, что малые газовые составляющие увеличивают эффект повышения температуры за счет роста  $\text{CO}_2$  на 30 %, верхние — на 60 %.

В 1985 г. на Международной конференции в Филлахе за основу был принят прогноз, по которому глобальное потепление, соответствующее удвоению концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере, будет достигнуто примерно к 2030 г. и составит  $1,5\text{--}4,5^{\circ}\text{C}$  (с учетом воздействия малых газовых составляющих).

Самая последняя уточненная прогнозная оценка, отражающая современное состояние исследований по этой проблеме в СССР, была выполнена в конце 1986 г. и опубликована в коллективной монографии /3/. По этой оценке по сравнению с доиндустриальной эпохой (до 1860 г.) повышение средней температуры воздуха за счет концентрации  $\text{CO}_2$  и малых газовых составляющих в атмосфере имеет следующие значения:

|                               |      |           |      |      |      |
|-------------------------------|------|-----------|------|------|------|
| Год . . . . .                 | 1975 | 1986—1990 | 2000 | 2025 | 2050 |
| $T^{\circ}\text{C}$ . . . . . | 0,5  | 1,0       | 1,5  | 2,5  | 3—4  |

Приведенные значения ожидаемых изменений глобального климата, как бы надежны они не были, недостаточны даже для самых приближенных оценок водных ресурсов будущего. Последние могут быть получены лишь на основе количественных оценок возможных региональных из-

менений климатических условий (температуры воздуха по сезонам, осадков и т. п.), которые, к сожалению, до настоящего времени оцениваются существенно менее надежно даже для самых крупных регионов и речных бассейнов.

Для прогнозных оценок изменений регионального климата наиболее широко используются динамические модели общей циркуляции атмосферы и материалы палеоклиматических реконструкций климатических условий для более теплых эпох прошлого. Прогнозы антропогенных изменений температуры воздуха и осадков на перспективу до 1990–2000 г и даже до 2020 г. давались различными авторами, начиная с 1974 г. Следует отметить, что в количественном отношении эти прогнозы весьма различны, особенно применительно к прогнозированию общего увлажнения и суммы осадков. Это свидетельствует прежде всего о том, что проблема оценки возможных долгосрочных (на 25–50 лет) изменений региональных климатических характеристик, обусловленных ростом концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере, пока еще очень далека от окончательного решения. Указанный вывод в полной мере подтвердили исследования, выполненные в нашей стране и за рубежом в самые последние годы.

Детальный анализ результатов применения современных моделей теории климата для получения оценок влияния увеличения  $\text{CO}_2$  в атмосфере на географическое распределение приземной температуры воздуха и атмосферных осадков показали [18, 22], что если для поля температур воздуха результаты применения различных моделей согласуются хотя бы качественно, то для поля атмосферных осадков применение моделей не дало каких-либо положительных результатов. Последнее, естественно, значительно усложняет проблему современной оценки возможного изменения региональных климатических характеристик при глобальном потеплении и делает все количественные оценки характеристик менее надежными. В то же время ряд полученных в последние годы результатов исследований [18, 22] в общем подтверждает возможности использования для региональных оценок количественных изменений различных характеристик климата при глобальном потеплении данных измерений за период инструментальных метеорологических наблюдений, а также палеоклиматических материалов. Указанные данные в основном и используются в настоящее время для региональных оценок изменений температуры воздуха (среднегодовой, летней и зимней) и годовых осадков для районов северного полушария и в первую очередь для территории СССР.

Уточненные карты изменений зимней и летней температур воздуха северного полушария при глобальном потеплении на  $1^\circ\text{C}$  (по отношению к периоду до середины 70-х годов), т. е. где-то на 2000 г., были получены в ГГИ в 1986 г. под руководством Будыко и представлены на V Всесоюзном гидрологическом съезде [18] и в монографии [3]. Они показывают, что повышение зимней температуры воздуха будет наиболее существенным (на  $2\text{--}4^\circ\text{C}$ ) в Восточной Европе и особенно в Централь-



ной и Северной Сибири; в условиях морского климата Западной Европы заметного изменения температуры зимних месяцев при глобальном потеплении такого масштаба не произойдет. Летние температуры воздуха более всего (на 2–3 °С) повысятся в высоких широтах, особенно в Арктике; в центральных районах Европейской части СССР и Сибири повышение составит 1 °С, а на юге Средней Азии вероятно даже небольшое снижение летних температур воздуха.

Влияние глобального потепления на режим осадков оказывается еще более сложным и оценки их менее определены по сравнению с оценками изменений температуры воздуха. В самое последнее время климатологами СССР /3/ получены карты возможных изменений годовых осадков для северного полушария и, в частности для территории СССР, при глобальном потеплении на 1 °С (на 2000 г.), на 2 °С (на 2020 г.) и на 3–4 °С (на 2050 г.). Естественно, наиболее детальны и, по-видимому, более или менее достоверны карты (рис. 29 и 30), относящиеся к концу текущего столетия /3/. К 2000 г. следует ожидать две области заметного увеличения годовых осадков — север Европы и Азии (на 50 мм) и Средняя Азия, часть Казахстана и Дальнего Востока (на 50–150 мм); на большей части территории Западной Европы и в районах средних широт СССР количество осадков уменьшается (примерно на 50 мм). Наиболее значительное уменьшение осадков (на 100–200 мм) следует ожидать на территории Северной Америки, а увеличение (до 200–300 мм) в Северной Африке (рис. 29 и 30). Полученные данные были использованы в ГГИ для ориентировочных оценок изменений водных ресурсов на территории СССР на конец столетия.

На более отдаленную перспективу (за пределами 2000 г.), согласно последним исследованиям климатологов ГГИ, можно ожидать совершенно иной картины изменения осадков при глобальном потеплении, что обусловлено, по-видимому, возможной коренной перестройкой циркуляции атмосферы. Практически на всей территории северного полушария наиболее вероятно значительное увеличение годовых осадков, причем к 2020 г. на всей территории СССР, включая южные районы, на 50–100 мм, а к середине следующего столетия — на 100–200 мм /3/. Следует отметить, что прогнозные оценки осадков на отдаленную перспективу чрезвычайно схематичны, являются сугубо ориентировочными и требуют проведения дополнительных исследований для их уточнения и детализации. Это крайне важно, поскольку указанные данные должны быть положены в основу при принятии решений по перспективному водообеспечению различных регионов мира.

Предполагаемые в ближайшие десятилетия антропогенные изменения климата Земли по своим масштабам близки к изменениям, которые имели место в прошлом на протяжении миллионов лет /17/; это вполне можно себе представить, если иметь в виду, что в ходе современной хозяйственной деятельности за десятилетие сжигаются такие объемы органического топлива, которые создавались в течении многих миллионов лет.

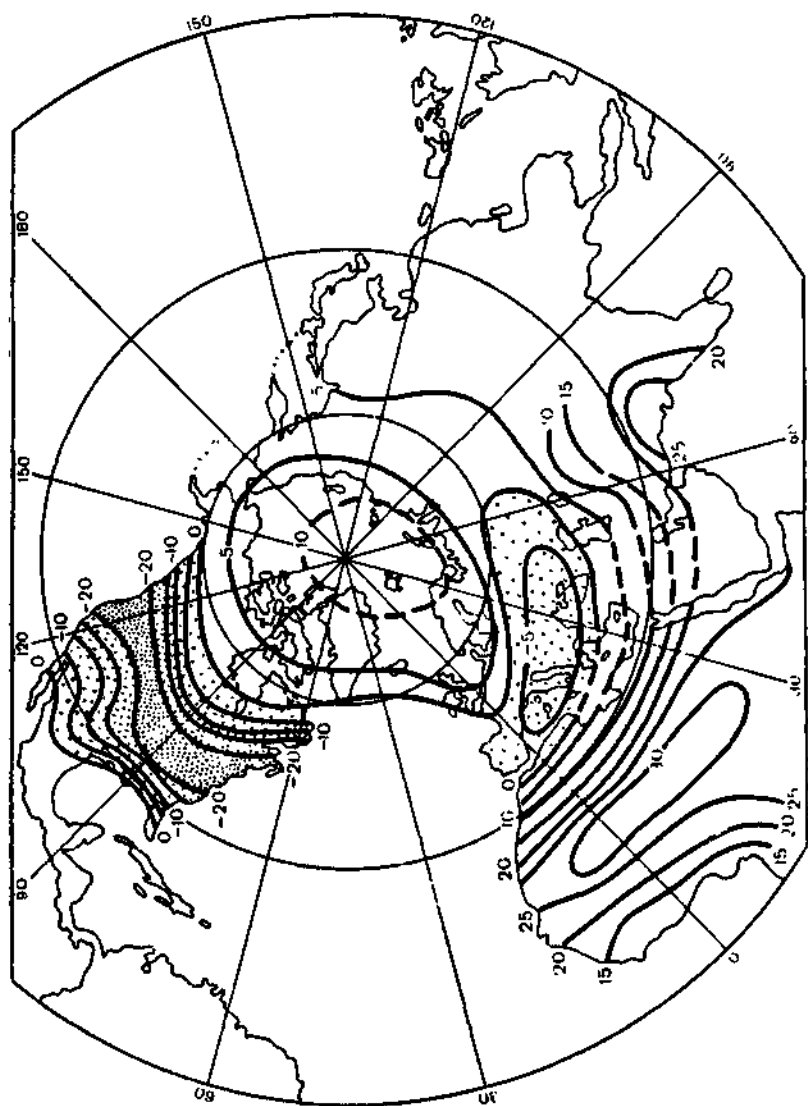


Рис. 29. Изменение годовой суммы осадков (в см слоя) в северном полушарии при повышении глобальной температуры воздуха на  $1^{\circ}\text{C}$  (на 2000 г.).

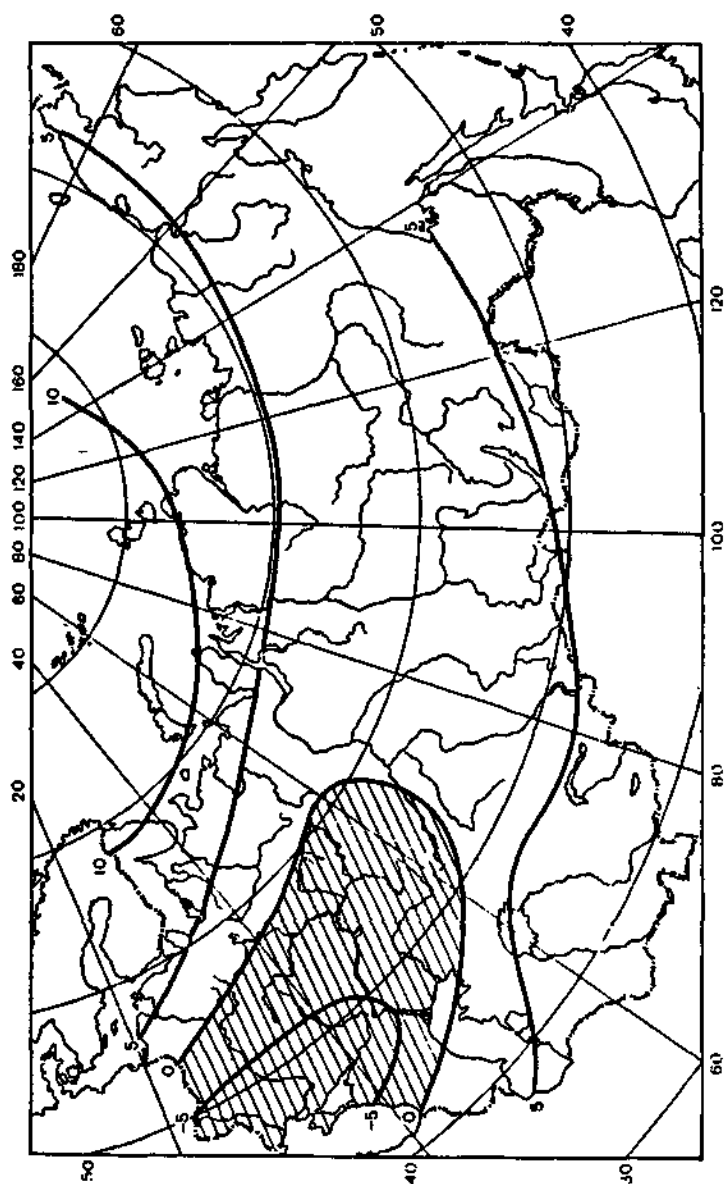


Рис. 30. Изменение годовой суммы осадков (в см слоя) для территории СССР при повышении глобальной температуры воздуха на  $1^{\circ}\text{C}$  (на 2000 г.).

Последствия возможных изменений климата трудно переоценить для хозяйственной деятельности человека, всей биосферы Земли и прежде всего изменений природных условий, которые могут быть особенно значительными в высоких и средних широтах.

В последние годы выполнено немало исследований, в которых сделаны попытки установить зависимости между изменениями климатических параметров и воздействиями их на окружающую среду и общественно-экономическую сферу. При этом наибольшее внимание уделяется возможному воздействию потепления глобального климата на растительный покров и сельскохозяйственное производство, на состояние арктических и антарктических льдов, уровень Мирового океана /3, 99/.

Одно из важнейших последствий ожидаемого изменения климата связано с воздействием на водные ресурсы, режим речного стока, состояние водных объектов суши. Гидрологические изменения, обусловленные воздействием человека на климат, неизбежно окажут влияние на все аспекты существования и деятельности человечества — сельскохозяйственное производство, мелиорацию и энергетику, регулирование паводков и защиту от наводнений, водоснабжение промышленности и населения, рыболовство и транспорт, рекреацию и охрану природы.

Во многих районах мира (см. главу 5) имеющиеся водные ресурсы находятся на грани истощения и не могут в полной мере удовлетворять потребности в них со стороны населения, промышленности и сельского хозяйства; трудности в водообеспечении испытывают с каждым годом все большее количество стран и регионов мира. Исключительные засушливые годы или сезоны, периодически возникающие в тех или иных регионах с неустойчивым увлажнением, нередко становятся национальным бедствием, обуславливающим на многие годы расстройство экономики и создающим колоссальные трудности существования и развития целых стран и народов. В то же время в других районах мира катастрофические наводнения и паводки наносят громадный экономический ущерб и приводят к человеческим жертвам.

Во всем мире построено и строится множество крупных, чрезвычайно дорогостоящих гидротехнических сооружений и водохозяйственных систем, которые рассчитаны на гидрологические характеристики, отвечающие стационарной климатической ситуации, т. е. на те максимальные и минимальные расходы, паводочные и меженьные периоды, которые наблюдались в прошлом. Как они будут функционировать в будущем, когда резко изменится климатическая ситуация и соответственно все гидрологические характеристики, каким образом в этих условиях выполнять гидрологическое обоснование проектируемых водохозяйственных систем, решать проблемы перспективного водообеспечения в тех или иных регионах?

Все эти проблемы, естественно, не могут не беспокоить специалистов по гидрологии и водному хозяйству. Исследования в этих направлениях проводятся в СССР, США и некоторых других странах мира начиная с

конца 70-х годов, т. е. тогда, когда стала очевидной острота и актуальность проблемы антропогенных изменений климата.

Анализируя работы, выполненные за последние десять лет по проблеме влияния изменений климата на гидрологические характеристики, нетрудно заметить, что они существенно различаются по методическим подходам, используемым исходным данным и предпосылкам и, конечно, по полученным результатам и выводам. При этом для исследований, выполненных за рубежом (в США, Канаде, Великобритании и некоторых других странах) преимущественно характерно применение для оценки гидрологических последствий, с одной стороны, глобальных климатических моделей (моделей общей циркуляции атмосферы), а с другой — моделей формирования стока на речных водосборах с использованием в качестве исходных данных гипотетических сценариев возможных изменений температуры воздуха и осадков. В первом случае получаются крайне неточные, упрощенные и обобщенные для больших территорий и периодов времени данные, по которым можно судить лишь о самых общих закономерностях и тенденциях возможных изменений общей увлажненности в тех или иных крупных регионах Земли. Использование таких данных для перспективного планирования практически невозможно. Во втором случае получают достаточно детальные и надежные выводы о возможных изменениях не только водных ресурсов, но и гидрологического режима в пределах конкретных речных бассейнов, расположенных в различных физико-географических условиях. Однако получаемые при этом выводы, какие бы детальные и надежные они не были, свидетельствуют лишь о возможной реакции, чувствительности водосбора на те или иные изменения климатических параметров. В практическом отношении их использовать затруднительно до тех пор, пока не будут получены более или менее надежные количественные результаты о предстоящих изменениях климатических характеристик в пределах рассматриваемых бассейнов.

Для исследований, ведущихся в СССР оценка возможных гидрологических последствий ожидаемых антропогенных изменений климата, как правило, непосредственно базируется на прогнозных значениях региональных климатических характеристик (прежде всего температуры воздуха и осадков), полученных климатологами для территории страны и северного полушария. При этом оценки даются по методу водного баланса за многолетний период на различные расчетные уровни или путем установления за период наблюдений корреляционных зависимостей стока от температуры воздуха и осадков и последующей их экстраполяции. Получаемые в результате исследований выводы весьма приближенны, относятся только к усредненным многолетним характеристикам годового стока больших речных бассейнов и крупных природно-экономических регионов, тем не менее они могут использоваться при перспективном планировании крупномасштабных водохозяйственных мероприятий, при определении общей стратегии водообеспечения и решения проблем внутренних водоемов. Надежность оценок гидрологических последствий в ос-

новном определяется точность прогнозирования региональных климатических характеристик.

Существенно различные подходы, получившие развитие в СССР и зарубежных странах в исследованиях гидрологических последствий антропогенных изменений климата, обусловлены главным образом достижениями советских климатологов; за рубежом до настоящего времени практически отсутствуют какие-либо реалистические прогнозы изменений региональных климатических характеристик, отнесенных к конкретным регионам и периодам времени.

Остановимся подробнее на основных результатах и выводах, полученных зарубежными и советскими исследователями по проблеме воздействия антропогенных изменений климата на водные ресурсы и гидрологический режим.

Гидрологические последствия антропогенных изменений климата в той или иной степени могут быть получены путем исследования на наиболее совершенных моделях общей циркуляции атмосферы. Интересные результаты в этом отношении получены, например, в работах /107–109, 131/. В этих работах приводятся различные изменения среднезональных значений влажности почвы, временного и пространственного распределения объемов поверхностного стока. Показано, в частности, что процесс глобального потепления может сопровождаться заметным увеличением годового стока в высоких широтах и существенным изменением запаса влаги в почве на больших территориях. В отношении использования моделей теории климата для количественной оценки гидрологических последствий особый интерес представляет работа, выполненная в Управлении по охране окружающей среды США в 1984 г. /129/. В этой работе крупномасштабная модель общей циркуляции специально использована для анализа изменений осадков, испарения и почвенной влаги в пределах больших регионов Северной Америки, которые могут произойти при удвоении содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Несмотря на малую разрешающую способность модели и имеющиеся недостатки в описании гидрологических процессов, полученные выводы заслуживают внимания гидрологов и водохозяйственников — они свидетельствуют о возможном при глобальном потеплении весьма значительном (на 20–60 %) увеличении годового стока в северо-западных районах США при одновременном уменьшении (на 26 %) стока в центральных районах страны.

В общем близкие результаты гидрологических последствий получены другими авторами (табл. 23) путем использования моделей общей циркуляции для различных регионов Северной Америки: уменьшение стока в бассейне Великих озер на 12–13 % /118/ и увеличение водности больших рек (на 7–20 %) в Канаде, штат Квебек /121/.

Анализируя получаемые на разных моделях общей циркуляции атмосферы результаты оценки гидрологических последствий антропогенных изменений глобального климата, следует отметить, что они далеко не идентичны, а для ряда важнейших показателей и регионов выводы могут

Таблица 23

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА РЕЧНОЙ СТОК (ЗАРУБЕЖНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ)

| Автор, год                                  | Регион, бассейн                               | Характеристика стока | Сценарий изменения климата                                                  | Процент изменения стока |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Стоктон и Боггез, 1979                      | Среднее для семи больших бассейнов запада США | Годовой              | 2 °C, -10 % осадки                                                          | от -40 до -76           |
| Немец и Шавке, 1982                         | Аризонный бассейн                             | "                    | 1 °C, 10 % осадки                                                           | 50                      |
|                                             |                                               | "                    | 1 °C, -10 % "                                                               | -50                     |
|                                             | Гумидный бассейн                              | "                    | 1 °C, 10 % "                                                                | 25                      |
|                                             |                                               | "                    | 1 °C, -10 % "                                                               | -25                     |
| Ривил и Вагнер, 1983                        | Бассейн р. Колорадо                           | "                    | 2 °C, 10 % осадки                                                           | -18                     |
|                                             |                                               | "                    | 2 °C, -10 % "                                                               | -40                     |
| Флашка, 1984                                | Бассейн Великих озер                          | "                    | 2 °C, -10 % "                                                               | от -17 до -38           |
| Идзо и Бразел, 1984                         | Влажные бассейны                              | "                    | 0 °C, -10 % осадки                                                          | 58                      |
|                                             |                                               | "                    | 2 °C, -10 % осадки                                                          | 41                      |
| Агентство охраны окружающей среды США, 1984 | Центральная часть США Северо-Запад США        | Годовой              | Удвоенное содержание CO <sub>2</sub> в атмосфере                            | -26                     |
| Глик, 1986                                  | Бассейн р. Колорадо                           | Летний               | 2 °C, -10 % осадки                                                          | от 20 до 60             |
|                                             |                                               | Зимний               | 4 °C, -10 % "                                                               | -26                     |
|                                             |                                               | "                    | 2 °C, 10 % "                                                                | -67                     |
|                                             |                                               | "                    | 4 °C, 10 % "                                                                | 22                      |
| Самдерсон и Вонг, 1987                      | Бассейн Великих озер                          | Годовой              | Модель общей циркуляции, удвоенная концентрация CO <sub>2</sub> в атмосфере | 32                      |
|                                             |                                               | "                    | Удвоенное содержание CO <sub>2</sub> : модель А                             | -12 -13                 |
| Синф, 1987                                  | Большие бассейны штата Квебек, Канада         | Годовой              | модель Б                                                                    | от 7 до 18              |
|                                             |                                               | "                    | Осадки от -2 до -9 %                                                        | от 14 до 20             |
| Палотиков, 1987                             | Бассейны Англии и Уэльса                      | Годовой              | Изменение испарения:                                                        |                         |
|                                             |                                               | "                    | 0                                                                           | от -5 до -25            |
|                                             |                                               | "                    | -15 %                                                                       | от 0 до 20              |
|                                             |                                               | "                    | -30 %                                                                       | от 20 до 40             |

быть даже весьма противоречивыми /3/. Последнее обусловлено, по всей видимости, тем, что современные, даже самые совершенные модели очень схематично описывают гидрологические процессы, значительно упрощая их. Безусловно, исследования в этом направлении будут продолжены, поскольку адекватное описание гидрологического цикла в моделях теории климата, имеющих достаточную для региональных количественных оценок разрешающую способность, является одной из наиболее актуальных задач. Однако до настоящего времени низкая точность оценок гидрологических последствий с помощью моделей теории климата и противоречивость получаемых результатов в большинстве случаев не позволяют их использовать в качестве прогностических для конкретных территорий и речных бассейнов.

В последние десять лет за рубежом, прежде всего в США, Великобритании и Канаде, выполнен целый ряд исследований по количественной оценке возможных изменений характеристик речного стока при изменении климатических параметров применительно к конкретным водосборам, расположенным в различных физико-географических условиях. При этом, как правило, используются различные гипотетические сценарии возможных изменений температуры воздуха и осадков, которые базируются на общих закономерностях и тенденциях, получаемых при исследованиях на моделях общей циркуляции атмосферы, последствий повышения концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере.

Результаты этих исследований приведены в работах /98–100, 102, 111–113, 116, 120, 123, 132 и др./. В работах /99, 106, 130/ даны обзоры и обобщения исследований, выполненных по проблеме, рассмотрены требования к моделям водосборов для получения надежных количественных выводов. В августе 1987 г. в Канаде (г. Ванкувер) на международном симпозиуме „Влияние изменений климата и климатической изменчивости на гидрологический режим и водные ресурсы” /125/ широко обсуждались вопросы чувствительности речных водосборов и водохозяйственных систем к естественным и антропогенным изменениям климатических параметров.

Одна из первых зарубежных работ, посвященная анализу воздействия климатических изменений на водные ресурсы, принадлежит Шварцу /120/, он выполнил ее для условий северо-востока США. В работе /120/ рассмотрены разные подходы для оценки гипотетических изменений климата на характеристики водных ресурсов, в том числе анализ реакции водосборов на климатические аномалии, имевшие место в прошлом. На основании выполненного анализа воздействия климатических изменений на гидрологические характеристики и общих логических рассуждений (не имея в общем самих оценок ожидаемых изменений климата), Шварц приходит к выводу, что некоторые важнейшие параметры, в частности изменчивость речного стока, очень чувствительны к изменениям климатических параметров. Он считает, что для перспективного водохозяйственного планирования крайне важно иметь для водосборов наибо-



лее реалистические сценарии возможных изменений климата.

В работах других авторов уже получены количественные оценки возможных изменений гидрологических характеристик для конкретных водосборов. При этом в качестве методической основы прежде всего использовались хорошо известные эмпирические зависимости годового стока от температуры воздуха и осадков. Таким путем Стоктон и Боггез /123/ исследовали гидрологические последствия для семи крупных водосборов западных районов США, обусловленные гипотетическими изменениями годовых значений температуры воздуха и осадков по четырем сценариям:  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  и  $\pm 10\%$ . Авторы /123/ пришли к выводу, что изменения в сторону более теплого и сухого климата будут иметь наиболее неблагоприятные последствия для западных районов с ограниченными водными ресурсами (уменьшение годового стока на 40–76 %). Изменения в сторону более прохладного и влажного климата имели бы наиболее благоприятные последствия, хотя увеличение паводков на крупных речных системах может привести и к некоторым негативным явлениям.

Регрессионные зависимости стока от температуры и осадков использовали также Ривил и Ваггонер /116/ для оценки влияния гипотетических изменений температуры воздуха и осадков на годовой сток р. Колорадо. Определив множественную корреляцию за многолетний период, они рассчитали реакцию стока реки на увеличение температуры воздуха на  $2^{\circ}\text{C}$  и изменения осадков на  $\pm 10\%$ : даже при увеличении осадков годовой сток уменьшается (на 18 %) за счет увеличения испарения; при уменьшении осадков уменьшение стока составит 40 %. Таким образом, если регрессионные зависимости будут справедливы в условиях измененного климата, то при глобальном потеплении, по мнению авторов /116/, следует ожидать существенного уменьшения водных ресурсов в западных районах США, т. е. выводы Стоктона и Боггеза были полностью подтверждены (табл. 23).

Аналогичный анализ выполнили Идзо и Бразел в 1984 г. для пяти речных бассейнов влажной зоны, но уже с учетом прямого влияния концентрации  $\text{CO}_2$  на транспирационную способность растений (полагается, что при повышении концентрации она резко уменьшается). В этом случае получены прямо противоположные результаты — при уменьшении осадков на 10 % ожидается увеличение стока на 58 % при отсутствии изменений в температуре и на 42 % при увеличении температуры на  $2^{\circ}\text{C}$ . Риглей и Джонез /132/ предположили, что одной из причин полученного столь большого эффекта прямого воздействия концентрации  $\text{CO}_2$  является малый коэффициент стока (0,16) рассматриваемых бассейнов (для умеренных широт он составляет 0,40). В результате анализа авторы /132/ получили графики относительных изменений в осадках к изменениям в стоке для трех различных значений коэффициентов стока и для уменьшений в суммарном испарении от 0 до 30 %. Эти графики были использованы Полютиковой /112, 113/ для оценки непосредственного и косвенного влияния увеличения концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере на речной сток в Ве-

ликобритании. Виглей и Джонез отметили большую роль прямого воздействия  $\text{CO}_2$  на транспирацию, что не учитывается многими исследователями. Отметим, однако, что данные Идзо и Бразела представляются явно завышенными.

В работах Немеца и Шаака /111/, а затем Флашка /98/ для количественной оценки влияния гипотетических сценариев климатических изменений на сток рек использованы гидрологические модели формирования стока на водосборах. Авторы /11/ выполнили исследования для аридного и увлажненного водосборов; они показали, что существенные изменения в стоке возникнут даже при умеренных колебаниях климата. В условиях влажного климата увеличение температуры воздуха только на  $1^\circ\text{C}$  с одновременным уменьшением осадков на 10 % приведет к уменьшению годового стока на 25 %. При тех же изменениях климатических параметров для аридного водосбора сток уменьшается примерно на 50 %. Возможные в перспективе столь значительные изменения стока рек окажут большое влияние на проектирование и эксплуатацию водохозяйственных систем в различных климатических зонах мира; эта проблема требует серьезного изучения.

В работе Флашка /98/ для оценки гидрологических последствий климатических изменений в бассейне Великих озер (США) использована модель годового водного баланса. Флашка отмечает, что при гипотетическом сценарии ( $2^\circ\text{C}$ ,  $-10\%$  осадки) годовой сток четырех рек бассейна Великих озер уменьшится на 17–38 %, а при уменьшении осадков на 25 % — почти вдвое.

Наиболее детальные исследования по рассматриваемой проблеме выполнены в последние годы в США Гликом для бассейна р. Колорадо /100/. В качестве методической основы оценки этот автор использовал воднобалансовую модель бассейна по месячным интервалам времени, откапированную по данным непрерывных наблюдений за 50-летний период. За исходные сценарии изменения климата им приняты десять вариантов гипотетических сценариев с увеличением среднемесячной температуры на  $2^\circ\text{C}$  и  $4^\circ\text{C}$  и с изменением годовых осадков от  $-20$  до  $20\%$ ; кроме того, расчеты выполнены по восьми сценариям климатических изменений, полученным по трем современным моделям общей циркуляции при удвоенной концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере. В результате исследований на модели для каждого варианта климатического сценария получены количественные изменения сезонного и месячного стока, влажности почвы, а также изменчивости указанных характеристик.

Наиболее важными изменениями практически по всем сценариям является постоянное понижение влажности почвы летом, резкое уменьшение летнего и увеличение зимнего стока. Например, при увеличении среднемесячной температуры на  $2^\circ\text{C}$  и уменьшении осадков на 10 % летний сток уменьшается на 32 %, а зимний — на 9 %; при том же изменении температуры и неизменности осадков снижение летнего стока составит 22 %, а увеличение зимнего — 8 %.

В результате выполненного исследования Глик делает выводы о большой важности и актуальности проблемы изучения антропогенных изменений климата для оценки будущих гидрологических характеристик речных водосборов, решения региональных задач водообеспечения, разработки мероприятий по устранению или смягчению возможных негативных последствий.

Основные результаты региональных оценок гидрологических последствий антропогенных изменений климата, полученные зарубежными авторами за последние десять лет для различных речных бассейнов, представлены в табл. 23. Данные получены совершенно различными методическими подходами: по современным моделям общей циркуляции атмосферы, с использованием региональных регрессионных зависимостей, гидрологических моделей формирования стока на речных водосборах, анализа исторических изменений стока во время климатических аномалий /112, 113/. Приведенные результаты имеют разную точность и трудно сравнимы между собой. Однако они убедительно свидетельствуют об исключительно серьезных последствиях (особенно для аридных и семиаридных районов), которые можно ожидать даже при весьма незначительных антропогенных изменениях климатических характеристик. В соответствие с последними исследованиями климатологов, эти изменения в отдельных регионах могут произойти уже в ближайшие десятилетия.

Как уже указывалось выше, практически все зарубежные исследования основываются не на реальных оценках, а на гипотетических сценариях изменений регионального климата, что, естественно, является существенным недостатком и не позволяет в полной мере использовать их для оценок водных ресурсов будущего, необходимых для долгосрочного перспективного планирования водообеспечения и для гидрологических расчетов при водохозяйственном проектировании. Иной подход используют советские исследователи для оценки воздействия антропогенных изменений климата на водные ресурсы — они основываются на прогнозных значениях региональных климатических характеристик.

Впервые количественные оценки влияния антропогенных изменений климата на водные ресурсы рек СССР были выполнены в ГГИ в 1978 г. под руководством Будыко /16/. Используя в качестве палеоклиматического аналога климатические условия оптимума плейстоцена, для которых имеются карты климатических характеристик, построенные В. М. Синициным /68/, были оценены возможные изменения стока в будущем (в первую четверть XXI в.). Полученные результаты свидетельствуют о резком увеличении годового стока в северных районах Европейской части СССР и Западной Сибири (примерно в 2 раза) при практически неизменности его в центральных и южных районах страны. Первые данные о возможных изменениях годового стока рек СССР в XXI в., основанные на непосредственном использовании полученных в 60-е годы палеоклиматических реконструкций климатических характеристик, имевших место миллионы лет назад, являлись сугубо ориентировочными, которые

в лучшем случае могли лишь качественно отражать более или менее реальную картину возможных в перспективе изменений речного стока.

В последующие годы, используя более надежные и детальные данные климатологов об антропогенных изменениях региональных климатических характеристик, а также материалы гидрометеорологических наблюдений за многолетний период, в ГГИ были выполнены приближенные оценки ожидаемых в будущем изменений водных ресурсов по крупным речным бассейнам и природно-экономическим регионам, в том числе с учетом хозяйственной деятельности на водосборах.

Даже для самых приближенных оценок водных ресурсов будущего применительно к отдельным регионам и речным бассейнам прежде всего необходимо решить следующие задачи:

- 1) оценить изменение водных ресурсов региона (бассейна), обусловленное изменением климатических параметров;
- 2) оценить возможные воздействия человека на водные ресурсы в условиях измененного климата.

Для оценки изменений годового стока рек на ближайшую перспективу (при повышении глобальной температуры воздуха на  $0,5^{\circ}\text{C}$  по отношению к средней температуре последнего столетия) расчеты выполнены с использованием двух совершенно различных методических подходов:

- 1) путем отыскания зависимостей годового стока рек от температуры воздуха и осадков по материалам наблюдений за многолетний период (В. И. Поляк и И. А. Сперанская) /3/;
- 2) путем использования уравнения взаимосвязи элементов водного баланса и методов определения испарения с суши.

Статистическая оценка связи годового стока с климатическими факторами позволила сделать ряд выводов об изменениях годового стока рек СССР при потеплении северного полушария на  $0,5^{\circ}\text{C}$  по сравнению с современным климатом:

- годовой сток рек Центрального и Волго-Вятского районов несколько уменьшается (уменьшение стока р. Волги до 5 %);
- сток рек Оби и Енисея в верховьях возрастает соответственно на 2–7 и 7–10 %;
- сток р. Амура в среднем течении возрастает (до 10 %).

Второй подход применен К. Я. Винниковым и Н. А. Лемешко /23/; расчеты выполнены с использованием с некоторыми дополнениями комплексного метода определения испарения с суши. Авторами получены оценки изменений годового стока рек и влагосодержания деятельного слоя почвы для летнего сезона при глобальном потеплении на  $0,5^{\circ}\text{C}$ , на  $1,2^{\circ}\text{C}$  и на  $2^{\circ}\text{C}$ . Наиболее надежные данные по годовому стоку рек, относящиеся к потеплению на  $0,5^{\circ}\text{C}$ , приведены на рис. 31. Оба методических подхода дали в общем довольно близкие результаты, относящиеся к глобальному потеплению на  $0,5^{\circ}\text{C}$ , хотя по некоторым районам (например, верховья р. Оби) имеются существенные различия.

На карте (рис. 31) довольно четко прослеживается зона особенно зна-

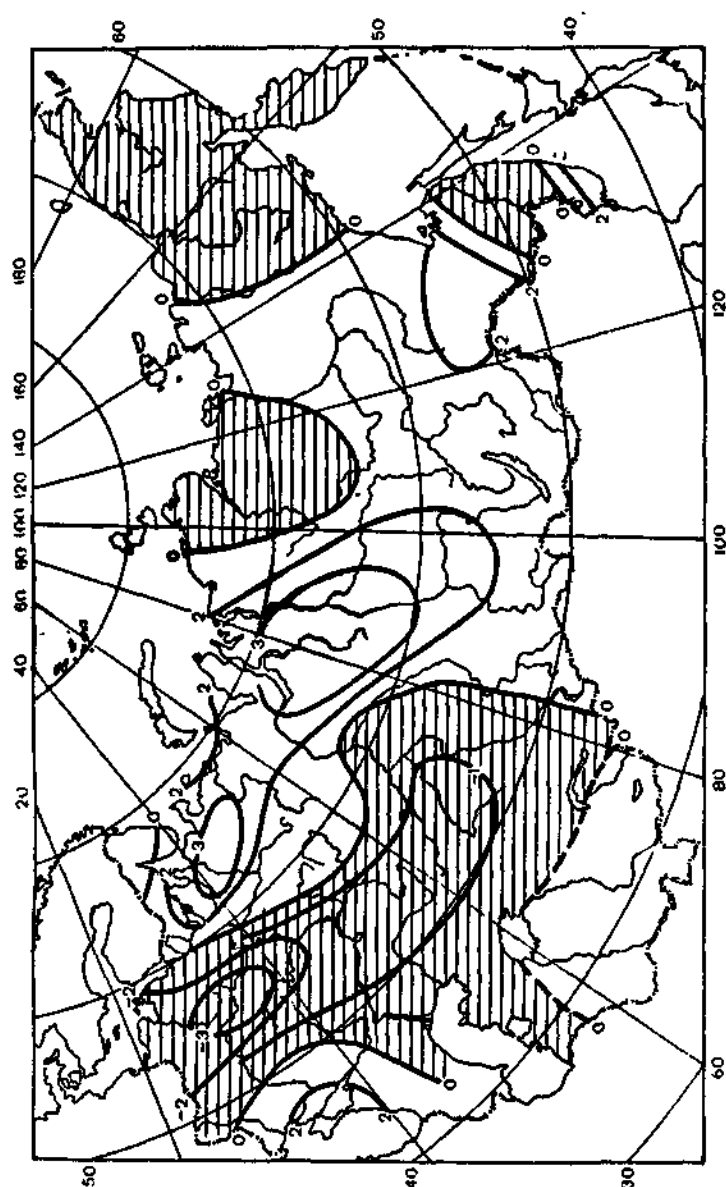


Рис. 31. Изменение среднего годового стока рек СССР (в см слон) при повышении глобальной температуры воздуха на 0,5 °С. (на 1990 г.).

чительного уменьшения стока (на 10–30 мм, или 10–20 %) — центральные районы Европейской части СССР — и зона повышенного (на 20–30 мм, или 7–10 %) стока — север Европейской части СССР, Западной и Средней Сибири. Указанные области очень тесно связаны с зонами уменьшения и увеличения осадков (см. рис. 29). Изменения стока крупнейших рек СССР значительно меньше приведенных значений, поскольку они пересекают зоны, где ожидаются различные по величине и даже по знаку изменения осадков.

Результаты расчетов возможных изменений при глобальном потеплении на 1 °С (примерно на 2000 г.) водных ресурсов основных речных бассейнов СССР (в км<sup>3</sup> и в процентах), полученные в ГГИ под руководством В. И. Бабкина, приведены в табл. 24. Оценки получены с использованием методов расчета испарения с суши (комплексный метод Будыко /13/, а также уровней, предположенных последние годы Бабкиным /9/). Возможные изменения стока под влиянием антропогенных изменений климата для речных бассейнов определялись по разности расчетных значений стока на уровень 2000 г. и расчетных норм.

Следует отметить, что приведенные значения являются сугубо ориентировочными, поскольку прежде всего весьма приближенны исходные данные рассчитанных изменений температуры воздуха и атмосферных осадков. Особенно большие погрешности возникают при определении с карт климатических характеристик, осредненных для конкретных водо-

Таблица 24

**ОРИЕНТИРОВОЧНЫЕ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ  
НА УРОВЕНЬ 2000 г.,  
ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВЛИЯНИЕМ ВОЗМОЖНЫХ АНТРОПОГЕННЫХ  
ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА**

| Река           | Площадь водосбора,<br>км <sup>2</sup> | Изменение водных ресурсов |            |
|----------------|---------------------------------------|---------------------------|------------|
|                |                                       | км <sup>3</sup> /год      | % от нормы |
| Урал           | 236 000                               | –1,0                      | –10        |
| Северная Двина | 357 000                               | 2,0                       | 2          |
| Печора         | 322 000                               | –1,6                      | –1         |
| Западная Двина | 87 900                                | –2,5                      | –12        |
| Неман          | 98 200                                | –2,0                      | –10        |
| Волга          | 1 380 000                             | –14,0                     | –6         |
| Ока            | 245 000                               | –3,0                      | –8         |
| Кама           | 507 000                               | –6,0                      | –5         |
| Днепр          | 504 000                               | –5,0                      | –9         |
| Днестр         | 72 100                                | –0,2                      | –2         |
| Южный Буг      | 63 700                                | 0,1                       | 4          |
| Сырдарья       | 219 000                               | 5,0                       | 13         |
| Амударья       | 309 000                               | 3,4                       | 5          |
| Обь            | 2 990 000                             | 15,0                      | 4          |
| Енисей         | 2 580 000                             | 41                        | 6          |
| Амур           | 1 855 000                             | 22,0                      | 6          |

сборов. Результаты оценок изменений стока для отдельных речных водосборов, выполненные независимо разными авторами при одних и тех же исходных климатических данных могут различаться более чем в 2 раза. Об этом свидетельствуют, например, данные, приведенные в табл. 9, для бассейна Каспийского моря.

Данные табл. 24 следует рассматривать как самое первое приближение, показывающее направленность процесса и порядок значений изменений, которые могут ожидать на территории СССР в ближайшие 15–20 лет.

В соответствии с представленными данными, к концу столетия следует ожидать заметного уменьшения (до  $-12\%$ ) годового стока практически всех рек Европейской части СССР при некотором увеличении (до  $13\%$ ) стока рек Средней Азии, Сибири и Дальнего Востока.

Возможные в перспективе антропогенные изменения климата, естественно, не могут не сказаться на процессах и количественных оценках влияния хозяйственной деятельности в бассейнах на сток рек. Причем влияние антропогенных изменений климата на приведенные величины может сказаться в двух аспектах: 1) могут измениться сами долгосрочные планы и масштабы развития хозяйственной деятельности в бассейнах, прежде всего орошаемого земледелия; 2) изменения климатических условий будут влиять на испарение, определяющее объемы безвозвратных потерь воды на хозяйственные нужды.

Первый фактор при оценках на 2000 г. вряд ли целесообразно учитывать, поскольку в самые последние годы приняты довольно определенные перспективные планы развития орошения, которые, видимо, не претерпят значительных изменений до конца столетия. Для решения второго вопроса в ГГИ были выполнены специальные исследования влияния возможных изменений осадков и температуры воздуха в разных физико-географических условиях на дополнительные потери на испарение с водохранилищ, на оросительные нормы, на безвозвратные потери воды при сельскохозяйственном водоснабжении, в промышленности и теплоэнергетике. Принимая установленные на конец столетия и полученные климатологами значения изменений годовой температуры воздуха и осадков, для каждого крупного речного водосбора СССР были рассчитаны изменения речного стока под влиянием хозяйственной деятельности с учетом антропогенных изменений климата.

Сравнение этих значений с соответствующими данными, полученными без учета изменений климата, показало, что они различаются для всех рассмотренных водосборов в пределах 2–8 %, т. е. очень незначительно, учитывая невысокую точность такого рода прогнозных оценок на перспективу.

Таким образом, при оценках влияния хозяйственной деятельности на сток рек на перспективу до конца столетия антропогенные изменения климата, на наш взгляд, можно не учитывать (это и не принималось в расчет при получении данных, приведенных на рис. 6 и в табл. 15, 16 для

территории СССР и природно-экономических регионов мира). При расчетах будущего положения уровня Каспийского моря на конец столетия и на более отдаленную перспективу (см. главу 4) указанный эффект учитывался, но он очень незначительно сказался на окончательных результатах.

Анализируя данные, полученные при оценках влияния хозяйственной деятельности в бассейнах и антропогенных изменений климата на сток рек СССР в ближайшей перспективе, можно сделать вывод, что на уровне конца столетия следует ожидать особенно неблагоприятной ситуации с водообеспечением народного хозяйства в бассейнах рек Черного, Каспийского и Азовского морей. Весьма ограниченные водные ресурсы этих районов имеют тенденцию к уменьшению и за счет антропогенных изменений климата, и за счет интенсификации хозяйственной деятельности в бассейнах.

На более отдаленную перспективу (на 2020–2050 гг.) при более значительном глобальном потеплении в соответствии с приведенным выше географическим распределением годовых сумм осадков (увеличении их практически на всей территории страны на 100–300 мм) следует ожидать существенного увеличения водных ресурсов многих речных бассейнов, однако давать в настоящее время какие-либо количественные оценки представляется преждевременным ввиду их явно недостаточной надежности.

Перераспределение в больших масштабах осадков и речного стока по территории СССР неизбежно повлечет за собой пересмотр существующих планов развития и размещения основных потребителей воды, разработки проектов крупных водохозяйственных мероприятий, в том числе для регулирования и управления режимом внутренних водоемов, закономерности колебаний уровней которых могут принципиально измениться.

В СССР в последние годы широко дискутируется проблема целесообразности в будущем переброски части стока северных и сибирских рек в бассейн Каспийского моря, в южные районы Средней Азии и Казахстана. Если ориентироваться при рассмотрении этой проблемы на приведенные выше данные антропогенных изменений климата и водных ресурсов к 2000 г., то они в общем свидетельствуют об увеличении дефицита водных ресурсов в южных районах с наибольшими значениями водопотребления и о некотором увеличении стока рек Севера Европейской части СССР и Сибири, что казалось бы подтверждает необходимость водоподачи части стока рек севера на юг. Однако, если рассматривать более отдаленную перспективу 2020–2050 гг. (когда, конечно, построенные к концу столетия водохозяйственные сооружения перебросок стока должны были бы функционировать в полном объеме), то, по данным климатологов, в этот период следует ожидать резкого увеличения осадков в южных районах и дополнительный сток северных рек на юге может оказаться излишним.



При этом за счет увеличения осадков, выпадающих на акваторию Каспийского и Аральского морей и уменьшения испарения можно предположить значительное повышение их уровней в отдаленной перспективе.

Конечно, пока это еще самые приближенные прикидки, но с ними нельзя не считаться, планируя столь крупномасштабные мероприятия, рассчитанные на такую отдаленную перспективу. На наш взгляд, в ближайшие годы должны быть предприняты наибольшие усилия не на разработку проектных инженерных решений тех или иных водохозяйственных мероприятий, а на уточнение прогнозов климата на будущее, на установление их большей надежности и детальности, так как в первую очередь от этого зависят принятие решения по принципам водообеспечения страны в перспективе, судьба перебросок стока, пути регулирования и управления водно-солевого режима внутренних морей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проблеме изучения водных ресурсов, их колебаний во времени и по территории, оценки динамики водообеспеченности тех или иных природно-экономических регионов первостепенное значение имеет учет влияния хозяйственной деятельности на гидрологический цикл. Это необходимо для планирования развития экономики, особенно роста орошаемых земель, освоения новых районов, решения проблем внутренних водоемов, мероприятий по охране окружающей среды.

Влияние хозяйственной деятельности (прежде всего рост орошаемых земель, сооружение водохранилищ, развитие промышленного и коммунального водопотребления) уже к настоящему времени привели в наиболее развитых регионах мира к резкому уменьшению речного стока, снижению уровней бессточных водоемов, загрязнению природных вод. Как показали исследования, влияние антропогенных факторов на речной сток зависит не только от масштабов и темпов развития хозяйственной деятельности, но и в значительной степени от естественных колебаний климатических характеристик за многолетний период, что необходимо учитывать при перспективном планировании размещения водоемких производств при разработке крупных водохозяйственных мероприятий и проектов, направленных на решение проблем водообеспечения и состояния внутренних водоемов, охраны окружающей среды.

В жаркие, сухие периоды влияние хозяйственной деятельности особенно неблагоприятно сказывается на водных ресурсах и водообеспеченности, крайне обостряя водохозяйственную обстановку во многих крупных регионах и речных бассейнах, стимулируя проектирование и разработку водохозяйственных мероприятий, предназначенных для координального решения проблем водообеспечения в будущем.

При наступлении холодных, влажных периодов влияние хозяйственной деятельности в значительно меньшей мере проявляется в уменьшении водности рек, водохозяйственная обстановка резко улучшается и развитие водохозяйственных мероприятий нередко приостанавливается, а разработанные проекты подвергаются ожесточенной критике, причем основное внимание концентрируется на их негативных сторонах.

По мере развития хозяйственной деятельности зависимость водных ресурсов и водообеспеченности от климатических характеристик существенно возрастает. Это проявляется на речных бассейнах южных районов СССР и в крупных природно-экономических регионах мира, особенно расположенных в зонах переменного увлажнения и засушливых. Здесь климатические условия определяют не только естественный речной сток, но и в значительной мере степень его уменьшения в результате действия комплекса антропогенных факторов. Все это обуславливает теснейшую взаимосвязь современных проблем обеспечения человечества пресной водой с проблемами естественных и антропогенных изменений климата.

С точки зрения оценки водных ресурсов будущего и решения проблем

водообеспечения на перспективу первоочередное значение имеют антропогенные изменения климата за счет воздействия человека на увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере.

Прогнозируемые климатологами на перспективу ближайших 40–60 лет изменения климата, соответствующие повышению за счет увеличения  $\text{CO}_2$  в атмосфере средней глобальной температуры воздуха на 3–4 °С, столь значительны по своим масштабам, особенно для умеренных и высоких широт северного полушария, что, естественно, не могут не оказать решающего влияния на весь комплекс природных условий обширных регионов и целых стран, на водные ресурсы будущего, на условия проживания населения, структуру развития экономики и прежде всего сельского и водного хозяйства.

Для специалистов в области гидрологии и водных ресурсов будущие климатические изменения имеют самое непосредственное и первоочередное значение для их деятельности. В случае значительных антропогенных изменений климата в ближайшие десятилетия перед учеными-гидрологами уже в настоящее время стоят серьезные научные проблемы в первую очередь по оценке водных ресурсов регионов и речных бассейнов в будущем, их изменений под влиянием хозяйственной деятельности; водообеспеченности населения, промышленности и сельского хозяйства в перспективе; по территориальному перераспределению водных ресурсов; по расчетам и прогнозам уровня режима и водно-солевого баланса крупнейших внутренних водоемов. Не меньшие проблемы возникают и в изучении гидрологических процессов в новых условиях и особенно в разработке концепции, общих принципов и стратегии инженерных гидрологических расчетов при строительном проектировании.

## Список литературы

1. Андреев В. Г., Бабкин В. И. Методика расчета суммарного испарения с речного водосбора за короткие интервалы времени отдельных лет.—Труды ГГИ, 1974, вып. 217, с. 70–93.
2. Антонов В. С. Проблемы уровня Каспийского моря и сток северных рек.—Труды ААНИИ, 1963, т. 253.
3. Антропогенные изменения климата/Под ред. М. И. Будыко и Ю. А. Израэля.—Л.: Гидрометеиздат, 1987. —405.
4. Аполлов Б. А., Алексеева К. И. Прогноз уровня Каспийского моря.—Труды океанографической комиссии АН СССР, 1954, т. 5, с. 63–78.
5. Архилова Е. Г. и др. Возможные изменения уровня и других элементов гидрологического режима Каспийского моря. Вопросы гидрологии моря.—Труды ГОИН, 1972, вып. 115, с. 5–17.
6. Афанасьев А. Н. Колебания гидрометеорологического режима на территории СССР.—М.: Наука, 1957.—230 с.
7. Бабкин В. И., Гусев О. А., Новикова В. А. Методика осреднения и интерполяции гидрометеорологических характеристик.—Труды ГГИ, 1974, вып. 217, с. 175–186.
8. Бабкин В. И., Воскресенский К. П. и др. Методические основы расчета водных ресурсов и водного баланса территории СССР.—Труды ГГИ, 1977, вып. 241, с. 11–28.
9. Бабкин В. И. Взаимосвязь элементов водного баланса речных бассейнов.—Труды ГГИ, 1979, вып. 260, с. 26–38.
10. Бабкин В. И., Будыко М. И., Соколов А. А. Водные ресурсы и водообеспеченность СССР в настоящем и будущем.—В кн.: Генеральные доклады V Всесоюзного гидрологического съезда. Л., 1986, с. 84–118.
11. Белинский Н. А., Калинин Г. П. О прогнозе колебаний уровня Каспийского моря.—Труды НИУ ГУГМС, сер. 4, 1946, вып. 37.
12. Будаговский А. И. Испарение почвенной влаги.—М.: Наука, 1964.—243 с.
13. Будыко М. И. Испарение в естественных условиях.—Л.: Гидрометеиздат, 1947. —136 с.
14. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности.—Л.: Гидрометеиздат, 1956. —255 с.
15. Будыко М. И. Влияние человека на климат. —Л.: Гидрометеиздат, 1972. —46 с.
16. Будыко М. И. и др. Предстоящие изменения климата.—Известия АН СССР, сер. геогр., 1978, № 6, с. 5–20.
17. Будыко М. И. Эволюция биосферы.—Л.: Гидрометеиздат, 1984.—487 с.
18. Будыко М. И., Винников К. Я. Влияние изменения глобального климата на водные ресурсы.—8 кн.: Тезисы докладов V Всесоюзного гидрологического съезда. Секция водных ресурсов и водного баланса. Л., 1986, с. 11–12.
19. Будыко М. И., Бютнер Э. Е., Винников К. Я. Обнаружение антропогенных изменений климата.—Метеорология и гидрология, 1986, № 12, с. 5–16.
20. Бютнер Э. Я. Планетарный газообмен.—Л.: Гидрометеиздат, 1986.—239 с.
21. Величко А. А. и др. Каспий и Волга 5,5 и 125 тысяч лет назад. Природа, 1987, № 3, с. 60–66.
22. Винников К. Я., Гройсман Н. Я., Лугина К. М., Голубев А. А. Изменение средней температуры воздуха Северного полушария за период 1841–1985 гг.—Метеорология и гидрология, 1987, № 1.
23. Винников К. Я., Пемешко Н. А. Влажность почвы и сток для территории СССР при глобальном потеплении.—Метеорология и гидрология,

1987 г. № 12, с. 96—103.

24. В л и я н и е увеличения количества углекислого газа в атмосфере на климат.—В кн.: Материалы советско-американского совещания. Л., 1982. — 56 с.

25. В о д н ы е ресурсы и водный баланс территории Советского Союза.—Л.: Гидрометеиздат, 1967. — 199 с.

26. Б о д о г р е ц к и й В. Е. Влияние агролесомелиораций на годовой сток.—Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 184 с.

27. В о е й к о в А. И. Климаты земного шара и в особенности России.—В кн.: Избранные сочинения, т.1, М.—Л., 1948, с. 163—750.

28. В о л ь ф ц у н И. Б., С у м а р о к о в а В. В. Динамика антропогенных и естественных потерь стока Амурь и Сырдарья за многолетний период.—Метеорология и гидрология, 1985, № 2, с. 98—104.

29. В о с к р е с е н с к и й К. П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза.—Л.: Гидрометеиздат, 1962. — 548 с.

30. В о с к р е с е н с к и й К. П., Б а б к и н В. И. и д р. Многолетние колебания стока основных рек СССР.—Л.: Гидрометеиздат, 1979, Труды ГГИ, вып. 260, с. 39—73.

31. Б у г л и н с к и й Б. С., К о л о б а е в А. Н., Я з в и н Л. С. Проблемы совершенствования системы гидрологических наблюдений и государственный водный кадастр.—В кн.: Генеральные доклады V Всесоюзного гидрологического съезда. Л., 1986, с. 60—83.

32. Г е о р г и е в с к и й В. Ю. Расчеты и прогнозы изменений уровня Каспийского моря под влиянием естественных климатических факторов и хозяйственной деятельности.—Труды ГГИ, 1978, вып. 255, с. 94—113.

33. Г и р с А. А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы.—Л.: Гидрометеиздат, 1971. — 280 с.

34. Г л у ш к о в Б. Г. Роль гидрологии в социалистическом строительстве.—Известия ГГИ, 1931, № 33, с. 8—20.

35. Г л у ш к о в В. Г. Вопросы теории и методы гидрологических исследований.—М.: Изд-во АН СССР, 1961, 416 с.

36. Г о л и ц ы н Г. С. Нужна ли переработка воды в Каспий,—Природа, 1987, № 3, с. 66—72.

37. Д р о з д о в О. А., Г р и г о р ь е в а А. С. Влагооборот в атмосфере.—Л.: Гидрометеиздат, 1963. — 250 с.

38. Д р о з д о в О. А. Закономерности влагооборота в атмосфере и возможные долгосрочные предсказания его изменений.—Водные ресурсы, 1972, № 1, с. 32—42.

39. Д р о з д о в О. А., С о р о ч а н О. Г., Ш и к л о м а н о в И. А. Предварительная оценка изменений глобального влагооборота под влиянием хозяйственной деятельности.—Водные ресурсы, 1976, № 6, с. 45—55.

40. Е р м о л и н а Н. А., К а л и н и н Г. П. Родопотребление и его влияние на воды суши.—8 кн.: Глобальный водообмен. М., 1975, с. 24—40.

41. З а й к о в Б. Д., Б е л и н к о в С. Ю. Средний многолетний сток рек СССР.—Труды ГГИ, 1937, вып. 2, 50 с.

42. З а й к о в Б. Д. Средний сток и его распределение в году на территории СССР.—Труды НИУ ГУГМС, 1946, сер. IV, вып. 24. Л.—М., с. 43.

43. З у б е н о к Л. И. Испарение на континентах.—Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 264 с.

44. К а л и н и н Г. П. Проблемы глобальной гидрологии.—Л.: Гидрометеиздат, 1968. — 378 с.

45. К а л и н и н Г. П., Ш и к л о м а н о в И. А. Использование водных ресурсов Земли.—В кн.: Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л., 1974, с. 575—605.

46. К а с п и й с к о е море, гидрология и гидрохимия.—М.: Наука, 1986. — 260 с.

47. К л и г е Р. К. Изменения глобального водообмена.—М.: Наука, 1985,

—247 с.

48. Константинов А. Р. Испарение в природе. —Л.: Гидрометеиздат, 1968. —532 с.

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

50. Кочерин Д. И. Средний многолетний годовой и месячный сток в Европейской части Союза.—Труды МИИТ, 1927, вып. 6, с. 10—26.

51. Крестовский О. И. Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек. —Л.: Гидрометеиздат, 1986. —118 с.

52. Кузин Л. С. График испарения с поверхности бассейна и его применение к расчету среднего многолетнего стока. —Записки ГГИ, 1934, т. 12, с. 189—209.

53. Ландсберг Г. Г., Фишман Л. Л., Фишер Д. Л. Ресурсы США в будущем/Пер. с англ. —М.: Прогресс, 1965. —564 с.

54. Львович М. И. Водные ресурсы будущего.—М.: Просвещение, 1969. —175 с.

55. Львович М. И., Коронкевич Н. И. Ориентировочный прогноз использования и охраны водных ресурсов СССР на уровне 2000 г.—Известия АН СССР сер. геогр., 1971, № 2, с. 35—48.

56. Львович М. И. Мировые водные ресурсы и их будущее.—М.: Мысль, 1974. —263 с.

57. Мезенцев В. С., Карнацевич И. В. Увлажненность Западно-Сибирской равнины. —Л.: Гидрометеиздат, 1969. —168 с.

58. Методические рекомендации по оценке и учету влияния агролесомелиоративных мероприятий на годовой сток в гидрологических расчетах. —Л.: Гидрометеиздат, 1976. —87 с.

59. Методы изучения и расчета водного баланса. —Л.: Гидрометеиздат, 1981. —с. 396.

60. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. —Л.: Гидрометеиздат, 1974. —638 с.

61. Моисеинков А. И., Квитрадзе В. 8. Оценка антропогенных изменений водного режима крупных рек с использованием метода математического моделирования. —8 кн.: Тезисы докладов V Всесоюзного гидрологического съезда. Секция гидрологического обоснования водохозяйственных мероприятий. Л., 1986, с. 79—80.

62. Новиков С. М., Гончарова Ж. С. Прогноз изменений водных ресурсов крупных рек СССР под влиянием осушительных мелиораций. —Труды ГГИ, 1978, вып. 255, с. 54—69.

63. Никитин С. П., Земцов В. А. Изменчивость полей гидрологических характеристик в Западной Сибири. —Новосибирск: Наука, 1986. —204 с.

64. Ольдекол Э. М. Об испарении с поверхности речных бассейнов. Юрьев, 1911. —209 с.

65. Панин Г. Н. Тепло-массообмен между водоемами и атмосферой в естественных условиях. —М.: Наука, 1985. —208 с.

66. Поляков Б. 8. Влияние агротехнических мероприятий на сток рек.—Метеорология и гидрология, 1939, № 4. — с. 40—48.

67. Поляков Б. В. Гидрологический анализ и расчеты. —Л.: Гидрометеиздат, 1946. —480 с.

68. Синицин В. М. Введение в палеоклиматологию. —Л.: Недра, 1967. —232 с.

69. Смирнова К. И. Водный баланс и долгосрочный прогноз уровня Каспийского моря.—Труды Гидрометцентра СССР, 1972, вып. 94, 123 с.

70. Соколов А. А., Чеботарев А. И. Очерки развития гидрологии в СССР.—Л.: Гидрометеиздат, 1970. —310 с.

71. Соколов А. А. О чем шумит русский лес.—Л.: Гидрометеиздат, 1982. —93 с.

72. Соскин И. М. Многолетние колебания гидрометеорологических характеристик Балтийского, Баренцева и Каспийского морей и солнечная активность. — В кн.: Труды океанографической комиссии АН СССР. М., т. 7, с. 3—22.
73. Тимашев И. Е. Количественная оценка водных ресурсов в США. Вестник МГУ, 1983, № 1, с. 67—74.
74. Уайт Г. Водные ресурсы США. Проблемы их использования/Пер. с англ. — М.: Прогресс, 1973. — 189 с.
75. Федоров С. Ф. Исследование элементов водного баланса в лесной зоне ЕТС. — Л.: Гидрометеиздат, 1977. — 264 с.
76. Харченко С. И. Гидрология орошаемых земель. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 246 с.
77. Черкавский С. К. О единой государственной системе учета вод и ведении водного кадастра. — Водные ресурсы, 1972, № 3, с. 44—53.
78. Шааке Джон К., Качмарек З. Изменчивость климата и проектирование и эксплуатация водохозяйственных систем. Всемирная конференция по климату, Женева, Февраль, 1979. с. 208—230.
79. Шикломанов И. А., Смирнова Л. Е. Оценка влияния хозяйственной деятельности на сток крупных рек Кавказа. — Труды ГГИ, 1973, вып. 206, с. 92—122.
80. Шикломанов И. А. Оценка изменений стока р. Волги у Волгограда под влиянием хозяйственной деятельности. — Труды ГГИ, 1975, вып. 229, с. 3—35.
81. Шикломанов И. А. Гидрологические аспекты проблемы Каспийского моря. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 77 с.
82. Шикломанов И. А. Изменения речного стока под влиянием антропогенных факторов. — Автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра геогр. наук. Л., 1977, 58 с.
83. Шикломанов И. А., Серетенникова Г. М. Влияние водохранилищ на годовой сток рек СССР. Труды ГГИ, 1977, вып. 239, с. 27—48.
84. Шикломанов И. А. Динамика антропогенных изменений водности рек СССР. — Труды ГГИ, 1978, вып. 239, с. 27—49.
85. Шикломанов И. А. Антропогенные изменения водности рек. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 301 с.
86. Шикломанов И. А., Фатуллаев Г. Ю. Антропогенные изменения стока реки Куры. — Метеорология и гидрология, 1983, № 8, с. 71—78.
87. Шикломанов И. А., Маркова О. Л. Проблемы водообеспечения и переброски речного стока в мире. — Л.: Гидрометеиздат, 1987.
88. Шлямин Б. А. Сверхдолгосрочный прогноз уровня Каспийского моря. — Известия ГГО, 1962, т. 94, вып. 1, с. 26—33.
89. Эйгенсон М. С. Будущее Каспийского моря. Проблемы Каспийского моря. — 8 кн.: Материалы 8сесоюзного совещания по проблеме Каспийского моря. Баку, 1963, с. 24—28.
90. Эльпинер Л. И., Асильев В. С. Водные ресурсы, современные особенности и перспективы водопотребления в США. — Водные ресурсы, 1983, № 1, с. 163—172.
91. Ambroggi R. P. Water under the Sahara. — Scient. American, 1966, vol. 214, N 5, p. 21—29.
92. Baumgartner A., Reichel E. The World Water Balance. R. Oldenbourg Verlag München. Wien, 1975, p. 180.
93. Bolin B. Energy and Climate. Stockholm, 1975, — 55 p.
94. Broecker W. S. Climatic change: are we on the brink of a pronounced climatic warming? — Science, 1975, vol. 189, N 4210, p. 460—463.
95. Callender G. S. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. — Quart. J. Roy. Met. Soc., 1938, vol. 64, N 27, p. 223—240.
96. Dosiadis C. A. Water for human environment. — Proc. of the Conf. „Water for Peace“, 1967, vol. 1. Washington: p. 33—60.

97. Falkenmark M., Lindth G. How can we cope with the water resources situation by the year 2015? —Ambio, 1974, vol. 3, N 3–4, p. 114–123.
98. Flusckha J. M. Climatic change and Water Supply in the Great Basin. Master's Thesis, Department of Hydrology and Water Resources, University of Arisona, 1984.
99. Gleick P. Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. J. of Hydrology, 1986, 88, pp. 97–116.
100. Gleick P. Global climatic changes and regional hydrology: impacts and responses. In: The influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources. IAHS. Publication, 1987, N 168, pp. 389–402.
101. Holy M. Water and the environment. —FAO, U. N., Roma, 1974.
102. Idso S. B., Brazel A. I. Rising atmospheric carbon dioxide concentrations may increase streamflow. Nature, 1984, vol. 312, N 5989, pp. 51–53.
103. Jones P. D., Raper S. G. B., Bradley R. S., Diaz H. F., Kelly P. M., Wigley T. M. L. Northern Hemisphere surface air temperature variations; 1851–1984. Journ. of Clim. and Appl. meteor., 1986, vol. 25, N 2, p. 161–169.
104. Jones P. D., Wigley T. M. L., Wright P. B. Global temperature variations between 1861 and 1984. —Nature, 1986, vol. 322, p. 430–434.
105. Keller G. Niederschlag, Abfluss und Verdunstung in Mitteleuropa. Jahrbuch für Gewässerkde. Besondere Mitteilungen, Bd. 1.4., 1906, S. 3–12.
106. Klemes V. Sensitivity of Water Resources Systems to Climate Variation. World Climate Applications Programme. WCP–98, WMO. 1985
107. Manabe S., Wetherald R. T. and Stouffer R. J. Summer dryness due to an increase of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. Climatic Change, 1981, 3, p. 347–386.
108. Manabe S., Wetherald R. T. Reduction in summer soil wetness induced by an increase in atmospheric carbon dioxide. Science, 1986, 232, p. 626–628.
109. Mitchell J., Lupton G. A 4 x CO<sub>2</sub> integration with prescribed changes in sea surface temperatures — Progress in Biometeorology 1984, vol. 3 p. 353–374.
110. National Water Summary 1983 — Hydrologic events and issues. By U. S. Geological Survey. — United States Geological Survey. Water-Supply Paper 2250. Washington D. C., 1984, —243 p.
111. Nemec J. and Schaake J. Sensitivity of water resource systems to climate variation. Hydrol. Sci. 1982, 27 (3), p. 327–343.
112. Palutikof I. P., Wigley T. M. L., Lough I. M. Seasonal Climate Scenarios for Europe and North America in a High-CO<sub>2</sub> Warmer World. DOE/EV/10098-5. U. S. Dept. of Energy, Washington, D. C. USA, 1984.
113. Palutikof I. P. Some possible impacts of greenhouse gas induced climatic change on water resources in England and Wales. In: The influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources. IAHS. Publication, 1987 N 168, p. 585–596.
114. Penk A. Untersuchungen über Verdunstung und Abfluss von grösseren Landflächen. Geogr. Abh. —Wien, Bd. 5, N 5, S. 10–29.
115. Penman H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc R. Soc. London, 1896, 193, p. 120–145.
116. Revelle R. R. and Waggoner P. E. Effects of a carbon dioxide — induced climatic change on water supplies in the Western United States. In: Changing Climate. National Academy of Sciences, National Academy Press. Washington. D. C. 1983. p. 419–432.
117. Riha I. Contribution to the analysis of the hydrological cycle and of the water consumption cycle. — Studie CSAV, Academia — Praha 1982 c. 12, 111 s.
118. Sanderson M., Wong L. Climatic change and Great Lakes water levels. The influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources. IAHS. Publication, 1987, N 168, p. 477–487.
119. Schreiber R. Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa. Mteer. E. 1904. S. 3–22.



120. S c h w a r z H. E. Climatic change and water supply: How Sensitive is the Northeast? In: Climate, Climatic Change and Water Supply. National Academy of Science. Washington, D. C., 1977, p. 111—120.

121. S i n g h S. The impacts of CO<sub>2</sub> — induced climate change on hydro-electric generation potential in the James Bay Territory of Quebec. The influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources. IAHS. Publication, 1987, N 168, p. 403—418.

122. S o l l e y W. S., C h a s e E. S. and M a n n W. B. Estimated use of water in the U. S. in 1980. Geological Survey Circular, 1983, N 1001 56 p.

123. S t o c k t o n C. W. and S o g g e s W. R. Geohydrological Implication of Climate Change on Water Resource Development. U. S. Army Coastal Engineering Research Center. Fort Belvoir Va. 1979.

124. T h e g l o b a l 2000 report to the President of the U. A.: entering the twenty first century. Vols 2—3. U. S. Government Printing Office. Washington D. V., 1980, p. 137—159.

125. T h e I n f l u e n c e of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources. IAHS. Publication, 1987, N 168, p. 640.

126. T h o r n t h w a i t e C. W., P o l a m a n S. The determination of evaporation from land and water surfaces. —Mon. Weath. Review, 1939, 67, N 1, p. 18—36.

127. T u r c L. Le bilan d'eau du sols. Relations entre les precipitations, l'évaporation et l'écoulement. Annales de l'Institut National de la recherche agronomique, serie A. Annales Agronomiques, 1954, t. IV, v. 1955.

128. U l e W. Niederschlag und Abfluss in Mitteleuropa. Forsch. Landes und Volkskde. Bd. XIV, 1903, N 5, S. 24—39.

129. U. S. E n v i r o n m e n t a l Protection Agency, Potential Climatic Impacts of Increasing Atmospheric CO<sub>2</sub> with Emphasis on Water Availability and Hydrology in the United States. EPA Office of Policy, Planning and Evaluation, Washington D. C. 1984.

130. V e r h a a y F. H. Impact of climate change on the morphology of river basins. In: The influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources. IAHS, Publication, 1987, N 168, p. 315—326.

131. W a s h i n g t o n W. M., M e e h l G. A. Seasonal cycle experiment on the climate sensitivity due to a doubling of CO<sub>2</sub> with an atmospheric general circulation model coupled to a simple mixed layer ocean model. J. Geophys. Res. 1984 vol. 89, p. 9475—9503.

132. W i g l e y T. M. L., J o n e s P. D. Influences of precipitation changes and direct CO<sub>2</sub> effects on streamflow. Nature, 1985, vol. 314, N 6007, p. 149—152.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Предисловие . . . . .                                                                                                          | 3   |
| Глава 1. Методы оценки водных ресурсов и развитие гидрологической сети . . . . .                                               | 4   |
| Глава 2. Государственный водный кадастр СССР и изучение водных ресурсов . . . . .                                              | 15  |
| Глава 3. Естественные водные ресурсы и водообеспеченность СССР. . . . .                                                        | 28  |
| Глава 4. Влияние хозяйственной деятельности на водные ресурсы СССР и проблема уровней Каспийского и Аральского морей . . . . . | 42  |
| 4.1. Изменение стока рек СССР под влиянием хозяйственной деятельности . . . . .                                                | 42  |
| 4.2. Проблема уровней Каспийского и Аральского морей. . . . .                                                                  | 62  |
| Глава 5. Водные ресурсы, водопотребление и водообеспеченность в мире . . . . .                                                 | 80  |
| Глава 6. Климат и водные ресурсы . . . . .                                                                                     | 108 |
| 6.1. Климатические и гидрологические характеристики при естественном гидрологическом цикле . . . . .                           | 108 |
| 6.2. Взаимодействие климата и водных ресурсов в условиях хозяйственной деятельности человека . . . . .                         | 114 |
| 6.3. Антропогенные изменения глобального климата и водные ресурсы . . . . .                                                    | 121 |
| Заклучение. . . . .                                                                                                            | 145 |
| Список литературы . . . . .                                                                                                    | 147 |

Монография

Игорь Алексеевич Шикломанов

Исследование

водных ресурсов суши:

итоги, проблемы, перспективы

Редактор З. М. Кожина. Художественный редактор В. В. Быков.

Технический редактор Е. Я. Заводько. Корректор Л. Б. Лаврова.

Художник И. Г. Архипов.

ИБ № 1951

Набрано в издательстве на композере.

Подписано в печать 02.06.88. М-27140. Формат — 60 х 84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Усл.-печ. л. 8,84. Усл. кр.-отт. 9,07. Уч.-изд. 10,62. Тираж 510 экз.

Индекс ГЛ-19. Заказ 2078 . Цена 1 р. 60 коп. Заказное.

Гидрометеиздат, 199226, Ленинград, В. О., ул. Беринга, д. 38.

Московская типография № 9 НПО „Всесоюзная книжная палата” Госкомиздата СССР. 109033 Москва, Ж-33, ул. Волочаевская, д. 40.