

Б. М. ДОБРОУМОВ
Б. С. УСТЮЖАНИН

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ
ВОДНЫХ РЕСУРСОВ
И РЕЖИМА РЕК
ЦЕНТРА ЕТС**



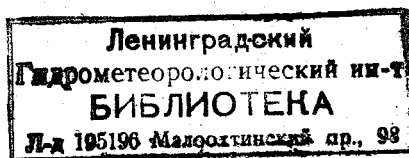
ЛЕНИНГРАД
ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ
1980

Освещается современное состояние проблемы количественной оценки ресурсов поверхностных и подземных вод. В систематизированном виде рассмотрены основные факторы преобразования речного стока, особенности и характер антропогенного воздействия на водные ресурсы и режим рек и на этой основе дана типизация речных бассейнов по условиям влияния хозяйственной деятельности на их водные ресурсы. Дан анализ методов исследований и количественной оценки антропогенного влияния на водный режим рек с примерами расчета. Основное внимание уделено рассмотрению вопросов влияния горнорудных разработок и интенсивных откачек подземных вод на водный режим рек, а также учета нарушений речного стока при оценке водных ресурсов. На основании выполненных исследований дан прогноз изменений речного стока под влиянием интенсивной эксплуатации подземных вод и других водохозяйственных мероприятий.

Монография рассчитана на научных работников, инженеров гидрологов, гидрогеологов, гидротехников, географов, а также проектировщиков, занимающихся вопросами изучения влияния хозяйственной деятельности на окружающую среду.

The problem of quantitative appraisal of the surface and underground waters is treated in its present-day condition. Main factors in the river runoff transformation and the way of the man's impact on the water resources and on the river regime are considered systematically. It provides a base to classify the river basins with respect to certain kinds of economic activity effects on their water resources. Techniques used for investigation and quantitative evaluation of the man's effect on the river regime are analysed with examples of the calculation. The main topics covered are the effects of open-pit mining and intensive pumping of underground waters; and to account for the runoff disturbance when evaluating the water resources. On the base of investigations which have been carried out, a forecast is given for the runoff changes caused by intensive exploitation of underground waters and other water management practices.

The monography is aimed at the audience of scientific workers, practical hydrologists, hydrogeologists, hydraulic engineers, geographers, and designers concerned with problems of the economic activity effects on the environment. It will be also of interest to postgraduates and students of hydrological, geographical and hydrogeological departments of institutes and universities.



313723

*Светлой памяти
Александра Ивановича Чеботарева
посвящают авторы эту книгу*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проблема пресной воды, сохранение природных вод от загрязнения и истощения приобретает все большие и большие масштабы. Уже сейчас во многих районах земного шара ощущается острый дефицит пресной воды, особенно в засушливые годы. Неуклонно возрастает объем водопотребления в процессе развития промышленного производства и роста производительных сил. Эта проблема становится более актуальной в связи с интенсивным преобразованием природных ландшафтов в настоящее время и особенно в перспективе.

Развитие народного хозяйства и экономическое освоение новых районов вызывают необходимость оценки возможных изменений водных ресурсов и водного баланса территорий под влиянием антропогенных факторов.

За прошедшие годы появилось много работ, в которых с той или иной степенью детальности освещались вопросы преобразования речных систем под влиянием интенсивной хозяйственной деятельности человека на водосборе. Однако все эти вопросы в силу многогранности и сложности до конца не решены. Их решение осложняется и тем, что интенсивность роста населения, промышленного и сельскохозяйственного производства, а также освоение новых месторождений полезных ископаемых неуклонно возрастают, в связи с чем в зону антропогенного воздействия вовлекаются новые области нашей страны. Число рек с искусственно измененным (преобразованным) стоком с каждым годом увеличивается. Более напряженным становится водохозяйственный баланс густонаселенных районов, для которых характерны широкое использование местных ресурсов поверхностных и подземных вод и переброска части речного стока из смежных речных бассейнов.

В проблеме обеспечения водой населения и отраслей народного хозяйства возрастает роль подземных вод. В связи с этим оценка изменений водного режима и ресурсов рек под влиянием эксплуатации подземных вод, количественная оценка этих изменений представляются задачами, имеющими важное практическое и научное значение. К сожалению, до сего времени в научной литературе указанные вопросы не нашли должного отражения. Авторы настоящей монографии сделали попытку восполнить этот пробел.

Основное внимание в монографии уделено методам и результатам оценки влияния интенсивной эксплуатации подземных

вод и других факторов хозяйственной деятельности на подземное питание рек и основные расчетные гидрологические характеристики (годовой, максимальный и низкий сток). Вместе с тем в ней предложен метод оценки восполнения запасов подземных вод в районах их интенсивной эксплуатации, а также приводится прогноз изменений речного стока под влиянием комплекса водохозяйственных мероприятий.

В книге широко используется и анализируется зарубежная литература по рассматриваемой проблеме; основные выводы и предложения базируются главным образом на работах, выполненных начиная с 1962 г. в Государственном гидрологическом институте под руководством и непосредственным участием авторов.

Авторы выражают искреннюю благодарность канд. геогр. наук О. В. Попову и канд. геогр. наук Н. И. Коронкевичу за ценные замечания и пожелания, которые способствовали улучшению книги.

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающее потребление воды при неравномерном распределении водных ресурсов во времени и пространстве, а также усиление влияния антропогенных факторов на водный режим и качество вод заставляют бережно относиться к воде, как к одному из ценнейших природных ресурсов, имеющих ограниченные запасы. Именно поэтому в нашей стране проводятся широкие мероприятия по рациональному использованию водных ресурсов и охране их от истощения и загрязнения. Принятые в 1970 г. «Основы водного законодательства Союза ССР и союзных республик», а также ряд постановлений ЦК КПСС и Совета Министров СССР устанавливают строгий порядок использования и охраны всех вод, включая поверхностные и подземные.

В настоящее время подземные воды широко используются в различных отраслях народного хозяйства. Только для целей водоснабжения ежегодно ведется бурение 30—40 тыс. новых водозаборных скважин, уточняются эксплуатационные запасы в районах действующих водозаборов и постоянно увеличивается их мощность, измеряемая десятками и сотнями тысяч кубометров воды в сутки. Кроме того, при разработке полезных ископаемых открытыми карьерами и шахтами происходит осушение всей толщи водовмещающих пород на месторождениях. В результате этих мероприятий из недр земли ежегодно изымается 95—100 км³ воды, или 10—12 % их естественных возобновляемых ресурсов [104, 155, 157].

Длительный региональный отбор подземных вод оказывает существенное влияние на водный режим не только отдельных рек и речных бассейнов, но и на водный режим значительных территорий. В районах расположения водозаборных сооружений происходит резкое снижение уровня подземных вод и развитие в эксплуатируемых водоносных горизонтах депрессионных воронок. Поскольку поверхностные и подземные воды тесно взаимосвязаны и сток рек СССР в среднем на 25—30 % сформирован подземными водами, то резкое снижение уровня последних вызывает сокращение подземного притока в реки, образование фильтрационных потерь поверхностных вод и усиление их притока к водозаборам. В условиях крупных водопонижений на участках рек, находящихся в пределах влияния депрессионных воронок, уменьшается речной (руслевой) сток. В отдельных случаях после отведения в реки использованных

подземных вод, в которых содержится часть вод недренируемых в естественных условиях водоносных горизонтов, происходит увеличение речного стока.)

Число рек с искусственно измененным (преобразованным) стоком с каждым годом возрастает, так как непрерывно увеличивается водопотребление, которое за 10—20 лет примерно удваивается [78]. Более напряженным становится водохозяйственный баланс густонаселенных и развитых в промышленном отношении районов, для которых характерно не только широкое использование местных поверхностных и подземных вод, но и переброска их из смежных речных бассейнов. В таких условиях преобразованный сток не может рассматриваться в качестве показателя естественных водных ресурсов исследуемых территорий. Поэтому вопросы оценки направленности и величины изменений речного стока под влиянием различных водохозяйственных мероприятий, осуществляемых в речных бассейнах, приобретают исключительно важное практическое и научно-методическое значение. Решение этих вопросов позволяет учесть характер и степень изменений комплекса природных условий при проектировании и эксплуатации различных гидротехнических сооружений, а также при разработке методов расчета основных гидрологических характеристик. Оценка изменений природных условий и возможность их предсказания имеют особо важное значение в свете постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР «Об усилении охраны природы и улучшении использования природных ресурсов».

Указанные выше вопросы слабо изучены. В советской и зарубежной литературе опубликованы результаты некоторых исследований, в которых содержатся сведения, в основном качественные, о влиянии отбора подземных вод на водные ресурсы, режим рек и водный баланс речных бассейнов. В ряде работ отмечается, что интенсивная эксплуатация подземных вод во многих случаях является основной причиной изменения свойств и состояния пород при их осушении, нарушения теплового и солевого режимов подземных вод и ухудшения их качества за счет минерализации, усиления процессов выщелачивания и коагуляции, оседания земной поверхности, интрузии морской воды в пресную и т. п.

Несмотря на наличие в литературе довольно большого числа указаний на изменение водного режима и ресурсов рек под влиянием эксплуатации подземных вод, количественная оценка этих изменений для больших территорий практически осуществлялась недостаточно. В то же время совместный анализ данных об условиях формирования водного режима речных бассейнов на основе использования количественных характеристик речного стока и других гидрологических материалов позволяет в региональном плане дать оценку современных изменений ресурсов и режима поверхностных и подземных вод при ин-

тенсивной эксплуатации последних, составить прогноз таких изменений при длительной эксплуатации водозаборов, а также при проведении всего комплекса водохозяйственных мероприятий в пределах как отдельных речных бассейнов, так и достаточно крупных районов и регионов.

Основное внимание в работе, результаты которой изложены в настоящей монографии, авторы уделили решению следующих основных задач:

- 1) совершенствованию методов расчета изменений стока рек под влиянием эксплуатации подземных вод и различных водохозяйственных мероприятий при наличии или отсутствии данных непосредственных наблюдений за стоком и режимом подземных вод;

- 2) оценке влияния интенсивной эксплуатации подземных вод и других факторов хозяйственной деятельности на подземное питание рек и основные расчетные гидрологические характеристики (годовой, максимальный и низкий сток);

- 3) разработке методов оценки восполнения запасов подземных вод в районах их интенсивной эксплуатации;

- 4) прогнозу изменений речного стока под влиянием интенсивной эксплуатации подземных вод и проведения ряда других водохозяйственных мероприятий.

Рассмотрены также важные научные и научно-методические вопросы современных методов оценки ресурсов поверхностных и подземных вод. Дан анализ особенностей формирования водного режима рек, протекающих в районах развития депрессионных воронок, по материалам натурных наблюдений за режимом поверхностных и подземных вод.

Все поставленные задачи решаются на примере рек центральной части ЕТС, т. е. в регионе, наиболее развитом в промышленном и сельскохозяйственном отношении, наиболее густонаселенном, в пределах которого приводится целый комплекс различных водохозяйственных мероприятий (регулирование стока, переброска вод, водозаборы и водосбросы, орошение и осушение и т. п.). Наряду с этим, в пределах названного региона расположены такие крупнейшие месторождения полезных ископаемых, как Курская магнитная аномалия (КМА), Московский угольный бассейн, в пределах которых происходит интенсивный отбор подземных вод и, как следствие, развитие мощных депрессий уровней подземных вод. Бассейны рассматриваемых рек занимают площадь около 600 тыс. км². В административном отношении эта площадь включает 15 областей РСФСР и три области УССР.

Приводимые в монографии обобщения базируются на материалах гидрологических работ и гидрометеорологических наблюдений на стационарной сети Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды (Госкомгидромет), а также на материалах экспедиционных

исследований, проводимых ГГИ на территориях КМА в 1962—1968 гг., Мещерской низменности в 1968—1969 гг., Московского артезианского бассейна (МAB) в 1969—1972 гг., в которых авторы принимали непосредственное участие. Используемые в работе гидрогеологические материалы являются результатом исследований, выполненных Территориальным геологическим управлением центральных районов (ГУЦР), МГУ, ВСЕГИНГЕО, ИВП АН СССР и Московской гидрогеологической экспедицией Министерства геологии РСФСР.

1. СОВРЕМЕННАЯ ОЦЕНКА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ, МЕТОДЫ ИХ ИЗУЧЕНИЯ И УЧЕТА

В развитии производительных сил Советского Союза все большее значение приобретает проблема водообеспечения, под которой понимается водоснабжение промышленности, коммунального и сельского хозяйства и других потребителей. Особое место занимает отвод отработанной воды при максимально возможном ее возобновлении по качественному и количественному составу. В этих условиях возникает необходимость в изучении и постоянном уточнении оценки водных ресурсов страны и особенно отдельных районов, которые испытывают острый дефицит в пресных водах.

Вода, являющаяся одним из основных элементов природной среды, окружающей человека, играла и продолжает играть важную роль в развитии человеческого общества и складывающихся в нем отношений. Спрос на воду в СССР и в других странах неуклонно возрастает в силу увеличения промышленного производства, численности населения и расширения площадей орошаемого сельскохозяйственного земледелия. Если до недавнего времени не возникало существенных затруднений в водообеспечении различных отраслей народного хозяйства СССР и не наблюдалось в больших объемах отрицательных последствий иррационального использования водных ресурсов, то теперь ввиду изменения объемов потребляемой воды, технологии промышленного, сельскохозяйственного и коммунального производства использование и охрана водных ресурсов становится актуальнейшей проблемой современности.

Как известно, к водным ресурсам принято относить все «свободные» воды гидросферы, включая воды рек, озер, водохранилищ, болот, подземные и почвенные воды, а также запасы воды в океанах, морях и ледниках. Химически и физически связанная вода литосферы, т. е. вода, входящая в состав минералов, в понятие «водные ресурсы» не включается [129].

Одна из наиболее полных оценок ресурсов поверхностных вод как СССР в целом, так и его отдельных районов, включая центральную часть ЕТС, выполнена в ГГИ в 1967 г. на основании данных многолетних гидрометрических наблюдений за речным стоком. Результаты этих исследований приведены в работе [39]. В ней впервые приведено районирование территории СССР по величине водных ресурсов, а также даны основные сведения о водном балансе и его составляющих по отдельным районам

страны. В дальнейшем исследования, направленные на уточнение общего количества водных ресурсов страны, их изменчивости в многолетнем и внутригодовом разрезе, на оценку водообеспеченности отдельных природных зон, экономических районов и бассейнов рек, систематически продолжались.

Естественно, что степень детальности изучения водных ресурсов какой-либо территории будет в первую очередь характеризоваться числом действующих в ее пределах гидрометрических станций и постов, а также продолжительностью наблюдений за стоком воды. В силу исторически сложившихся обстоятельств размещение сети гидрологических станций в пределах СССР весьма неравномерно. Наибольшее их количество (около 60 %) размещено на Европейской территории СССР, что, естественно, позволяет наиболее полно и достоверно оценивать водные ресурсы и их изменения именно для этой части страны. Всего на территории СССР, по сведениям А. И. Чеботарева [189], около 35 000 пунктов наблюдений за элементами гидрологического режима, в том числе 6243 входят в состав опорной государственной сети Госкомгидромета. Учет стока воды осуществляется в настоящее время примерно в 5000 пунктах наблюдений, при этом в 70 % случаев эти наблюдения охватывают периоды более 25 лет и в 30 % — более 50 лет. Использование результатов наблюдений позволяет выполнять исследования, направленные на дальнейшее развитие и совершенствование методов оценки водных ресурсов, уточнение их количества и изменений, происшедших под влиянием хозяйственной деятельности.

На территории СССР насчитывается около 3 млн. рек, включая малые длиной до 0,5—1 км; в том числе в пределах Европейской территории СССР более 667 тыс. рек [60]. Озер и водохранилищ насчитывается более 2 млн. 800 тыс., включая озера (пруды) площадью менее 1 км². При этом суммарная площадь зеркала озер составляет около 2 % территории СССР, или около 500 тыс. км² [140]. Такое громадное количество рек предопределило невозможность непосредственного изучения режима и ресурсов каждой отдельной реки, озера (пруда) или водохранилища и потребовало разработки методов оценки водных ресурсов, базирующихся на региональных обобщениях по материалам стационарных гидрометрических наблюдений. Один из таких методов, в основе которого лежит идея построения карт стока, предложил П. Н. Лебедев [122]. Практическая его реализация нашла воплощение в работе Д. И. Кочерина [97], ставшей классической и определившей методологию оценки стока неизученных рек, основанной на применении метода интерполяции по картам стока. По мере развития наблюдательной гидрометрической сети, совершенствования способов измерений и наблюдений, а также методики картирования характеристик стока производилось последовательное уточнение водных ресурсов СССР. Наибольший вклад в эти исследования в 40—60-е годы

внесли Б. Д. Зайков [66], П. С. Кузин [107], К. П. Воскресенский [45], М. И. Львович [40] и др.

Региональная оценка водных ресурсов наиболее полно представлена материалами, приводимыми в 42 выпусках справочного издания «Ресурсы поверхностных вод СССР».

Указанные выше исследования по разработке наиболее совершенных методов количественной оценки водных ресурсов были продолжены и в более позднее время, в основном в ГГИ и Институте географии АН СССР. По данным ГГИ [134], общие запасы водных ресурсов СССР в средний по водности год составляют 4714 км³. Речной сток с территории СССР, по данным М. И. Львовича и Н. Н. Дрейер [40], оценивается в 4350 км³, т. е. примерно на 8 % меньше, а вместе с притоком воды с территории зарубежных стран — 4650 км³ в год, или на 1,4 % меньше, чем по оценкам ГГИ.

В условиях различных темпов развития промышленности, роста городов, сельскохозяйственного освоения отдельных районов СССР особое значение приобретает оценка водных ресурсов не только страны в целом, но и отдельных союзных республик, экономических районов, а также бассейнов наиболее крупных рек, становящихся объектами многоцелевого использования их природных потенциалов. Указанное обстоятельство в свою очередь потребовало уточнения методики оценки ежегодных и средних многолетних значений водных ресурсов рек Советского Союза, его республик, регионов и районов.

Наиболее полные исследования по этой проблеме выполнены в 1973—1977 гг. в ГГИ, что позволило, с одной стороны, получить ряд расчетных уравнений для определения характеристик водных ресурсов, с другой — дать необходимые оценки для составления генеральной схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов на различные временные интервалы.

1.1. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЕЖЕГОДНЫХ ЗНАЧЕНИЙ РЕСУРСОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

В гидрологической практике используются два метода оценки водных ресурсов. Первый заключается в интегрировании поверхности слоя стока в пределах заданной площади и широко известен как «метод изолиний». Сущность его состоит в том, что, опираясь на сведения о средних многолетних значениях стока в различных изученных гидрометрических створах, можно построить карту изолиний и с ее помощью установить закономерность распределения стока по территории. Такие карты позволяют определить также значения нормы стока для рек, непосредственные измерения на которых не производились. В то же время вследствие значительной изменчивости во времени стока рек оценка ежегодных водных ресурсов может

быть осуществлена лишь по картам стока, построенным для отдельных лет. Построение таких карт является чрезвычайно трудоемкой работой, и в связи со значительной изменчивостью стока по территории определение ежегодных водных ресурсов по картам стока не обеспечивает получения достоверных оценок.

Для повышения точности оценки ежегодных характеристик водных ресурсов отдельных экономических районов и союзных республик в последнее время разработана система алгоритмов, позволяющая с использованием ЭВМ осуществить построение карт изолиний стока.

Как отмечается в работе [8], суть предлагаемого метода сводится к интегрированию уравнений поверхности слоя стока каждого района, при этом исходное уравнение представляется в виде

$$h = f(x, y, z, \dots, \varphi), \quad (1.1)$$

где x и y — прямоугольные координаты центров тяжести речных бассейнов; $z, \dots, \varphi$ — определяющие сток природные факторы; h — слой стока.

Указанный метод до сего времени не нашел широкого применения в гидрологической практике из-за отсутствия специальных программ вычислений на ЭВМ, особенно для случаев сложной конфигурации контуров гидрологических или экономических районов, когда задача сводится к решению двойных интегралов по прямоугольной или треугольной области интегрирования.

Вторым методом оценки ежегодных значений водных ресурсов является разработанный в 1973—1974 гг. метод линейных уравнений стока [8, 134] вида

$$W_i = K_0 + K_1 Q_1 + K_2 Q_2 + \dots + K_n Q_n, \quad (1.2)$$

где W_i — i -тая характеристика водных ресурсов (приток, отток или местный сток) за конкретный год, км³; $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ — расходы воды в гидрометрических створах, принятых для оценки водных ресурсов, м³/с; K_0 — свободный член уравнения; $K_1, K_2, \dots, K_n$ — весовые коэффициенты.

Основой для составления линейных уравнений стока служат методы гидрологической аналогии и географической интерполяции с учетом местоположения гидрометрических створов относительно границ района. При несовпадении границ районов с местоположением замыкающих водосборы гидрометрических створов в расчетные уравнения вводятся корректирующие коэффициенты, учитывающие вес каждой площади.

Используя изложенную выше методику, К. П. Воскресенский и др. [134] выполнили оценку водных ресурсов союзных республик, экономических районов и наиболее крупных рек СССР. Ниже приведены основные показатели водных ресурсов отдельных экономических районов СССР, относящихся к рассматриваемому нами региону (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Водные ресурсы экономических районов

Экономический район	Площадь территории, тыс. км ²	Местный сток, км ³	Приток, км ³		Общие ресурсы, км ³	Отток, км ³	
			всего	из-за границы района		всего	за границу района
Прибалтика и Белоруссия	396,7	83	26,6	1,6	110	110	3,17
Европейский север	1926,1	601	134	28,4	735	735	—
Центральный юго-запад ЕТС	652,9	111	27,1	—	138	138	—
	634	50,2	158	123	208	208	8,4

Водообеспеченность экономических районов на 1 км² площади, а также на одного человека характеризуется данными табл. 1.2.

Таблица 1.2

Удельные показатели водных ресурсов рек экономических районов

Экономический район	Коэффициент местного стока	Коэффициент испарения	Водные ресурсы, тыс. м ³ /год			
			на 1 км ² площади		на одного человека	
			местный сток	общие ресурсы	местный сток	общие ресурсы
Прибалтика и Белоруссия	0,283	0,717	211,0	278,0	4,88	6,41
Европейский север	0,471	0,529	312,0	382,0	28,8	5,2
Центральный юго-запад ЕТС	0,240	0,760	170,0	212,0	3,09	3,85
	0,128	0,872	79,2	328,0	0,96	3,18

Как видно из табл. 1.2, наибольшую обеспеченность водами местного стока на 1 км² площади имеет Европейский север. Центральный и юго-западный районы ЕТС обладают наименьшими водными ресурсами как на 1 км² площади, так и в расчете на одного человека.

1.2. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

В настоящее время можно выделить следующие основные методы определения подземного стока: 1) гидрогеологический; 2) гидрологический; 3) гидролого-гидрогеологический. Все эти методы достаточно широко освещались в литературе [103, 104,

157], поэтому остановимся лишь на основных, принципиальных подходах к определению подземного питания рек и оценки ресурсов подземных вод. При этом представляется целесообразным отдельно рассмотреть методы определения притока подземных вод в различных условиях их взаимосвязи с рекой, т. е. в условиях: а) отсутствия гидравлической связи между грунтовыми водами и рекой; б) наличия гидравлической связи; в) артезианского питания.

1.2.1. Отсутствие гидравлической связи между грунтовыми водами и рекой

Наиболее полно такой случай был рассмотрен Ф. А. Макаренко [130]. На основе сопоставления гидрографа реки и суммарного дебита опорных источников Макаренко предложил определять подземный приток за единицу времени как сумму произведений единичных месячных расходов воды на коэффициенты изменения подземного притока в реку, определяемых по режиму родников.

Наряду с методом Макаренко, нашедшим широкое применение при расчетах подземного притока в реки, предложены способы определения подземного притока в реки, основанные на кривой спада. Кривая спада $Q_{\text{п}}=f(t)$, наблюдающаяся в период отсутствия притока воды в водоносные горизонты, представляет собой интегральную характеристику притока подземных вод со всего бассейна. Приток воды в речную сеть в этих условиях определяется в основном запасами подземных вод в речном бассейне, т. е. $Q_{\text{п}}=f(W)$, причем, если рассматривать небольшие реки, для которых время добегания воды по руслу невелико, то, используя кривую спада, можно определить запасы подземных вод, а также построить кривую объемов подземных вод, принимающих участие в формировании подземного стока. Для больших и средних рек учет времени добегания является обязательным. Методика расчета подземного притока по кривым спада предложена Г. П. Калинин и Г. С. Абальян [76, 77].

1.2.2. Наличие гидравлической связи между подземными водами и рекой

В соответствии с исследованиями Б. И. Куделина [103, 104], расход грунтовых вод q_t в этих условиях может быть определен по соотношению

$$q_t = \bar{k}_t h_t i_t + \frac{\Delta h_t i_t r_t}{2}, \quad (1.3)$$

где $\bar{k}_t$ — средний коэффициент фильтрации; h_t — среднее арифметическое из высоты уровня воды в реке и в расчетной наблю-

дательной скважине над водоупором водоносного пласта; i_t — гидравлический уклон; Δh_t — приращение уровня воды; l_t — расстояние от уреза реки до наблюдательной скважины; r_t — водоотдача или недостаток насыщения в зоне колебания уровня грунтовых вод.

Наряду с определением подземного притока в реки по уравнению (1.3) Куделин подробно исследовал возможности применения для оценки глубокого подземного стока метода водного баланса речных систем. Уравнение водного баланса речной системы представлено им в следующем виде:

$$Q_{\text{ст}} = q_{\text{пр}} + (x - z) F + \frac{\Delta W}{\Delta t}, \quad (1.4)$$

где $Q_{\text{ст}}$ — расход воды в замыкающем створе; $q_{\text{пр}}$ — приток воды в речную сеть; x, z — осадки и испарение с площади зеркала речной системы F ; $\frac{\Delta W}{\Delta t}$ — изменение объема воды в речной сети.

Использование метода водного баланса для оценки подземного притока в реки представляется весьма перспективным, однако получаемое по уравнению водного баланса значение подземного притока существенно меньше остальных его составляющих, что в свою очередь предопределяет достоверность и точность искомой характеристики.

1.2.3. Оценка естественных ресурсов артезианских вод

Для оценки естественных ресурсов артезианских вод в настоящее время применяются гидрогеологический, гидрологический, гидролого-гидрогеологический методы, а также метод межженных гидрометрических съемок, когда артезианское питание определяется по минимальным расходам воды в реках, определенным в период межени.

При использовании гидрогеологического метода приток артезианских вод вычисляется по уравнению Дарси. Этот метод был, в частности, применен К. И. Маковым [104] для расчета расхода напорных вод в пределах Днепровско-Донецкой впадины. Являясь в целом вполне приемлемым, этот метод обладает рядом недостатков и прежде всего сложностью определения площади поперечного сечения и коэффициентов фильтрации, которые, как известно, обладают большой изменчивостью и для отдельных районов могут изменяться в десятки и сотни раз.

Применение гидрологического метода, как указывается в работе [77], основывается на том, что реки, будучи естественным интегратором поступающих в них артезианских вод, практически собирают все артезианские воды, поступающие в них не только путем непосредственного дренирования своими руслами, но и в результате стекания с водосбора.

Возможность применения гидрологического метода определяется также тем, что минимальные расходы воды рек являются характеристикой глубокого артезианского питания и, следовательно, могут быть использованы для оценки их суммарного количества. На этом положении основано применение метода меженных гидрометрических съемок для оценки артезианского и грунтового питания рек, о чем будет сказано ниже. Здесь лишь отметим, что использование для оценки ресурсов артезианских вод сведений о минимальных расходах воды не всегда правомерно. Это связано с тем, что в формировании минимальных расходов воды помимо артезианских вод, как правило, принимают участие и грунтовые воды, отчего возникает довольно сложная задача разделения общего количества воды на отдельные генетические составляющие. Такое разделение в силу крайне незначительных величин артезианских и грунтовых вод требует проведения специальных гидрохимических и гидрогеологических исследований.

Практическое применение гидрологического метода определения роли артезианского питания в формировании речного стока в сочетании с натурными наблюдениями за режимом речных и напорных подземных вод, а также химическим составом отдельных категорий вод, выполнено Г. П. Колесовым и Е. Л. Грейсером [88] на примере р. Тосны.

Комплексный гидролого-гидрогеологический (воднобалансовый) метод для оценки величины артезианского питания рек впервые был детально разработан и применен на практике Куделиным для территории центральной части ЕТС [104]. Он основан на применении уравнения водного баланса, в котором остаточный член характеризует расход или пополнение запасов артезианских вод, т. е.

$$\pm W = x - y - z, \quad (1.5)$$

где x , y , z — средние многолетние значения осадков, испарения и стока.

Использование этого метода позволило Куделину рассчитать значения артезианского питания и инфильтрации для территории Днепровско-Донецкой впадины. В дальнейшем этот метод нашел широкое применение в ГГИ при оценке водных ресурсов районов КМА и МАБ.

Недостатком воднобалансового метода определения ресурсов артезианских вод является то, что положенный в его основу «метод разности» может привести к значительным погрешностям в определении величины W . Поэтому при его применении обязательными являются гидрогеологическая оценка и контроль полученных результатов. Такая оценка позволяет установить, соответствует ли знак величины W конкретным гидрогеологическим и геологическим условиям района. Вместе с тем расчеты артезианского питания, выполненные другими методами, а также

определение дебита артезианских вод непосредственно по данным эксплуатационных скважин позволяет проконтролировать полученные количественные оценки притока артезианских вод.

1.2.4. Использование меженных гидрометрических съемок для оценки ресурсов подземных вод

313723
Подземные воды, формирующиеся в зоне интенсивного водообмена, находятся под дренирующим воздействием речных систем. Это позволяет определять естественные ресурсы подземных вод по непосредственным измерениям подземного стока в реки, что наиболее точно можно выполнить в периоды малой водности. Периоды малой водности, или меженный период, наблюдаются, как правило, в летне-осенний и зимний сезоны. Для этих сезонов в пределах центральной части ЕТС характерно наличие устойчивых расходов воды в реках, которые на гидрографе стока выражаются почти прямой линией. В этот период реки переходят на питание преимущественно подземными водами и измеренные расходы воды будут характеризовать подземное питание реки выше замыкающего створа. В период межени нередко могут быть кратковременные повышения расходов воды, обусловленные поступлением в русло рек поверхностных вод, сформированных дождевыми осадками (чаще ливневыми) или талыми водами в периоды значительных оттепелей. Это обстоятельство приводит к необходимости в общем меженном периоде выделять такие периоды, когда речной сток формируется только за счет подземных вод зоны интенсивного водообмена или артезианских вод глубокого залегания.

Решение задачи определения подземного питания рек в условиях интенсивной эксплуатации подземных вод приводит к необходимости оценки их запасов с относительно высокой точностью и детальностью учета распределения подземного стока в пределах отдельных речных бассейнов. Использование для этих целей материалов стационарных наблюдений, когда существующее размещение гидрометрических створов не всегда соответствует границам смены гидрогеологических условий формирования подземных вод, не позволяет с требуемой детализацией определить естественные ресурсы отдельных водоносных горизонтов и их комплексов. Такая детализация может быть достигнута только на основании совместного использования результатов определения подземного притока как по стационарным, так и по эпизодическим гидростворам, измерения воды на которых производятся в период гидрометрической съемки.

Гидрометрический метод определения подземного питания рек использовался различными исследователями (А. А. Труфанов, В. В. Вальман, П. В. Поляков, С. Н. Крицкий и

М. Ф. Менкель и др.). Наибольшее развитие он получил начиная с 60-х годов в исследованиях ГГИ [3, 55, 59, 133, 165], проводимых на территории центра ЕТС, Северо-Онежского бокситоносного района Урала, Западной Сибири, района БАМ и др.

Рассмотрим более подробно возможности использования гидрометрического метода при оценке ресурсов подземных вод применительно к территории ЦЧО [55]. Задача сводится к вы-

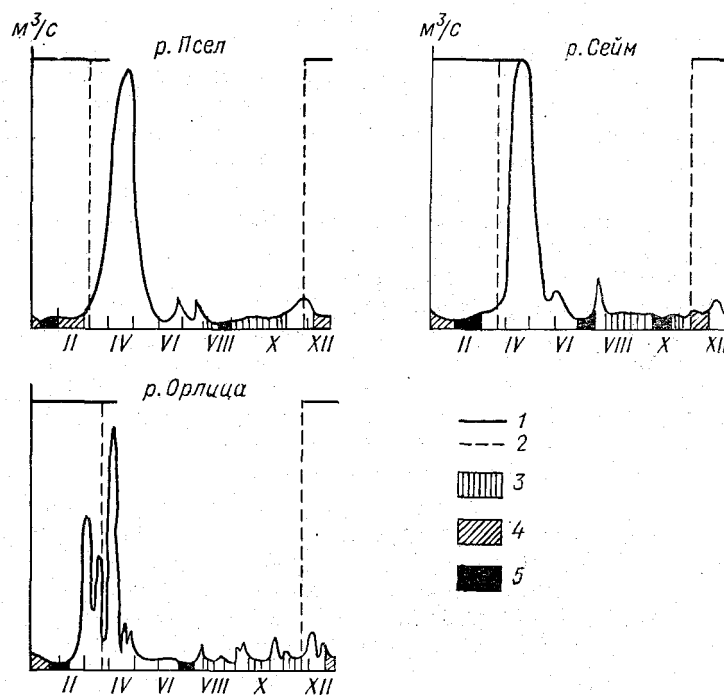


Рис. 1. Характерные гидрографы стока рек ЦЧО.

1 — ледостав; 2 — граница холодного и теплого сезонов; 3 — летне-осенний меженный период; 4 — зимний меженный период; 5 — период подземного питания.

бору периодов преимущественного питания рек подземными водами путем анализа гидрографов стока. Установлено, что на территории ЦЧО периоды подземного питания рек отмечаются в большинстве случаев зимой (декабрь—февраль) и в летне-осенний период (август—сентябрь). Примеры выделения меженных периодов, когда реки переходят на питание подземными водами, приведены на рис. 1.

Гидрометрические работы в период межени должны непременно выполняться в возможно короткие сроки при неизменных

погодных условиях, что позволит определить генетически однородный подземный сток в реки. Для учета внутригодовой изменчивости подземного притока в реки гидрометрические работы приводятся и в зимнюю и в летне-осеннюю межень.

В основу схемы размещения створов измерений был положен детальный анализ гидрогеологических условий территории, а также их смена по длине рек, что устанавливается по картам дренирования реками основных водоносных горизонтов и их комплексов. Помимо этого схема размещения предусматривала возможности наиболее полного освещения наблюдениями неизученных рек (особенно малых), а также необходимые расстояния между створами для обеспечения точности расчетов приращения стока в зависимости от нарастания расходов воды или площадей водосборов.

Естественно, что определенные в период гидрометрической съемки значения подземного питания могут рассматриваться лишь как приближенные, нередко включающие в себя часть вод, сформированных поверхностным стоком. Для их исключения результаты единичных измерений приводились к периоду устойчивой межени, т. е. к периоду, когда реки питаются только за счет притока подземных вод. Такое приведение осуществлялось с использованием материалов стационарных наблюдений.

Периоды подземного питания на стационарных гидростворах выделялись по гидрографам стока. Продолжительность таких периодов на территории ЦЧО составляет в среднем 20—25 сут. За выделенные периоды определялся средний расход воды, который в дальнейшем использовался для нахождения переходных коэффициентов K от единичных измерений расходов воды к величине подземного стока в реки. Значения K вычислялись как отношение модуля подземного притока для стационарных створов-аналогов к модулю стока на дату производства измерений в створах с единичными измерениями расходов воды. В качестве створов-аналогов выбирался ряд стационарных пунктов наблюдений, имеющих однородное с приводимым створом гидрогеологическое строение водосборов, находящихся в одинаковых физико-географических условиях, мало отличающихся по площади водосборов, заболоченности и т. д. За окончательное значение переходных коэффициентов принималось среднее арифметическое, определенное по ряду створов-аналогов отдельно для периодов зимней и летне-осенней межени.

Как известно, оценка естественных ресурсов подземных вод может быть произведена по данным о средних годовых многолетних значениях подземного стока в реки. В связи с этим полученные значения подземного питания рек за период летней (летне-осенней) и зимней межени должны быть приведены к средним годовым и средним многолетним значениям. Средние годовые значения подземного стока в реки для стационарных

и временных (эпизодических) створов находились по полусумме модулей стока за период летней и зимней межени, т. е. по гарантированным значениям подземного стока в реки, с последующим определением слоя подземного стока за год.

Использование данных о подземном питании рек в период межени по стационарным пунктам наблюдений позволяет учесть характер колебаний подземного стока в многолетнем разрезе и перейти к его средним многолетним годовым значениям. Для пунктов, имеющих продолжительные ряды наблюдений ($n > 25$ лет), средние многолетние значения подземного стока в реки вычислялись непосредственно по имеющемуся ряду наблюдений. Для определения нормы подземного стока большее значение имеет выбор наиболее репрезентативного периода. Такие периоды устанавливались путем построения разностных интегральных кривых модульных коэффициентов подземного стока в реки в период межени для пунктов с периодом наблюдений более 50 лет.

Для пунктов, продолжительность наблюдений на которых менее 25 лет, средние многолетние значения подземного стока в реки определялись на основании графического построения связей соответственных модулей стока приводимого пункта и аналога. Для контроля полученных величин для приведения использовалось несколько створов-аналогов. Как показали выполненные на основе этих связей расчеты коэффициентов корреляции, связь между сравниваемыми пунктами довольно тесная и их значения лежат в пределах 0,80—0,90. В ряде случаев при $n < 10$ лет для графического определения средних многолетних значений подземного стока использовались данные о минимальном месячном стоке.

Сопоставление результатов определения значений подземного питания рек на гидрометрических станциях с его средними многолетними значениями позволяет вычислить переходные коэффициенты для всех пунктов измерений, а использование этих пунктов в качестве аналогов для эпизодических створов дает возможность получить для них средние многолетние значения подземного стока в реки. Использовать данные гидрометрических створов, выбранных в качестве аналога для получения переходных коэффициентов, можно только в том случае, если генезис вод до створа аналога и приводимого пункта примерно однороден. Иначе говоря, гидрогеологические условия формирования подземного питания рек должны быть одинаковыми. Для установления этого используются подробные гидрогеологические материалы и в первую очередь карты и схемы дренирования основных водоносных горизонтов, составленные на основе гидрогеологических разрезов территории, сведения о мощности и фильтрационных свойствах водовмещающих пород. Для выяснения областей разгрузки и питания глубоких во-

доносных горизонтов анализируются карты гидроизогипс и гидроизопьез¹.

Вычисление коэффициентов для перехода от значений подземного стока по створам с единичными измерениями расходов воды к их средним многолетним значениям проводится для контроля по ряду створов-аналогов и за окончательное принимается их среднеарифметическое значение.

Сравнение определенных по результатам гидрометрических съемок в межень 1963 и 1964 гг. средних многолетних значений подземного стока в реки, приведенных для ряда пунктов в табл. 1.3, показывает их довольно хорошую сходимость. Отклонения от среднего значения не превышают для большинства пунктов 20 %.

Таблица 1.3

Сравнение средних многолетних значений подземного притока в межень, определенных по результатам летних гидрометрических съемок 1963 и 1964 гг.

Река — пункт	Норма, определенная по измерениям в 1963 г., л/с	Норма, определенная по измерениям в 1964 г., л/с	Средняя норма, л/с	Отклонение от среднего значения, %
Северский Донец — Подольхи	0,41	0,62	0,52	19
Нежеголь — Терновая	0,84	0,61	0,72	15
Короча — Дмитриевка	0,64	0,81	0,72	12
Корень — Крапивное	0,50	0,26	0,38	32
Оскол — Кулига	3,64	3,64	3,64	0
Оскол — Каплино	1,50	1,69	1,60	6
Оскол — Афоньевка	2,01	1,90	1,96	3
Оскол — Козловка	1,82	1,48	1,65	10
Стужень — Бурцевка	1,46	1,15	1,30	12
Герасим — Герасимово	2,82	1,90	2,36	20
Чуфичка — Нижнее Чуфичево	0,12	0,08	0,10	20
Котел — Обуховка	0,49	0,70	0,60	17
Холок — Холки	0,95	0,62	0,78	20
Донецкая Сеймица — Сеймице	1,14	0,69	0,92	25
Млодать — Большое Шумаково	1,89	1,70	1,80	6
Полевая Снова — Золотухино	0,92	0,99	0,96	3
Усожа — Жидеевка	0,68	0,50	0,59	18
Солотинка — Кочетовка	0,51	0,73	0,62	18
Усланка — Усланка	2,56	2,81	2,68	5
Пена — Меловое	0,37	0,57	0,47	21
Ока — Алексеевка	0,42	0,62	0,52	19

Для проверки правильности принятой методики перехода от единичных измерений к средним годовым и средним многолетним значениям подземного питания рек проведен расчет

¹ Анализ гидрогеологических особенностей формирования подземного стока в реки на территории ЦЧО выполнен в ГГИ по материалам ГУЦР и литературным данным [105, 155].

этих величин с использованием данных по стационарной наблюдательной сети. С этой целью из таблиц измеренных расходов воды, публикуемых в гидрологических ежегодниках, для пунктов с продолжительными рядами наблюдений произвольно выбирался измеренный в период межени расход воды, который считался как эпизодический. По этому расходу с помощью переходных коэффициентов, определенных по створам-аналогам, вычислялось среднее многолетнее значение подземного стока в реки, которое затем сравнивалось с нормой стока, полученной по фактически наблюдаемому ряду (табл. 1.4). Как видно из приводимых данных, наибольшие отклонения не превышают 20 %, составляя в среднем 10—11 %.

Таблица 1.4

Оценка точности определения норм подземного притока в период межени

Река—пункт	Площадь водосбора, км ²	Норма подземного притока, определенная по измеренному расходу	Норма подземного притока, определенная по ряду	Отклонение нормы, определенной по измеренному расходу, от нормы, определенной по ряду	
				абсолютное	%
Сейм — Зуевка	2 320	0,96	0,86	—0,10	12
Тускорь — Курск	2 320	1,28	1,14	—0,14	12
Свапа — Старый город	3 690	1,01	1,09	0,08	7
Навля — Навля	1 566	1,41	1,25	—0,16	13
Сосна — Елец	16 300	1,31	1,58	0,27	17
Ока — Белев	17 590	1,68	1,56	—0,12	8
Снежать — Карачев	347	0,61	0,70	0,09	13
Сейм — Рышково	7 469	0,98	1,11	0,13	12
Сейм — Рыльск	18 100	1,32	1,24	—0,08	6
Рать — Беседино	615	1,69	0,79	0,10	6
Зуша — Мценск	6 000	2,54	2,14	—0,40	19
Северский Донец — Изюм	22 600	0,50	0,49	0,01	2
Северский Донец — Лисичанск	52 400	0,39	0,48	0,09	19
Нежеголь — Шебекино	2 070	0,74	0,68	0,06	9
Казенный Торец — Райское	936	0,18	0,15	0,03	20
Кривой Торец — Алексеево-Дружково	1 530	0,38	0,36	—0,02	6
Десна — Брянск	12 400	1,53	2,03	—0,40	20
Болва — Псурь	3 210	1,61	1,64	0,03	18
Реут — Любичское	960	0,52	0,63	0,11	17
Упа — Орлово	8 210	1,78	1,95	0,17	9
Жиздра — Козельск	6 940	1,16	1,38	0,22	16

Помимо этого правильность определения средних многолетних значений подземного стока в реки проверялась по графикам нарастания расходов с увеличением площади водосборов как для основной реки, так и для ее притоков с использованием данных по стационарным гидрометрическим створам и

створам с единичными изменениями расходов воды. Пример такого построения для периода летней межени в бассейне р. Сейм приводится на рис. 2. Как видно, расходы воды от истоков постепенно увеличиваются, что связано с увеличением глубины дренирования и числа водоносных горизонтов, участвующих в ее питании.

Как известно, в формировании подземного стока в период межени основное участие принимают пресные воды зоны интенсивного водообмена, залегающие неглубоко от поверхности

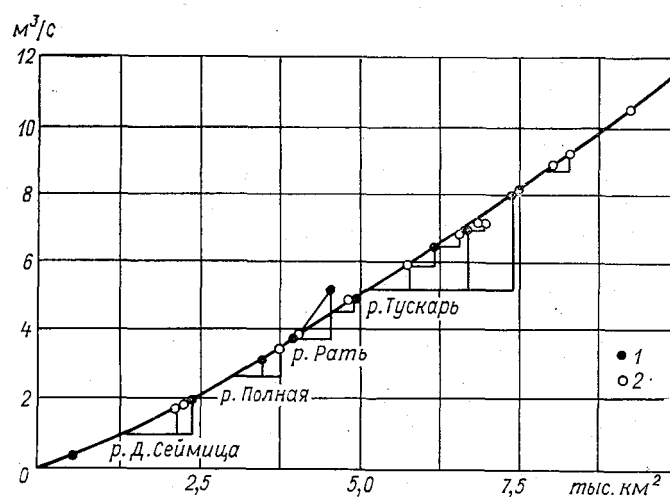


Рис. 2. График нарастания средних многолетних расходов воды с увеличением площади водосбора в период летней межени в бассейне р. Сейм.

1 — стационарные гидрометрические створы; 2 — эпизодические пункты измерений.

земли и обладающие в ряде случаев местными напорами. Режим этих вод в значительной степени зависит от климатических факторов и обладает повышенной динамичностью. В связи с этим изменчивость по территории подземных вод зоны интенсивного водообмена тесно связана с изменчивостью климатических факторов и в целом подчиняется закону географической зональности.

Напорные подземные воды глубокого залегания, принимающие в отдельных речных бассейнах ЦЧО существенное участие в питании рек, как правило, мало динамичны, и режим их определяется многолетними циклами колебаний климатических факторов. Помимо климатических факторов на формирование подземного стока в реки в период межени большое влияние оказывают местные факторы и в первую очередь гидрогеологическое строение водосборов, определяющее степень взаимосвязи

речных и подземных вод, места интенсивной разгрузки или питания подземных вод, степень дренированности водоносных горизонтов по длине рек. Для учета влияния этих местных факторов основными расчетными параметрами при характеристике естественных водных ресурсов являются модули (слои) подземного стока по частным водосборам. Частный водосбор представляет собой участок реки, ограниченный двумя гидрометрическими створами. При разделении водосбора реки на частные бассейны сток, фиксируемый в замыкающем створе, дифференцируется; при этом становится возможным установить размер и характер изменения интенсивности подземного питания реки по ее длине в зависимости от местных факторов, играющих подчас доминирующую роль.

Исходя из изложенного, для территории ЦЧО построена карта подземного стока в реки по частным водосборам (рис. 3).

При построении карты использованы материалы определения средних многолетних значений подземного стока в реки по 211 пунктам наблюдений. Как видно на карте, подземный сток изменяется по территории от 90 мм ($2,86 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$) на севере до 5 мм ($0,16 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$) на юге, что подтверждает зависимость изменений подземного стока в речную сеть от изменений климатических факторов (уменьшение количества осадков, идущих на питание подземных вод, и увеличение испарения).

Наряду с зональным изменением подземного стока в реки его распределение по территории имеет довольно пестрый характер, что связано с изменением интенсивности подземного питания рек, определяемой гидрогеологическими условиями территории ЦЧО, а также местными условиями формирования подземных вод.

Гидрогеологические условия рассматриваемой территории определяются в первую очередь ее геоструктурным строением, элементами которого являются северо-восточный и юго-западный склоны Воронежской антиклизы, первый из которых представляет южное крыло Подмосковного, а второй — северо-восточное крыло Днепровско-Донецкого артезианских бассейнов.

Подземный водораздел указанных склонов располагается в сводовой части Воронежского поднятия, что соответствует верховьям рек Сосны и Неручи. В пределах сводовой части антиклизы водоносные горизонты приурочены к докембрийским и метаморфическим образованиям, песчаным породам юры, песчаным меломергельным отложениям нижнего и верхнего мела.

На юго-западном склоне Воронежской антиклизы водосодержащими породами являются докембрийские образования, известняки и глинистые пески каменноугольного возраста, а также отложения мела и мергелей мелового периода и песчаников и песков палеогена. На северо-восточном склоне обводнены образования архея и протерозоя, девонские отложения, пески и песчаники юры.

Все реки, протекающие в пределах рассматриваемой территории, относятся в основном к бассейнам рек Днепра, Дона и Оки.

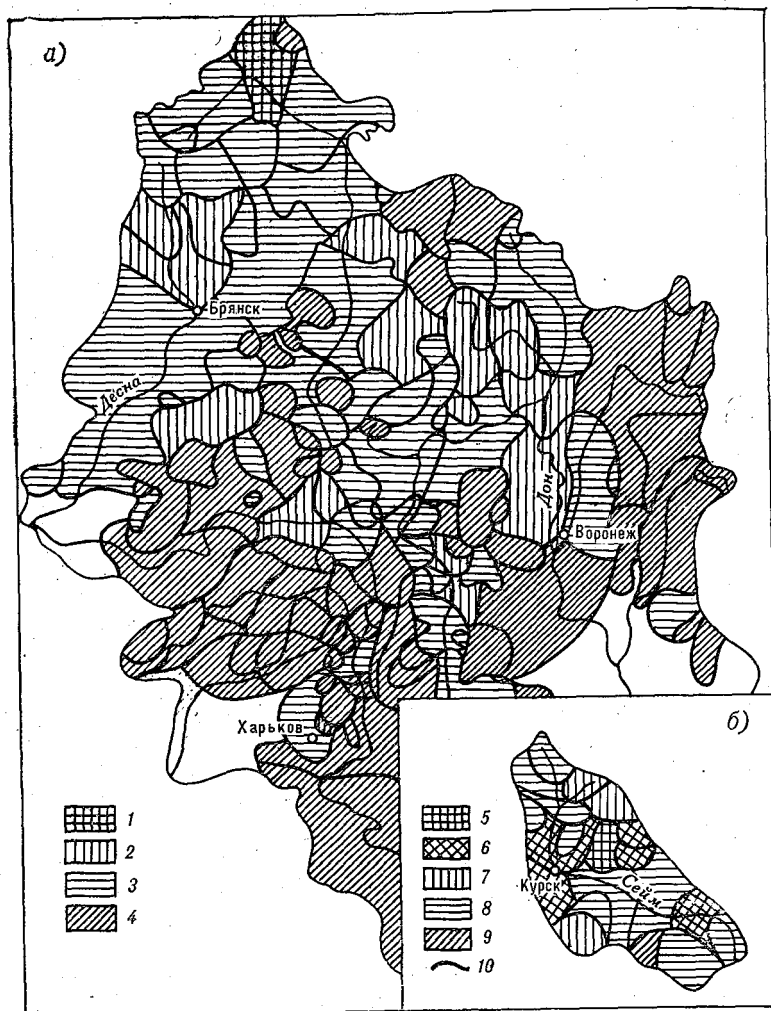


Рис. 3. Распределение слоя подземного стока в реки в период межени на территории ЦЧО (а) и на водосборе р. Сейм до с. Рышково (б).
 1 — больше 90 мм; 2 — от 90 до 61 мм; 3 — от 61 до 31 мм; 4 — меньше 30 мм;
 5 — больше 70 мм; 6 — от 70 до 50 мм; 7 — от 51 до 30 мм; 8 — от 31 до 11 мм;
 9 — меньше 10 мм; 10 — граница частных водосборов.

В бассейне р. Днепра (р. Сейм с притоками, реки Нерусса, Навля, Псёл, Ворскла) основными водоносными горизонтами, принимающими участие в подземном питании рек, являются: сеноман-альбский, приуроченный к средне- и мелкозернистым

пескам, и мергельно-меловой, связанный с закарстованной и трещиноватой зоной мергельно-меловой толщи сенон-турона. Воды юрских, каменноугольных и девонских отложений играют в питании рек подчиненную роль и распространены в верховьях рек Десны и Сейма.

В южной части территории, в верховьях р. Ворсклы, существенное значение в питании реки принимает палеогеновый водоносный горизонт. Подземный сток в бассейнах рек Сейма и Десны изменяется от 30 мм ($0,9 \text{ л/}(\text{с} \cdot \text{км}^2)$) до 70—80 мм ($2,0\text{—}2,5 \text{ л/}(\text{с} \cdot \text{км}^2)$). Для рек бассейна р. Дона характерны значения слоя стока 10—30 мм ($0,3\text{—}1,0 \text{ л/}(\text{с} \cdot \text{км}^2)$).

В бассейне р. Дона реками дренируются породы палеозойского, мезозойского и кайнозойского возрастов. Воды девонских отложений являются основными в северо-западной части территории (в бассейнах рек Дона, Сосны, Ведуги, Олыма, Красивой Мечи). Подземный сток составляет здесь 30—70 мм ($1,0\text{—}2,0 \text{ л/}(\text{с} \cdot \text{км}^2)$). Повышенные значения подземного стока в бассейне р. Красивой Мечи и в низовьях р. Сосны связаны с развитием карстовых явлений и разгрузкой глубоких артезианских вод.

Юрский водоносный горизонт дренируется на ограниченной площади (в верховьях рек Сосны, Тима, Девицы и Кшени); он характеризуется низкой водообильностью, модули подземного стока $0,6\text{—}0,9 \text{ л/}(\text{с} \cdot \text{км}^2)$.

Воды мергельно-меловой толщи развиты в южной части территории (в бассейнах рек Северского Донца, Оскола, Тихой Сосны, Черной Калитвы). В бассейнах рек Северского Донца и Оскола, в верховьях р. Псёл речными руслами дренируются также воды сеноман-альбского водоносного горизонта. Подземный сток этого района в межень составляет 1—30 мм. Повышенное значение слоя стока для водосбора р. Оскола до г. Старого Оскола (90 мм) связано со специфическими геоструктурными и гидрогеологическими условиями этого бассейна, благодаря чему происходит интенсивная разгрузка напорных артезианских вод. Повышенное значение подземного стока отмечается также и в верховьях р. Северского Донца (50 мм), что связано с разгрузкой мощных родников.

При среднем и особенно крупномасштабном картировании естественных водных ресурсов возникает необходимость их подсчета для всех водоносных горизонтов и комплексов, выделяемых при гидрогеологической съемке и развитых очень часто на небольших площадях. Эта задача может быть решена путем построения карты подземного стока с использованием данных стационарных наблюдений и гидрометрических работ в межень. Пример такого построения для участка р. Сейма до впадения в нее р. Реут приведен на рис. 3. Как видно, использование результатов гидрометрических работ в период межени в значительной степени детализирует картину изменения интенсивности

подземного питания на отдельных участках бассейнов, что связано с большой изменчивостью гидрогеологических условий формирования подземного стока, учет которой необходим при расчетах естественных ресурсов подземных вод.

Гидрометрический метод количественной оценки подземного стока в реки основывается на использовании материалов массовых единичных измерений расходов воды. Вполне ясно, что степень точности исходных материалов и их качество определяют надежность всех дальнейших расчетов и обобщений.

Наиболее полные исследования по оценке точности экспедиционных гидрометрических работ при изучении ресурсов подземных вод выполнены Н. С. Ратнер [162]. Ею рассмотрены вопросы, связанные с оценкой точности измерений расходов воды в зависимости от принятой методики, приборов и гидравлических условий на участке реки. В качестве основного метода был использован эмпирический, основанный на статистической обработке данных, полученных по результатам:

1) последовательных измерений расходов воды в одном створе по одной методике и одной вертушкой, но разными исполнителями (схема I);

2) последовательных измерений расходов воды в одном створе по одинаковой методике, но разными вертушками (схема II);

3) последовательных измерений расходов воды в смежных створах одной вертушкой (схема III);

4) параллельных (последовательных) измерений расходов воды в смежных створах разными вертушками (схема IV).

Всего для оценки точности гидрометрических работ на малых реках было использовано 600 измерений расходов воды, из них 97 при ледоставе. Выводы, полученные Ратнер, можно сформулировать в следующем виде:

а) значения средней квадратической ошибки исполнителя (схема I) и прибора (схема II) для расходов воды более 0,050 м³/с практически соизмеримы и составляют 2—4 %. При меньших расходах воды они увеличиваются до 8 %;

б) ошибки за счет выбора створа (схема III) в 2 раза превышают погрешности, полученные при работах по схемам I и II, и составляют 4,5—10 %;

в) суммарная случайная погрешность измерений расходов воды на малых реках изменяется от 5 до 14 %. В 95 % случаев она составляет 10—30 %, изменяясь также в зависимости от величины расхода воды;

г) суммарная случайная погрешность измерений в зимний период примерно в 1,5—1,7 раза выше, чем при свободном русле;

д) систематические погрешности измерений в зависимости от скорости потока имеют преимущественно положительный знак, однако они незначительны и не превышают 2,5 %;

е) систематические погрешности измерений в зависимости от глубины потока носят случайный характер, при этом их значение для различных градаций расходов воды изменяется от 0,7 до —2,5 %.

Как правило, недостаточное количество сведений о режиме подземных вод на водосборе и изменчивости их запасов во времени приводит к необходимости использовать косвенные показатели интенсивности подземного питания и количества подземных вод, дренируемых водотоками. К числу методов, в которых используются такие показатели, относятся так называемые «морфометрические».

В 1956 г. С. Н. Боголюбов и З. П. Богомазова [14] для оценки роли подземного питания в годовом стоке рек предложили использовать зависимость подземного стока от глубины эрозионного вреза водотока. Дальнейшее развитие этот метод получил в работах А. И. Зеленого [67], который установил зависимость подземного питания рек от «объема дренирующей зоны бассейна»

$$Q_{\text{п}} = 0,0397 V_{\text{з. д.}}^{0,894} \quad (1.6)$$

Объем дренирующей зоны бассейна в этом случае определяется по выражению

$$V_{\text{з. д.}} = H_{\text{з. д.}} F = (H_{\text{ср}} - h_{\text{ср}}) F = \sum f_i h_i \left(1 - \frac{h_{\text{ср}}}{H_{\text{ср}}}\right), \quad (1.7)$$

где $V_{\text{з. д.}}$ — объем зоны дренирования, км³; $H_{\text{ср}}$ — средняя высота водосбора, м; $h_{\text{ср}}$ — средняя отметка продольного профиля речного русла, м; $\sum f_i h_i$ — объем бассейна, км³; F — площадь водосбора, км²; $H_{\text{з. д.}}$ — мощность зоны дренирования, м.

Определение глубины эрозионного вреза водотока в водоносные горизонты связано с необходимостью установления соотношения между отметкой вреза и отметками водоносных горизонтов, участвующих в питании реки до замыкающего створа. Вместе с тем увеличение глубины эрозионного вреза связано с увеличением размера реки, а следовательно, ее водосборной площади. Площадь водосбора в свою очередь является интегральной характеристикой морфологических и гидрологических условий формирования подземного стока в реки. Это обстоятельство позволило разработать методику расчета подземного стока в малые реки применительно к району ЦЧО [55].

Как известно, питание рек подземными водами осуществляется главным образом из водоносных горизонтов зоны свободного водообмена с атмосферой. Воды этой зоны находятся под влиянием тех же климатических факторов, что и поверхностные, поэтому при оценке средних многолетних значений подземного стока в реки следует ожидать проявления закона географической зональности, присущего основным стокообразующим факторам. Эта зональность вследствие влияния на процесс обра-

зования и стекания подземных вод местных, свойственных конкретному речному бассейну факторов, может нарушаться, что в целом и составляет основную трудность при оценке подземного притока и естественных ресурсов подземных вод.

Азональные факторы влияют в первую очередь на формирование подземного стока малых рек, так как он определяется прежде всего гидрогеологическими условиями водосборов (обводненность водоносных горизонтов, водопроницаемость пластов, степень взаимосвязи речных и подземных вод и т. д.). Поэтому предварительным этапом при разработке методики определения подземного притока в малые реки явилось гидрогеологическое районирование исследуемой территории.

Подземное питание рек ЦЧО осуществляется дренированием трех основных водоносных комплексов, приуроченных к отложениям неоген-палеогеновой, меловой и девонской систем. В связи с этим в пределах рассматриваемой территории выделяются три гидрогеологических района.

1. Южный район, в границах которого расположены бассейны рек Десны ниже с. Разлеты, Сейма ниже с. Мутино, Псёла ниже г. Сумы, Ворсклы ниже с. Козинка, Уды и Мерлы до устья.

В состав водоносного неоген-палеогенового комплекса входят водоносные горизонты песков, реже песчаников полтавско-харьковского и бучакско-каневского ярусов, разделяемых породами киевского яруса.

2. Центральный гидрогеологический район включает в себя бассейны рек правобережья р. Дона, верховьев р. Оки, реки Сейм, Псёл, Ворскла, Северский Донец с Осколом и др.

Меловой водоносный комплекс образован в верхней своей части карбонатными мело-мергельными породами сенон-турона, в нижней части песками сеноман-альба, а также аптского яруса, подстилаемых глинами апта.

В пределах указанного района по степени глубины вреза речных долин в толщу отложений меловой системы и положению уровня дренирования мелового водоносного комплекса выделяется пять подрайонов.

Для первого подрайона характерна полная дренированность меловых пород и песков сеноман-альба. При этом руслами рек полностью перехватывается грунтовый поток мелового комплекса, поступающий с междуречий к долинам рек Тихая Сосна, Потудань, Олым, Кшень, Свапа, Тускарь и др.

Второй подрайон (бассейны рек Оскола, Сейма, Неруссы, Ревны и др.) характеризуется высокой степенью дренирования толщи коньяк-туронских мелов и мергелей сантона, а также сеноман-альбского водоносного горизонта.

Третий подрайон отвечает условиям, когда долинами рек (Тихая Сосна, Оскол, Сейм и др.) вскрывается толща мелов коньяк-турона, гидравлически связанных с сеноман-альбским водоносным горизонтом.

Для четвертого подрайона, включающего бассейны рек Северского Донца, Псёла, среднее течение р. Оскола, характерно вскрытие долинами рек мергелей сантона с резкой дифференциацией мело-мергельных отложений в долинах рек и между-речных участках.

Основная особенность гидрогеологических условий пятого подрайона (реки Ворскла, Илек, Пена, Айдар, Харьков) заключается в возрастании мощности мело-мергельных пород в кровле сеноман-альбского водоносного горизонта в долинах рек и присутствие мелов кампан-маастрихта, вскрываемых, но не прорезаемых речными долинами.

3. Северный район характеризуется участием в питании рек водоносных горизонтов верхнедевонского комплекса и охватывает бассейны рек Оки, Сосны и Дона (в верхнем течении). В верховьях притоков Оки и Сосны вскрываются также породы мелового водоносного горизонта, воды которого на этих участках речных бассейнов обеспечивают в основном подземное питание рек.

В основу методики расчета подземного стока в малые реки ЦЧО положены принципы, используемые при определении минимального стока в работе [36].

Разделение рек на малые и средние производилось на основании анализа зависимости модуля подземного стока от площади бассейна.

Площадь бассейна, находясь в определенной зависимости от глубины эрозионного вреза и отражая влияние основных факторов стока, является наиболее подходящей характеристикой при исследованиях подземного стока в реки. Естественно, что при выявлении различного рода закономерностей формирования подземного стока в реки, а также разработке методов его расчета правильнее пользоваться величиной объема водоносных горизонтов, принимающих участие в питании реки. Однако в связи со сложностью и неопределенностью нахождения подобного рода характеристик наиболее целесообразно использовать площадь подземного водосбора, которая является интегральным показателем условий дренирования реками водоносных горизонтов и влияния физико-географических факторов на подземный сток в реки. Для рассматриваемого района, как показал анализ карт гидроизогипс, на большей части отмечается совпадение поверхностного и подземного водосборов, что значительно упрощает поставленную задачу и позволяет в дальнейшем пользоваться значениями площадей поверхностных водосборов рек.

Значения подземного стока в реки определялись путем расчленения гидрографов общего речного стока на поверхностную и подземную составляющие по методикам, изложенным в работе [157].

Выполненное гидрогеологическое районирование территории ЦЧО и определение средних многолетних модулей подземного

стока в реки позволило для каждого из выделенных районов построить зависимости модулей подземного стока от площади водосборов рек (рис. 4). Правомерность построения такой зависимости базируется на том положении, что с увеличением глубины эрозионного вреза условия питания рек подземными водами изменяются, но до определенного предела, по достиже-

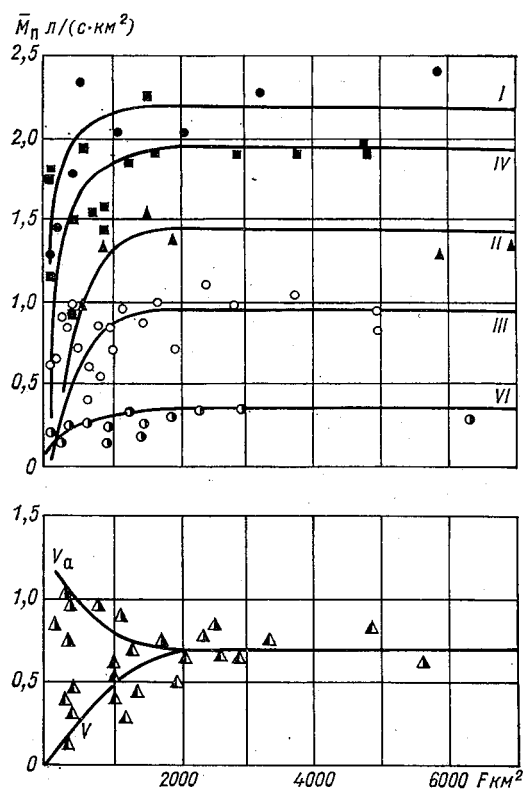


Рис. 4. Зависимость модуля подземного стока в реки от площади водосбора.
I—VI — номера районов.

нии которого значения стока практически остаются постоянными.

Как видно из рисунка, на рассматриваемой территории можно выделить семь типов зависимости модуля подземного стока от площади речных бассейнов. По этим зависимостям определены наибольшие значения площадей водосборов, ниже которых река считается малой. В качестве такого предела приняты площади водосборов, выше которых не происходит резкого изменения или совершенно не изменяется подземный приток реки, т. е.

наступает полное дренирование рекой всех водоносных горизонтов, принимающих участие в ее питании (табл. 1.5, рис. 5).

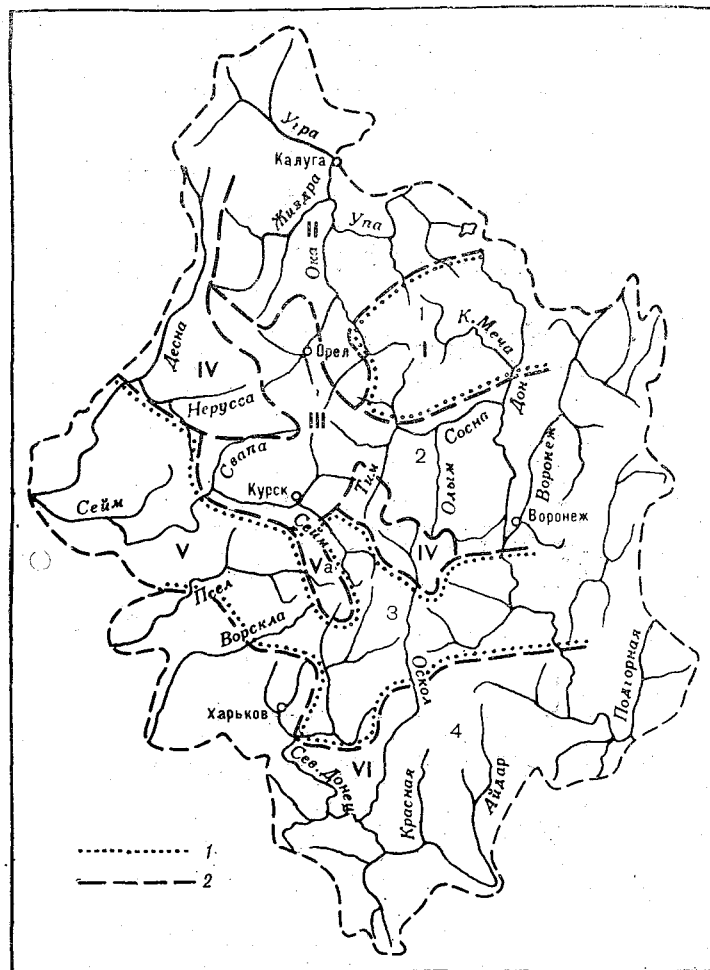


Рис. 5. Районы для определения средних многолетних значений подземного стока в малые реки.

1 — границы районов (1—4) с наибольшей площадью водосбора малых рек, представленных в табл. 1.5; 2 — границы районов (1—VI) с одной типной зависимостью $\bar{Q}_{\text{п}} = f(F)$.

Таблица 1.5

Наибольшие площади водосборов малых рек

Номер района по рис. 5 . . .	1 (I)	2 (II)	2 (III)	2 (IV)	3 (V)	3 (Va)	4 (VI)
Площадь, км ²	1250	1500	1500	1500	2000	2000	1700

Для установления влияния размера бассейна реки на значение подземного стока в нее на рис. 6 приведены зависимости $\bar{Q}_п = f(F)$. Построение подобных зависимостей выполнено для районов с одинаковыми гидрогеологическими условиями. По характеру зависимостей произведено районирование территории. Границы районов проведены по водоразделам рек, а также по границам резкой смены гидрогеологических комплексов, определяющих подземный сток в реки. Всего на рассматриваемой

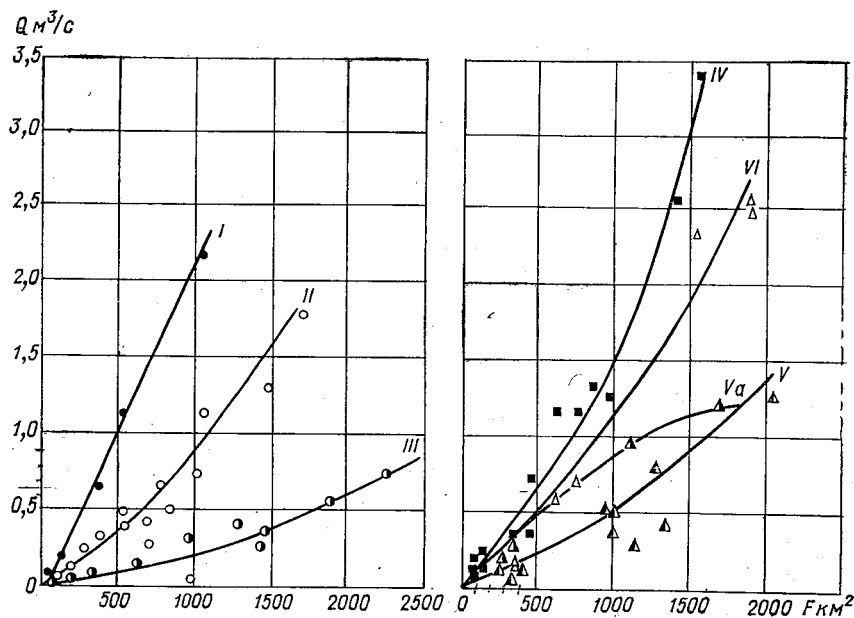


Рис. 6. Зависимость подземного стока в реки от площади водосбора.
I—VI — номера районов.

территории выделено шесть районов (см. рис. 5). Район V по зависимости $\bar{Q}_п = f(F)$ разделен на два подрайона, различающиеся геологическим строением и гидрогеологическими условиями питания и разгрузки подземных вод.

Представленные на рис. 6 зависимости значений подземного притока от площадей водосборов рек аналитически можно выразить уравнением вида

$$\bar{Q}_п = aF^n, \quad (1.8)$$

где F — площадь бассейна реки, км²; a и n — районные параметры, зависящие от климатических условий района, определяющих общий зональный подземный сток в реки, и местных факторов, накладывающих отпечаток на условия дренирования

реками подземных вод и в конечном итоге на значение подземного притока.

Приводимые на рис. 6 зависимости, а также уравнение (1.8) могут быть использованы для определения подземного притока к малым рекам, на которых отсутствуют наблюдения за стоком. При этом параметр a выражает подземный сток в реки с элементарной площади бассейна ($F=1 \text{ км}^2$).

Не рекомендуется рассчитывать подземный приток по уравнению (1.8) для рек с площадями водосборов менее 100 км^2 , поскольку значения стока на таких реках соизмеримы с точностью его подсчета при использовании обычных гидрометрических методов, и выявление влияния местных условий на подземный сток в реки может привести к существенным погрешностям.

Значения параметров a и n , входящих в уравнение (1.8), приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Значения районных параметров a и n для расчета подземного притока в малые реки

Номер района	a	n	Номер района	a	n
I	0,000 43	1,14	V	0,000 10	1,24
II	0,000 85	1,03	Va	0,000 76	1,02
III	0,000 16	1,25	VI	0,000 008	1,48
IV	0,000 77	1,09			

Анализ изменения подземного стока по речным бассейнам территории ЦЧО, включая и малые реки, показывает, что в целом его распределение находится в прямой зависимости от количества осадков, что выражается в преобладании наибольших значений подземного стока в северной части и наименьших — в южной. Эта закономерность является до некоторой степени отражением уменьшения общего количества осадков и возрастания испарения в южном направлении. Для рек широтного и субширотного направлений, к числу которых относятся Сейм, Сосна, Псёл, Ворскла, влияние изменений средних годовых количеств атмосферных осадков и показателей испарения на формирование ресурсов подземных (грунтовых) вод зоны интенсивного водообмена будет, по-видимому, сказываться в меньшей степени.

Различия в значениях модулей подземного притока к малым рекам, как указывалось выше, объясняются не только влиянием физико-географических факторов, но и показателями самого водоносного горизонта, условиями его питания, характером водопроницаемости, условиями разгрузки, гипсометрическим положением его поверхности и др.

К числу постоянно действующих факторов, определяющих запасы подземных вод на водосборе, относятся прежде всего водопроводимость и водоотдача пород, зависящие от степени пористости и закарстованности водовмещающей толщи.

В пределах рассматриваемой территории наибольшей водоотдачей обладают породы мелового водоносного комплекса, представленные песками сеноман-альбского горизонта и мелями коньяк-турона (районы IV, Va). Минимальные значения модулей подземного стока, отмечаемые в районах V и VI, обусловлены, по-видимому, не только уменьшением количества осадков, но главным образом низкой водопроводимостью и водоотдачей мело-мергельных пород на междуречьях, являющихся основными участками восполнения запасов подземных вод сенон-туронского комплекса, из которого и осуществляется питание рек этого района.

Изложенная методика определения подземного стока в малые реки позволяет установить лишь годовые его значения. Определение подземного стока в реки за отдельные сезоны года требует разработки специальных приемов, учитывающих изменчивость запасов подземных вод на водосборе внутри года и динамику подземного притока в зависимости от фазы речного стока.

2. ФАКТОРЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА И ОБЩАЯ СХЕМА ТИПИЗАЦИИ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ ПО УСЛОВИЯМ АНТРОПОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ НА ИХ ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ

2.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В результате интенсивного использования природных ресурсов происходит замена естественных ландшафтов однотипными антропогенными ландшафтами. Населенные пункты, промышленные предприятия, горнорудные разработки с отвалами пустой породы, гидроэлектростанции, водохранилища, каналы, массивы мелиорируемых земель и другие объекты хозяйственной деятельности или полностью уничтожают естественный ландшафт, или приводят к изменению отдельных его компонентов.

Хозяйственная деятельность по своим масштабам в настоящее время настолько велика, что может быть приравнена к естественным природным процессам. Человек эксплуатирует 55 % суши, ежегодно использует 12 % речных вод и 50 % прироста леса, перемещает при строительных и горных работах более 4 триллионов тонн породы, извлекает более 100 млрд. т руды, сжигает 7 млрд. т условного топлива, сбрасывает в водоемы после использования 600 млрд. т промышленно-бытовых стоков, рассеивает на сельскохозяйственные поля и угодья 300 млн. т минеральных удобрений и 4 млн. т ядохимикатов, выбрасывает в атмосферу до 23 млрд. т углекислого газа и более 1 млрд. т других химических веществ [114]. Установлено, что поступление химических элементов из недр земли на поверхность более чем в 100 раз ниже антропогенного.

Уже в современных условиях развития общества в целом ряде стран имеет место региональное истощение различных естественных ресурсов, часть из которых не может быть восстановлена. Появились и быстро нарастают опасные и вредные изменения в природной среде, которые носят глобальный характер и ухудшают условия жизни людей. Природные процессы не считаются с государственными границами, и всякие нарушения экологического равновесия в одном месте Земли оказывают влияние на соседние экологические системы или на экологические системы, расположенные на значительном расстоянии в других местах Земли.

Указанные особенности хозяйственного воздействия на окружающую среду являются важнейшими и требуют тщательного изучения с целью предсказания возможности возникновения непреднамеренных глобальных и региональных природно-климатических изменений. Необходимо знать не только характер и масштабы тех изменений, которые могут наступить в процессе осуществления грандиозных хозяйственных проектов, но и результаты мероприятий по использованию местных природных ресурсов в различных районах страны.

2.2. ФАКТОРЫ АНТРОПОГЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА.

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ХАРАКТЕР ВЛИЯНИЯ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ВОДНЫЙ РЕЖИМ

В результате хозяйственной деятельности человек изменяет естественный водный режим и водный баланс водных объектов. В настоящее время практически не осталось таких речных бассейнов, водный режим которых не испытывал бы определенного антропогенного воздействия. Наибольшее влияние на водный режим и баланс рек оказывают:

- 1) водопотребление и водоотведение, связанные с использованием поверхностных и подземных вод для нужд населения, промышленного и сельскохозяйственного производства;
- 2) урбанизация речных бассейнов;
- 3) горнорудные разработки и водозаборы подземных вод;
- 4) мелиорация земель (орошение засушливых полей, осушение болот и заболоченных территорий);
- 5) сооружение плотин и создание водохранилищ;
- 6) вырубка лесов и их возобновление;
- 7) агротехнические мероприятия;
- 8) дорожное строительство;
- 9) рекультивация.

2.2.1. Водопотребление и водоотведение

Объемы водопотребления и водоотведения возрастают от года к году, что связано с быстрым ростом населения и промышленности, а также с развитием орошаемого земледелия.

По данным И. И. Бородавченко и О. Н. Толстихина [18], из общего количества водных ресурсов, которыми располагает СССР, в 1950 г. забиралось около 90 км³, в 1960 г. — 160 км³, в 1970 г. — 253 км³, в 1975 г. — около 300 км³ поверхностных и подземных вод. В ближайшей перспективе водопотребление достигнет 500 км³, из которых, как предполагают авторы, более половины (280 км³) будет расходоваться безвозвратно. Как видим из данных фактического учета использования водных ресурсов, водопотребление за десятилетие с 1960 по 1970 г. увеличилось в 1,6 раза, а в целом за 25 лет (с 1950 по 1975 г.) более чем в 3,2 раза.

Представляет интерес привести для сравнения данные о водопотреблении, которые были определены на перспективу на основании детального анализа материалов генеральных схем комплексного использования водных ресурсов и директивных документов С. Л. Вендровым и Г. Г. Гангардтом [34] (табл. 2.1) и Г. П. Калинин [77] (табл. 2.2).

Таблица 2.1
Данные о водопотреблении в СССР [34] км³/год

Водопотребитель	1962 г.		Предполагаемое на 1970—1972 гг.	
	полное	в том числе безвозвратное	полное	в том числе безвозвратное
Сельское хозяйство	105	82	178	153
Промышленность	30	6	78	15
Города и рабочие поселки	6	3	16	6
Рыбное хозяйство	7,5	1,8	46	12
Прочие	17	17	25	25
Итого	170	110	340	210

Таблица 2.2
Потребность основных отраслей народного хозяйства в воде [77], км³/год

Вид водопотребления	Полное водопотребление				Безвозвратное водопотребление			
	1960 г.	1970 г.	1980 г.	2000 г.	1960 г.	1970 г.	1980 г.	2000 г.
Водоснабжение населения	5	14	36	70	1	2	5	10
Водоснабжение промышленности	30	60	120	480	5	9,6	12	48
Орошение	110	170	330	550	80	120	240	400
Прочие виды (потери на испарение водохранилищ, обводнение территорий, рыбное хозяйство, охота, спортивное рыболовство, заповедники и т. д.)	30	50	75	100	30	50	75	100
Итого	170	290	460	940	110	180	340	550
Разбавление загрязнений	100	250	532	1960	100	250	530	1960
Итого (округленно)	270	540	990	2010	210	430	870	2510

Сравнивая данные, приводимые в работах [34] и [77], следует отметить большое различие прогнозируемых и фактических значений, а также увеличившийся объем безвозвратного водопотребления (50—60 %).

Оценка будущего водопотребления представляет сложную задачу, поскольку ее решение должно быть выполнено на основании прогноза развития всех отраслей народного хозяйства. Несмотря на приближенный характер расчетов, приведенные Калининским данные (без учета воды на разбавление) практически соответствовали фактическому водопотреблению в 1970 г. и будут, по-видимому, несколько завышенными для 1980 г.

Динамика фактического водопотребления по тем же водопотребителям, что и в табл. 2.2, характеризуется следующими данными (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Динамика водопотребления в СССР, км³/год

Водопотребитель	1965 г.	1970 г.	1975 г.	Прогноз на 1980 г.
Коммунальное хозяйство	6,5	12,6	15,9	20,0
Промышленность, включая ТЭЦ, ГРЭС, АЭС	58,2	89,9	101,4	115,0
Сельское хозяйство, в том числе орошение	104,7	147,7	161,6	180,0
Прочие (потери на испарение с поверхности водохранилищ, рыбное хозяйство, обводнение территорий и т. д.)	100,0	130,6	143,3	160,0
	24,2	38,6	40,1	42,0
Итого	193,6	288,9	319,0	357,0

Большое влияние на водный режим отдельных рек оказывает переброска части воды из одних речных бассейнов в другие. Между речными бассейнами по крупным каналам перераспределяется ежегодно около 40 км³ речного стока. Общая протяженность каналов около 4000 км. После строительства ряда каналов в южных районах ЕТС объем перебросок стока достигнет 100 км³. Однако забор воды из Волги, Днепра, Дуная, Западной Двины и других крупных рек позволяет решить задачи водоснабжения народного хозяйства примерно до 1985 г. Дальнейший рост потребностей в воде в южных районах потребует привлечения ресурсов Севера и Сибири.

Некоторое представление о размерах переброски части стока из одних речных бассейнов в другие в пределах рассматриваемой территории ЕТС дают сведения, приводимые в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Переброска воды в отдельные речные бассейны ЕТС, м³/с

Забор	Сброс	Средний многолетний	Наименьший Год	Наибольший Год
р. Мста	р. Тверца	21,7	—	$\frac{129}{1968}$
р. Волга, Ивановское водохранилище	Канал им. Москвы	39,0	$\frac{11,3}{1942}$	$\frac{70,0}{1968}$
Канал им. Москвы, Ик- шинское, Акуловское, Пироговское водохра- нилища	р. Уча	0,8	$\frac{0,4}{1944}$	$\frac{1,3}{1967}$
	р. Клязьма	2,2	$\frac{0,4}{1944}$	$\frac{4,1}{1968}$
	р. Яуза	2,9	$\frac{0,3}{1954}$	$\frac{5,5}{1966}$
	р. Москва, г. Москва	34,0	$\frac{11,7}{1943-45}$	$\frac{58,0}{1968-69}$

Крупные заборы речных вод на технические и бытовые нужды населенных пунктов, расположенных по берегам рек, осуществляются почти повсеместно из Волги, Москвы, Клязьмы, Оки, Дона, Воронежа, Оскола и др.

Как видно из таблицы, особенно значительным является забор воды из рек Мсты (129 м³/с), Волги (70 м³/с), Москвы в районе д. Рублево (10 м³/с). Забор воды из р. Москвы здесь составляет более половины всего среднего многолетнего стока реки. Значительны также заборы воды из р. Москвы для нужд тепловых электростанций, суммарные значения которых колеблются по годам от 0,68 до 1,4 м³/с [5]. Для технических нужд в ряде городов и поселков отбирается от 2 до 12 % средних многолетних расходов воды.

Суммарный дебит, осуществляемый сотнями крупных групповых и тысячами единичных водозаборов, по ориентировочным расчетам составляет около 300 м³/с. Только в пределах Московской области действует более 6000 водозаборных скважин общей производительностью, превышающей 27 м³/с.

Водоотведение. Воды, изъятые из рек, озер и водохранилищ или из подземных водоносных горизонтов (комплексов), после использования возвращаются обратно в реки или недалеко от мест их изъятия (водоснабжение населенных пунктов), или на значительном удалении от них (использование воды на орошение земель, переброска стока на техническое и коммунальное водоснабжение, использование при эксплуатации ме-

сторождений полезных ископаемых и т. д.). Как правило, суммарное количество воды, изъятая из реки и поступившей в нее обратно, уменьшается на величину потерь воды в процессе ее использования или по пути движения воды от мест забора к местам использования и обратно. Вместе с тем при переброске воды из одних речных бассейнов в другие и при сбросе вод глубоких (не дренируемых рекой на данном участке) водоносных горизонтов количество отводимых после использования вод может быть близко к величине забора воды из реки или существенно больше этой величины. Все это затрудняет учет влияния водопотребления на режим стока.

В 1972 г. количество объектов, сбрасывающих сточные воды и находящихся под контролем, равнялось 85 тыс., а общий объем водоотведения составлял более 100 км³. В современных условиях под контролем находится более 100 тыс. объектов, сбрасывающих до 120 км³ в год сточных вод, из которых 1/4 не проходит необходимой очистки [18].

Если судить по доле сбросных вод в речном стоке (табл. 2.5), то размеры их влияния могут оказаться весьма заметными, особенно на речной сток меженных периодов.

Та часть водных ресурсов, которая расходуется безвозвратно на производство промышленной и сельскохозяйственной

Таблица 2.5
Доля сбросных вод в речном стоке

Река—пункт	Средний многолетний ненарушенный сток, м ³ /с		Расход сбросных всд, м ³ /с	Доля сбросных вод в речном стоке, %	
	общий годовой	подземный в пересече- те на год		от годового	от подземного
Свапа — с. Ста- рый Город	16,0	3,74	0,31	1,9	8,3
Чернь — с. Оста- пово	2,0	0,78	0,31	15,5	30,8
Сейм — д. Рой- ково	27,2	8,51	6,3—8,5	23—31	74—100
Тускарь — г. Курск	10,5	3,06	0,19	1,8	6,2
Осколец — г. Ста- рый Оскол	1,86	0,61	1,93	104	317
Ворксла — п. Яковлево	0,30	0,085	0,38 *	127	447
Везелка — г. Белгород	1,50	0,14	0,03—0,07	2,0—4,7	21,4—50,0
Северский До- нец — г. Белго- род	(6,70)	0,69	0,33—(0,44)	6,6	63,8

* Сброс подземных вод в реку производился при опытных водопонижениях.

продукции или теряется безвозвратно на пути движения воды от водного объекта к месту ее использования и обратно, образует безвозвратные потери. Безвозвратные потери могут быть отнесены к административной территории (республика, край, область и район), речному бассейну или его участку, городу (на-

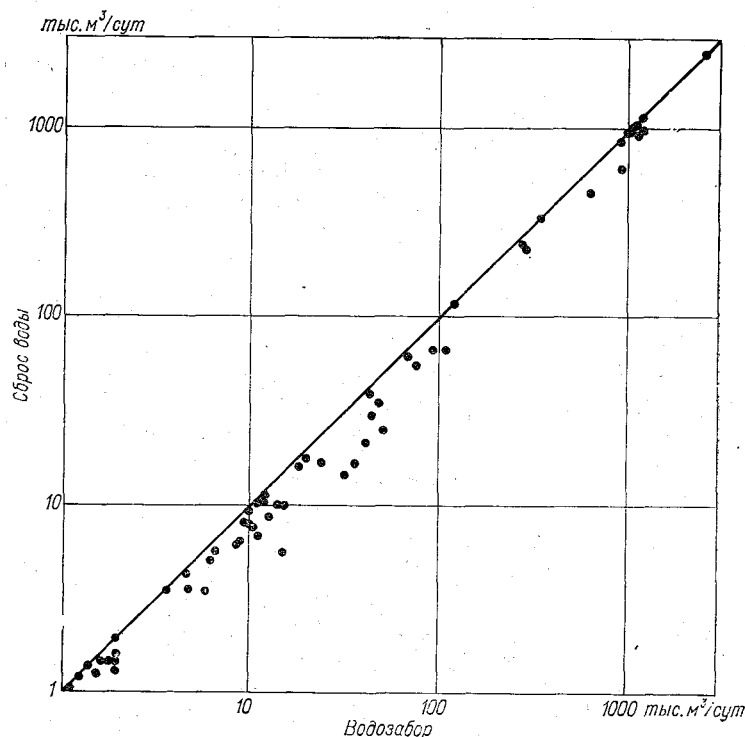


Рис. 7. График связи средних годовых значений суммарного водозабора и сброса воды в реки подземных вод после их использования по отдельным промышленным городам.

селенный пункт) и тому или иному водному, общественно-коммунальному, промышленному и сельскохозяйственному объекту. Из приводимых данных следует, что безвозвратные потери воды изменяются в широких пределах, усложняя оценку влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы и водный режим территорий. В коммунальном хозяйстве безвозвратные потери воды весьма велики, что связано с несовершенством водопроводно-канализационных систем, расходом воды на испарение по пути ее движения и при приготовлении пищи, поливе улиц, транспортировке снега за пределы пунктов и другими причинами. По данным табл. 2.2, они составляют от 15 до 20 % и

должны уменьшаться. По данным ряда обследований потери в жилых и общественных зданиях оцениваются в современных условиях в 20—35 % фактического потребления, что существенно завышает объем водопотребления во многих городах [96, 112]. Эти данные подтверждаются результатами исследований ГГИ, выполненных по ряду промышленных городов на территории ЕТС и приводимых на рис. 7. Из рисунка следует, что безвозвратные потери в целом по городу могут достигать 15—30 %, а в отдельных случаях даже 50 % суммарного водозабора (например, по г. Минску безвозвратные потери составляют 30 % суммарного забора воды [113]).

Безвозвратные потери в промышленности на современном уровне ее развития составляют 12—16 % и приняты на перспективу равными 10 %. Характерной чертой водопотребления промышленных предприятий различных отраслей является то, что удельное водопотребление — расход воды на единицу продукции однотипных предприятий — различается в десятки и сотни раз [124]. Такая значительная разница в потреблении воды предприятиями, производящими одинаковую продукцию, объясняется прежде всего несовершенством и различием технологических процессов и водопроводно-канализационного хозяйства, а также условиями размещения производства (в южных районах водопотребление выше, чем в северных).

Безвозвратные потери воды в сельском хозяйстве состоят из потерь воды в оросительных системах на фильтрацию и испарение с водной поверхности каналов и водохранилищ, расхода воды на выращивание сельскохозяйственных культур, водопой скота и водоснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов. Основные потери воды связаны с фильтрацией и испарением и составляют в среднем 20—40 % общего объема водопотребления. Так, например, Г. П. Калинин (см. табл. 2.2.) безвозвратные потери на орошение на перспективу приняты равными 73 % исходя из существующих в практике соотношений нормы орошения ($11\,000\text{ м}^3/\text{га}$) и потерь воды ($8000\text{ м}^3/\text{га}$).

2.2.2. Урбанизация речных бассейнов

Изменение ландшафта на больших площадях жилыми постройками, промышленными сооружениями, дорогами, дренажно-канализационной сетью и другими элементами урбанизации приводит к коренным преобразованиям структуры водного баланса, водного режима территорий и качества вод. Преобразующая роль урбанизации проявляется как внутри урбанизированных территорий, в особенности городов, так и далеко за их пределами. Отсутствие специальных воднобалансовых исследований на урбанизированных территориях, в городах и

недостаток сетевых наблюдений не позволяют получить строгие расчетные модели происходящих изменений водных ресурсов. Имеющаяся информация характеризует лишь общую направленность процесса и дает представление о порядке величин преобразований отдельных составляющих водного баланса [112, 113].

Общие сведения об урбанизации. Концентрация населения в городах является неизбежным историческим процессом, следствием научно-технической революции XX в. По данным ЮНЕСКО, городское население мира за 1920—1960 гг. увеличилось почти втрое, а за 1960—2000 гг. возрастет более чем в 3 раза и превысит 4 млрд. человек.

По данным всесоюзной переписи 1979 г., в городах Советского Союза проживает 163,6 млн. человек (62 % всего населения), к 2000 г. доля городского населения в нашей стране составит 75 % [50, 112].

Рост численности городского населения сопровождается усилением его концентрации в больших городах. В начале XX в. в мире насчитывалось примерно 360 городов с населением свыше 100 тыс. жителей (5 % всего населения), в 1960 г. — 1500 городов (20 % населения), в 1975 г. в крупных городах было сосредоточено около 35 % всего населения.

В настоящее время города вместе с наземными коммуникациями занимают примерно 2 % площади суши, или 13 % всей интенсивно используемой человеком территории. В мире имеется около десятка городов, из которых каждый занимает площадь более 1000 км².

В СССР территория, занятая городами, незначительна (по данным 1967 г. — 0,35 % всей суши государства), но к 2000 г. она должна увеличиться до 0,75 %. Города отдельных районов занимают огромные площади речных бассейнов, что создает в них напряженный водный баланс.

Для условий ЕТС динамику увеличения площади городов в зависимости от числа жителей в них можно проиллюстрировать графиком (рис. 8).

Процесс «расползания» крупных городов неразрывно связан с формированием городских агломераций, являющихся важнейшей особенностью современной урбанизации. На смену комплексному «точечному» городу в его классическом понимании ныне приходит новая социально пространственная форма расселения — агломерация (мегаполис, метрополис, урбанизированный район и т. д.), которая характеризуется значительно большей территорией, чем прежние города, меньшей компактностью застройки и плотностью населения. Гигантские мегаполисы образуются в США, где предполагается, что их по крайней мере будет три: Бостон—Вашингтон, Чикаго—Питсбург, Сан-Диего—Сан-Франциско с населением в 80, 40 и 20 млн. человек каждый [112]. Такие же гигантские городские агломе-

рации возникают в Англии, Франции, ФРГ, Японии. В перспективе возможно появление мегаполисов, достигающих в поперечнике 200 км [116].

В СССР в качестве крупных городов-агломераций принимаются территории, тяготеющие к городам с населением в 250 тыс. и более. Радиус таких территорий обычно 60 км (для Москвы и Ленинграда — 100 км). В подобных агломерациях происходят большие изменения природной среды с огромным объемом водопотребления и сбросом отработанных вод.

В среднем для всего земного шара на одного городского жителя расходуется воды 150 л/сут ($55 \text{ м}^3/\text{год}$), а на одного сельского — 50 л/сут ($18 \text{ м}^3/\text{год}$). В большинстве городов земного шара в настоящее время удельное потребление воды населением составляет 300—600 л/сут на одного человека (Москва — 600 л/сут, Нью-Йорк — 600 л/сут, Париж — 500 л/сут, Берн — 400 л/сут, Ленинград — 370 л/сут, Лондон — 263 л/сут). По мере роста городов и повышения благосостояния населения водопотребление постоянно увеличивается. Например, с 1900 по 1970 г. удельное водопотребление населения возросло в СССР примерно

в 4 раза, в США в 3—4 раза, в Европейских странах более чем в 2 раза. Уже в настоящее время потребности крупных городов в воде огромны. Так, в водопроводную сеть Ленинграда подается $20 \text{ м}^3/\text{с}$, а в Москве — $60 \text{ м}^3/\text{с}$. Обеспечение водой больших городов за счет местных источников уже зачастую невозможно. В связи с этим для водоснабжения привлекаются артезианские воды или осуществляется переброска воды из других бассейнов. Например, для водоснабжения Нью-Йорка вода подается из источников, расположенных в 250 км от города, а для Лос-Анджелеса — в 320—400 км. Для улучшения водоснабжения Москвы построен канал длиной 128 км, подающий воду р. Волги. Для некоторых городов зарубежных стран разрабатываются проекты строительства сверхдальних водопроводов, протяженностью в несколько сотен километров. Все изложенное выше свидетельствует о том, какие

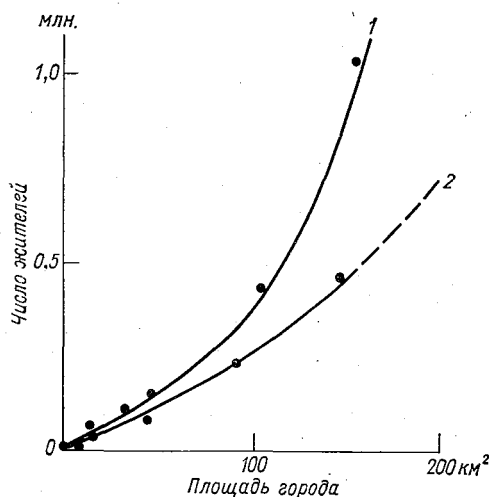


Рис. 8. Увеличение площади крупных (1) и малых (2) городов с ростом числа жителей.

огромные количественные преобразования вносит урбанизация в водный баланс территории. Однако важнейшей проблемой представляется не количественное истощение водных ресурсов, а прогрессирующее ухудшение качества как поверхностных, так и подземных вод. Даже если 50 % сбрасываемых вод искусственно очищать, то и в этом случае для разбавления и нейтрализации их вредного воздействия потребуется чистой воды в 12—15 раз больше объема сбросов [110].

Гидрологические аспекты урбанизации. Сток воды с урбанизированной территории в количественном и качественном отношении резко отличается от стока с естественных водосборов. Различия в той или иной мере проявляются при сравнении объемов стока за год и за отдельные периоды, максимальных и минимальных расходов воды, а также соотношений между поверхностной и подземной составляющими общего речного стока. Факторами, определяющими изменения водного баланса на урбанизированной территории, помимо климатических, могут быть:

- вовлечение во влагооборот вод из-за пределов местного водосбора (для обеспечения коммунального водоснабжения и производства);

- наличие больших участков водонепроницаемых и малопроницаемых площадей за счет зданий, асфальтированных улиц, промышленных и хозяйственных строений, препятствующих инфильтрации и обуславливающих высокие коэффициенты стока;

- наличие дренажных и канализационных сетей, сбрасывающих воды в водные объекты (поверхностные и подземные) местного водосбора или выводящих их за его пределы.

Годовой сток с урбанизированных водосборов, как правило, значительно больше (до 10 %), чем с неурбанизированных. Причина этого — большие осадки в городах и меньшие безвозвратные потери, связанные с инфильтрацией [110]. Фактические данные, показывающие значительное увеличение годового стока в водоприемниках, приведены в ряде работ американских и японских исследователей [92, 197, 200, 207, 211]. Так, по данным наблюдений на руч. Перманенте около г. Сан-Франциско, уже в первые годы городской застройки было отмечено, что доля стока по отношению к стоку периода с ненарушенным режимом заметно возрастает. Если в начале периода приращение стока с намечавшейся к застройке площади составляло 18 %, то после того, как было застроено около $\frac{1}{5}$ площади водосбора, равной 52 км², оно достигло 70 % [197].

Увеличился с 1,3 м³/с (период 1937—1943 гг.) до 3,6 м³/с (период 1960—1962 гг.) средний годовой сток руч. Ист-Медоубрук в районе г. Нью-Йорка за счет сброса сточных вод, забираемых из водоносных горизонтов [217]. Данные наблюдений за стоком на руч. Сяндзин в г. Токио показали, что по мере

развития строительства суммарный годовой сток также увеличился [92].

Исследования, выполненные в СССР, дают основание для выводов о том, что годовой сток рек под влиянием городов имеет различную направленность: может оставаться без изменений, увеличиться или значительно уменьшиться.

Максимальные расходы воды. Наиболее резко урбанизация сказывается на значениях, объеме и продолжительности максимальных паводочных расходов [197, 200]. Так, на руч. Ист-Медоу-Брук при частичной урбанизации водосбора средний расход единичного паводка увеличился с $8,7 \text{ м}^3/\text{с}$ (1939 г., до урбанизации) до $22 \text{ м}^3/\text{с}$ (1962 г., после частичной урбанизации). При полной урбанизации водосбора средний расход дождевых паводков может в 8 раз превышать его значения в естественном ландшафте [217]. Наибольшие расхождения между расходами паводков на естественных и урбанизированных водосборах имеют место при их малых и средних значениях, когда коэффициенты стока отличаются более резко. При ливневых расходах редкой повторяемости различия их значений для урбанизированных и естественных водосборов уменьшаются вследствие сближения коэффициентов стока.

Д. Андерсон [197] разработал схему расчета паводков с урбанизированных водосборов для районов Северной Вирджинии (США) и получил эмпирические зависимости для максимальных расходов разной повторяемости. В расчетах используются пять независимых переменных: площадь водосбора, длина водотока, уклон бассейна, процент площади с водонепроницаемой поверхностью, степень развития дренажно-канализационной системы. Предложенная расчетная схема может быть использована и для других районов при условии разработки параметров, соответствующих конкретным природным условиям и особенностям урбанизированной территории.

В настоящее время большинство работ по исследованию максимального стока в городах посвящено методам расчета пропускной способности дренажно-канализационных сетей. Расчет строится на основе определения стокообразующей части дождя, его продолжительности и интенсивности, коэффициентов стока, уклона и характера поверхности водосбора [200]. Поиски идут в направлении разработки наиболее оптимальной модели для расчета на ЭВМ гидрографа дождевого стока применительно к конкретному городу. В работе [200] дан исторический обзор различных методов и сделано сопоставление результатов расчетов по ним применительно к городам Чикаго для площади $0,04 \text{ км}^2$ и Цинциннати (шт. Огайо) — $9,6 \text{ км}^2$. Рассмотрены модели для различных формул, от эмпирической, применявшейся еще в конце прошлого столетия ($Q = ciF$, где Q — максимальный дождевой расход, c — коэффициент стока, i — показатель формы хода интенсивности дождя, F — площадь водосбора), до

современных, учитывающих физические свойства водосбора и особенно процессы инфильтрации. Авторы делают вывод, что первостепенное значение имеет правильный учет инфильтрации, которая возрастает по мере увеличения рассчитываемой площади водосбора. Делается заключение о необходимости продолжать попытки совершенствовать расчетные модели, повышая наряду с этим точность определения вводимых параметров.

Изучению процессов формирования дождевых паводков на застроенных территориях и их водного баланса посвящены работы [68, 69]. В них предложен метод расчета стокообразующих дождевых паводков, основанный на уравнении водного баланса и баланса потерь. Расчеты базируются на данных экспериментальных исследований в Москве и Минске.

Меженный сток в результате урбанизации может как снижаться, так и повышаться. Если водоснабжение ведется из местных источников, то уменьшение меженного стока наиболее вероятно ввиду уменьшения инфильтрации дождевых и особенно талых вод из-за вывоза снега за пределы города.

Повышение меженного стока водотоков в пределах урбанизированной территории может происходить в случае сброса в них отработанных вод, забираемых для водоснабжения города из смежных бассейнов. Например, на р. Скок-Крик [216, 217] с площадью водосбора 215 км² (штат Иллинойс), бассейн которой интенсивно застраивался в 1951—1965 гг., отмечено существенное возрастание меженного стока, так как в реку сбрасываются сточные воды коммунального хозяйства, а поступает вода из-за пределов бассейна. Меженный сток р. Моррисон-Крик (штат Калифорния) в результате урбанизации и забора воды на водоснабжение из ее бассейна снизился на 30 % [207].

При расчетах стока необходимо учитывать наличие и особенности водораспределительной и канализационно-сбросной сетей. Установлено, что утечка вод из этих сетей может быть значительной и являться источником пополнения грунтовых вод. На основе анализа материалов по 91 городу США подсчитано, что потери в городских водораспределительных системах составляют в среднем 12 % общего объема забираемой воды. В работе [216] указано, что в 36 распределительных системах г. Чикаго потери достигают 850 млн. м³ в день, или 20 % общего объема воды, забираемого для коммунальных нужд.

2.2.3. Водозаборы подземных вод и горнорудные разработки

В настоящее время ведется широкая эксплуатация подземных вод водозаборными сооружениями горнорудных, промышленных и сельскохозяйственных предприятий, водозаборами населенных пунктов. В СССР только для водоснабжения населения, промышленности и орошения полей ежегодно оборудуется 30—40 тыс. буровых скважин [135], а из недр земли из-

влекается около 25 км³ пресных подземных вод или более 11 % их эксплуатационных запасов [124]. Водопотребление 60 % городского и 80 % сельского населения нашей страны обеспечивается подземными водами. В Дании, Бельгии и Финляндии потребность в воде за счет ресурсов подземных вод удовлетворяется на 90 %, а в ФРГ и Голландии — на 75 % [124]. В большинстве стран мира пресные подземные воды составляют не менее 50 % всего водопотребления. Исключением являются США, потребляющие до 20 % пресных подземных вод.

Если учесть, что при освоении месторождений различных полезных ископаемых осуществляется комплекс водопонижительно-дренажных мероприятий, то ежегодный отбор подземных вод можно значительно увеличить. Так, по данным О. В. Попова [157], современный отбор подземных вод в СССР достигает 95—105 км³, или 10—12 % средних годовых естественных возобновляемых ресурсов подземных вод.

Характеристика взаимодействия поверхностных и подземных вод в районах крупных водопонижений. Эксплуатация подземных вод сопровождается целым рядом явлений, оказывающих отрицательное влияние на природные условия и водообеспеченность окружающих территорий. Особенно заметным такое влияние стало в районах интенсивной эксплуатации подземных вод водозаборами крупных городов и водопонижительными системами шахт и карьеров, осваивающими различные месторождения полезных ископаемых.

Потенциальная возможность изменения водного режима и других природных особенностей речных бассейнов в связи с эксплуатацией подземных вод появляется с момента понижения их уровня и образования в эксплуатируемых водоносных горизонтах (комплексах) депрессионных воронок. Развивающиеся при извлечении воды из недр земли депрессионные воронки распространяют свое влияние на различные части речной долины (междуречье, русло, склон, пойма) или на обширную площадь нескольких речных бассейнов. Поэтому при оценке влияния эксплуатации подземных вод на водный режим речного бассейна важно знать распространение депрессионной воронки как в разрезе эксплуатируемого водоносного горизонта, имеющего нижние и верхние границы, так и в плане по площади речного бассейна в соответствии с его контурами.

Взаимодействие речных и подземных вод для условий развития депрессионной воронки в безнапорном водоносном горизонте показано на рис. 9. Аналогично взаимодействие речных и подземных вод в условиях развития депрессионных воронок в напорных водоносных горизонтах.

Некоторое представление о характере режима подземных вод, формирующихся в районах расположения водозаборов, дают типовые графики, представленные на рис. 10. Как видно из рисунка, режим речных вод в районе крупных водопониже-

ний находится в прямой зависимости от режима подземных вод, и наоборот, режим подземных вод определяется потерями реч-

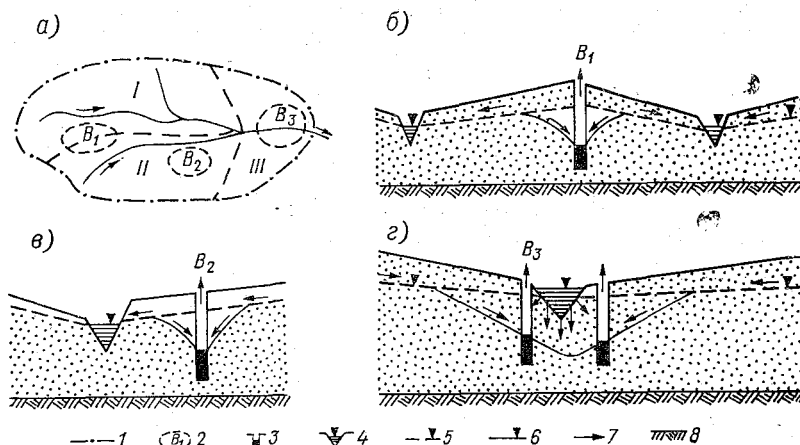


Рис. 9. Схема взаимодействия речных и подземных вод в районах крупных водопонижений при расположении водозаборных сооружений и депрессионных воронок на приводораздельных (а, б), склоновых (а, в) и прирусловых (а, г) участках речного бассейна.

1 — граница водосбора; 2 — граница депрессионных воронок уровня подземных вод; 3 — водозаборное сооружение; 4 — река; 5 — уровень подземных вод в естественном режиме; 6 — уровень подземных вод при их эксплуатации; 7 — направление движения воды; 8 — подстилающие породы.

ных вод в границах депрессионных воронок на инфильтрацию и их отток к водозаборам.

Размеры депрессионных воронок различны и зависят от ряда причин, главными из которых являются величина отбора под-

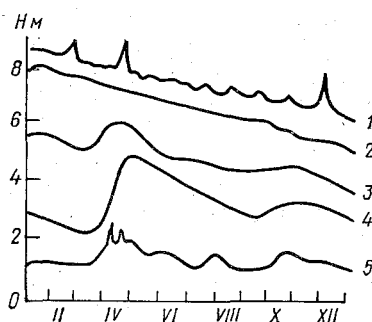


Рис. 10. Режим уровней подземных вод в районах крупных водопонижений при эксплуатации напорных (1, 2), напорно-безнапорных (3) и безнапорных (4, 5) водоносных горизонтов [135].

земных вод, продолжительность эксплуатации водоносного пласта, гидрогеологические условия района, включая особенности эксплуатируемого водоносного пласта (мощность, водообильность, водоотдача и т. п.), и условия взаимосвязи его с поверхностными водами и подземными водами других водоносных горизонтов.

В процессе изъятия подземных вод зона пониженных уровней распространяется по эксплуатируемому водоносному горизонту на десятки и сотни километров, охватывая различные части и всю площадь речных бассейнов.

В настоящее время депрессии уровня подземных вод, сливаясь в региональные понижения, оказывают влияние на формирование водного режима на значительных площадях КМА, МАБ и др.

На реках и водоемах, находящихся в зоне влияния депрессионных воронок, может происходить:

- 1) частичное или полное прекращение подземного питания;
- 2) фильтрация речных вод в нижележащие водоносные горизонты в случаях снижения уровня подземных вод ниже вреза гидрографической сети;

- 3) увеличение стока в случаях отведения в поверхностные водные объекты после использования подземных вод из глубоких, не дренируемых рекой водоносных горизонтов, или подземных вод, перехваченных воронками из соседних речных бассейнов (расширение границ подземного водосбора), а также увеличение подземного притока за счет сокращения «испарения» воды с поверхности эксплуатируемого водоносного горизонта, если оно имело место в естественных условиях, при значительном снижении в нем уровня подземных вод.

О развитии депрессионных воронок в различных природных условиях можно судить по данным табл. 2.6, составленной по материалам работ [3, 9, 47, 48, 63, 145, 150—152].

Как видно из таблицы, развитие депрессионных воронок достаточно объективно характеризуется модулем питания подземных вод. Модуль питания подземных вод (M_d л/(с·км²)), или модуль водообильности эксплуатируемого водоносного горизонта, представляет собой расход воды, поступающей к водозаборным сооружениям в единицу времени с единицы площади депрессионной воронки. Он определяется по формуле

$$M_d = \frac{Q_d \cdot 1000}{F_d}, \quad (2.1)$$

где Q_d — расход воды, извлеченной из-под земли всеми водозаборными сооружениями в пределах депрессионной воронки площадью F , которая ограничена нулевой изолинией снижения, м³/с.

Следует подчеркнуть, что модуль подземного питания лишь приближенно характеризует условия восполнения запасов эксплуатируемого водоносного горизонта, так как не во всех случаях можно с высокой точностью учесть забор подземных вод, осуществляемый на больших площадях всеми водозаборными сооружениями, включая колодцы, одиночные скважины, групповые водозаборы, системы по осушению месторождений и т. п.

Таблица 2.6

Характеристика распространения депрессионных воронок в поверхности подземных вод

Местоположение депрессионной воронки	Эксплуатируемый водоносный горизонт	Глубина задевания эксплуатируемого водоносного горизонта от поверхности земли, м	Дебит водозабора, л/с	Снижение уровня подземных вод, м	Площадь депрессионной воронки, км ²	Модуль питания подземных вод, л/(с·км ²)
Крупные водозаборы						
Бассейн р. Северский Донец	Меловой	50—100	560	6—14	2800—3800	0,15—0,20
Бассейн р. Тускаръ	Сеноман-альбский	30—60	230	—	28—50	4,7—8,2
Бассейн р. Сейм	Девонский	80—150	470	55—60	20 000—26 000	0,018—0,023
Бассейн р. Оки	Девонский	70—150	180	35	11 300—20 000	0,009—0,016
Бассейн р. Поли (Московская обл.)	Каменноугольный	30—80	1450	15—25	1520—2400	0,61—0,96
Осушение месторождений полезных ископаемых						
Михайловское месторождение железных руд (бассейн р. Чернь)	Докембрийский Надорский	70—90 20—30	220 70	70—75 8	1000—1260 126—280	0,17—0,22 2,5—5,6
Старооскольское месторождение железных руд (бассейн р. Осколец)	Докембрийский Надорский	80—100 30	2240 2240	93 43	1260 530	1,78 4,40
Яковлевское месторождение железных руд (бассейн р. Ворсклы)	Каменноугольный	430—450	310	210	11 300	0,027
Кизеловский каменноугольный бассейн	Каменноугольный	600—900	40—670	—	113—5500	0,89—0,13

Местоположение депрессионной воронки	Эксплуатируемый водоносный горизонт	Глубина залегания эксплуатируемого водоносного горизонта от поверхности земли, м	Дебит водозабора, л/с	Снижение уровня подзаборной воды, м	Площадь депрессионной воронки, км ²	Модуль питания подземных вод, л/(с·км ²)
Донецкий каменноугольный бассейн	Каменноугольный	—	53	0,4—2,7	(3,8)	(14)
Подмосковный каменноугольный бассейн	Каменноугольный	—	100—580	10—15	28	3,5—20,0
Североуральское месторождение бокситовых руд (бассейн р. Сосьвы)	Трещинно-карстовый (карбон и девон)					
Миргалимсайское месторождение полиметаллических руд	Трещинно-карстовый (карбон и девон)	20—300	3200	260—280	710—1000	3,2—4,4
Джезказганское месторождение полиметаллических руд	Пермский, трещинные воды	60—250	36—230	200	24—51	1,5—4,5
Одиночные водозаборы (осушение мелиоративных земель)						
Голодная степь	Четвертичные отложения	22	18	4,5	0,28	64,3
Голодная степь	То же	11—12	0,7—2,9	8—8,5	0,126	5,6—23
Голодная степь	"	65—130	18	—	12,6	1,4
Голодная степь	"	70	37	8,1	—	—
Голодная степь	"	49	44,8—50,8	8,8—16,1	0,35	129—145
Северная Лугань	"	60	14,5—19,5	11,4—13,3	0,70—1,13	16—17
Карасу-Зангибассар	"	53	44—53	16—21	3,14	14—17
Арадаянская степь	"	28—46	30—60	7—19	1,5—3,1	20—19
Вахшская долина	"	39—87	38—68	5,7—6,3	0,13—1,54	292—44

Кроме того, значительные затруднения возникают при определении границ распространения водопонижений по эксплуатируемому водоносному горизонту. Последние оцениваются по материалам наблюдений за уровнем подземных вод по сети режимных скважин, густота которой не одинакова для различных территорий. Наиболее благоприятными в отношении освещения материалами режимных наблюдений являются районы разработки месторождений полезных ископаемых.

Как можно судить по данным табл. 2.6, депрессионные воронки, образовавшиеся в девонских водоносных горизонтах на территории КМА при эксплуатации подземных вод относительно крупными водозаборами, взаимодействуя между собой, распространяются на значительные расстояния (рис. 11). Практически изолинией нулевого снижения уровня подземных вод ограничивается площадь до 100 000 км². При сравнительно небольших водозаборах (до 1,0 м³/с) радиус влияния этих депрессионных воронок по эксплуатируемому водоносному горизонту достигает десятков, а нередко и сотен километров. Все это свидетельствует о весьма затрудненной связи поверхностных и подземных вод, которая обуславливается относительно глубоким залеганием рассматриваемых водоносных горизонтов и наличием выдержанных мощных водоупоров.

В условиях непосредственного взаимодействия поверхностных и подземных вод, когда отсутствуют сплошные водоупоры и водоносные горизонты залегают близко от дневной поверхности, при высокой фильтрационной способности пород депрессионные воронки не получают значительного развития. Например, при осушении железных руд на территории КМА, каменного угля в Подмосковье и Донбассе, бокситов и каменного угля на Урале, полиметаллических руд на склонах хр. Каратау и других месторождений, а также при эксплуатации многочисленных водозаборов в бассейнах рек площадь депрессионных воронок редко превышает 1500—2000 км², а радиус их влияния 20 км. Незначительное развитие депрессионных воронок в этих районах при весьма большом отборе подземных вод, достигающем 2—3 м³/с и более, свидетельствует об активном их восполнении из поверхностных водных источников.

Большие модули питания подземных вод по ряду одиночных скважин, находящихся в засушливых районах страны, также указывают на исключительно высокую водообильность эксплуатируемых водоносных горизонтов и широкие возможности восполнения их запасов из поверхностных водных источников.

Зависимость размеров депрессионных воронок подземных вод от формирующих их факторов. Интенсивность отбора подземных вод, обуславливающая развитие депрессионных воронок во времени, с развитием народного хозяйства нарастает непрерывно,

о чем можно судить по данным табл. 2.7 и рис. 12. Но увеличение отбора не беспредельно и ограничивается эксплуатационными запасами используемого водоносного горизонта.

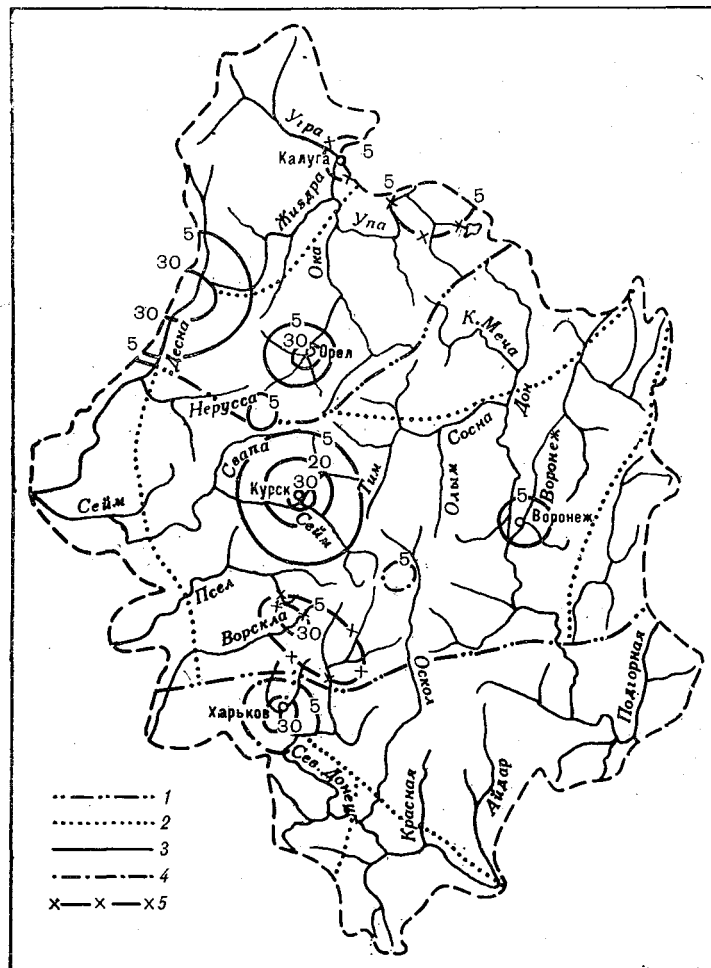


Рис. 11. Депрессионные воронки уровня подземных вод на территории Курской магнитной аномалии.

1 — граница ландшафтных зон; 2 — граница физико-географических районов; 3 — снижение уровня подземных вод в метрах от статического в верхнедевонском водоносном горизонте; 4 — то же, в келловейбате; 5 — то же, в нижнем карбоне.

Режим отбора подземных вод при водопонижительных мероприятиях меняется в течение года, увеличиваясь в период весенних половодий и уменьшаясь в меженные периоды. Примерно так же изменяются значения отборов воды из рек,

Таблица 2.7

Средний годовой отбор подземных вод в различных речных бассейнах, л/с

Местоположение водозабора (речной бассейн)	Период				
	1911—1920	1921—1930	1931—1940	1941—1945	1946—1950
Территория Курской магнитной аномалии, бассейн р. Осколец	—	—	—	—	—
Московский артезианский бассейн, бассейн р. Поли	320	350	540	700	720
Московский артезианский бассейн, бассейн р. Москвы	—	128	128	178	247
Маргалимсайское месторождение полиметаллов	—	—	—	55	222
Московский артезианский бассейн, отбор речных вод из р. Волги	—	—	—	17 000	20 500

Местоположение водозабора (речной бассейн)	Период			
	1951—1955	1956—1960	1961—1965	1966—1970
Территория Курской магнитной аномалии, бассейн р. Осколец	—	1 078	1 830	2 736
Московский артезианский бассейн, бассейн р. Поли	722	909	1 430	1 390
Московский артезианский бассейн, бассейн р. Москвы	278	424	530	822
Маргалимсайское месторождение полиметаллов	1 280	1 970	2 350	3 000
Московский артезианский бассейн, отбор речных вод из р. Волги	34 600	40 000	49 000	67 000

которые для сравнения приведены в табл. 2.7. Таким образом, размеры отбора подземных вод находятся в прямой зависимости от водности поверхностных источников питания, что делает весьма динамичными границы депрессионной воронки как внутри года, так и от года к году (рис. 13). По осредненным годовым значениям отбора подземных вод и объему осушенных пород можно построить зависимость, достаточно надежно характеризующую устойчивость депрессионной воронки при работе водозабора. Зависимость этого вида для условий бассейна р. Осколец приведена на рис. 14.

Объем пород, осушенных в результате комплекса водопонижительных и дренажных работ в бассейне р. Осколец, вычислен по формуле

$$V_d = \frac{\pi R^2 h}{3}, \quad (2.2)$$

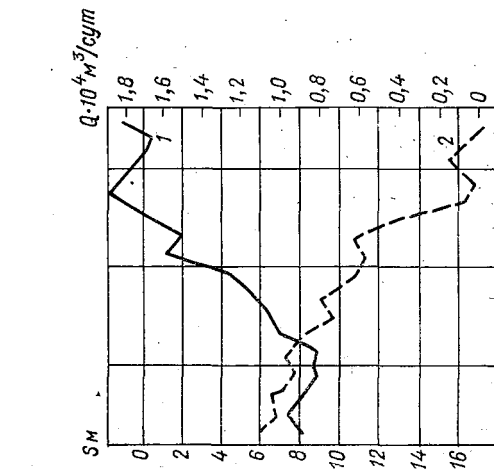


Рис. 12. Изменение средних годовых значений отбора и уровня подземных вод в районах эксплуатации крупных водозаборов [135].

1 — расход воды; 2 — снижение уровня подземных вод в центре депрессионной воронки от статического.

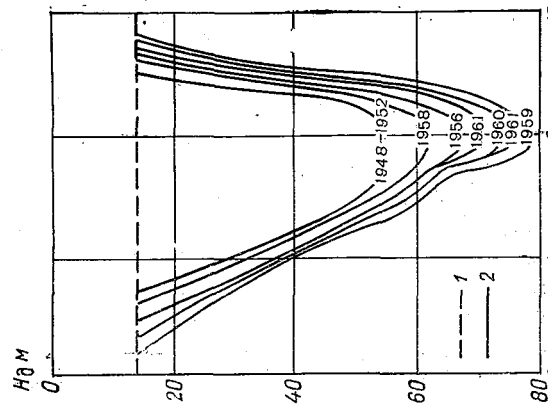


Рис. 13. Развитие депрессионной воронки уровня подземных вод при интенсивной эксплуатации водозаборов [135].

Уровень подземных вод; 1 — статический, 2 — динамический.

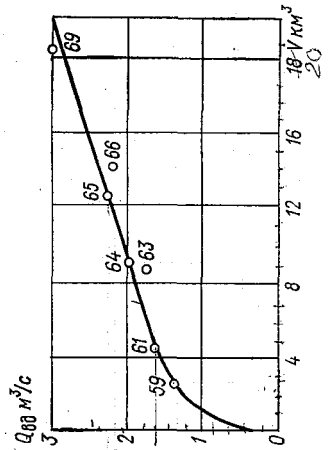


Рис. 14. Зависимость объема пород, осушенных в результате водоопытных работ (V) при эксплуатации Лебединской группы месторождений железных руд в бассейне р. Осколец, от отбора подземных вод ($Q_{вд}$).

Цифры у точек — годы.

где V_d — объем осушенных пород, или объем депрессионной воронки, км³; h — высота максимального снижения уровня подземных вод от статического в центре воронки, км; $\pi R^2 = F_d$ — площадь круга, равновеликая площади распространения воронки по эксплуатируемому водоносному горизонту.

За высоту максимального снижения уровня подземных вод принималась величина снижения уровня всех водоносных горизонтов включительно до архей-протерозоя, наблюдаемая на Лебединском железорудном карьере.

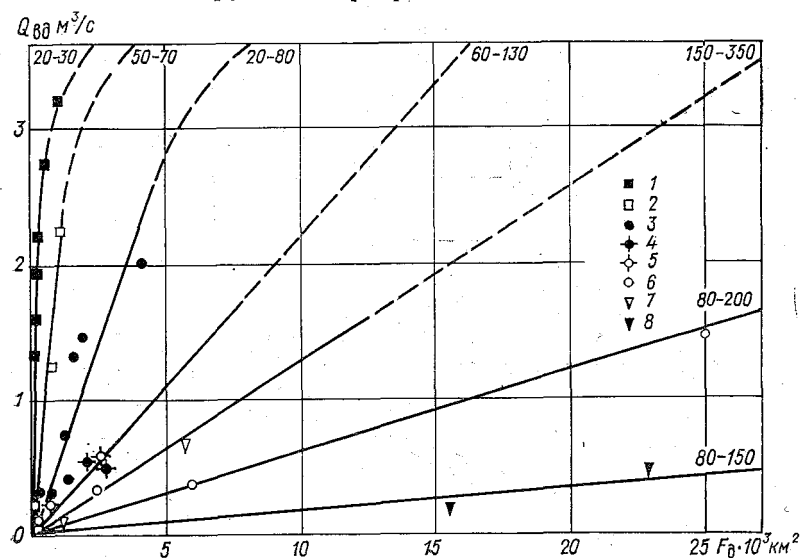


Рис. 15. Зависимость площади депрессионной воронки F_d от суммарного отбора подземных вод $Q_{вд}$ из различных водоносных горизонтов.

Горизонты: 1 — сеноман-альбский, 2 — меловой, 3 — верхне- и нижнегжельский; 4 — мячковско-подольский; 5 — каширский; 6 — упинский; 7 — протвинско-серпуховский, 8 — верхнедевонский; цифры у кривых — глубина залегания кровли эксплуатируемого водоносного горизонта.

Следует отметить, что наличие такой связи дает возможность прогнозировать по объему осушенных пород размеры отбора подземных вод, а также возможные преобразования природных условий, которые могут иметь место в пределах развития депрессионных воронок. Особенно большое значение при изучении нарушений режима подземных и поверхностных вод и их прогнозировании имеет установление связи дебита водозаборных сооружений и площади распространения депрессионных воронок. Такая связь позволяет определить границы влияния водопонижений в пределах площади речных бассейнов для различных гидрогеологических условий (рис. 15).

Распространение депрессионной воронки по мере увеличения дебита водозабора исследовано М. В. Фадеевой [184]. Она от-

мечает, что на первом этапе работы крупного водозабора (первые четыре года), когда срабатываются статические запасы, уровень подземных вод снижается быстро и происходит основное формирование депрессии. В последующие годы подземный водораздел постепенно смещается к реке, и после понижения уровня подземных вод до отметок дна реки и ниже (примерно через 15 лет) река становится одним из основных источников

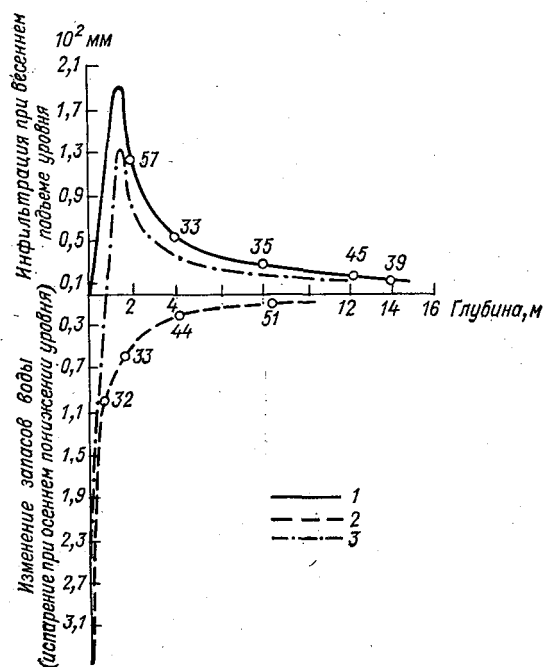


Рис. 16. Зависимость величины питания подземных вод от глубины их залегания (по А. В. Лебедеву—В. С. Ковалевскому).

1 — инфильтрация атмосферных осадков; 2 — испарение с поверхности подземных вод; 3 — питание подземных вод; цифры у точек — номера скважин.

питания водозабора. В течение первых 15 лет эксплуатации водозабора не только сокращается питание реки подземными водами, но и происходит интенсивный расход речных вод на фильтрацию в пределах депрессионной воронки. Поэтому в последующие годы скорость снижения уровней подземных вод замедляется, отличаясь от первоначальной в 5—6 раз. При этом большое значение имеют условия взаимосвязи поверхностных и подземных вод.

Рассматривая вопрос об изменении режима подземных вод при эксплуатации, необходимо отметить работы [117, 118, 135],

в которых на примерах различных районов страны (Подмосковье, Казахстан, Предкавказье) показано, что при снижении уровня подземных вод, залегающих неглубоко от земной поверхности, а следовательно, при увеличении мощности зоны аэрации, уменьшаются потери подземных вод на испарение. Одновременно с увеличением глубины залегания подземных вод уменьшаются размеры инфильтрации атмосферных осадков. Часто испарение сокращается быстрее, чем инфильтрация осадков, что приводит к некоторому увеличению запасов эксплуатируемого водоносного горизонта (рис. 16).

На тех глубинах, на которых испарение с поверхности подземных вод практически не наблюдается, питание подземных

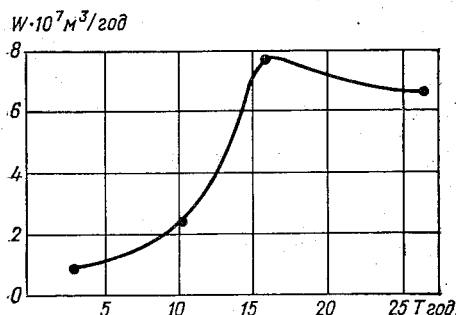


Рис. 17. Изменение инфильтрационного питания подземных вод в пределах площади депрессионной воронки по мере ее развития (по А. В. Лебедеву—В. С. Ковалевскому).

вод под влиянием снижения их уровня начинает постепенно уменьшаться (рис. 17). Выводы, сделанные М. Ф. Фадеевой и А. В. Лебедевым, дополняют друг друга и подтверждаются исследованиями, результаты которых подробно изложены в работах [139, 182, 183]. Кратко можно указать лишь, что увеличение дебита водозабора способствует расширению депрессионной воронки и усилению инфильтрационного питания эксплуатируемого водоносного горизонта

как за счет дополнительного привлечения поверхностных и подземных вод, так и за счет сокращения потерь подземных вод на испарение.

Роль речных вод в формировании запасов эксплуатируемых подземных вод видна из графиков, представленных на рис. 18. Для их построения использованы данные об интенсивности отбора подземных вод из эксплуатируемого водоносного горизонта и о скорости снижения уровня подземных вод в центре депрессионной воронки. Интенсивность отбора и скорость снижения уровня подземных вод вычислялись делением их суммарных значений на число лет работы водозабора. Учитывалось также местоположение водозабора в речном бассейне (водораздельные участки, склоны и террасы долины, близость к реке), гидрогеологические особенности в районе водозабора и глубина залегания эксплуатируемого водоносного горизонта.

Анализируя полученные связи для условий Московского артезианского бассейна, можно сделать следующие общие выводы.

1. Размеры восполнения запасов подземных вод в районах длительной эксплуатации водозаборных сооружений в значительной степени зависят от местоположения водозаборов и площади депрессионной воронки в речном бассейне, а также от глубины залегания эксплуатируемого водоносного горизонта. При прочих равных условиях наиболее обеспеченными питанием являются приречные водозаборы, наименее обеспеченными — приводораздельные.

2. Большинство приводораздельных и склоновых водозаборов действует при ограниченном питании за счет перехвата

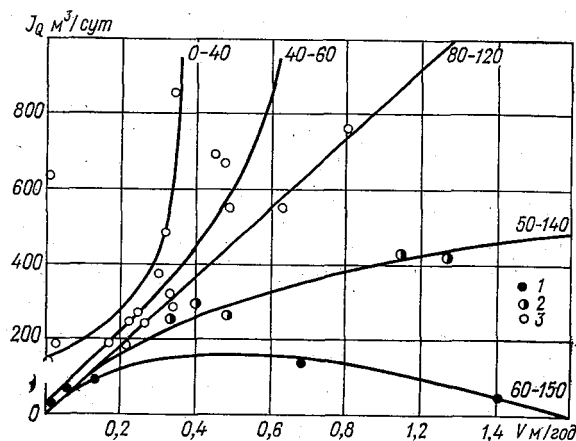


Рис. 18. Связь между скоростью снижения уровня V и интенсивностью отбора J_Q подземных вод верхнегжельского водоносного горизонта в бассейне р. Клязьмы (условия многолетнего развития депрессионных воронок).

Водозаборы подземных вод: 1 — приводораздельные; 2 — склоновые, или террасовые; 3 — приречные; цифры у кривых — глубина залегания кровли эксплуатируемого водоносного горизонта, м.

части подземного стока в пределах влияния их депрессионных воронок, иногда захватывающих бассейны соседних рек, и сработки статических запасов эксплуатируемого водоносного горизонта (две нижние линии связи на рис. 18).

3. Большинство приречных водозаборов в зависимости от глубины залегания кровли эксплуатируемого водоносного горизонта хорошо обеспечено питанием за счет перехвата части подземного стока, разгружаемого в естественных условиях в реку (средняя линия связи на рис. 18), или за счет фильтрации речных вод в пределах депрессионной воронки и перехвата ею подземного стока как в пределах исследуемого водосбора, так и у соседнего речного бассейна.

4. Скорость снижения уровня подземных вод в районе расположения приводораздельных водозаборов наибольшая,

в районе расположения приречных водозаборов — наименьшая. При этом в районах расположения водозаборов, эксплуатирующих более глубокие водоносные горизонты, скорость снижения уровня подземных вод значительно выше, чем в случаях эксплуатации подземных вод ближе расположенного к дневной поверхности водоносного горизонта.

5. Быстрое снижение уровня подземных вод в районах расположения приводораздельных водозаборов ограничивает их производительность и может привести к истощению запасов водоносного горизонта. В пределах влияния склоновых водозаборов снижение уровня подземных вод (при более высоких значениях интенсивности водоотбора) также ведет к истощению запасов водоносного горизонта.

В тех случаях, когда водозаборы (в основном приречные водозаборы с относительно глубоким залеганием водоносного горизонта, а иногда склоновые и приводораздельные водозаборы с близким его залеганием) получают дополнительное питание, изменяющееся по линейному закону (средняя линия связи на рис. 18), скорость снижения уровня подземных вод пропорциональна интенсивности их отбора. В случаях когда при расчетах водозабора (приречные водозаборы с неглубоким залеганием водоносного горизонта) недоучитывается дополнительный приток речных вод в пределах депрессионной воронки, интенсивность отбора подземных вод не только не приводит к увеличению скорости снижения их уровня, а, наоборот, сохраняет и даже сокращает ее.

Уменьшение скорости снижения уровня подземных вод с ростом интенсивности их отбора позволяет увеличить мощность водозабора без особого ущерба запасам эксплуатируемого водоносного горизонта. Например, для многих водозаборов, расположенных в бассейне р. Клязьмы и эксплуатирующих верхнегжельский (клязьминский) водоносный горизонт, отбор подземных вод можно значительно увеличить, доведя его до 30 000—50 000 м³/сут.

6. Анализ связей типа приведенных в качестве примера на рис. 18 позволяет районировать речной бассейн по условиям влияния эксплуатации подземных вод на речной сток. Некоторое представление о роли речных вод в питании эксплуатируемого водоносного горизонта дают данные табл. 2.8, составленной по материалам работ [11, 64, 123, 139, 180, 182, 183, 187].

По данным этой таблицы можно видеть, что из общего объема отбираемых водозабором подземных вод на долю сокращения подземного притока в реки и потерь речных вод на инфильтрацию в пределах депрессионной воронки приходится от 60 до 100 % суммарного водозабора. Вследствие этого в районах интенсивной эксплуатации подземных вод происходит изменение условий питания рек. Как было показано выше,

Таблица 2.8

Средний годовой приток подземных вод к водозаборным сооружениям и его распределение по источникам питания

Характеристика мероприятий	В каких речных бассейнах развивается депрессионная воронка	Год	Источники формирования водопритока									
			фильтрация русловых вод		сокращение подземного притока в реки		сработка вековых запасов		прочие притоки воды		всего	
			л/с	%	л/с	%	л/с	%	л/с	%	л/с	%
Осушение месторождений железных руд, водоснабжение г. Губкина (КМА, открытые карьеры, шахты, водозаборные скважины)	Осколец, Оскол, Чуфичка	1966	925	42	716	33	291	13	274	12	2206	100
Осушение месторождений бокситов (Северо-Уральский бокситовый район, шахты)	Сарайная, Вагран, Калля	1953	755	60,1	464	36,1	49	3,8	0	0	1290	100
Осушение месторождений каменного угля (Кизеловский район р. Губахи, шахты)	Косьва	1964	300	51	266	45	24	4,0	0	0	590	100
Эксплуатация месторождений полиметаллических руд	Боялдыр, Биресек, Кантаги и др.	1964	1920	56,0	1420	41,3	20	0,6	72	2,1	3420	100
Эксплуатация месторождений полиметаллических руд (открытые карьеры, Джезказган, шахты)	Притоки рек Кенгир и Джезды	1964	50	22	60	27	90	40	25	11	225	100
Водозабор подземных вод (МДБ, водоснабжение городов)	Поля, Ушма, Полярный и др.	1969	240	17,4	980	71,0	160	11,6	0	0	1380	100
Эксплуатация Богословского месторождения бурого угля (открытый карьер)	Лапча	1966—1970	140	47	160	53	0	0	0	0	300	100

по мере снижения уровня подземных вод сокращается подземное питание рек и происходит потеря части русловых вод на фильтрацию в нижележащие водоносные горизонты. Фильтрация русловых вод значительно увеличивается при опускании уровня подземных вод ниже вреза русел, в результате чего участки речных бассейнов, в пределах которых в естественных условиях происходила разгрузка подземных вод, становятся областями их дополнительного питания.

В речных бассейнах, где производится интенсивная эксплуатация подземных вод, могут исчезать родники, ручьи и мелкие реки, снижаться уровни воды в озерах и водохранилищах. Временные водотоки и малые реки, сток которых формируется в пределах развития депрессионных воронок, часто полностью исчезают.

Режим постоянно действующих водотоков, сток которых формируется в основном за пределами влияния депрессий, в зоне их развития также может существенно измениться под влиянием воронок.

Наиболее значительно влияние эксплуатации подземных вод сказывается на режиме малых и средних рек с площадями водосборов до 500—1000 км². Еще большим оказывается влияние эксплуатации подземных вод на сток речных бассейнов, расположенных в районах развития карстующихся пород.

С увеличением площади речного бассейна или с увеличением расхода воды в речной сети (например, во время половодья) изменения в режиме стока будут менее выраженными, так как доля нарушений с увеличением расходов воды сокращается (см. табл. 2.5).

Влияние водозаборов подземных вод и горнорудных разработок на водные ресурсы. Влияние водозаборов подземных вод и горнорудных работ с водопонижениями на водный режим речных бассейнов может быть показано на следующих примерах. Исследованиями ГГИ на территории КМА на основании детальных и многолетних комплексных гидрологических наблюдений было установлено [54], что в результате освоения Старооскольской группы железорудных месторождений при понижении уровня подземных вод в центре осушения на 93 м произошло значительное изменение водного режима р. Осколец. За 10 лет эксплуатации месторождений (к 1967 г.) подземное питание реки сократилось на 24 % по сравнению с многолетним значением естественного годового стока. В бассейне р. Осколец появились две зоны интенсивной фильтрации речных вод, тяготеющие к железорудным карьерам. Фильтрационные потери речных и рудничных вод, которые сбрасываются в р. Осколец в пределах влияния депрессионной воронки в размере 2,24 м³/с, составили 58 % среднего многолетнего значения годового стока. Если бы изъятые при осушении подземные воды отводились за пределы бассейна р. Осколец, то в меженный период река

полностью пересыхала. Однако за счет сброса рудничных вод и особенно той их части, которая прежде не дренировалась рекой, в устьевой части р. Осколец, у г. Старый Оскол $F = 494 \text{ км}^2$) наблюдается постепенное увеличение водности. К 1967 г. водность реки была выше естественной для годового стока на 33 % и для стока устойчивой межени на 157 %.

Аналогичные результаты оценки потерь стока р. Осколец под влиянием отбора подземных вод получены также В. С. Плотниковым [152], В. Д. Бабушкиным и Ф. И. Лосевым [10] путем моделирования процессов взаимодействия речных и подземных вод в районе Лебединского и Стойленского железнорудных карьеров. Этими авторами было найдено, что около 40 % суммарного притока воды в Лебединский карьер (1700—1800 м³/ч) составляют воды р. Осколец и около 15 % (до 800 м³/ч) — воды «гидроотвалов», расположенных в пойме этой реки. Таким образом, к Лебединскому карьере в 1964—1966 гг. поступало воды около 2600 м³/ч.

Необходимо отметить, что первую попытку определения потерь воды из р. Осколец в районе Лебединского карьера путем непосредственного измерения расходов воды по длине реки на одном из участков депрессионной воронки выполнил в 1962 г. Е. П. Писанец [150]. Полученные значения потерь речных вод для участка реки автор распространил на всю ее длину в пределах развития депрессионной воронки и получил величину, равную 1000 м³/ч.

Большее практическое и методическое значение имеют исследования формирования притока подземных вод к горным выработкам Миргалимсайского месторождения полиметаллических руд, выполненные И. Б. Вольфцуном и К. И. Смирновым [146]. На основании использования многолетней информации о стоке, метеорологических элементах и их изменении в условиях проведения горнорудных работ на юго-западных склонах хр. Каратау Вольфцун и Смирнов произвели расчеты притока поверхностных и подземных вод к месторождениям полиметаллических руд и определили, что в зависимости от водности года на долю потерь русловых вод в пределах депрессионных воронок приходилось от 20 до 70 % общего притока подземных вод к месторождению.

Такие же данные о притоке подземных и поверхностных вод к разработкам Миргалимсайского месторождения полиметаллических руд получены Л. З. Леви [123]. Ей удалось показать, что под влиянием работы шахтного водоотлива и с развитием депрессионной воронки, захватившей к 1966 г. более 100 км² речного водосбора, потери воды из рек в 1960—1966 гг. возросли по сравнению с 1956—1959 гг. на 30—35 % и достигли в среднем за год 3,3 м³/с.

Используя метод множественной корреляции, Леви предложила формулу, позволяющую рассчитывать максимальный

водоприток к месторождению с заблаговременностью 1,5—2 месяца.

Исследуя формирование подземных вод в районе Североуральского бокситового месторождения, к выводу о потерях речных вод в зонах развития депрессионных зон приходят А. А. Колодяжная, М. А. Сунцов, А. А. Огильви и В. К. Хмелевский [187]. Они обнаружили, что под влиянием рудничного водоотлива и широкого развития депрессионных воронок в поверхности трещинно-карстовых вод образовались участки интенсивного поглощения стока рек, ручьев и карстовых источников (табл. 2.9).

Таблица 2.9

Водоприток в шахты Североуральского бокситового месторождения в 1953 г.

Источник формирования ресурсов в бассейне	Расход воды, м ³ /ч
Инфильтрация в пределах воронки и сток из областей питания	1680,5
Сработка вековых запасов бассейна	176,4
Поглощение в долине р. Сарайной	692,0
Поглощение в долине р. Вагран	1418,0
Поглощение в долинах рек Калы и Черемушки	633,0
Поглощение водосброса шахты в северной части	46,0
Всего	4646,9

Определение потерь подземного стока на участках развития депрессионных воронок позволило оценить приток подземных вод в шахты и сравнить его с фактическим водоотливом. Фактический среднегодовой приток ко всем месторождениям, по данным шахтного водоотлива, в 1953 г. был равен 4273 м³/ч, т. е. его значение оказалось меньше расчетного на 373,5 м³/ч, или на 8,7 %.

Особенно показательными в этом отношении являются результаты исследований, выполненных Н. С. Кошевым [98] в районе Богословского месторождения бурого угля (Южный Урал). Автор отмечает, что до начала работ по искусственному понижению уровня подземных вод в районе месторождения наблюдалось большое количество ручьев и источников, связанных с трещинно-карстовыми водами девонских известняков. Дебит отдельных источников достигал в летнее время 100 л/с. Средний многолетний сток составлял 6,22 л/(с·км²), а подземный сток в реки — 2,96 л/(с·км²). В связи с интенсивной отработкой запасов угля на месторождении возникла необходимость значительного понижения уровня подземных вод (к 1970 г. на 100—150 м от его первоначального положения), что изменило режим поверхностных и подземных вод. В этих условиях сред-

ний многолетний модуль подземного стока составляет 6,3 л/(с×км²), т. е. практически равен общему речному стоку до начала водопонижающих и дренажных работ.

Оценке влияния эксплуатации подземных вод на поверхностный сток в пределах речных бассейнов посвящены также работы Е. Л. Минкина [139]. Автором выделены основные факторы, определяющие локальное и региональное снижение речного стока при эксплуатации подземных вод, приведены рекомендации по оценке уменьшения стока.

Для наиболее простого случая, когда русло прорезает водоносный горизонт до горизонтального водоупора и фильтрационные свойства горизонта в плане и по разрезу однородны, Минкин рекомендует несложные формулы расчета сокращения речного стока под влиянием работы одиночного и группового водозабора, состоящего из любого числа разноебитных и произвольно расположенных скважин. Для условий затрудненной связи вследствие фильтрационной неоднородности и русловых отложений при ограниченной ширине реки и асимметричном фильтрационном истоке Минкиным разработаны формулы оценки «ущерба» речному стоку при эксплуатации подземных вод. Следует подчеркнуть, что приводимые автором формулы не учитывают всего многообразия природных условий и могут быть использованы лишь для приближенных расчетов.

Минкиным сформулированы общие положения относительно оценки регионального «ущерба» речному стоку при эксплуатации подземных вод на значительной площади. Автор утверждает, что эксплуатация любого водозабора, независимо от его местоположения относительно речной долины и от условий залегания водоносного горизонта (напорного или безнапорного), обязательно рано или поздно скажется на режиме поверхностных вод. Это влияние может быть самым различным: речной сток будет существенно ниже водоотбора, соответствуя, как правило, безвозвратным потерям, или практически не сократится, или вследствие сбросов подземных вод в реки возрастет.

Из зарубежных работ, посвященных изучению взаимосвязи поверхностных и подземных вод в условиях эксплуатации водозаборов, наиболее значительными являются исследования американских и немецких ученых [204—206, 210, 212].

Аналитические решения применительно к условиям безнапорного водоносного горизонта, из которого не происходит утечки в нижележащие слои, нашел М. Хантуш [206]. С их помощью можно рассчитать уменьшение речного стока на любой момент откачки подземных вод и полный объем его уменьшения за период непрерывного отбора подземных вод.

М. Хантуш также предложил способ оценки уменьшения речного стока и запасов подземных вод в процессе их эксплуатации для бесприточного водотока большой протяженности.

Приводимые автором формулы сложны и могут применяться лишь для ориентировочных расчетов в строго ограниченных условиях.

М. Хантуш на основании своих исследований делает следующие выводы:

1) расход реки, гидравлически связанной с водоносным горизонтом, может в значительных размерах уменьшаться под влиянием отбора подземных вод близлежащими к реке скважинами;

2) в процессе отбора уменьшается естественный расход подземного потока, питающего реку, и происходит инфильтрация в берега;

3) степень влияния откачек на сток реки зависит от размера отбора подземных вод и расстояния между скважиной и рекой.

Некоторое представление о возможных изменениях речного стока при сбросе использованных подземных вод дают наблюдения на руч. Ист-Медоу-Брук (площадь водосбора 315 км²) в районе Нью-Йорка [217]. До 1937 г. бассейн ручья не был застроен (интенсивное строительство жилых домов началось с 1940 г.). Канализационная сеть, сбрасывающая отработанные воды в ручей, была введена в 1943 г. на площади в 230 га, а в 1962 г. — на 1400 га. Средний годовой сток ручья соответственно составил 1,3 м³/с в 1937—1943 гг. и 3,6 м³/с — в 1960—1962 гг. Если учесть, что водность периодов, за которые рассчитан годовой сток, была примерно одинаковой, то сток ручья за счет сброса использованных подземных вод увеличился в 3 раза.

Результаты исследований других американских ученых в этом направлении ограничиваются качественной оценкой процесса без рекомендаций по расчетам. Например, Р. Мансон [212] указывает на пополнение запасов подземных вод из водоемов и водотоков, если их уровень опускается ниже отметок дна поверхностных водоемов. На изменение речного стока и водного режима окружающих территорий в связи с отбором подземных вод указывают и другие авторы, в частности Л. М. Штернберг [218], Е. П. Веекс, Д. В. Эриксон и Л. Р. Хольт [222], В. Вальтон [221], К. Барри [199], А. Хоудаль и Г. Марсли [208]. Определенный интерес представляют работы В. Гольфа [205], С. Матей [214] и др. Например, В. Гольф приводит результаты сравнения гидрологических исследований, выполненных на двух малых водосборах в бассейне р. Шпрее. На одном из этих водосборов (р. Добра) он изучал влияние на водный режим реки сброса рудничных вод и открытых разработок бурого угля. Другой контрольный водосбор (река без названия) находился в естественных условиях. В исследованиях отмечено, что на р. Добра произошло уменьшение амплитуды колебаний стока по сравнению со стоком контрольной реки, сглаживание пика

половодья и увеличение стока в межень, которое за период наблюдений составило в среднем 540 л/с.

Как было отмечено выше, интенсивная эксплуатация подземных вод в целом ряде случаев является основной причиной таких явлений, как изменение свойств и состояния пород вследствие их осушения, нарушение теплового и солевого режимов подземных вод и ухудшение их качества за счет минерализации, развитие процессов выщелачивания и коагуляции, оседания земной поверхности, интрузии морской воды в пресную и т. п. [49, 96, 135, 211 и др.]. Например, отбор подземных вод в размере до 23,4 м³/с в связи с осушением месторождений бурого угля в бассейне р. Эрфт привел к нарушению водоснабжения территории, к осадке грунта, образованию трещин в зданиях и увеличению стока рек, в которые производились сбросы откачиваемых вод [49, 210]. Под влиянием отбора подземных вод в размере 8,1 м³/с восточная часть г. Токио, расположенная в долине р. Ара-Кава, опускается на площади 300 км² со скоростью 18 см/год [49]. Снижение уровня подземных вод на 34 м в долине р. Санта-Клара (Калифорния) привело к опусканию земной поверхности на 1,5 м [49]. Аналогичные явления имеют место в Мехико, Риме, Москве [96]. В работах Л. Хусмана [209] отмечается, что под влиянием эксплуатации подземных вод водозаборами в крупных портовых городах происходит осолонение пресных вод за счет внедрения в них во время приливов морских вод. Внедрение соленых морских вод в зоны депрессионных воронок уровня пресных подземных вод отмечено в ряде советских городов: Лиепае, Клайпеде и др. [135].

Рекультивация преобразованных территорий. Разработка месторождений полезных ископаемых сопровождается резким снижением уровня подземных вод, выемкой и перемещением пустых и рудосодержащих пород, образованием открытых карьеров, котлованов, стволов шахт, открытых и закрытых разрезов, выработок, оседаний земной поверхности, провальных и суффозионных ям, траншей, отвалов, разнообразных насыпей, дамб, плотин, дражных и шламовых полей, хвостохранилищ и других искусственных форм рельефа. Объем водопонижений, выемок и стволов горных пород исключительно велик. Например, по приведенным в табл. 2.6 данным, на территории КМА площадь снижения уровня подземных вод может достигать нескольких десятков тысяч квадратных километров. По данным Х. Массинга [213], отбор подземных вод при осушении месторождений бурого угля в ФРГ составлял 35—45 м³/с. По расчетам Б. П. Колесникова [89], основанным на данных И. В. Комара [90], в 1967 г. в СССР из шахт и открытых карьеров при добыче полезных ископаемых было извлечено 2,7—2,9 млрд. т горных пород. При этом в расчетах недостаточно полно были учтены или совсем не учтены данные о количестве горных

пород, извлеченных из мелких карьеров и на разработках местной строительной промышленности. Но даже неполные сведения свидетельствуют о том, что площади земель, нарушенные горнорудными разработками, исчисляются многими тысячами гектаров.

По данным работ [83, 89, 142], только при открытой разработке месторождений различных полезных ископаемых в СССР ежегодно происходит образование отвалов на площади 30—35 км². Площадь отвалов на Украине оценивается в 30—50 км². Территории отработанных карьеров и прилегающих к ним отвалов в Кузбассе составляют около 10 км², а по всем угольным бассейнам РСФСР — более 40 км².

Отрицательное воздействие горнорудных разработок на окружающий ландшафт многосторонне и выражается не только в увеличении площади, занятой этими разработками, но и в ухудшении местных климатических условий, загрязнении воздушной среды, изменении уровня подземных вод, отмирании и деградации лесов, загрязнении водоемов и эксплуатируемых водоносных горизонтов. В связи с этим несомненно важным и необходимым является вторичное изменение природных условий в районах горнорудных разработок, потерявших свою экономическую и социальную ценность, или осуществление комплекса мероприятий по рекультивации земель, нарушенных горнорудными разработками. К настоящему времени в СССР накоплен обширный, в основном научно-исследовательский опыт проведения рекультивационных работ. Этот опыт содержит преимущественно результаты рекультивации карьерно-отвального типа ландшафтов, образующихся при открытых разработках месторождений, и ландшафтных образований золоотвалов ТЭЦ [89, 142 и др.]

Интересным представляется опыт рекультивационных работ, проводимый за рубежом, в частности в ФРГ и ГДР. Например, в ФРГ, по данным Х. Мессинга [213], разработка бурого угля (лигнита) открытыми карьерами в бассейне р. Рейна привела к необходимости перемещения 20 населенных пунктов, выемки только в 1969 г. пород, покрывающих месторождение, в объеме $185 \cdot 10^6$ м³ и лигнита в объеме $276 \cdot 10^6$ м³. Это потребовало осуществить снижение уровня подземных вод на глубину до 300 м. За последние 10 лет в среднем откачивалось $1,2 \cdot 10^9$ м³ подземных вод в год при максимуме до 45 м³/с, в результате чего в глубоких водоносных горизонтах сформировалась депрессионная воронка площадью около 2000 км², а водность р. Эрфт после соответствующего расширения и углубления русла изменилась с 5 до 25 м³/с. Одна треть дренажных вод отводится в специально построенный обводный Кельнский канал. Была создана такая система водоснабжения, которая обеспечивает подземной водой 240 тыс. человек, многочисленные промышленные и сельскохозяйственные предприятия.

За последние 100 лет горнорудные разработки в бассейне р. Рейна производились на площади в 2500 км² и к настоящему времени часть шахт, открытых карьеров и разрезов прекратила разработку lignита. При этом площадь выемок пород шахт и открытых карьеров составила около 154 км²; значительно большую площадь занимали отвалы. Для исключения отрицательного воздействия на природную среду этих заброшенных искусственных форм рельефа горнорудные предприятия осуществили ряд рекреационных мероприятий, включая заполнение шахт и карьеров отработанной породой и водой, выравнивание отвалов, придание живописных форм и укрепление берегов водоемов, созданных на месте открытых карьеров, лесопосадки, строительство дорог и населенных пунктов. В результате рекультивации были восстановлены и выровнены земли на площади 91 км², произведены посадки леса на площади 45 км², около 34 км² отведено под сельскохозяйственные поля, 12 км² занято дорогами. В окрестностях г. Кельна искусственно созданные на месте горнорудных разработок озера и лесные массивы превратили рекреационную территорию (20 км²) в один из красивейших районов, где в выходные дни отдыхает более 20 тыс. человек.

Аналогичные рекультивационные мероприятия проводятся в ГДР. При этом, как отмечают гидрологи из Института водного хозяйства в г. Берлине Д. Лаутербах и др. [41], в связи с перемещениями мест разработки бурого угля на север имеет место повышение уровня подземных вод на отработанных месторождениях. В некоторых местах такой подъем уровня достиг своего исходного положения, что потребовало осуществления мероприятий по защите построенных там зданий от подтопления водой. Обращается также внимание и на то, что котлованы выработанных карьеров имеют большое значение для водного хозяйства страны и для отдыха населения. Так, емкость одного такого водохранилища будет составлять $50 \cdot 10^6 - 250 \cdot 10^6$ м³ с площадью водной поверхности от 0,3 до 1,2 км².

В нашей стране рекультивационные мероприятия приобретают все большее значение; они начинают рассматриваться как неотъемлемое звено деятельности предприятий, связанных с эксплуатацией земных недр, водных, растительных и земельных ресурсов.

2.2.4. Мелиорация земель (орошение, осушение болот и заболоченных территорий)

Под влиянием орошаемого и осушаемого земледелия происходят значительные изменения природных условий. Эти изменения проявляются в рельефе, почвенном и растительном покрове, режиме поверхностных и подземных вод. В процессе

орошения и осушения земель изменяется водный и солевой баланс мелиорируемой территории.

Орошение земель. В исследованиях влияния орошения земель на водные ресурсы и водный баланс речных бассейнов основными вопросами являются оценка изменения стока рек, а также учет засоления орошаемых земель.

Изменения стока рек под влиянием орошения определяются в первую очередь изменениями суммарного испарения воды с орошаемых земель и непродуктивного испарения с прилегающих к ним территорий. В зависимости от соотношения этих величин в речных бассейнах может иметь место как существенное уменьшение стока рек, так и некоторое его увеличение. Выполненные исследования многолетних колебаний стока некоторых больших рек СССР [46, 188, 195] в районах орошаемого земледелия свидетельствуют о том, что средний многолетний сток в замыкающих створах в отдельных речных бассейнах изменился сравнительно мало, несмотря на значительное (более чем в 2 раза) увеличение орошаемых площадей. В современных условиях развития ирригации такое положение объясняется наличием компенсационных факторов в речном бассейне, к числу которых следует отнести сокращение непродуктивного испарения с водной поверхности и транспирации влаголюбивой дикорастущей растительности при уменьшении площади разливов рек. Определенным подтверждением этого служат многолетние колебания уровней бессточных озер. Например, уровень воды в Аральском море практически оставался неизменным с 1910 по 1960 г., несмотря на увеличение площади орошаемых земель в его бассейне за этот период с 2,0 до 4,0 млн. га. Только в последние 15 лет приток воды к морю резко сократился, что связано с изъятиями стока в новые каналы и сбросом воды в Арнасайскую и Сарыкамышскую впадины [46].

Следует иметь в виду, что роль компенсационных факторов не является безграничной и зависит как от общих физико-географических условий, так и от наличия ресурсов компенсации воды в бассейне. В условиях развития орошения роль основных факторов компенсации воды в речных системах будет уменьшаться.

Большое значение при планировании орошаемого земледелия имеет также надежность определения возвратных вод, величина которых в настоящее время колеблется в исключительно широких пределах: от 15 % (СССР, Болгария, Турция и др.) до 40 % (Канада, США и др.). Под влиянием возвратных вод, поступающих после орошения обратно в реки, происходит выравнивание внутригодового распределения стока.

По имеющимся данным [46], на 1980—1985 гг. за счет возможного прироста орошаемых площадей возможно уменьшение годового стока некоторых больших рек СССР на 15—30 %

его естественных значений. Особенно большое снижение стока рек происходит в вегетационный период, когда повсеместный отбор воды на орошение приводит к резкому сокращению водности даже крупных рек. Осенью и зимой наблюдается интенсивный приток воды с орошаемых земель. На реках с весенне-летним половодьем это выравнивает сток внутри года. Необходимо иметь в виду, что на крупных водосборах в изменении внутригодового распределения и других гидрологических характеристик стока могут принимать участие и другие факторы хозяйственной деятельности.

Возврат воды в реки с орошаемых территорий, расположенных в засушливом климате, приводит к засолению орошаемых земель. Засоленные земли обычно характерны для речных бассейнов или их участков, не обеспеченных естественным дренажом. Для некоторых оросительных систем минерализация дренажно-коллекторных вод, поступающих с орошаемых земель, в 8—10 раз превышает минерализацию воды, которая подается на орошение. Одним из признаков развития процессов засоления является повышение уровня грунтовых вод за счет фильтрации воды из каналов и переувлажнения орошаемых полей.

Помимо отмеченного изменения водного и солевого балансов орошаемых земель орошение почти всегда сопровождается развитием инженерно-геологических процессов и явлений (оседание, просадки), изменением водно-физических и физико-механических свойств пород, режима уровня грунтовых вод и гидродинамической структуры территорий.

Осушение болот и заболоченных территорий. Осушительные мероприятия, как и мероприятия по орошению, проявляются в различных направлениях, отражая связь различных компонентов природной среды. Естественно, что создание мелиоративных систем улучшает условия стока с болот, снижает уровни грунтовых вод, изменяет запасы влаги в зоне аэрации, водно-физические свойства торфа и испарение.

По мнению М. И. Львовича [128], при осушении заболоченных территорий с маломощной торфяной залежью происходит сокращение паводочного стока. Причиной этого является хорошая инфильтрационная способность осушенных земель. В вегетационный период мало увеличивается питание грунтовых вод на осушенных землях. Следовательно, можно ожидать уменьшения годового стока рек в районах осушения заболоченных земель. В то же время осушение болот, испаряющих в естественных условиях больше влаги, может привести к некоторому увеличению речного стока.

Исследования А. А. Ключевой и А. Г. Булавко [27, 29, 87] показывают, что осушение болот в условиях избыточного и достаточного увлажнения не уменьшает годовой сток, а приводит к значительному повышению пика весенних и дождевых паводков

при одновременном сокращении продолжительности затопления пойм. По данным, относящимся к Белоруссии, после снижения уровней грунтовых вод на болотном массиве в результате дренажа уменьшается испарение. В летний период на осушенном болоте испарение уменьшается в среднем на 10—15 % по сравнению с болотом, развитие которого продолжается в естественно увлажненных условиях. При сельскохозяйственном освоении осушенных болот суммарное испарение может увеличиться на 20—25 % во влажные годы и остаться без изменения в засушливые годы.

Надо иметь в виду, что влияние осушения болот и заболоченных земель на режим малых и крупных рек может проявляться совершенно по-разному. В значительной степени характер осушения при прочих равных условиях определяется природными условиями, типом болот, способом их осушения и использования. Например, С. М. Перехрест [149] считает, что уменьшение стока после осушения земель относится преимущественно к системам с двухсторонним регулированием водного режима почвы и высокопродуктивному земледелию.

В целом для районов избыточного увлажнения изменение нормы среднего годового стока рек с грунтовым питанием под влиянием осушительных мероприятий не выходит за пределы точности расчетов стока (3—5 %). Максимальный сток рек может как увеличиться, так и уменьшиться. Однако осушение и освоение болот мало влияет на максимальные значения дождевых паводков и весеннего половодья. Наиболее значительны их проявления на водность меженного периода и внутригодовое распределение стока. В большинстве случаев осушение способствует выравниванию внутригодового распределения стока, увеличивая сток меженного периода.

2.2.5. Сооружение плотин и создание водоемов

Сооружение плотин и создание водоемов является основой разнообразного и комплексного использования водных ресурсов, средством регулирования стока, уменьшения или полной ликвидации наводнений, наносящих ущерб народному хозяйству. Вместе с тем создание водоемов, особенно крупных водохранилищ, вызывает коренные и нередко отрицательные изменения природных условий. В зависимости от размера искусственно созданных водоемов эти изменения могут быть отмечены как непосредственно в зоне создания водоемов (местное воздействие), так и на значительном удалении от них (регионально-линейное, регионально-площадное и глобальное воздействие).

При создании водохранилищ неизбежными становятся затопления ценных в хозяйственном отношении земель, лесов и месторождений полезных ископаемых, развитие процессов заиления, переработки береговых склонов, подпора подземных

вод и подтопления прилегающих территорий. Разнообразным является изменение гидрологических и гидрогеологических условий, растительного и животного мира. Со всем этим тесно связаны дорогостоящие мероприятия по переносу населенных пунктов, промышленных и сельскохозяйственных предприятий, их переустройству и защите.

Общая характеристика. В настоящее время общее число искусственных водоемов (водохранилищ и прудов) в СССР превышает 100 тыс. [1], из них около 1100 водохранилищ имеют объем более 1 млн. м³ каждое. В 157 водохранилищах, вмещающих свыше 100 млн. м³ воды каждое, сосредоточено 98 % полного и полезного их объема. При этом суммарный полный объем составляет около 830 млн. м³, полезный объем около 420 млн. м³, площадь водного зеркала около 120 тыс. км² и площадь затопленных земель более 65 тыс. км². Такие значительные площади водного зеркала и неблагоприятные соотношения полного и полезного объема водохранилищ предопределены широким развитием строительства гидроэнергетических узлов на крупных равнинных реках Европейской территории СССР и слабой изученностью географических особенностей изменения природных условий в результате создания и эксплуатации водохранилищ.

Для сравнения в табл. 2.10 приведена характеристика водохранилищ объемом более 100 млн. м³ в СССР и США.

Таблица 2.10

Средние показатели объема и площади водного зеркала водохранилищ СССР (числитель) и США (знаменатель) (по данным работы [1])

Водохранилище с полным объемом, млн. м ³	Количество водохранилищ	Объем, км ³		Площадь водного зеркала, км ²	Соотношение между полезным и полным объемом, %
		полный	полезный		
100—1 000	105	0,31	0,21	0,061	67,8
	367	0,30	0,25	0,049	82,0
1 001—10 000	25	3,64	1,85	0,484	51,0
	92	2,63	2,04	0,272	77,6
10 001—25 000	11	15,7	8,47	1,33	54,6
	2	17,9	11,8	0,65	66,0
25 001—50 000	6	36,5	21,1	2,80	58,0
	4	32,4	28,2	1,10	87,0
100—50 000	147	3,49	1,96	0,340	56,3
	465	1,12	0,89	0,105	79,3

В засушливых районах СССР имеется более 20 000 прудов с суммарным объемом около 1,3 км³. Только в лесостепной зоне ЦЧО (Орловская, Курская, Липецкая, Воронежская и

Таблица 2.11

Основные сведения о водохранилищах водораздельного бьефа канала им. Москвы и р. Москвы

Водохранилище	год инвентаризации	Площадь, км ²		Полезная емкость, млн. м ³	Наполне- ние водо- хранили- ща, м ³ /с	Сработка водохранилища, м ³ /с				Фильтра- ция из водохра- нилища, м ³ /с
		водосбора	зеркала воды			место сработки	средняя	мини- мальная	макси- мальная	
Иваньковское	1937	41 000	930	915	39	Канал им. Москвы	39,0	13,1 1942	70,0 1968	—
Водохранилище водораздельного бьефа канала им. Москвы:	1937	890	60	344	45,2 *	Реки Уна, Клязьма, Яуза, р. Моск- ва — г. Москва	39,9	13,1 1942	70,0 1968	2,5
Икшинское, Пя- Акуловское, Пя- ловское, Пестов- ское, Пирогов- ское	1935	1 010	33,6	183	6,4	р. Истра	3,9	1,6 1952	9,7 1966	1,2
Можайское	1960	1 380	31,0	235	10,2	р. Москва	8,2	4,7 1965	14,6 1962	0,8
Рузское	1966	1 140	32,7	220	7,4	р. Руза	6,2	4,5 1969	8,6 1966	0,5
Озернинское	1967	733	23,1	144	3,9	реки Озерна, Руза, Москва	2,9	2,2 1967	4,0 1968	0,2

* Из них 6,2 м³/с — естественный средний многолетний приток воды с площади 890 км² и 39,0 м³/с — средний много-
летний расход волжской воды, проходящей по каналу им. Москвы.

Белгородская области), по данным Г. С. Пашнева [147], имелось более 8000 прудов. Суммарная площадь их 261,46 км², а объем наполнения 454,74 млн. м³. Пруды распространены здесь повсеместно. Из общего числа этих искусственных водоемов 41 % прудов создано для целей водоснабжения, 10 % — для орошения полей, 5 % — для рыбоводства, 1 % — для птицеводства, 8—9 % — для получения электроэнергии и 34 % — для других хозяйственных нужд. Более 50 % прудов наполняется во время весеннего половодья, грунтовое питание получают около 30 % прудов. Проточные пруды летом не высыхают, а те, которые наполняются только весной или во время значительных дождевых паводков, часто высыхают полностью. При этом за весну, лето и осень они могут наполняться и опорожняться 2—3 раза.

Влияние искусственных водоемов на речной сток. Создание водохранилищ, значительных по площади, и прудов является причиной сокращения общего речного стока за счет дополнительного испарения с площади их зеркала и перераспределения стока внутри года. Весной за счет аккумуляции талых вод в искусственно созданных водоемах на нижерасположенных участках рек наблюдается заметное сокращение речного стока. В летне-осенне-зимний период за счет сработки накопленных в искусственных водоемах запасов воды отмечается увеличение водности рек. Насколько значительным может быть влияние отдельных водохранилищ на сток рек, видно из табл. 2.11.

Особенно большие изменения в природных условиях происходят в нижних бьефах крупных водохранилищ, способных перераспределять естественный сток в многолетнем, сезонном и суточном разрезе. В связи с этим возникает ряд проблем, требующих своего разрешения с учетом всесторонней увязки интересов многочисленных водопользователей и водопотребителей.

Влияние прудов на общий речной сток и сток за период весеннего половодья, как правило, невелико, особенно для районов достаточного увлажнения, но может быть значительным в годы малой водности. Это особенно хорошо видно из данных табл. 2.12, составленной по материалам работы [183]. Так, в годы малой водности на реках с площадями водосборов от 50 до 1500 км² под влиянием прудов отмечается сокращение стока от 5 % (лесостепная зона) до 80 % (степная зона). Следовательно, в период межени, когда реки переходят на преимущественно подземное питание, влияние прудов на сток рек центральной части ЕТС может быть также значительным и сравнимым с теми значениями, которые определил О. Н. Борсук для маловодных лет по отдельным водотокам Молдавии и Украины.

Влияние водохранилищ и прудов на гидрогеологические условия. Сооружение плотин и создание водоемов сопровождается изменением взаимодействия поверхностных и подземных

Таблица 2.12

**Влияние прудов на сток отдельных рек и временных водотоков
Молдавии и Украины**

Река — пункт	F км ²	Полезная емкость прудов, тыс. м ³	Зарегулированность стока, %			
			средний год		маловодный год	
			по полезной емкости	по водному балансу	по полезной емкости	по водному балансу
Скриповка — устье	94,0	211	2,6	0,8	6,4	4,6
Муховец — с. Лав- риновцы	95,0	779	8,8	0,8	20	4,8
Хомора — с. Сах- новцы	205	930	4,7	1,1	11	7,0
Хомора — м. Гри- цев	455	2075	4,5	1,0	11	7,1
Хомора — с. Боль- шие Новосельцы	929	2681	2,6	0,8	6,2	5,0
Хомора — устье	1430	3239	2,0	0,8	4,8	4,4
Громокля — у слияния исто- ков	10	28	15	15	63	67
Громокля — с. Новоалек- сандровка	128	373	16	14	64	67
Громокля — с. Веселовка	213	544	14	16	61	70
Громокля — выше впадения балки Богодуш- ной	400	1081	15	15	62	68
Громокля — ниже впадения балки Богодушной	613	2148	18	16	68	71
Громокля — с. Максимовка	1320	3500	15	13	56	56
Куболта — с. Дро- галина	78	—	—	3,8	—	12
Куболта — Мара- моновская ГЭС	363	—	—	7,1	—	25
Куболта — с. Ку- болта	891	—	—	8,4	—	29
Куболта — с. Пу- тинешты	950	—	—	8,8	—	29
Балка без назва- ния — с. Семено- Филипповка	7	31	22	17	73	72
Балка Лысая — устье	40	85	12	12	57	61
Балка без назва- ния — с. Юровка	120	394	17	15	67	69

Река — пункт	F км ²	Полезная емкость прудов, тыс. м ³	Зарегулированность стока, %			
			средний год		маловодный год	
			по полезной емкости	по водному балансу	по полезной емкости	по водному балансу
Балка Богодушная — устье	213	1066	24	20	75	75
Балка без названия — с. Корбул	55	—	—	5,0	—	17
Балка Сухая — устье	220	955	22	15	72	68

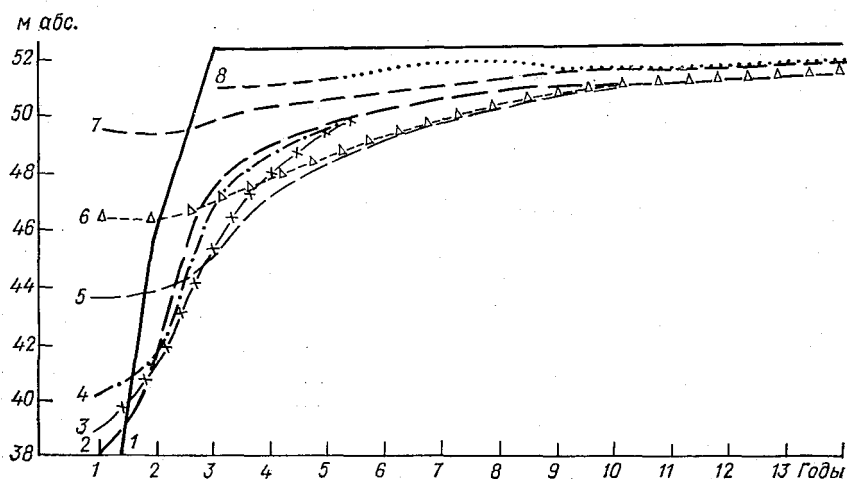


Рис. 19. Формирование уровней подземных вод в зоне водохранилища по мере его заполнения (по данным работы [5]).

1 — уровень воды в водохранилище; 2—8 — уровни подземных вод в скважинах, удаленных от водохранилища соответственно на 0,5; 1,0; 2,5; 6,0; 9,5; 15,0 и 23,5 км.

вод. Подъем уровня реки при создании водоемов вызывает подпор подземных вод, в естественных условиях разгружавшихся в реку.

Формирование подпорного уровня подземных вод в зоне водоемов продолжается длительное время (от 7 до 10 лет и более), что хорошо иллюстрируется примером, приведенным на рис. 19 [51]. Как видно из рисунка, в результате подпора подземных вод происходит подтопление прилегающих к водоему территорий, на которых могут быть расположены населенные пункты, промышленные предприятия и сельскохозяйственные угодья. В этих условиях несомненно важное значение имеет строительство водозаборов подземных вод, направленных,

с одной стороны, на ликвидацию подтопления, а с другой, на использование запасов подземных вод для удовлетворения различных нужд.

Фильтрационные потери из водоемов приводят к опреснению подземных вод и уменьшению их минерализации. Однако в условиях подпора подземных вод в водоносном горизонте может происходить и увеличение общей минерализации.

С созданием водохранилищ и прудов начинается переработка береговых склонов и активизация оползневых и просадочных явлений, а также других инженерно-геологических процессов на их берегах.

Отмечая возможность влияния искусственно созданных водоемов на многие другие компоненты природной среды, следует обратить внимание на необходимость тщательной разработки научно обоснованных требований всех участников водохозяйственного комплекса к режиму использования водохранилищ и технико-экономических показателей положительных и отрицательных последствий создания водоемов для отдельных отраслей народного хозяйства.

2.2.6. Вырубка лесов и их возобновление

Хозяйственная деятельность, связанная с использованием лесов и их возобновлением, оказывает различное воздействие на водные ресурсы. Значительную роль в этом играют физико-географические условия района, видовой состав леса, его биологическая продуктивность, способы вырубки и характер возобновления, а также площадь лесных массивов и их размещение на водосборе реки.

Благодаря разрыхляющему действию корней и жизнедеятельности обитателей леса, приводящих к увеличению скважности и водопроницаемости лесных почв, часть поверхностного стока талых и дождевых вод переводится в подземный, что увеличивает питание рек в межень грунтовыми водами. Другими словами, имеет место перераспределение стока во времени за счет снижения объемов и максимальных расходов воды в период весеннего половодья или дождевых паводков и увеличение подземного притока в период межени.

Лесные массивы в значительной степени снижают максимумы талого и дождевого стока, однако эффект этого снижения зависит от размера водотока и глубины вреза его русла.

Размеры воздействия леса на внутригодовой ход речного стока определяются как видом леса и почв, так и степенью облесенности и размещением лесных массивов на водосборе. Более сильное влияние леса на внутригодовое распределение стока проявляется на водосборах, сложенных тяжелыми глинистыми и суглинистыми почвами, по сравнению с водосборами, занятыми песчаными и супесчаными почвами, а также

там, где лесные насаждения имеют более мощную и глубоко-проникающую корневую систему. Но во всех случаях (и об этом повсеместно свидетельствуют многочисленные примеры) меженный сток облесенных водосборов существенно выше меженного стока водосборов, не покрытых лесом.

Несмотря на очевидность водорегулирующей роли леса, вопрос о его влиянии на водный режим рек и особенно на общий годовой сток до настоящего времени остается дискуссионным. Немаловажную роль при этом имеет, как справедливо отмечает Д. Л. Соколовский [174], смешение различных типов речных бассейнов и механическое перенесение результатов оценки влияния леса на сток с малых водотоков на большие.

Влияние леса на годовой сток. Данные наблюдений за стоком на лесных и безлесных водосборах свидетельствуют о том, что влияние леса (вырубка или посадка леса) на суммарный годовой расход воды может быть как положительным, так и отрицательным, т. е. может иметь место и увеличение, и уменьшение годового стока на частично или полностью облесенных водосборах.

Как считает ряд исследователей [73, 78, 119, 141, 163, 174], основной причиной увеличения стока является возрастание атмосферных осадков над лесными массивами. Установлено, что «лесные насаждения воздействуют на воздушные потоки пропорционально своим площадям», а также посредством чередования облесенных и необлесенных участков. По данным Л. П. Кузнецовой [106], эффект увеличения осадков составляет примерно 2,5 % на каждые 10 % увеличения лесистости и он проявляется уже за несколько километров от наветренного края облесенного участка. На противоположной стороне этого участка наблюдается уменьшение осадков. Важное значение при этом, на наш взгляд, имеет высота и видовой состав лесов. Естественно также, что не любой по площади массив леса вызывает увеличение атмосферных осадков, а следовательно, и приводит к увеличению суммарного годового стока.

По данным Л. М. Сидоркиной [169], выполнившей анализ результатов многолетних наблюдений по 18 рекам лесной и степной зон ЕТС в условиях полного дренирования подземных вод, и А. П. Бочкова [19], основанным на анализе многолетних наблюдений за осадками, стоком и снегозапасами в 92 различно залесенных водосборах лесостепной и степной зон СССР, суммарный годовой сток более облесенных водосборов на 10—20 % (лесная зона) и 20—40 % (лесостепная и степная зоны) выше, чем сток открытых водосборов. Характерно, что доля поверхностного стока на облесенных водосборах значительно меньше, а подземная составляющая больше по сравнению с их значениями на открытых водосборах. Аналогичные выводы и данные приводятся в работах В. В. Рахманова, А. В. Лебедева, А. А. Молчанова и Д. Л. Соколового [119, 163, 174].

Анализ данных о стоке целого ряда речных бассейнов на территории КМА позволяет сделать противоположный вывод. Так, в работе [181] приведены результаты анализа, иллюстрирующие уменьшение годовых значений стока с увеличением залесенности водосбора. Это связано с тем, что площадь лесных массивов на рассматриваемых водосборах не вызывает увеличения атмосферных осадков, а структура лесных почв способствует переводу талых и дождевых вод в зону аэрации и некоторому увеличению испарения. Более подробно результаты этой работы изложены в главе 4.

Интересные результаты оценки влияния леса на годовой сток получены в США [198] на основании данных наблюдений за стоком, осуществленных в течение 8 лет на двух примерно одинаково (78,4 и 83,8 %) облесенных водосборах и в течение 7 лет на этих же водосборах, но в условиях, когда на одном из них лес был полностью вырублен. Несмотря на то что после рубки леса свойства лесных почв мало изменились, годовой сток с открытого водосбора увеличился на 16,3 %.

Аналогичные данные приводятся Д. Л. Соколовским [174] по наблюдениям на лесных и малооблесенных водосборах ВНИГЛ за 20 лет. Автор указывает, что средний годовой сток и коэффициент стока лога Таежного, облесенного на 98 %, на 40—50 % ниже стока и коэффициента стока расположенного рядом лога Усадьевского (залесенность водосбора 22 %) при равной средней годовой сумме атмосферных осадков.

Влияние леса на характерные расходы воды. На малых водотоках, которые дренируют небольшую часть водовмещающей толщи, талые воды, поступившие в водоносный горизонт, не возвращаются в неглубокие русла и под влиянием леса происходит более резкое снижение максимальных расходов воды, чем в средних и крупных речных бассейнах. На малых водотоках максимумы талых и дождевых вод при полной залесенности водосборов снижаются в 5—10 раз, на средних и больших реках — лишь в 2—3 раза. Одновременно уменьшаются и объемы паводочного стока.

Весьма интересны и показательны в этом отношении данные о максимальном и суммарном стоке, приведенные в работе А. А. Соколова [173]. Из них следует, что максимальный сток и объемы весеннего половодья на облесенных водосборах примерно в 5—10 раз меньше, чем на открытых, необлесенных, водосборах малых водотоков ЕТС. Также значительно снижение максимальных расходов воды и объемов весеннего стока под влиянием искусственных лесонасаждений (лесных полос).

О характере и степени влияния искусственных лесонасаждений (с учетом состава и возраста посадок) на величину поверхностного весеннего стока со склонов достаточно ясное представление дают данные табл. 2.13. Как видно из таблицы, коэффициенты весеннего стока с площадок, на которые были

высажены молодые лиственные и хвойные деревья, быстро уменьшались, соответственно от 0,92 и 0,96 (1951 г.) практически до нуля (1959—1960 гг.), по мере роста посадок и независимо от характера насаждений.

Таблица 2.13

Влияние лесонасаждений на весенний поверхностный сток со склонов (стоковые площадки ВНИГЛ № 11, 15 и 16) [174]

Год	Снегозапасы плюс осадки, мм			Коэффициент стока		
	хвойный лес	лиственный лес	открытая площадка	хвойный лес	лиственный лес	открытая площадка
1951	112	105	95	0,96	0,92	0,74
1952	162	167	94	0,69	0,77	0,87
1953	190	216	69	0,39	0,53	0,56
1954	122	96	39	0,47	0,46	0,56
1955	401	383	141	0,08	0,04	0,62
1956	347	406	161	0,01	0,01	0,43
1957	220	200	104	0,07	0,06	0,66
1958	309	250	132	0,18	0,01	0,01
1959	267	214	198	0,04	0,00	0,00
1960	194	190	172	0,10	0,04	0,51
1961	184	180	170	0,01	0,00	0,00
1962	237	251	204	0,01	0,00	0,00
1963	94	98	88	0,04	0,05	0,58
1964	114	137	143	0,00	0,00	0,01
1965	208	144	147	0,02	0,01	0,00
1966	292	296	275	0,01	0,00	0,00

2.2.7. Агротехнические мероприятия

Распашка целинных и залежных земель, зяблевая вспашка, создание лесных полос, снегозадержание и многие другие мероприятия, направленные на сохранение или увеличение влаги в почве и повышение урожайности сельскохозяйственных культур, оказывают непосредственное влияние на формирование как поверхностного, так и подземного стока.

В настоящее время не вызывает сомнения тот факт, что агротехнические мероприятия, способствуя увеличению проницаемости почв и усилению инфильтрации талых и дождевых вод, снижают поверхностный сток со склонов, приводят к изменению путей стекания воды в реки и водоемы. Степень снижения талого (весеннего) стока с распаханых склонов и со склонов, покрытых травами или залежью, зависит в значительной мере от предвесеннего увлажнения, степени промерзания почвогрунтов, запасов воды в снеге и водности весеннего периода. Значительную роль при этом играет перенос снега с полей, не защищенных травяным покровом, в балки и овраги, площадь которых в отдельных районах рассматриваемой территории составляет 20—30 % площади речного водосбора.

В отдельные годы на полях может иметь место как уменьшение, так и увеличение склонового стока. Например, в условиях значительного переноса снега с полей и при малых снегозапасах в маловодные годы с распаханых склонов поверхностный сток может практически не наблюдаться. И наоборот, в многоводные годы его величина будет мало отличаться от стока со склонов, покрытых травой.

Бесспорным, по-видимому, является вывод, что повышение продуктивности земледелия приводит к сокращению полного речного и особенно поверхностного (склонового) стока речных водосборов. Как указывают многие исследователи, это сокращение необходимо учитывать в практике водохозяйственных расчетов [28, 43, 94, 129, 149 и др.].

Оценивая влияние агротехнических мероприятий, следует иметь в виду также различный характер и степень их воздействия на водный режим и сток со склонов, временных водотоков и рек.

Влияние агротехнических мероприятий на годовой сток. Данные натурных многолетних наблюдений на стоковых станциях лесостепной и степной зон Европейской территории и в других районах нашей страны, а также их анализ, выполненный А. П. Бочковым, В. Е. Водогретским, Г. Р. Юнусовым и другими [19, 28, 43, 109, 196], дают возможность сделать следующие основные выводы.

1. Под влиянием комплекса агротехнических мероприятий в зависимости от физико-географических условий отмечается снижение годового стока с полей на 10—50 %, причем возможное снижение поверхностного склонового стока в весенний период с полностью распаханых участков составляет в средние по водности годы 20—40 % по сравнению с участками, занятыми залежью.

На участках, занятых озимыми культурами и стерней, снижение поверхностного стока по сравнению со стоком с залежи изменяется от 20 до 5 %.

2. Снижение годового стока с водосборов логов и малых рек, распаханых на 65—75 %, составляет в зависимости от местных условий 10—20 %.

3. Годовой сток средних и крупных рек под влиянием агротехнических мероприятий изменяется незначительно в связи с возрастающей ролью подземных вод в формировании общего речного стока за счет более интенсивной инфильтрации поверхностных вод с распаханых склонов. Уменьшение нормы стока в настоящее время составляет 3—5 %, а с учетом расширения посевных площадей и интенсификации агротехники к 1990 г. достигнет 6—8 %.

Вместе с тем имеется несколько иное представление о механизме уменьшения поверхностного стока под влиянием агротехники. В частности, М. И. Львович [127] считает, что под влия-

нием зяблевой пахоты происходит значительное уменьшение поверхностного стока по сравнению с полями, не вспаханymi с осени. Согласно его данным, коэффициент поверхностного стока на вспаханных полях на юге лесной зоны ЕТС уменьшается в 1,5—2 раза, в лесостепной зоне — в 2—4 раза, в степной зоне — в 4—7 раз. Предполагается, что поступившая в зону аэрации вода расходуется преимущественно на продуктивное испарение, а не на питание подземных вод, и делается вывод о снижении нормы речного стока на 10—20 %.

По разным вариантам расчета, выполненного в Институте географии АН СССР [94], современное уменьшение полного речного стока под влиянием комплекса агротехнических мероприятий для Днепра составляет 1—1,5 км³, Дона — 2—4 км³ и Волги — 3—5 км³, что в 1,5—2 раза выше значений, полученных на основании исследований ГГИ.

Полученные прогнозные значения уменьшения годового стока рек ЕТС, приводимые Институтом географии, по-видимому, завышены, а ГГИ — занижены, и было бы целесообразно принимать их промежуточные значения.

Влияние агротехнических мероприятий на максимальные расходы воды. Под влиянием распашки и других агротехнических мероприятий снижение максимальных расходов редкой повторяемости практически лежит в пределах точности их определения. Средние и низкие максимумы в период весеннего половодья снижаются под влиянием агротехники на 10—20 %, что в значительной мере связано с переносом снега в овражно-балочную и речную сеть. В сочетании с влиянием прудов снижение может достигать 30—50 %, поскольку часть талых вод идет на заполнение прудов.

Влияние агротехнических мероприятий на дождевой сток зависит от местных природных условий, приемов обработки почв и их защиты от ветровой и водной эрозии. В условиях распашки вдоль склонов имеют место случаи, когда дождевой сток с распашанных площадей превышает сток с участков, покрытых травой. Например, по данным американских исследователей, увеличение до 30 % максимальных дождевых расходов воды связано с уменьшением потерь на испарение в результате замены травяной растительности с глубокой корневой системой на пропашные культуры. При более высоком уровне агротехники, как отмечает И. А. Кузник [109], наблюдается уменьшение слоя максимальных расходов на 20—30 %, что связано с повышением инфильтрационной способности почв после их обработки.

Следует подчеркнуть, что изменение водных ресурсов под влиянием агротехники — процесс управляемый и его последствия зависят в значительной мере от уровня хозяйственной деятельности.

2.2.8. Дорожное строительство

В настоящее время многие большие и малые водосборы пересечены автомобильными или железными дорогами. По данным Е. В. Болдакова [15], протяженность автомобильных дорог только с твердым покрытием на Европейской территории СССР составляет 4,5 км на каждые 100 км² площади, а в Московской области — 22 км. В среднем за год сеть таких дорог возрастает на 6 %. Общая протяженность железных дорог, по данным работы [16], равна 134,6 млн. км. В несколько раз больше приводимых выше значений протяженность грунтовых и проселочных дорог.

Действующие дороги различных технических категорий и разной протяженности могут явиться причиной изменения водного баланса территории, процессов формирования поверхностных и подземных вод, трансформации максимального весеннего и дождевого стока. Изменения стока могут иметь место как на очень малых, так и на очень больших водосборных площадях. Велик размыв русел водотоков под транспортными сооружениями.

Проектировщикам и строителям дорог хорошо известно, что действующие автомобильные и железные дороги отдельно и в сочетании с другими многочисленными факторами хозяйственной деятельности вызывают перераспределение водных ресурсов по площади и во времени, увеличение или уменьшение стока поверхностных и подземных вод.

Если увеличение поверхностного стока связано в основном с его перераспределением по площади, то уменьшение — с потерями поверхностных вод. В ряде случаев потери поверхностных вод обусловлены аккумуляцией части стока перед дорогами, в специально созданных водоемах с заданными отметками перелива воды, сбросами вод в смежные водоотводные сооружения (канавы, трубы, лотки и пр.), а также с регулированием стока дорогами, мостовыми переходами и другими дорожными сооружениями.

Современные методы расчета максимальных расходов воды при проектировании дорог и дорожных сооружений предполагают необходимым учет степени влияния естественного и искусственного регулирования стока. Их сущность достаточно подробно изложена в монографии Б. Ф. Перевозникова [148] и позволяет представить характер и размеры возможных изменений речного стока. Однако вопрос о количественной оценке степени влияния автомобильных и железных дорог на различные гидрологические характеристики до настоящего времени остается практически слабо изученным.

Влияние автомобильных и железных дорог на годовой сток и характерные расходы воды. Наличие дорог и дорожных сооружений на водосборах может изменить годовой сток и характерные расходы воды рек. Характер и степень изменения стока

обычно зависят от расположения дорог и дорожных сооружений на водосборе, которые, по-существу, превращаются в водоразделы. Наибольшие изменения в стоке происходят в тех случаях, когда дорога и дорожные сооружения располагаются вдоль основного русла реки (водотока).

Воздействие дорог и дорожных сооружений на формирование стока на водосборе многосторонне. Прежде всего, естественные его характеристики могут измениться под влиянием трансформации расходов воды в результате ее частичной аккумуляции перед отверстиями дорожных труб, акведуков и малых мостов. Искусственная аккумуляция талых и дождевых вод перед такими сооружениями не только изменяет форму гидрографа и снижает максимальные расходы воды, но и сокращает суммарный годовой сток за счет увеличения испарения воды с площади подтопления и ее фильтрации в водоносные горизонты. В отдельных случаях изменение стока может быть обусловлено частичным отведением поверхностных вод в бессточные емкости или временные водохранилища (карьеры, обвалованные пространства и т. п.). К ним можно отнести и сбор поверхностных вод со склонов водосборов в подземные водохранилища (магазинирование воды). В некоторых случаях насыпь дороги служит плотиной постоянного или временного водохранилища перед дорогой, предназначенного для использования в самых различных целях: водоснабжения, водопоя скота, рыбо-разведения и т. п. Сооружение таких водохранилищ особенно широко распространено в центральной части ЕТС. Водопропускное сооружение оборудуют в основании дороги в русле водотока или выносят на один из его берегов. Многократное накопление воды перед сооружениями может существенно снизить суммарный годовой сток. Например, на пологих логах равнинной местности снижение максимальных расходов дождевых вод при аккумуляции по сравнению с естественными условиями их формирования может достигать 300 % и более.

Уменьшение стока за год зависит от суммарного расхода воды, пропускаемого сооружением, аккумулирующей емкости и площади пруда, создаваемого сооружением, объема паводочного стока и продолжительности испарения и фильтрации воды с площади пруда.

Важным фактором изменения речного стока является перераспределение поверхностных (талых и дождевых) вод при помощи водоотводных канав, лотков и труб, т. е. отведение части стока в смежные бассейны или сооружения. Сброс воды в смежные бассейны может иметь место в следующих случаях: при низких отметках одного из водоразделов, разделяющих смежные водосборы (естественный перелив); при высоких водоразделах, когда экономически целесообразно отвести часть воды, поступающей с одного бассейна, в смежный; при сбросе воды вдоль дороги. Во всех случаях на одних водотоках будет

наблюдаться уменьшение водности, а на других — ее увеличение. Количественную оценку влияния дорог и дорожного строительства необходимо выполнять с учетом других факторов хозяйственной деятельности: распашки полей, сооружения плотин, вырубки и посадки лесов, агротехнических и других мероприятий.

2.3. ТИПИЗАЦИЯ РЕК ПО УСЛОВИЯМ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ИХ ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ

В однородных природных условиях масштабы преобразования водных ресурсов зависят от вида, количества, характера размещения в пределах речного бассейна объектов хозяйственной деятельности и от режима их эксплуатации.

При оценке антропогенного воздействия на режим следует учитывать мероприятия, приводимые как в руслах рек, так и на их водосборе. Непосредственно в руслах рек осуществляются:

- забор речных вод и их сброс в ту же реку после использования;
- переброска и сброс вод из смежных речных бассейнов;
- сброс подземных вод после использования;
- строительство плотин и создание водохранилищ (прудов);
- аккумуляция воды в водохранилищах;
- сработка водохранилищ;
- фильтрация воды из водохранилищ в берега и нижние бьефы плотин;
- фильтрация русловых вод на участках развития депрессионных воронок;
- дноуглубительные работы, спрямление и засыпка русел, укрепление берегов;
- сооружение мостовых переходов;
- другие виды хозяйственной деятельности.

На водосборной площади речных бассейнов производятся:

- мелиорация, включая орошение сельскохозяйственных полей, осушение болот и заболоченных земель и обводнение территорий;

- интенсивная эксплуатация подземных вод для водоснабжения населенных пунктов, промышленности и сельскохозяйственных угодий;

- горнорудные разработки месторождений твердых полезных ископаемых с водопонижением и водоотводом, приводящими к образованию обширных депрессионных зон и отдельных воронок;

- строительство новых и расширение старых населенных пунктов;

Таблица 2.14

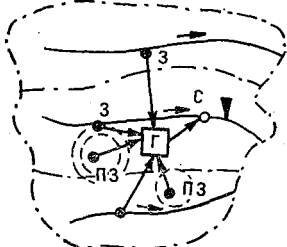
Варианты возможного изменения стока рек под влиянием хозяйственной деятельности

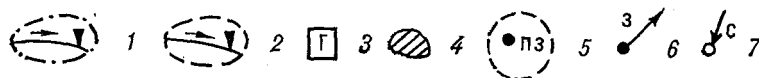
Вариант возможного изменения стока исследуемой реки	Схема возможного забора и отведения в реку после использования поверхностных и подземных вод
Перераспределение стока; сток практически не изменяется	
1. Использование и отведение поверхностных (речных, озерных и др.) и подземных (дренируемых) вод до гидроствора в неизменном объеме	
2. Забор (перехват депрессионной воронкой) подземных (дренируемых) вод у соседних рек и отведение их в исследуемую реку в объеме безвозвратных потерь поверхностных вод, используемых городом	
3. Перехват подземного питания и потери поверхностных вод на фильтрацию в пределах депрессионных воронок, образовавшихся при отборе воды из дренируемых рекой водоносных горизонтов. Отведение подземных вод в реку до гидроствора в размере их забора	
4. Потери поверхностных вод на фильтрацию в депрессионные воронки глубоких (не дренируемых рекой на участке города) водоносных горизонтов, равные величине забора подземных вод. Отведение использованных вод в реку до гидроствора в размере потерь	
Уменьшение стока	
1. Забор поверхностных и подземных (дренируемых) вод и отведение после использования до гидроствора в меньшем объеме	
2. Забор поверхностных и подземных (дренируемых) вод до гидроствора, отведение после использования ниже гидроствора или за пределы бассейна	

Вариант возможного изменения стока исследуемой реки	Схема возможного забора и отведения в реку после использования поверхностных и подземных вод
3. Забор подземных (дренируемых) вод исследуемой реки водозаборами, расположенными в соседних речных бассейнах	
4. Потери поверхностных вод на фильтрацию и частичный перехват подземного питания реки депрессионной воронкой, расположенной ниже гидроствора	
5. Потери поверхностных вод на фильтрацию в депрессионные воронки глубоких водоносных горизонтов при отведении использованных вод до гидроствора в меньшем объеме, чем потери	

Увеличение стока

1. Забор поверхностных вод в соседних речных бассейнах, отведение до гидроствора исследуемой реки	
2. Забор подземных (дренируемых) вод у соседних речных бассейнов (перехват подземного питания депрессионной воронкой), отведение в исследуемую реку до гидроствора	
3. Перехват депрессионной воронкой подземных вод глубоких водоносных горизонтов (сработка вековых запасов), отведение до гидроствора исследуемой реки	

Вариант возможного изменения стока исследуемой реки	Схема возможного забора и отведения в реку после использования поверхностных и подземных вод
4. Забор поверхностных вод в соседних речных бассейнах, подземных вод дренируемых и недренируемых водоносных горизонтов в пределах собственного водосбора и в соседних речных бассейнах, отведение до гидроствора исследуемой реки	



1 — границы водосбора; 2 — границы депрессионных воронок; 3 — населенный пункт (город, поселок и т. п.); 4 — озеро или водохранилище; 5 — забор подземных вод; 6 — забор поверхностных вод; 7 — сброс поверхностных и подземных вод.

— агролесомелиоративные мероприятия, включая вырубку и посадку лесов, распаху целинных, залежных и ежегодно распахиваемых полей, снегозадержание, внесение минеральных удобрений, орошение сельскохозяйственных угодий и др.;

— гидротехнические и технические мероприятия, включая строительство промышленных и сельскохозяйственных предприятий, железных и автомобильных дорог, горнорудных предприятий, трубопроводов и других сооружений;

— другие виды хозяйственной деятельности.

Все указанные мероприятия могут оказывать влияние непосредственно на речной (русловой) сток, а также косвенное — путем влияния на отдельные элементы водного баланса.

Большинство водохозяйственных мероприятий мало изменяют сток, а приводят лишь к его перераспределению во времени и по площади речного бассейна; при этом важную роль играет водность рассматриваемого периода. Как правило, относительная величина нарушений уменьшается с увеличением значений стока. Например, в расходах воды за период половодья доля забираемых из реки и сбрасываемых в нее вод меньше, чем в меженном или годовом стоке, а в расходах выше-расположенных створов на одной реке — в несколько раз больше, чем в расходах воды нижних створов.

По направленности антропогенного влияния на водные ресурсы выделяются три основных типа рек (табл. 2.14):

Т а б л и ц а
Размеры основных нарушений

Пункт	Площадь водосбора, км ²	1963 г.									
		$Q_{изм}$ м ³ /с	м ³ /с				в % от $Q_{изм}$				
			$Q_{нап}$	$Q_{сраб}$	$Q_{ф}$	$Q_{сбр. н}$	$Q_{нап}$	$Q_{сраб}$	$Q_{ф}$	$Q_{сбр. н}$	$Q_{нар}$

Общий

г. Щёлково	1 210	5,8	5,6	1,8	2,8	0,4	-97	31	48	7	-11
г. Павловский По- сад	5 440	31,2	5,6	1,8	2,8	1,1	-18	6	9	4	1
г. Владимир	15 200	78,2	5,6	1,8	2,8	2,9	-7	2	4	4	3
г. Ковров	25 800	140,0	5,6	1,8	2,8	2,9	-4	1	2	2	1

Максимальный

г. Щёлково	1 210	12,2	29,6	1,6	2,8	0,4	-242	13	23	3	-203
г. Павловский По- сад	5 440	146,0	29,6	1,6	2,8	1,1	-20	1	2	1	-16
г. Владимир	15 200	323	29,6	1,6	2,8	2,9	-9	0,5	0,9	1	-6
г. Ковров	25 800	559	29,6	1,6	2,8	2,9	-5	0,3	0,5	0,5	-4

Подземный

г. Щёлково	1 210	4,5	2,1	1,4	2,8	0,4	-47	31	62	9	55
г. Павловский По- сад	5 444	16,3	2,1	1,4	2,8	1,1	-13	9	17	7	20
г. Владимир	15 200	34,4	2,1	1,4	2,8	2,9	-6	4	8	8	14
г. Ковров	25 800	54,0	2,1	1,4	2,8	2,9	-4	3	5	5	9

Примечание. $Q_{изм}$ — измеренный на гидростворе расход воды; $Q_{нап}$ — сток в верховьях р. Клязьмы; $Q_{сраб}$ — отток воды из водохранилища (сра); $Q_{сбр. н}$ — сброс в реку недренируемых подземных вод; $Q_{нар}$ — суммарная

1) реки, сток которых в результате различного и противоположного по знаку влияния остается без изменений (с водностью, близкой к естественной);

2) реки с сократившимся стоком (с уменьшающейся водностью);

3) реки с увеличивающимся стоком (с возрастающей водностью).

2.15

стока по длине р. Клязьмы

1968 г.									
$Q_{изм}$ м³/с	м³/с				в % от $Q_{изм}$				
	$Q_{нап}$	$Q_{сраб}$	$Q_{ф}$	$Q_{сбр. н}$	$Q_{нап}$	$Q_{сраб}$	$Q_{ф}$	$Q_{сбр. н}$	$Q_{нар}$

годовой

(5,6)	5,2	5,3	2,3	0,6	-93	95	41	11	54
30,2	5,2	5,3	2,3	2,4	-17	18	8	8	17
66,5	5,2	5,3	2,3	3,4	-8	8	4	5	9
123,0	5,2	5,3	2,3	3,4	-4	4	2	3	3

суточный

(12,6)	14,5	4,4	2,3	0,6	-115	35	18	5	-57
105	14,5	4,4	2,3	2,4	-14	4	2	2	-6
361	14,5	4,4	2,3	3,4	-4	1	0,6	1	-1
689	14,5	4,4	2,3	3,4	-2	1	0,3	0,5	0

годовой

(5,4)	5,1	5,1	2,3	0,6	-94	94	43	11	54
17,4	5,1	5,1	2,3	2,4	-29	29	13	14	27
25,0	5,1	5,1	2,3	3,4	-20	20	9	14	23
48,1	5,1	5,1	2,3	3,4	-11	11	5	7	12

— естественный приток воды к водохранилищам (наполнение), расположен-
ботка); $Q_{ф}$ — фильтрация воды из водохранилищ в нижний бьеф плотин;
величина нарушений стока [183].

Для рек первого типа характерно такое перераспределение стока во времени и по длине реки, при котором влияние на сток различных факторов компенсируется, и к замыкающему створу речной сток остается практически неизменным, т. е. близким к естественному.

Ко второму типу относятся реки, сток которых непосредственно используется на промышленные, коммунальные и сель-

скохозяйственные нужды или уменьшается за счет сокращения подземного притока с водосбора, частично или полностью находящегося в зоне влияния депрессионных воронок, вызванных эксплуатацией подземных вод или водопонижениями при горнорудных работах; к этому же типу относятся реки, в пределах водосборов которых проведение других хозяйственных мероприятий определяет уменьшение подземного стока и стока поверхностных вод.

К третьему типу относятся реки, водность которых возрастает за счет отведения в них вод, переброшенных из смежных речных систем; извлеченных в процессе работы водозаборов подземных вод глубоких (недренируемых) и дренируемых (перехваченных депрессионными воронками в соседних речных бассейнах) водоносных горизонтов; поступивших с полей орошения и осушения, участков снегозадержания и свалок снега, урбанизированных территорий, из прудов и водохранилищ.

Данные табл. 2.15 характеризуют в качестве примера размеры основных нарушений годового и внутрисезонного стока по длине р. Клязьмы в результате эксплуатации водохранилищ и использования речных и подземных вод. Поскольку наблюдения на гидростворе г. Щелково в 1968 г. не производились, в скобках даны приближенные значения стока, восстановленные по связи с расходами воды на гидростворе г. Павловский Посад. Площадь водосбора реки до гидростворов приведена для естественных условий.

В речном бассейне водохозяйственные мероприятия осуществляются преимущественно в комплексе, что вызывает необходимость учета суммарного эффекта их влияния на водный режим и водные ресурсы.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ВОДНЫЙ РЕЖИМ РЕК

Сток многих рек земного шара, преобразованный хозяйственной деятельностью, не может рассматриваться в качестве естественной характеристики природных водных ресурсов. Поэтому для решения ряда практических и научных вопросов важно иметь восстановленные значения естественного стока или количественную оценку его преобразования (нарушения). Количественная оценка влияния хозяйственной деятельности на речной сток усложнена тем, что на естественные колебания стокообразующих факторов накладывается направленный характер антропогенных воздействий, установить начало которых часто оказывается невозможным.

Количественная оценка влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы предполагает решение трех основных задач:

- 1) установить начало нарушений водного режима, начиная с которого последующие значения стокообразующих факторов могут быть неоднородными;
- 2) определить значимость расхождений в однородности выборок при заданном уровне значимости, т. е. проверить исходную гидрометеорологическую информацию в отношении гипотезы неоднородности;
- 3) рассчитать выявленные изменения стокообразующих факторов.

3.1. УСТАНОВЛЕНИЕ НАЧАЛА НАРУШЕНИЙ ВОДНОГО РЕЖИМА НА ВОДОСБОРЕ ПОД ВЛИЯНИЕМ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Начало нарушений водного режима устанавливается: по данным о факторах хозяйственного влияния; путем построения и анализа графических связей последовательно суммированных (интегральных) значений стока, выраженного в расходах, слое, модульных коэффициентах и других элементах; при помощи параметрических и непараметрических критериев.

Наиболее простым способом установления начала изменений водного режима под влиянием хозяйственной деятельности является анализ сведений о сроках ввода в эксплуатацию отдельных объектов и начале осуществления различных мероприятий,

оказывающих влияние на режим поверхностных и подземных вод, а также о темпах и масштабах развития хозяйственной деятельности на водосборе. Однако при некоторых хозяйственных мероприятиях, связанных с изменением условий формирования водного режима, таких, как мелиорация, распашка целинных земель, вырубка лесов, рост площади городов и т. п., изменения в однородности рядов наблюдений проявляются не с начала внедрения того или иного мероприятия, а после коренных преобразований на водосборе. В этих случаях, располагая фактическим материалом о хозяйственной деятельности на водосборе и зная физические причины, нарушающие состояние однородности, не представляется возможным установить границы неоднородности рядов наблюдений, вызванной влиянием медленно изменяющихся природных условий.

Установление начала нарушений водного режима на водосборе графоаналитическим способом заключается в сравнении стока (или стокообразующих факторов на исследуемом водосборе) в рассматриваемом створе за весь период наблюдений со стоком рек-аналогов, находящихся в естественных условиях, путем построения и анализа графических связей последовательно суммированных (интегральных) значений стока, выраженных в расходах, слое, модульных коэффициентах и т. п. Такие интегральные кривые величин для сравниваемых рек позволяют графически установить границу периодов с естественным и нарушенным стоком и, кроме того, выявить начало существенных изменений в однородности рядов гидрометеорологической информации для различных по продолжительности периодов.

Графические связи между последовательно суммированными величинами (сток по двум гидростворам одной реки, сток по двум гидростворам разных рек, сток и осадки и т. п.) широко используются как советскими [54, 78, 182, 183], так и зарубежными учеными [176, 177, 223]. Эти связи между двумя временными рядами, в которых точки определяют двумерную интегральную кривую, характеризуются координатами

$$\left. \begin{aligned} X_{01} &= \sum_1^n X_{1i}(t_i) \\ X_{02} &= \sum_1^n X_{2i}(t_i) \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

В случаях связанных между собой двух временных рядов интегральная кривая будет показывать случайные колебания рассматриваемых величин по обе стороны от прямой линии, определяющей ее общее направление. Систематическое отклонение, которое обусловлено неоднородностью данных (изменение местоположения пункта наблюдений, смена методики измерений,

влияние одного или нескольких факторов хозяйственной деятельности), определяется по изменению направления прямой с момента времени t , в который проявятся причины неоднородности.

В качестве примера на рис. 20 приведены графики связи между последовательно суммированными значениями стока двух гидрометрических пунктов, атмосферных осадков двух метеостанций, атмосферных осадков и стока. Полученные связи

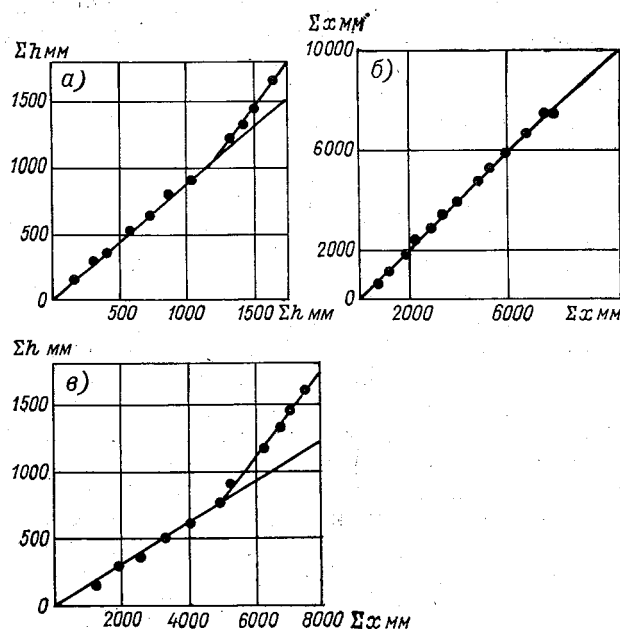


Рис. 20. Графики связи между последовательно суммированными значениями стока в двух гидростворах, в одном из которых осуществляются хозяйственные мероприятия (а), атмосферных осадков на двух метеостанциях (б), осадков и преобразованного стока (в).

дают возможность не только выделить период нарушений водного режима реки, но и определить средние соотношения между значениями стока, имевшие место до начала нарушений, зная которые можно восстановить значения предполагаемого естественного стока.

Определить границы периодов с нарушенным и естественным стоком (или другими элементами водного режима) можно также при помощи параметрических и непараметрических критериев. При заданном уровне значимости анализируется несколько вариантов расчленения ряда гидрометеорологической информации на отдельные выборки, которые последовательно

сравниваются между собой. Более подробно использование непараметрических критериев для установления начала нарушений водного режима рек под влиянием хозяйственной деятельности изложено в главе 4.

3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУЩЕСТВЕННОСТИ (ЗНАЧИМОСТИ) РАСХОЖДЕНИЙ В ОДНОРОДНОСТИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Изменение водного режима отдельных речных бассейнов в результате хозяйственной деятельности приводит к тому, что ряды гидрометеорологических наблюдений часто оказываются неоднородными и для пунктов с достаточно большим периодом наблюдений представляют две совокупности чисел, одна из которых относится к периоду естественного, другая — к периоду нарушенного режима. Однако из-за многофакторности гидрологических процессов бывает трудно установить объективные причины, нарушающие однородность рядов наблюдений, и отделить от них те факторы, которые формируют ряд как совокупность случайных переменных. Использование неоднородных по своему содержанию рядов наблюдений за общим речным стоком, стоком весеннего половодья, низким меженным или подземным стоком для получения их средних многолетних значений, изменчивости и других параметров кривой распределения методами математической статистики не является правомерным. В связи с этим вопрос об установлении однородности выборок и принадлежности этих выборок к одной генеральной совокупности для каждого пункта гидрологических наблюдений имеет важное значение при любых гидрологических расчетах.

Вместе с тем при оценке влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы вопрос об однородности гидрометеорологических данных имеет самостоятельное значение при выборе пунктов-аналогов для реки с нарушенным водным режимом и при установлении однородности физико-географических факторов, формирующих сток на двух водосборах.

В практике расчетов долгое время использовались лишь качественные характеристики однородности гидрометеорологической информации без применения объективных количественных критериев. Не вызывает сомнения, например, факт неоднородности двух выборок максимального или меженного стока в пунктах, расположенных на реке в нижних бьефах плотин, за периоды до и после создания гидротехнических сооружений. Однако в условиях интенсивного использования водных ресурсов может оказаться, что рассматриваемые выборки будут однородными. В этих случаях физического анализа однородности гидрологических характеристик и обуславливающих их факторов явно недостаточно; появляется необходимость в использовании статистических методов, позволяющих представить неоднородность информации в количественном выражении. Более

того, часто полностью отсутствуют сведения об источниках нарушения однородности данных, тогда статистические методы анализа ее обнаружения становятся единственно возможными. В целом статистические и физические приемы анализа данных для определения их однородности обычно дополняют и уточняют друг друга, и их совместное использование приводит к наиболее положительным результатам.

Статистический анализ рядов гидрометеорологических наблюдений на однородность содержит формулировку (выдвижение) нулевой и альтернативных гипотез, выбор (определение) уровня значимости и проверку нулевой гипотезы на основе выбора критической области.

Формулировка нулевой и альтернативных гипотез. Нулевой гипотезой называется предположение, что рассматриваемые выборки являются представителями одной генеральной совокупности. Другими словами, данные двух выборок однородны и наблюдаемые различия в их распределении между основными параметрами (среднее, коэффициенты вариации и асимметрии) несут незначительный характер. Проверка этих параметров на нулевую гипотезу, можно получить альтернативные, т. е. противоположные, выводы относительно рядов гидрометеорологических наблюдений.

Выбор уровня значимости. Уровнем значимости, или мерой случайности, считается такое достаточно малое значение вероятности, которое характеризует практически невозможное событие. Выбор уровня значимости определяется важностью решаемой задачи и точностью исходной информации. В гидрологических расчетах за уровень значимости обычно принимают вероятность 5; 2 и 1 %. Следует иметь в виду, что с уменьшением уровня значимости уменьшается вероятность отклонения нулевой гипотезы, когда она верна, но одновременно с этим из-за увеличения границ допустимых значений увеличивается вероятность принятия нулевой гипотезы, когда она неверна.

Проверка нулевой гипотезы. Анализ однородности рядов гидрометеорологической информации, или статистическая проверка нулевой гипотезы, может быть выполнен на основе использования стандартных (параметрических) и непараметрических критериев. При этом в соответствии с выбранной статистической закономерностью для данного уровня значимости (5; 2; 1 % и т. д.) по таблицам получают граничные теоретические значения выбранного критерия и сравнивают эти значения с фактическими, рассчитанными по данным наблюдений. В случаях расхождения эмпирических данных с гипотетическим принятым допущением ряды наблюдений считаются неоднородными.

Из стандартных параметрических критериев наиболее широко используется критерий Стьюдента (метод t -испытаний)

для установления различий между средними двух выборок и критерий Фишера (метод F -распределений) для проверки равенства дисперсий этих двух выборок. Применение указанных параметрических критериев для проверки однородности данных гидрометеорологических наблюдений, кроме ряда допущений о характере распределения случайных величин и отдельных параметров, требует большого объема вычислений.

В последние годы для решения однородности рядов гидрометеорологических наблюдений широкое применение нашли непараметрические критерии. Преимущество многих из этих критериев состоит в том, что их использование не требует предварительного определения типа кривой распределения исследуемых величин и ее параметров, не связано с большим объемом вычислений и легко проверяется. Эти критерии дают прекрасную возможность быстро подтвердить или опровергнуть нулевую гипотезу, поскольку вычисления с их помощью просты и дают достаточно обоснованные результаты даже в случаях использования коротких рядов наблюдений.

В исследованиях неоднородности отдельных рядов наблюдений за стоком, соответствующих условиям естественного и нарушенного водного режима, могут быть использованы различные непараметрические критерии: критерии Колмогорова—Смирнова, статистика Терри, порядковые критерии Вилькоксона, Ван дер Вардена, критерии знаков и др. Однако наибольшее применение имеют порядковые критерии Вилькоксона и Ван дер Вардена [58, 99, 102].

Подробное изложение существа параметрических и непараметрических критериев приведено в учебных пособиях по математической статистике и в другой справочной литературе [31, 167].

Применительно к исследованиям неоднородности рядов стока на территории ЕТС рассмотрено содержание критериев Вилькоксона и Ван дер Вардена. С их помощью выполнен также анализ рядов климатических характеристик за периоды естественного и нарушенного водного режима рек, результаты которого позволили оценить неоднородность выборок, связанную с различной водностью анализируемых периодов.

Критерии Вилькоксона и Ван дер Вардена основаны на упорядочении наблюдаемых величин, которые располагаются в порядке возрастания их значений. При этом наблюдаемые величины, принадлежащие выборкам за естественный и нарушенный периоды водного режима и обозначенные соответственно через X и Y , образуют последовательность

$$Y_1 Y_2 X_1 Y_3 X_2 Y_4 Y_5 X_3 X_4. \quad (3.2)$$

Если в этой последовательности значению X предшествует значение Y , то эта пара образует инверсию. В случае если зна-

чению X предшествуют два значения Y , то число инверсий будет равно двум и т. д.

Для проверки нулевой гипотезы по критерию Вилькоксона используется число инверсий u вариационного ряда, равное сумме инверсий для каждого X или каждого Y . Так, в последовательности (3.2) число инверсий составляет 15, т. е. $u = 2 + 3 + 5 + 5 = 15$. Нулевая гипотеза отвергается, если число инверсий, вычисленное по фактическому ряду, превосходит границу, выбранную с заданным уровнем значимости. Согласно работе [31], при $m > 10$ и $n > 10$ число инверсий распределено приблизительно по нормальному закону и математическое ожидание Mu может быть определено по формуле

$$Mu = \frac{mn}{2}, \quad (3.3)$$

где m и n — число членов в сравниваемых выборках.

Дисперсия числа инверсий Du находится по формуле

$$Du = \frac{mn}{12} (m + n + 1). \quad (3.4)$$

Критическая область для нулевой гипотезы определяется по формулам:

$$u \leq m_u - t_p \sigma_u; \quad (3.5)$$

$$u \geq m_u + t_p \sigma_u, \quad (3.6)$$

где t_p — нормированное отклонение при принятом уровне значимости q ; $\sigma_u = \sqrt{Du}$.

При справедливости гипотезы однородности вероятность попадания в область допустимых значений (в процентах) определяется по формуле

$$\beta = (100 - q). \quad (3.7)$$

Если значение критерия, вычисленное по наблюдаемым величинам, окажется в критической области, нулевая гипотеза бракуется и с доверительной вероятностью β принимается противоположная (альтернативная) гипотеза неоднородности. Границы критической области для критерия Вилькоксона (табл. 3.1) заимствованы из работы Ф. В. Крюкова [102].

Таблица 3.1

$\beta \%$	99,9	99,0	95,0	90,0	80,0	70,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	0,0
t_p	3,29	2,58	1,96	1,46	1,28	1,04	0,675	0,525	0,385	0,250	0,125	0,0

Степень неоднородности ряда тем больше, чем больше значение β . Обычно неоднородной по сравнению с исходным естественным рядом можно считать выборку данных при $\beta = 70 \%$.

В работе [31] приведены вероятности $P(u)$ событий $u \leq q$, выраженные в процентах и не превосходящие 5 %. Эти вероятности предполагают, что нулевая гипотеза верна и тогда согласно этому все X и Y независимы и подчиняются одинаковому непрерывному распределению. Если оказывается, что $P(u) \leq \beta$, то нулевую гипотезу следует отвергнуть. Истинный уровень значимости одностороннего критерия не превышает β , а истинный уровень значимости двухстороннего критерия не превосходит 2β . При $u > \frac{mn}{2}$ обозначения X и Y следует менять местами.

Анализ однородности гидрологических (или других) выборок при помощи критерия Ван дер Вардена заключается в определении суммы функций, обратных нормальному распределению по аргументу $\frac{r_x}{n+1}$ [31], т. е.

$$X = \sum_{i=1}^n \psi\left(\frac{r_x}{n+1}\right), \quad (3.8)$$

где r_x — порядковые номера X в общем ряду; n — число членов ряда.

По этому критерию ряды стока (или другие) считаются однородными, или нулевая гипотеза не отвергается, если вычисленные по фактическим выборкам значения X меньше заданных граничных значений функции X при соответствующем значении уровня значимости ($X < X_q$).

Вычисление X начинается с деления порядковых номеров X в общем ряду на число членов ряда плюс единица. Затем по данным таблицы, приведенной в работе [31], находят значения функции, которые после суммирования используются для сравнения с граничными значениями функции X . Границы критической области для критерия X находятся по таблицам, приведенным в работе [31]. Если случайная величина X находится вне этих границ, нулевая гипотеза отвергается.

Применение вышеуказанных критериев для проверки однородности выборок за естественный и нарушенный периоды показывается на примере четырех речных бассейнов ЕТС, в которых водный режим рек нарушен главным образом интенсивным использованием подземных вод.

Освоение железорудных месторождений на территории КМА в районе г. Губкина, сопровождаемое водопонижительно-дренажными работами, привело к изменению режима стока р. Осколец. Эти изменения, связанные с развитием депрессионных воронок уровня подземных вод в бассейне р. Осколец после ввода в действие группы железорудных карьеров, выражаются, с одной стороны, в снижении или полном прекращении подземного питания реки и в образовании потерь речных вод на инфильтрацию в пределах депрессионных воронок, а с другой

стороны, в увеличении стока за границами воронок на устьевом участке в районе г. Старый Оскол.

Учитывая изложенное, в замыкающем створе реки у г. Старый Оскол, где ведутся многолетние наблюдения за водным режимом, следует ожидать неоднородности данных в рядах стока с начала водоотлива подземных вод. Водопонижения в районе карьеров и отведение откачиваемых при этом вод началось в 1958 г. Это дает основание разложить имеющиеся ряды наблюдений за стоком на две выборки. Предполагается, что выборка до 1958 г. характеризует (при прочих равных условиях) естественный режим формирования стока, а после 1958 г. — режим реки в условиях значительных водопонижений и сбросов откачиваемых вод в р. Осколец. В качестве исследуемой величины использован подземный сток в реку в период зимней и летней межени. Во избежание включения в значения подземного стока части поверхностных вод, сформированных ливневыми (дождевыми) осадками или талыми водами во время оттепелей, в расчет принимались лишь периоды устойчивых расходов воды, когда их незначительные колебания были обусловлены изменением интенсивности подземного питания реки.

В соответствии с изложенной выше методикой располагаем имеющиеся значения подземного стока в р. Осколец у г. Старый Оскол в принятых нами выборках в порядке их возрастания. Сток, относящийся к первому периоду (в нашем случае с 1952 по 1957 г.), обозначаем через X_i и ко второму (с 1958 по 1966 г.) — через Y_i . После этого подсчитываем эмпирическое число инверсий. Порядок записи результатов расчета числа инверсий представлен в табл. 3.2.

По формулам (3.3) и (3.4) рассчитываем Mu и Du :

$$Mu = \frac{6 \cdot 9}{2} = 27;$$

$$Du = \frac{6 \cdot 9}{12} (6 + 9 + 1) = 72;$$

$$\sigma_u = \sqrt{72} \approx 8,5.$$

Последующее определение критической области числа инверсий при заданном уровне значимости $q=5\%$ ($\beta=95\%$) выполним по формулам (3.5) и (3.6). Значение t_p находим по табл. 3.1.

Согласно формулам (3.5) и (3.6), получим критические области для периодов летней и зимней межени соответственно равными 44 и 10. При этом рассматриваются двухсторонние доверительные границы:

$$u_{0,05} \geq 27 + 1,96 \cdot 8,5 \approx 44;$$

$$u_{0,05} \leq 27 - 1,96 \cdot 8,5 \approx 10.$$

Таблица 3.2

Эмпирические значения инверсий подземного стока в р. Осколец за период 1952—1966 гг.

Годы в порядке возрастания стока	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Годы с естественным X и нарушенным Y стоком	X	X	X	Y	X	X	X	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Годы с естественным X и нарушенным Y стоком	X	X	X	Y	Y	X	X	Y	Y	X	Y	Y	Y	Y	Y

Примечание. Число инверсий в летнюю межень 3, в зимнюю 8.

Таблица 3.3

Эмпирические значения критерия X подземного стока в р. Осколец за период 1952—1966 гг.

Годы в порядке возрастания стока	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Годы с естественным X и нарушенным Y стоком	X	X	X	Y	X	X	X	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
$\frac{rX}{n+1}$	0,062	0,125	0,187	—	0,312	0,374	0,437	—	—	—	—	—	—	—	—
ψ	—1,54	—1,15	—0,89	—	—0,48	—0,32	—0,16	—	—	—	—	—	—	—	—
Годы с естественным X и нарушенным Y стоком	X	X	X	Y	Y	X	X	Y	Y	X	Y	Y	Y	Y	Y
$\frac{rX}{n+1}$	0,062	0,125	0,187	—	—	0,374	0,437	—	—	0,625	—	—	—	—	—
ψ	—1,54	—1,15	—0,89	—	—	—0,32	—0,16	—	—	0,32	—	—	—	—	—

Поскольку вычисленные по эмпирическим выборкам значения инверсий, равные для зимней и летней межени соответственно 3 и 8, выходят за теоретические пределы ($u < u_{0,05}$), нулевая гипотеза отвергается и исследуемые ряды подземного стока следует рассматривать как неоднородные.

Исследование этих же рядов подземного стока в р. Осколец с использованием критерия Ван дер Вардена также подтверждает их неоднородность, что иллюстрируется данными табл. 3.3.

Суммируя значения ψ , получаем для ряда подземного стока в период летней межени $X = -4,54$, а для зимней межени $X = -3,74$. Так как полученные по фактическим выборкам эмпирические значения X лежат за пределами двухсторонней границы их теоретических величин, равных $\pm 3,19$ (при уровне значимости $q = 5\%$), то гипотеза H_0 отвергается.

Использование порядковых критериев при анализе рядов подземного стока подтверждается возможностью применения интегральных кривых для установления направленных изменений режима подземных вод под влиянием хозяйственной деятельности, характеристика которых приведена ниже.

Аналогичные исследования, выполненные по отдельным речным водосборам (Истра, Пахра, Поля), расположенным на территории Московского артезианского бассейна, также подтверждают сделанный вывод. Следует при этом подчеркнуть, что если режим подземного стока р. Истры испытывает начиная с 1935 г. влияние расположенной выше гидроствора плотины, то две другие реки находятся в зоне влияния крупных депрессионных воронок, образованных вследствие изъятия подземных вод мощными водозаборами.

Проверка на однородность рядов подземного стока в период летней и зимней межени за период наблюдений на р. Истре у с. Павловская Слобода как по критерию Вилькоксона, так и по критерию Ван дер Вардена показывает, что изменения подземного стока в реки являются существенными (значимыми) начиная с 1955 г. (табл. 3.4).

Для исключения влияния разной продолжительности сравниваемых выборок выполнена проверка их однородности для различных вариантов расчленения исходного ряда. Продолжительность сравниваемых выборок принималась единой и составляла 10 лет. Каждая последующая выборка сравнивалась с исходной (выборка X), за период которой режим подземного стока в реки принят естественным. Указанная проверка показала, что период с 1925 по 1954 г. может рассматриваться применительно к подземному стоку как однородный, и лишь в последнее десятилетие (1955—1964) отмечается резкая его неоднородность по сравнению с исходным за естественный период, и гипотеза H_0 в этом случае отвергается (см. табл. 3.4). Наряду с этим указанная проверка может рассматриваться как

Таблица 3.4

Результаты определения однородности значений подземного стока в р. Истру у с. Павловская Слобода по отношению к стоку условно естественного периода X (1925—1934 гг.)

Характеристика стока за период	По Вилькоксоу		По Ван дер Вардену		Характеристика однородности ряда
	u	$u_{0,05}$	X	$X_{0,05}$	

Летняя межень

1935—1944 (Y_1)	30	25—75	—2,87	3,86	Однороден
1945—1954 (Y_2)	29	25—75	—2,85	3,86	Однороден
1955—1964 (Y_3)	0	25—75	—7,18	3,86	Неоднороден
1935—1964 (Y_{1-3})	59	105—245	—7,44	6,10	Неоднороден

Зимняя межень

1935—1955 (Y_1)	42	25—75	—1,28	3,86	Однороден
1945—1954 (Y_2)	32	25—75	—2,91	3,86	Однороден
1955—1964 (Y_3)	6	25—75	—6,57	3,86	Неоднороден
1935—1964 (Y_{1-3})	85	125—245	—6,73	6,10	Неоднороден

способ для самостоятельного установления неоднородности данных наблюдений в тех случаях, когда сведения о начале нарушений водного режима рек отсутствуют.

Анализ ряда подземного притока к р. Пахре у д. Макарово, водосбор которой находится в зоне влияния региональной депрессионной воронки уровня подземных вод, за период наблюдений 1925—1967 гг. и расчленение этого ряда на две отдельные выборки показали, что появление неоднородности в данных наблюдениях приходится на 1948 г. (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Результаты проверки данных наблюдений за стоком рек Пахры и Поли на однородность (летняя межень)

Период	По Вилькоксоу		По Ван дер Вардену		Характеристика однородности ряда
	u	$u_{0,05}$	X	$X_{0,05}$	

р. Пахра — д. Макарово

1925—1947	144	150—310	—6,87	5,97	Неоднороден
1948—1967					

р. Поля — пос. Кривандино

1930—1934	0	10—26	—4,65	3,61	Неоднороден
1935—1948					

Как следует из табл. 3.5, выборки подземного стока р. Поли у пос. Кривандино за период с 1935 по 1948 г. могут быть уверенно приняты как неоднородные.

Таким образом, применение порядковых критериев для установления однородности данных может широко использоваться при решении различных гидрологических задач, связанных с оценкой влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы и водный режим речных бассейнов.

3.3. МЕТОДЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ НА ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ

Изменение стокообразующих факторов, водного режима и водных ресурсов речного бассейна в результате хозяйственной деятельности может быть количественно оценено различными методами. Эти методы многочисленны и часто применимы лишь для определенных природных условий. Все они могут быть разделены на следующие основные группы:

1) статистические методы, основанные на анализе характеристик многолетних колебаний стока, климатических факторов и факторов хозяйственной деятельности в рассматриваемых створах (пунктах), установлении связи между этими характеристиками в естественных условиях их формирования и распространении установленных связей на периоды нарушений;

2) воднобалансовые методы, в основе которых лежит использование натурных данных наблюдений за отдельными элементами водного и теплового баланса речного водосбора или его участка для определения степени воздействия на них каждого фактора хозяйственной деятельности в отдельности и суммарно;

3) методы натурального и математического моделирования условий формирования стока с применением различных аналоговых установок, аналоговых и электронных цифровых вычислительных машин (АВМ и ЭЦВМ).

Из первой группы методов в практике гидрологических расчетов используются:

— метод сравнения характеристик стока, климатических факторов и факторов хозяйственной деятельности за различные по продолжительности периоды;

— методы гидрологической аналогии, к которым относятся метод графического сравнения единичных и последовательно суммированных величин, метод парной линейной и нелинейной корреляции, метод множественной линейной корреляции, метод районных зависимостей различных характеристик (расходов воды и модулей) от площади водосбора, метод парных бассейнов;

— метод восстановления стока по естественным стокообразующим факторам.

К второй группе методов относятся:

- метод водного баланса речных бассейнов или их участков;

- метод руслового водного баланса и учетного водного баланса;

- метод гидрометрических съемок.

Третья группа методов объединяет:

- метод натурального моделирования условий формирования стока на установках, которые представляют собой уменьшенную натурную копию речного водосбора или его части;

- метод активного эксперимента, осуществляемого непосредственно на речном водосборе;

- метод моделирования стокообразующих факторов на электроинтеграторах или интеграторах других видов;

- метод математического моделирования процессов стока с учетом факторов хозяйственной деятельности, оказывающих влияние на элементы природной среды, на аналоговых и электронных цифровых вычислительных машинах.

Все перечисленные методы позволяют оценивать изменения водного режима и водных ресурсов речного бассейна, происходящие как под влиянием всего комплекса факторов антропогенного воздействия, так и отдельных мероприятий хозяйственной деятельности в случаях их решающего влияния.

3.3.1. Статистические методы

При решении задач, связанных с определением степени изменений стока под влиянием хозяйственной деятельности и его восстановления до естественных значений, широко используются статистические методы. В основе этих методов лежит принятие гипотезы постоянства комплекса условий, определяющих статистические зависимости одной величины, принимаемой за независимую, от бесчисленного множества значений другой величины. Обычно применяются корреляционные связи как частная форма выражения статистических связей.

В зависимости от полноты исходных гидрометеорологических данных указанные выше задачи решаются путем простого сравнения исследуемых характеристик за периоды с естественным и нарушенным режимом и при помощи линейных и нелинейных корреляционных уравнений или уравнений регрессии. Существенное значение имеет при этом установление линейности связей при большом рассеянии данных в случаях наличия малых выборок.

Метод сравнения. Часто используется для сравнения данных натурных наблюдений за различные по продолжительности промежутки времени. При этом многолетний ряд наблюдений разбивается на две выборки, одна из которых характери-

зует естественные условия формирования рассматриваемого элемента, а другая относится к периоду с различным уровнем развития хозяйственной деятельности на исследуемой территории.

Данные натурных наблюдений суммируются по каждому пункту наблюдений за каждый установленный период, сравниваются между собой и результаты сравнения принимаются в качестве расчетных значений степени изменений рассматриваемого элемента. Обычно одновременно с гидрологическими характеристиками, которые изменяются под влиянием хозяйственной деятельности, сравниваются метеорологические элементы (чаще всего осадки) за те же периоды с целью обнаружения антропогенного воздействия на стокообразующие факторы.

Использование метода сравнения для оценки изменений годового стока под влиянием эксплуатации подземных вод иллюстрируется данными табл. 3.6. В ней приведены результаты сравнения значений стока, атмосферных осадков и коэффициентов стока за два одинаковых периода по четырем рекам. Причем водный режим одной из них (Поля у пос. Кривандино) нарушен, а трех других рек (Озерна, Цна, Пахра) принят за естественный.

Таблица 3.6

Оценка изменений годового стока р. Поля методом сравнения

Период и его характеристика	Сумма осадков за год, мм	Сток, мм			
		нарушен- ный ре- жим	естественный режим		
			р. Поля	р. Озерна	р. Цна
1933—1938	543	160	234	154	198
1939—1948	484	117	216	135	167
Отношение значений пер- вого периода ко вто- рому	1,12	1,37	1,08	1,14	1,18

Период и его характеристика	Сумма осадков за год, мм	Коэффициент стока			
		нарушен- ный ре- жим	естественный режим		
			р. Поля	р. Озерна	р. Цна
1933—1938	543	0,30	0,43	0,28	0,36
1939—1948	484	0,24	0,45	0,28	0,35
Отношение значений пер- вого периода ко вто- рому	1,12	1,25	0,96	1,00	1,03

Как видно из таблицы, осредненная за первый период сумма осадков X_1 примерно на 12 % больше суммы осадков X_2 второго периода ($\frac{X_1}{X_2} = K_X = 1,12$). Примерно на столько же отличается и сток рек, формирующийся в условиях естественного режима подземных вод ($\frac{Y_1}{Y_2} = K_Y = 1,13$). В то же время интенсивность сокращения годового стока реки с нарушенным режимом подземных вод (р. Поля) заметно больше ($K_Y = 1,37$) естественных его изменений, отмеченных по другим рекам. Особенно хорошо виден характер и степень изменения коэффициентов стока, соотношения которых за указанные периоды для р. Поли составили 1,25, а для остальных рек около 1,0.

Если принять сток р. Поли у пос. Кривандино за период 1933—1938 гг. близким к естественному, тогда его сокращение за второй период составит в среднем около 29 мм, или около 18 % среднего многолетнего значения естественного стока.

Метод сравнения использован в работах [29, 77, 87, 127, 132, 182, 183, 188—190, 195]. В частности, в работе [132] этот метод использован для оценки изменений термического режима рек ЕТС под влиянием хозяйственной деятельности.

Более надежным, по-видимому, надо считать использование этого метода для оценки антропогенного влияния в зонах достаточного и избыточного увлажнения, где суммарные осадки за год определяют суммарный годовой сток.

Метод гидрологической аналогии. Одним из приемов, позволяющим получать количественное представление об изменениях водных ресурсов (или других природных факторов) под влиянием хозяйственной деятельности, является восстановление естественных значений исследуемых элементов, нарушенных в результате хозяйственной деятельности, по данным многолетних наблюдений на объектах с естественными условиями их формирования. Применительно к речному стоку этот прием используется широко и отличается большим разнообразием, что следует из многочисленного ряда работ советских и зарубежных исследователей.

Отклонение значений различных характеристик стока от естественных по методу аналогии оценивается путем сопоставления стока реки с нарушенным режимом и стока рек-аналогов за периоды до и после начала проведения хозяйственных мероприятий. Для настоящей работы все расчеты выполнены с учетом классификации речных бассейнов по типу нарушений стока, изложенной в п. 2.3. Для рек с нарушенным водным режимом учитывается расположение гидрометрического створа по отношению к местоположению водохозяйственных объектов, населенных пунктов (главным образом городов), депрессионных воронок в речном бассейне, заборов и сбросов речных и подземных вод. Например, при расположении гидрометрического

створа в зоне влияния депрессионной воронки выше мест сбросов речных и подземных вод наблюдениями может быть отмечено уменьшение водности рек. Это уменьшение будет характеризовать потери речных вод на фильтрацию через русло и сокращение питания рек подземными водами. Если гидрометрический створ будет замыкать водосбор, в пределах которого проводится весь комплекс водохозяйственных мероприятий, включая систему сбросов и заборов речных и подземных вод, наблюдениями может быть зафиксировано или неизменное состояние водных ресурсов, или увеличение водности рек. Указанное будет определяться возможной компенсацией влияния различных антропогенных факторов.

В качестве аналогов ненарушенного водного режима реки принимаются ближайшие, находящиеся в одинаковых природных условиях, речные водосборы с достаточно длинными рядами наблюдений в гидрометрических пунктах. Для анализа используются данные за годы синхронных наблюдений во всех сравниваемых пунктах. При этом в зависимости от продолжительности синхронных наблюдений в период естественного водного режима на исследуемой реке и реках-аналогах расчет естественных значений стока может быть выполнен при помощи графических связей последовательно суммированных его значений или при помощи методов парной и множественной линейной и нелинейной корреляции. Таким образом, синхронность в колебаниях исследуемых величин является физической основой применения корреляционных связей.

Необходимо подчеркнуть, что объективность и точность восстановления нарушенных значений стока до их естественных значений при помощи метода аналогии определяется тем, насколько удачно подобраны реки-аналоги. Как справедливо отмечается многими авторами [46, 94, 166, 182, 183, 194], в современных условиях хозяйственного освоения территории сделать это весьма сложно, особенно в горных районах, характеризующихся значительной асинхронностью колебаний стока.

Метод графического сравнения данных. Сравнение выполняется путем построения графиков связи между значениями стока исследуемой реки и рек-аналогов по основным его характеристикам. В случаях достаточно тесных связей, которые оцениваются коэффициентом корреляции, для условий естественного режима строятся графики связи между последовательно суммированными (интегральными) значениями характеристик стока реки с нарушенным режимом и рек-аналогов. Такие связи дают возможность выделить период нарушений водного режима реки, а также определить средние соотношения между значениями стока исследуемой реки и рек-аналогов, имевшими место до начала нарушений. Распространяя полученные соотношения на годы с нарушенным водным режимом, можно вычислить значения естественного стока путем

умножения этих соотношений на фактический сток рек-аналогов за каждый год или другой период времени.

В этом случае естественные значения различных характеристик стока (годовой, весенний, меженный) восстанавливаются на основе простейшей формулы

$$Q_{в. е} = k Q_a, \quad (3.9)$$

где $Q_{в. е}$ — восстановленный сток; Q_a — сток реки-аналога; k — отношение стока исследуемой реки за период естественного водного режима к стоку реки-аналога за этот же период при коэффициенте корреляции между ними от 0,8 и более и продолжительности синхронных наблюдений более 10 лет.

В качестве расчетных принимаются восстановленные значения стока, осредненные по нескольким пунктам-аналогам.

Величина нарушений (изменений) стока определяется по разности между восстановленными естественными $Q_{в. е}$ и фактическими нарушенными $Q_{ф. н.}$ значениями стока по формуле

$$\Delta Q = Q_{в. е} - Q_{ф. н.} \quad (3.10)$$

Возможность использования метода графического сравнения для восстановления естественных значений стока и определения степени его нарушений рассмотрена на примере р. Осколец у г. Старый Оскол.

Для оценки характера и степени изменений (нарушений) водности р. Осколец под влиянием эксплуатации месторождений и водозаборов промышленных городов выполнено сравнение ее водного режима с режимом рек-аналогов за периоды до и после начала эксплуатации железорудных месторождений.

В качестве аналогов естественного ненарушенного водного режима реки приняты пять ближайших речных водосборов, имеющих достаточно продолжительные ряды гидрологических наблюдений: р. Тим у с. Новые Савины ($F=900 \text{ км}^2$), р. Кшень у д. Серебряковка ($F=1160 \text{ км}^2$), р. Сейм у с. Зуевка ($F=2320 \text{ км}^2$), р. Псёл у г. Обоянь ($F=1100 \text{ км}^2$) и р. Оскол у г. Старый Оскол ($F=1540 \text{ км}^2$).

Для анализа использованы годы совместных наблюдений во всех сравниваемых пунктах за период с 1952 по 1970 г. Сравнение выполнено по четырем характеристикам водности рек (общий годовой, весенний, меженный и подземный сток) методом построения графиков связи между интегральными, последовательно суммированными, значениями стока р. Осколец у г. Старый Оскол и стока рек-аналогов. На графиках удалось выделить периоды естественного и нарушенного водного режима р. Осколец и определить средние соотношения k , имевшие место до начала нарушений стока (табл. 3.7). Как видно из графиков на рис. 21, приведенных в качестве примера по реке-аналогу Тим у с. Новые Савины, естественный режим

р. Осколец прослеживается до 1959 г. В дальнейшем водность реки стала последовательно увеличиваться, что позволило считать водный режим реки в период 1959—1970 гг. нарушенным. Лишь весенний сток не претерпел заметных изменений, поскольку нарушения в нем имеют незначительный удельный вес. Аналогичную картину дают графики и по другим рекам-аналогам.

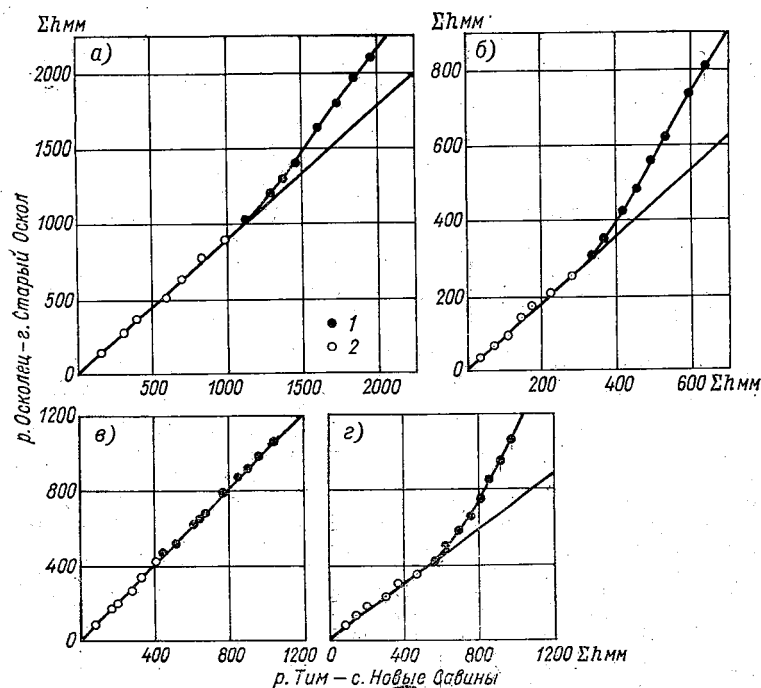


Рис. 21. Связь последовательно суммированных значений общего годового (а), меженного (б), весеннего (в), подземного годового (г) стока и стока реки-аналога; р. Осколец у г. Старый Оскол.

1 — годы с режимом, нарушенным хозяйственной деятельностью; 2 — годы с естественным режимом.

Полученные значения соотношения k (см. табл. 3.7) распространены на период нарушений водного режима р. Осколец и использованы для восстановления естественных значений речного стока по формуле (3.9), а после их осреднения по всем рекам-аналогам — для оценки характера и степени нарушений стока по формуле (3.10).

Отклонения значений фактического стока р. Осколец от предполагаемых естественных значений за весь расчетный период приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.7

Средние значения соотношения значений стока р. Осколец и рек-аналогов (к)
до начала нарушений ее водного режима

Сток	р. Тим	р. Кшень	р. Сейм	р. Псел	р. Оскол
Годовой	0,90	1,02	1,24	1,00	0,77
Весенний	1,04	1,01	1,05	0,96	0,88
Меженный	0,78	1,02	1,48	1,23	0,72
Подземный	0,89	1,02	1,48	1,38	0,65

Таблица 3.8

Отклонение значений фактического нарушенного (ф. н.) стока р. Осколец
от естественных восстановленных (в. е.) по постам-аналогам

Год	Сток, л/с				Отклонение стока					
	сбций		подземный		сбшего годового			подземного		
	в. е.	ф. н.	в. е.	ф. н.	л/с	мм	%	л/с	мм	%
1955	2390	2360	565	755	-30	-2	-1	190	12	33
1956	1840	2060	455	220	220	14	12	-15	-1	-3
1957	2070	2260	630	800	190	12	9	170	11	28
1958	1915	1810	768	598	-105	-7	-6	-170	-11	-22
1959	1640	1810	720	814	170	11	10	94	6	13
1960	2620	3020	533	596	400	25	15	63	4	12
1961	1080	1675	655	1000	595	38	55	345	22	42
1962	1200	1625	598	975	425	27	35	377	24	63
1963	2240	3340	439	1034	1100	70	49	595	38	136
1964	2060	2860	565	1345	800	51	39	780	50	138
1965	1400	2460	750	1680	1060	68	76	930	59	124
1966	1459	1940	750	1170	481	31	33	420	27	56
Среднее за период нарушений	1710	2342	626	1076	632	28	37	450	20	73

Данные табл. 3.8 также показывают, что начиная с 1959 г. водность р. Осколец стала последовательно увеличиваться. К 1966 г. отклонение значений фактического стока от восстановленных естественных для годового стока достигло 1060 л/с, или 76 %, а для подземного стока 930 л/с, или 124 %. По весеннему стоку отклонения имеют разный знак и лежат в пределах точности определения естественных значений весеннего стока. За период нарушений стока с 1959 по 1966 г. среднее отклонение фактических его значений от восстановленных естественных для годового стока составило 632 л/с, или 37 %, а для подземного 450 л/с, или 73 %. Необходимо указать, что начало выявленных нарушений водного режима р. Осколец совпадает

по времени с вводом в эксплуатацию Лебединского рудника и целиком связано в дальнейшем с усилением водопонижительных работ в районе карьеров.

Метод парной линейной и нелинейной корреляции. Используется для установления связи между двумя переменными величинами (гидрологическими характе-

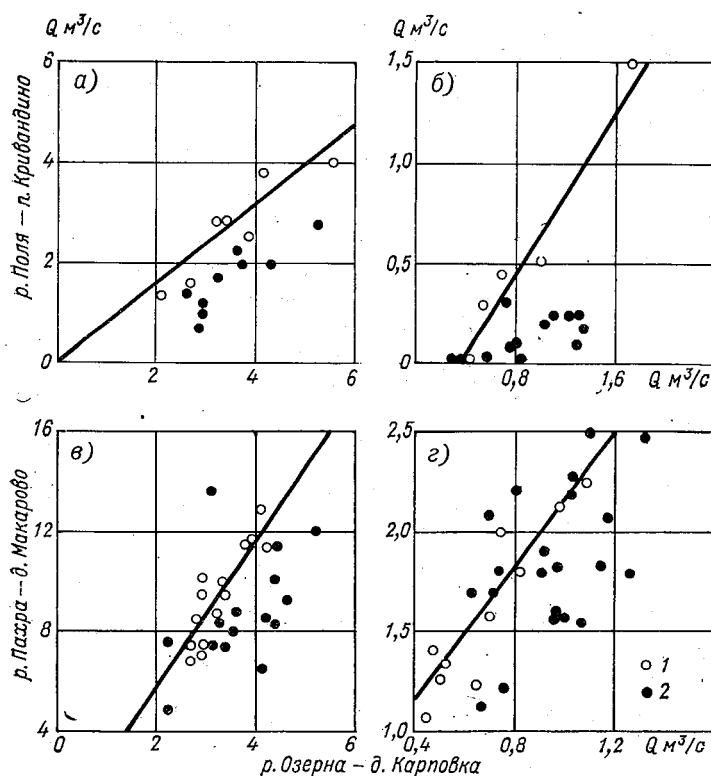


Рис. 22. Связь между средними годовыми значениями общего (а, в) и подземного (б, г) стока исследуемой реки и реки-аналога (р. Озерна).

1 — годы естественного режима поверхностных и подземных вод; 2 — годы нарушенного режима.

ристиками одного пункта наблюдений и такими же гидрологическими характеристиками другого пункта наблюдений или гидрологическими характеристиками и климатическими элементами в одном пункте наблюдений) за периоды их естественного формирования и распространения этих связей на периоды с условиями, преобразованными в процессе хозяйственного освоения территории.

Линейность соответствующих переменных X_i и Y_i обнаруживается графически. Для примера на рис. 22 приведена

линейная связь годовых значений общего стока и подземного притока в двух пунктах наблюдений за периоды естественного и нарушенного водного режима рек.

Параметры линейной зависимости вида

$$Y = aX + b \quad (3.11)$$

находятся при условии, когда сумма квадратов отклонений наблюдаемых величин от рассчитанных по уравнению регрессии будет иметь наименьшие значения. Порядок определения параметров a и b подробно изложен в работе [167]. Здесь уместно лишь указать, что параметр

$$a = r \frac{\sigma_Y}{\sigma_X}, \quad (3.12)$$

а параметр

$$b = \bar{Y} - r \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} \bar{X}, \quad (3.13)$$

где σ_Y и σ_X — средние квадратические отклонения переменных Y и X от их арифметического среднего, определяемые по уравнениям

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n}}; \quad (3.14)$$

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_1^n (X_i - \bar{X})^2}{n}}; \quad (3.15)$$

r — коэффициент корреляции между переменными.

Коэффициент корреляции между переменными определяется по формуле

$$r = \frac{\sum_1^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_1^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_1^n (Y_i - \bar{Y})^2}}. \quad (3.16)$$

В тех случаях, когда переменные X и Y независимы друг от друга, коэффициент корреляции будет равен нулю, поскольку сумма произведений отклонений переменных от среднего в числителе формулы (3.16) равна нулю. Если имеет место корреляционная (и притом линейная) связь, тогда в зависимости от ее тесноты коэффициент корреляции будет изменяться в пределах ± 1 . При увеличении функции с ростом аргумента (прямая зависимость) коэффициент характеризуется положитель-

ными значениями и, наоборот, при уменьшении функции с ростом аргумента (обратная зависимость) — отрицательными значениями.

Подставляя найденные значения параметров a и b в равенство (3.11), получаем уравнение регрессии Y по X

$$Y - \bar{Y} = r \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} (X - \bar{X}). \quad (3.17)$$

Аналогично получается уравнение линейной зависимости X по Y , которое, как и первое уравнение, имеет самостоятельный характер:

$$X - \bar{X} = r \frac{\sigma_X}{\sigma_Y} (Y - \bar{Y}). \quad (3.18)$$

В общем виде приведенные зависимости справедливы для любого закона распределения случайных переменных X и Y .

Стандартные ошибки, или средние квадратические отклонения σ_Y , между наблюдаемыми и рассчитанными по уравнению регрессии могут быть оценены по формулам:

$$\sigma_{Y(X)} = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2 - a \sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n}} \quad (3.19)$$

или

$$\sigma_{Y(X)} = \sigma_{Y0} \sqrt{1 - r^2}. \quad (3.20)$$

В формуле (3.20) σ_{Y0} — среднее квадратическое отклонение исходного ряда величин Y , а r — коэффициент корреляции уравнения регрессии.

Стандартные ошибки коэффициентов a и b , значения которых зависят от объема выборки, определяются по формулам

$$\sigma_a = \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} \frac{1 - r^2}{\sqrt{n}} \quad (3.21)$$

и

$$\sigma_b = \frac{\sigma_{Y(X)}}{\sqrt{n}} = \frac{\sigma_Y \sqrt{1 - r^2}}{\sqrt{n}}, \quad (3.22)$$

а погрешность в оценке ординаты линии регрессии

$$\sigma_{\bar{Y}(X)} = \sigma_{Y(X)} \sqrt{\frac{1}{n-2} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\sum (X_i - \bar{X})^2}}. \quad (3.23)$$

Стандартная ошибка определения коэффициента корреляции при достаточно большом числе n

$$\sigma_r \approx \frac{1 - r^2}{\sqrt{n-1}}. \quad (3.24)$$

При малых объемах выборки и больших значениях r используют обычно преобразования Фишера

$$Z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r}, \quad (3.25)$$

величина которого может быть принята из таблиц.

Стандартная ошибка Z определяется по формуле

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{n-3}}. \quad (3.26)$$

Поскольку восстановленные значения стока для периода нарушения водного режима реки хозяйственной деятельностью отличаются от действительных сглаженностью колебаний, то можно принять, что действительное значение изменчивости рассматриваемой гидрологической величины равно C_v [101]. В данном случае C_v — коэффициент вариации ряда, восстановленного по уравнению регрессии, а r имеет прежнее обозначение. Для сохранения общего характера колебаний переменной Y следует также в $1/r$ раз увеличить отклонения $Y - \bar{Y}$, определенные по уравнению регрессии. Вместе с тем, как указывают А. В. Рождественский и А. И. Чеботарев, при низких значениях коэффициентов корреляции ряды, восстановленные с учетом поправки, равной $1/r$, не отражают колебаний рассматриваемой величины за конкретный отрезок времени, к которому относятся используемые при расчете наблюдения за колебаниями аргумента X [167].

Таким образом, естественные значения различных характеристик речного стока восстанавливаются по формулам (3.17) и (3.18) с учетом определения их погрешностей и осредняются по нескольким пунктам-аналогам.

Величина нарушений стока определяется по формуле (3.10).

Возможность применения метода парной корреляции показана ниже на примере анализа данных наблюдений за стоком р. Осколец у г. Старый Оскол, нарушенным влиянием комплекса водохозяйственных мероприятий, и р. Тим у с. Новые Савины, использованной в качестве аналога с естественным водным режимом.

По данным многолетних наблюдений в условиях естественного водного режима на р. Осколец и на р. Тим продолжительностью 15 лет (1932—1939, 1952—1958) в соответствии с изложенной выше последовательностью были восстановлены естественные значения стока и определены размеры нарушений водного режима р. Осколец, подтверждающие результаты расчета, приведенные в табл. 3.8.

В случае нелинейности связи между переменными X и Y происходит преобразование исходных гидрологических или климатических данных, приводящее исследуемую связь к линей-

ному виду. Одним из простых способов преобразования нелинейных связей в линейные является логарифмическое выражение одной или двух переменных.

Все шире применяется способ установления линейного уравнения регрессии, основанной на предварительной нормализации и линеаризации исходных гидрометеорологических данных. Подробно этот способ рассмотрен в монографии Г. А. Алексеева [4] и в настоящей работе не приводится.

Метод множественной линейной корреляции. В случаях коротких рядов совместных наблюдений в естественном режиме стока на исследуемой реке и реках-аналогах при отсутствии достаточно надежных связей между величинами в двух пунктах, когда применение парной корреляции не дает положительных результатов, восстановление естественных значений стока рек за период его нарушений в результате хозяйственной деятельности выполняется по методу множественной линейной корреляции.

Сущность этого метода заключается в установлении линейной корреляционной связи между несколькими переменными — гидрологическими характеристиками или климатическими элементами и стоком.

Вывод уравнения множественной линейной регрессии для расчета стока исследуемой реки основывается на анализе данных наблюдений трех-четырех пунктов-аналогов с периодом синхронных наблюдений более пяти лет или данных наблюдений за несколькими климатическими элементами, которые привлекаются для установления их связи с естественным значением стока в рассматриваемом пункте.

Восстановление естественного стока за нарушенный период производится по уравнению множественной линейной регрессии общего вида

$$\hat{Y}_i = k_1 \hat{X}_1 + k_2 \hat{X}_2 + \dots + k_j \hat{X}_j + \dots + k_n \hat{X}_n, \quad (3.27)$$

где $\hat{Y}_i = Y_i - \bar{Y}$ и $\hat{X}_j = X_{ji} - \bar{X}_j$ при $i = 1, 2, \dots, m$ и $j = 1, 2, \dots, n$, представляющие систему уравнений в соответствии с числом наблюдений над величинами $Y, X_1, X_2, \dots, X_n$.

Решение системы уравнений начинается с расчета коэффициентов корреляции и сводится к нахождению неизвестных величин, связанных между собою, использование которых в системе позволяет получать наименьшие отклонения рассчитанных величин от наблюдаемых. Наилучшее решение системы уравнений удовлетворяет требованиям правила наименьших квадратов, т. е. сумма квадратов всех отклонений должна быть минимальной величиной.

Если в парном корреляционном уравнении коэффициент регрессии связывает две переменных, то в уравнении

множественной регрессии имеет место их комбинация. Например, для случая трех переменных Y , X_1 и X_2 уравнение множественной регрессии можно записать в следующем виде:

$$\hat{Y} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} \frac{r_{YX_1} - r_{YX_2} r_{X_1X_2}}{1 - r_{X_1X_2}^2} \hat{X}_1 + \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} \frac{r_{YX_2} - r_{YX_1} r_{X_1X_2}}{1 - r_{X_1X_2}^2} \hat{X}_2. \quad (3.28)$$

Начиная с четырех переменных, уравнение становится громоздким и расчет коэффициентов регрессии лучше производить на вычислительных машинах с использованием детерминантов (определителей).

Для данного случая определитель D и его миноры D_{YY} , D_{YX_1} и D_{YX_2} находятся из выражений:

$$D = \begin{vmatrix} 1 & r_{YX_1} & r_{YX_2} \\ r_{YX_1} & 1 & r_{X_1X_2} \\ r_{YX_2} & r_{X_1X_2} & 1 \end{vmatrix}; \quad (3.29)$$

$$D_{YY} = \begin{vmatrix} 1 & r_{X_1X_2} \\ r_{X_1X_2} & 1 \end{vmatrix} = |1 - r_{X_1X_2}^2|; \quad (3.30)$$

$$D_{YX_1} = \begin{vmatrix} r_{YX_1} & r_{X_1X_2} \\ r_{YX_2} & 1 \end{vmatrix} = r_{YX_1} - r_{YX_2} r_{X_1X_2}; \quad (3.31)$$

$$D_{YX_2} = - \begin{vmatrix} r_{YX_1} & 1 \\ r_{YX_2} & r_{X_1X_2} \end{vmatrix} = -|r_{YX_1} r_{X_1X_2} - r_{YX_2}| = \\ = r_{YX_2} - r_{YX_1} r_{X_1X_2}. \quad (3.32)$$

Последние позволяют представить коэффициент регрессии в общем виде

$$k_j = \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} \frac{D_{YX_j}}{D_{YY}}, \quad (3.33)$$

где σ_Y и σ_X — прежние обозначения; D_{YX_j} и D_{YY} — миноры определителя D .

Используя это выражение, уравнение регрессии для трех переменных (3.28) запишем

$$\hat{Y} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{X_1}} \frac{D_{YX_1}}{D_{YY}} \hat{X}_1 + \frac{\sigma_Y}{\sigma_{X_2}} \frac{D_{YX_2}}{D_{YY}} \hat{X}_2. \quad (3.34)$$

Коэффициент парной корреляции между переменными определяется по формуле, аналогичной (3.16), а полный — по формуле

$$R = \sqrt{1 - \frac{D}{D_{YY}}}. \quad (3.35)$$

Полный коэффициент корреляции изменяется от нуля до единицы. Если $r=0$ и $R=0$, то линейная связь между величинами отсутствует, а при $r = \pm 1$ и $R = 1$ связь между величинами функциональна.

Точность уравнения регрессии может быть определена по формулам

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (Y_n - Y_p)^2}{m}} \quad (3.36)$$

и

$$\sigma_Y = \sigma_0 \sqrt{1 - R^2} \quad (3.37)$$

(здесь Y_n — сток наблюдаемый, Y_p — сток расчетный).

Средняя квадратическая погрешность коэффициента регрессии находится по формуле

$$\sigma_{kj} = \sqrt{\frac{m \sigma_Y^2}{(m-n) P_{kj}}} \quad (3.38)$$

где m — число членов ряда; n — число независимых переменных;

$P_{kj} = \frac{\Delta}{\Delta_{jj}}$ — определитель уравнения при $j=1, 2, \dots, n$.

Средние квадратические погрешности определения коэффициентов регрессии для случая трех переменных равны:

$$\sigma = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{X_1} \sqrt{(m-2)(1-r_{X_1 X_2}^2)}}; \quad (3.39)$$

$$\sigma_{k_2} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{X_2} \sqrt{(m-2)(1-r_{X_1 X_2}^2)}}. \quad (3.40)$$

Применение метода множественной линейной корреляции для восстановления естественных значений стока, нарушенного влиянием хозяйственной деятельности, рассмотрено на примере р. Осколец у г. Старый Оскол (Y) и двух рек-аналогов: р. Оскол у г. Старый Оскол (X_1) и р. Псёл у г. Обоянь (X_2). Продолжительность синхронных наблюдений за стоком в период естественного водного режима р. Осколец была принята не фактическая — 15 лет, а только за 7 лет с 1952 по 1958 г.

Для оценки характера и степени нарушений стока р. Осколец в соответствии с рекомендациями по формуле (3.16) рассчитаны коэффициенты корреляции между переменными. В данном случае $r_{YX_1} = 0,96$, $r_{YX_2} = 0,74$ и $r_{X_1 X_2} = 0,82$. Затем по формулам (3.29) — (3.32) найдены определитель D и его миноры D_{YY} , а по формуле (3.36) — средние квадратические отклонения, которые соответственно составили: $D = 0,018$; $D_{YY} = 0,329$; $D_{YX_1} = -0,354$; $D_{YX_2} = 0,055$; $\sigma_Y = 0,41$; $\sigma_{X_1} = 1,40$; $\sigma_{X_2} = 1,31$.

Коэффициенты регрессии, вычисленные по формуле (3.33), равны:

$$k_1 = -\frac{0,41 \cdot 0,354}{1,40 \cdot 0,329} = -0,31,$$

$$k_2 = \frac{0,41 \cdot 0,055}{1,31 \cdot 0,329} = 0,05$$

при полном коэффициенте корреляции 0,97.

Располагая необходимыми данными, получаем уравнение регрессии вида

$$Y = 0,31X_1 - 0,05X_2 - 0,24, \quad (3.41)$$

позволяющее восстанавливать естественные значения стока р. Осколец конкретно за каждый год.

Среднее квадратическое отклонение связи (3.41) равно

$$\sigma_{\bar{Y}} = \sigma_Y \sqrt{1 - R^2} = 0,41 \sqrt{1 - 0,97^2} \approx 0,10.$$

Средние квадратические погрешности коэффициентов регрессии k_1 и k_2 рассчитаны по формулам (3.39) и (3.40):

$$\sigma_{k_1} = \frac{0,10}{1,40 \sqrt{(7-2)(1-0,82^2)}} = 0,05;$$

$$\sigma_{k_2} = \frac{0,10}{1,31 \sqrt{(7-2)(1-0,82^2)}} = 0,06.$$

Полученные отклонения коэффициентов регрессии указывают на то, что первый из них достаточно надежен; второй коэффициент не надежен, но поскольку вес его в уравнении невелик, то и вносимые им при расчетах погрешности незначительны. Аналогичные уравнения множественной регрессии были получены и для других характеристик стока, в частности для подземного стока. Это позволило определить по формуле (3.10) характер и степень нарушений стока р. Осколец у г. Старый Оскол. В среднем с 1959 по 1966 г. общий годовой сток здесь увеличился за счет сброса не дренируемых рекой вод на 0,64 м³/с, или на 37%, а сток в период устойчивой межени — на 0,44 м³/с, или на 74%. Сравнение вышеприведенных значений нарушений стока, которые были определены методом графического сравнения, со значениями, полученными методом множественной линейной корреляции, показывает, что они близки между собой.

Метод множественной линейной корреляции для определения влияния хозяйственной деятельности на сток использован в работах [163, 182, 195 и др.].

Метод районных зависимостей расходов воды от площади водосбора $Q=f(F)$. В формировании речного стока наряду с общими зональными закономерностями,

большое значение имеют закономерности, связанные с влиянием аazonальных факторов. Эта особенность позволяет объединять речные бассейны по отдельным однородным признакам или по совокупности признаков, т. е. районировать территорию по одному или нескольким природным факторам. Районирование территории представляет собой один из методов обобщения необходимой информации и широко используется в научных исследованиях. Принцип и особенности районирования территории применительно к различным направлениям науки изложены в работах [36, 37, 86, 108, 129, 155, 172, 186].

Обобщение однородной по своему содержанию информации в виде районных карт позволяет устанавливать расчетные связи между искомой характеристикой и основными физико-географическими факторами, например, между стоком рек и факторами подстилающей поверхности: площадью, высотой, озерностью, заболоченностью, гидрогеологическими условиями, составом почвогрунтов и залесенностью водосбора. В частности, А. М. Владимировым [36] была выявлена надежная пространственная связь минимального расхода воды с площадью водосбора. Он всесторонне аргументирует использование указанной связи для получения минимальных расходов воды неизученных рек. При этом обращает внимание на то, что при установлении расчетных связей для определения стока неизученных рек обычно используют модуль или слой стока, т. е. параметры, приведенные к единице площади, а не расход воды. Как отмечает Владимиров, применение этих в известной мере условных характеристик в ряде случаев приводит к необоснованным или неопределенным выводам, поскольку тесноту связи модуля с площадью водосбора могут искажать точность определения зависимых величин, несовпадение границ поверхностного и подземного водосбора, различия в густоте гидрографической сети, изменение природных условий по длине реки и др.

Районирование территории СССР и разработанный Владимировым метод расчета минимального среднего многолетнего 30-суточного стока малых рек были впервые опубликованы в работе [36] и Указаниях [178]. Наиболее полно карты районов для зимнего и летне-осеннего сезонов представлены в работе [36]. Всего на территории СССР, исключая горные районы Кавказа и Средней Азии, выделено 158 районов в зимний и 148 районов в летне-осенний сезоны.

Общая расчетная зависимость для определения минимальных 30-суточных расходов воды неизученных рек с площадью водосбора от нескольких квадратных километров до 15 000 км² имеет вид

$$Q_{\min} = a (F \pm f)^n; \quad (3.42)$$

здесь $Q_{\min}$ — средний многолетний минимальный 30-суточный расход воды в зимний или летне-осенний сезон, м³/с; F —

площадь водосбора реки, км²; f — средняя по району площадь с отсутствием стока (случай отрицательного знака) или средняя площадь подземного бассейна, обеспечивающая более значительную водность рек района (случай положительного знака); a и n — параметры, характеризующие условия формирования стока в районе.

Дальнейшее развитие изложенный выше метод получил в работе [37].

Метод районных зависимостей расхода воды от площади водосбора был использован в работе [183] для восстановления естественного стока рек центральной части ЕТС, измененного в результате интенсивной хозяйственной деятельности. Значительным преимуществом метода для условий ЕТС является получение данных по рекам, не освещенных наблюдениями за стоком в естественном водном режиме.

Для восстановления естественных значений нарушенного стока за различные промежутки времени (год, сезон) достаточно надежно используется зависимость естественных расходов воды Q_T за многолетний период ($T > 10$ лет) от площади водосбора F , имеющая вид

$$Q_T = aF^n, \quad (3.43)$$

где a и n — районные параметры, характеризующие условия формирования рассматриваемой характеристики стока в районе.

Зависимость (3.43) устанавливается по данным о средних многолетних естественных значениях стока, характеризующих средние по условиям водности периоды наблюдений на реках, расположенных в однородном физико-географическом районе. Примеры такой зависимости годового и сезонного (за период половодья и межени) стока одного из районов центральной части ЕТС приведены на рис. 23. Наличие указанной зависимости позволяет определить по площади водосбора средние многолетние расходы воды неизученных рек и рек с преобразованным режимом стока.

Восстановление нарушенных (измененных) значений стока за период влияния различных водохозяйственных мероприятий продолжительностью t лет выполняется по формуле

$$\bar{Q}_t = Q_T \bar{K}_t = aF^n \bar{K}_t, \quad (3.44)$$

где $\bar{K}_t$ — коэффициент естественной водности за период нарушений стока; a и n — те же по величине параметры, что и в зависимости (3.43) для многолетнего периода (нормы стока).

Коэффициент $\bar{K}_t$, которым оценивают естественные колебания водности исследуемых рек за период нарушений их водного режима, определяется по данным наблюдений на m ре-

ках-аналогах с естественными или близкими к естественным условиями его формирования:

$$\overline{K}_t = \frac{\sum_{i=1}^m K_t}{m \approx 5} \quad (3.45)$$

при

$$K_t = \frac{\sum_{i=1}^t K}{t} \quad (3.45a)$$

и

$$K = \frac{Q_i}{Q_T} \quad (3.45b)$$

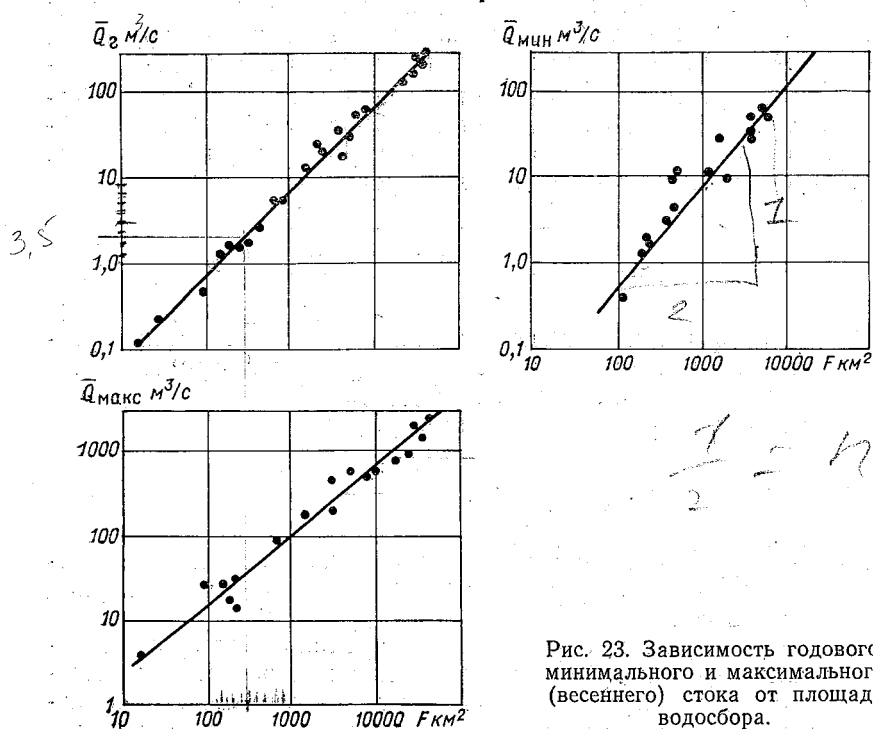


Рис. 23. Зависимость годового, минимального и максимального (весеннего) стока от площади водосбора.

В приведенных выражениях K_t — коэффициент водности за период нарушений стока на исследуемой реке, вычисленный по стоку реки-аналога, а K — отношение расхода воды за каждый отдельный год Q_i к среднему многолетнему расходу Q_T .

Характер и степень нарушений (изменений) речного стока под влиянием хозяйственной деятельности за период t определяется по разности между фактическими (нарушенными) $\overline{Q}_{t,н}$

и естественными (восстановленными) значениями стока с помощью формулы

$$\Delta Q = \bar{Q}_{t,н} - Q_t = \bar{Q}_{t,н} - aF^n \bar{K}_t. \quad (3.46)$$

Точность восстановленных значений стока оценивается по закону сложения случайных ошибок двух зависимых переменных, что следует из выражений (3.45) — (3.45 а, б), по формуле

$$\sqrt{\sigma_{\bar{Q}_t}} = \sqrt{\sigma_{Q_T}^2 + \sigma_{\bar{K}_t}^2 + 2r_{Q_T \bar{K}_t} \sigma_{Q_T} \sigma_{\bar{K}_t}}, \quad (3.47)$$

где σ_{Q_T} , σ_{Q_T} и $\sigma_{\bar{K}_t}$ — соответственно средние квадратические погрешности определения восстановленного расхода воды, нормы стока по зависимости (3.43) и среднего за период нарушений стока коэффициента естественной водности реки; $r_{Q_T \bar{K}_t}$ — коэффициент корреляции между естественным средним многолетним расходом воды, вычисленным по формуле (3.16), и коэффициентом естественной водности за период нарушений стока.

Погрешность σ_{Q_T} определяется по формуле

$$\sigma_{Q_T} = \sqrt{\frac{\sum (Q_{T,набл} - Q_{T,расч})^2}{n-1}}, \quad (3.48)$$

где n — число пунктов, использованное для вычисления среднего многолетнего расхода воды по ряду непосредственных наблюдений $Q_{T,набл}$ и по формуле $Q_{T,расч}$.

Погрешность $\sigma_{\bar{K}_t}$ находится по формуле

$$\sigma_{\bar{K}_t} = \sqrt{\frac{\sum (K_t - \bar{K}_t)^2}{m-1}}, \quad (3.49)$$

где m — число пунктов-аналогов, использованных для вычисления среднего коэффициента естественной водности за период нарушений стока.

Метод парных бассейнов предполагает сравнительный анализ данных многолетних наблюдений за водным режимом и водными ресурсами пары речных водосборов. Рассматриваются два примерно одинаковых по всем своим природным характеристикам водосбора, отличающиеся друг от друга степенью залесенности, заболоченности, распаханности, урбанизации и другими признаками антропогенного воздействия на природную среду, т. е. на одном водосборе природные ресурсы сохраняются в естественном состоянии, а на другом ведутся вырубки лесов, осушительные мероприятия, эксплуатация подземных вод, разработка месторождений полезных ископаемых и др.

Метод парных бассейнов представляется генетически более обоснованным, поскольку сопровождается анализом физической сущности большого числа факторов. Тем не менее получаемые различными авторами результаты расходятся между собой. Чаще всего этот метод применяется для малых водосборов и стоковых площадок, в связи с чем полученные выводы не всегда являются репрезентативными для средних и больших рек. Попытки переноса результатов наблюдений по стоковым площадкам на большие речные бассейны, имевшие место в практике гидрологических расчетов, приводили к ошибочным и несостоятельным выводам, не подтвердившимся в действительности.

Метод парных бассейнов использован для оценки влияния на речной сток леса [70, 73, 74, 163, 164, 174 и др.], мелиоративных [29, 43, 86, 87 и др.] и агротехнических [19, 42, 109, 127 и др.] мероприятий.

Метод восстановления стока по его зависимости от естественных стокообразующих факторов (комбинированный метод) предложен и широко использован И. А. Шикломановым [194, 195] применительно к различным физико-географическим зонам СССР и речным бассейнам. В основе метода лежит исследование по данным непосредственных наблюдений многолетних колебаний стока с одновременным анализом метеорологических факторов и факторов хозяйственной деятельности, осуществляемой в бассейне реки до рассматриваемого замыкающего створа. Для установления многофакторных зависимостей стока от естественных стокообразующих факторов привлекается метод множественной линейной корреляции с применением ЭВМ. В частности, Шикломанов использует этот метод для восстановления естественных значений стока в замыкающем створе горных рек (Кура, Терек и др.), устанавливая многофакторную зависимость вида

$$Y = \psi(\sum Q, X, d) \quad (3.50)$$

или

$$Y = \psi(\sum Q, X, d, U_{\text{хоз}}), \quad (3.51)$$

где Y — годовой (или за вегетационный период) сток; $\sum Q$ — сток горных рек в зоне формирования; x и d — атмосферные осадки и дефицит влажности воздуха в зоне использования стока; $U_{\text{хоз}}$ — антропогенный фактор, количественно характеризующий безвозвратные потери стока при его использовании. Обычно $U_{\text{хоз}}$ представляется в виде общей площади орошаемых земель бассейна.

Чаще всего при расчетах применяется зависимость (3.50), устанавливаемая по данным наблюдений за стоком в зоне его естественного формирования и отдельных стокообразующих факторов в зоне использования стока.

Для равнинных рек, водные ресурсы которых испытывают влияние хозяйственной деятельности, также возможно использование многофакторных зависимостей, аналогичных зависимости (3.51). В этом случае необходимо устанавливать корреляционные связи между стоком в замыкающем створе и стокообразующими факторами, которые формировались в естественных условиях водного режима речного бассейна.

Исследования, выполненные Шикломановым [194], показали, что для условий лесостепных и степных районов СССР весьма эффективно могут быть использованы при оценке влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы зависимости стока от климатических факторов. Например, для восстановления стока за весенний период $Y_{\text{вес}}$ рекомендуется зависимость вида

$$Y_{\text{вес}} = \psi(S, d, Z_{\text{ос}}, t_{\text{в}}), \quad (3.52)$$

где S — максимальные снегозапасы на водосборе к началу снеготаяния; d — средний дефицит влажности воздуха на водосборе за июнь — сентябрь предшествующего года; $Z_{\text{ос}}$ — испарение в осенний период (октябрь — ноябрь); $t_{\text{в}}$ — средняя температура воздуха на водосборе в период снеготаяния.

Для восстановления гидрологических характеристик стока (годовых и сезонных) крупных равнинных рек (Волга, Днепр и др.) используются многофакторные зависимости вида

$$Y_{\text{в.с}} = \psi(Y_1, Y_2, \dots, Y_n; X_{\text{ср}} t_{\text{ср}}), \quad (3.53)$$

где $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ — сток рек-индикаторов с естественным или незначительно измененным водным режимом за многолетний период наблюдений, расположенных в лесной зоне; $X_{\text{ср}}$ — среднее за год (или сезон) количество атмосферных осадков по метеостанциям в зоне использования водных ресурсов; $t_{\text{ср}}$ — средняя годовая (или сезонная) температура воздуха по тем же метеостанциям.

Количественная оценка влияния комплекса факторов хозяйственной деятельности на речной сток вычисляется по разности между значениями естественного (восстановительного) и фактического (нарушенного) стока.

Возможность использования указанных способов расчета изменений водных ресурсов под влиянием факторов хозяйственной деятельности показана в работах [46, 194, 195] на примере многих рек нашей страны. При этом установлено, что в 1970—1973 гг. суммарное уменьшение стока основных рек СССР достигало 60 км³/год, или около 2 % водных ресурсов страны. Из них суммарное снижение стока рек южных районов ЕТС определено в 49 км³/год, что составляет около 9 % ресурсов поверхностных вод этой территории. На 14—22 % в среднем сократился годовой сток рек Терека, Дона, Днепра, Днестра и Урала. Объем годового стока р. Волги у г. Волго-

града за период с 1956 по 1970 г. уменьшился под влиянием всего комплекса хозяйственных мероприятий примерно на $20 \text{ км}^3/\text{год}$, или на 8 % нормы стока.

Предложенные Шикломановым методы значительно расширили границы исследований влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы, особенно на водные ресурсы крупных рек. Вместе с тем их использование, как правило, ограничено отсутствием длительных наблюдений за стоком в естественных условиях его формирования, трудностью подбора бассейнов-аналогов, в ряде случаев недостаточно высокой точностью определения основных климатических факторов и невозможностью вскрытия физической сущности происходящих на водосборе процессов.

3.3.2. Воднобалансовые методы

Широкое развитие воднобалансовых исследований в нашей стране [93] происходило в направлении:

- организации комплексных натурных исследований элементов водного баланса, их взаимосвязи и оценки степени влияния природных факторов и хозяйственной деятельности;
- разработки и усовершенствования методов изучения и расчета различных элементов водного баланса;
- внедрения в практику оперативных водных балансов для отдельных речных бассейнов, озер и водохранилищ.

Большое значение имеют воднобалансовые исследования для составления водохозяйственных балансов при разработке проектов использования и охраны водных ресурсов. Воднобалансовые исследования позволяют решить многие гидрологические задачи, среди которых следует отметить оценку влияния различных антропогенных факторов на водные ресурсы и прогнозирование изменений водного режима преобразованных территорий. Воднобалансовые методы изучения антропогенного воздействия на природную среду нашли особенно широкое применение в последние 10 лет в связи с необходимостью разработки способов контроля за использованием и охраной естественных водных ресурсов.

В основе методов лежит изучение элементов водного баланса и их изменения под влиянием хозяйственной деятельности в пределах речного бассейна, его участка или русла реки за различные промежутки времени (многолетие, год, сезон, месяц, декада, сутки, фазовооднородные периоды и т. п.). Наиболее полные результаты этих исследований могут быть получены, когда одновременно изучаются изменения других компонентов природной среды, в частности изменения элементов теплового или солевого баланса. Сложный комплекс процессов, определяющих особенности формирования водного баланса речного бассейна, может быть представлен математическими

моделями в виде уравнений водного, теплового и солевого балансов, уравнений связи отдельных элементов этих балансов между собой, с элементами гидрометеорологического режима, характеристиками подстилающей поверхности (почвенными, растительными, зоологическими и т. п.) и факторами хозяйственной деятельности.

Общим уравнением для всех видов баланса является простое балансовое соотношение

$$\sum_{i=1}^k Q_i - \sum_{j=1}^m Q_j = \Delta. \quad (3.54)$$

В первую сумму включаются все приходные элементы баланса Q_i , во вторую сумму входят расходные статьи баланса Q_j . Число элементов, входящих в суммы Q_i и Q_j , зависит от продолжительности периода, для которого составляется баланс, и полноты учета элементов. Разность между приходной и расходной статьями Δ характеризует изменение элементов баланса за рассматриваемый период времени и погрешности их определения. Эта разность будет тем точнее, чем полнее и надежнее учитываются элементы баланса. При $\Delta=0$ имеет место баланс приходных и расходных элементов исследуемого вещества, при $\Delta>0$ — его накопление, а при $\Delta<0$ — его сокращение.

Скорости изменения величин $Q_i = \frac{dQ_i}{dt}$ и $Q_j = \frac{dQ_j}{dt}$, а также зависимость этих скоростей от естественных и антропогенных факторов на основании работы [3] можно представить системой дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} Q_1 &= f_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_n; U_1, U_2, \dots, U_m); \\ \frac{d}{dt} Q_k &= f_k(Q_1, Q_2, \dots, Q_n; U_1, U_2, \dots, U_m); \\ \frac{d}{dt} Q_{k+1} &= f_{k+1}(Q_1, Q_2, \dots, Q_n; U_1, U_2, \dots, U_m); \\ \frac{d}{dt} Q_n &= f_n(Q_1, Q_2, \dots, Q_n; U_1, U_2, \dots, U_m). \end{aligned} \quad (3.55)$$

В системе (3.55) факторы антропогенного воздействия, влияющие на скорость изменения компонент вектора $\mathbf{Q} = \{Q_1, \dots, Q_k, Q_{k+1}, \dots, Q_n\}$, обозначены через $U_1, \dots, U_k, U_{k+1}, \dots, U_m$ и далее вектором $\mathbf{U}$.

Скорость изменения величины $\Delta = \sum_{i=1}^k Q_i - \sum_{i=k+1}^n Q_i$ — произ-

водная по времени — может быть выражена через правые части системы (3.55):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta = \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^k Q_i - \sum_{i=k+1}^n Q_i \right) &= \sum_{i=1}^k \frac{dQ_i}{dt} - \\ - \sum_{i=k+1}^n \frac{dQ_i}{dt} &= \sum_{i=1}^k f_i(\mathbf{Q}, \mathbf{U}) - \sum_{i=k+1}^n f_i(\mathbf{Q}, \mathbf{U}). \end{aligned}$$

Отсюда получается выражение для $\Delta(t)$

$$\Delta(t) = \Delta(0) + \int_0^t \left(\sum_{i=1}^k f_i(\mathbf{Q}, \mathbf{U}) - \sum_{i=k+1}^n f_i(\mathbf{Q}, \mathbf{U}) \right) dt. \quad (3.56)$$

Зная компоненты векторов $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{U}$ в любой момент времени t и вид функций $f_i(\mathbf{Q}, \mathbf{U})$, а также разность на начальный момент $\Delta(0)$, можно точно установить закон изменения величины $\Delta(t)$. В принципе система (3.55) позволяет получить

$$Q_i(t) = g(U_1, \dots, U_k, U_{k+1}, \dots, U_m, Q_1(0), \dots, Q_n(0))$$

как функцию от факторов антропогенного воздействия $\mathbf{U}$ и начального состояния $\mathbf{Q}(0)$. Подставляя эти решения в выражение (3.56), получаем

$$\begin{aligned} \Delta(t) = \Delta(0) + \int_0^t \left\{ \sum_{i=1}^k f_i[\bar{g}(\mathbf{U}, \mathbf{Q}(0)), \mathbf{U}] - \right. \\ \left. - \sum_{i=k+1}^n f_i[\bar{g}(\mathbf{U}, \mathbf{Q}(0)), \mathbf{U}] \right\} dt = \Delta(0) + \int_0^t G(\mathbf{U}, \mathbf{Q}(0)) dt. \end{aligned}$$

Анализ соотношения (3.56) позволяет следить за изменением величины $\Delta(t)$ по известным значениям факторов антропогенного воздействия $\mathbf{U}(t)$ и начального положения $\mathbf{Q}(t)$.

При наличии прогнозных значений $\mathbf{U}(t)$ уравнение (3.56) дает возможность для прогнозирования величины Δt и определения нежелательных последствий антропогенного влияния.

Каждую функцию $Q_i(t)$ можно представить графически и наблюдать за изменением во времени всего вектора $\mathbf{Q}$. При этом начальное состояние $\mathbf{Q}(0)$ и совокупность антропогенных воздействий $\mathbf{U}(t)$ определяют в фазовом пространстве некоторую траекторию вектора $\mathbf{Q}(t)$.

Для предотвращения нежелательного антропогенного влияния на компоненты вектора $\mathbf{Q}$ прогнозируемая величина разности $\Delta(t)$ не должна превосходить некоторого критического ее значения $\Delta_{кр}$, т. е. должно выполняться неравенство $\Delta(t) \geq \Delta_{кр}$.

В фазовом пространстве этому неравенству соответствует двусторонняя критическая область

$$\Omega = \left\{ Q; \left(\sum_{i=1}^k Q_i - \sum_{i=k+1}^n Q_i \right) \geq \Delta_{кр} \right\}, \quad (3.57)$$

определяющая предельную величину соотношения приходной и расходной частей баланса. Как положительные, так и отрицательные значения разности $\Delta(t)$ не должны превосходить ее допустимую критическую величину.

Метод водного баланса речного водосбора используется для определения неизвестных элементов по известным составляющим. Для замкнутого речного бассейна с естественным водным режимом общий вид уравнения водного баланса за многолетний период при достаточно надежных (точных) данных имеет вид

$$P - Q - E = 0, \quad (3.58)$$

где P — атмосферные осадки, выпавшие на водосбор за расчетный интервал времени; Q — речной сток в замыкающем створе; E — суммарное испарение с водосбора.

Располагая данными об осадках и испарении, уравнение (3.58) можно решить относительно естественного стока и по разности рассчитанной величины с фактической определить характер и степень изменения стока за период влияния хозяйственной деятельности.

Для коротких промежутков времени применительно к водосборам с антропогенным влиянием уравнение водного баланса значительно усложняется и приобретает следующий вид:

$$P - Q_{п} - Q_{гр} + Q_{з} - Q_{с} - E + \Delta M + \Delta U + \Delta S_{с} + \Delta S_{р} + \Delta S_{в} + \Delta S_{оз} + \Delta S_{б} + \Delta S_{л} = 0. \quad (3.59)$$

Здесь P и E имеют прежние значения; $Q_{п}$ — поверхностный речной сток; $Q_{гр}$ — подземный приток к реке; $Q_{з}$ — водозабор из реки или водоносного горизонта, гидравлически связанного с рекой; $Q_{с}$ — сбросы и переброска воды из соседних речных бассейнов; остальные элементы характеризуют изменения запасов влаги в верхнем метровом слое почвы ΔM , в водоносных горизонтах ΔU , в снеге и ледяной корке $\Delta S_{с}$, в русловой сети бассейна $\Delta S_{р}$, в водохранилищах $\Delta S_{в}$, озерах $\Delta S_{оз}$ и болотах $\Delta S_{б}$, а также в неучтенных составляющих баланса $\Delta S_{л}$. В величину $\Delta S_{л}$ включается и суммарная погрешность определения всех составляющих уравнения (3.59). Решая уравнение (3.59) относительно антропогенных элементов, можно с определенной достоверностью получить величину изменений речного стока в замыкающем створе.

Другим способом оценки степени антропогенного влияния является восстановление стока реки в замыкающем створе по

уравнению водного баланса, включающем в себя сведения о заборах и сбросах воды, изменении ее запасов в водохранилищах, разность между величинами аккумуляции Q_a , сработки $Q_{ср}$ и фильтрации вод через дно и берега водохранилищ в нижний бьеф $Q_{ф.н}$, а также о величине зарегулированного (бытового) стока $Q_{ф.}$.

Восстановление значений стока осуществляется по формуле

$$Q_{в.е} = Q_{ф.} + \sum (Q_з - Q_с + Q_a - Q_{ср} - Q_{ф.н}). \quad (3.60)$$

В подавляющем большинстве случаев расчеты восстановления значений стока по месячным и более продолжительным интервалам времени можно вести без учета времени добегающего по речной системе.

Все компоненты воднобалансовых уравнений могут быть измерены или определены расчетным путем. Способы их расчета изложены в Методических указаниях [137]. Следует указать, что очень часто погрешность определения составляющих и полнота их учета значительно снижают точность восстанавливаемых значений.

Методы водного баланса речного бассейна или его участка эффективно использованы в работах [5, 19, 28, 43, 94, 127, 146].

Метод руслового водного баланса. Русловые водные балансы (РВБ) являются составной частью водного баланса речного бассейна и выражают количественное соотношение притока и потерь поверхностных и подземных вод с учетом их использования в народном хозяйстве на участке реки, ограниченном входным (верхним) и замыкающим (нижним) створами.

РВБ обеспечивают количественную оценку неизученного (неизвестного) элемента, восстановление стока в замыкающем створе, а также его потерь или приращений на участке реки. В зависимости от характера решаемых задач, расчетного периода и участка реки используются различные уравнения РВБ. Например, для бесприточного участка и короткого интервала времени (сутки, декада), за который не происходит значительных изменений стокообразующих факторов, РВБ включает в себя ограниченное число составляющих и имеет вид

$$Q_{в.} - Q_{н.} - Q_з + Q_с \pm Q_0 = 0, \quad (3.61)$$

где $Q_{в.}$ и $Q_{н.}$ — расход воды соответственно в верхнем и нижнем створе; Q_0 — остаточный элемент уравнения, учитывающий неполноту и погрешности определения составляющих.

Для приточных участков и более продолжительных интервалов времени (месяц, квартал, сезон) используются детальные уравнения РВБ вида

$$Q_{в.} - Q_{н.} + Q_{б.п.} - Q_з + Q_с - Q_{н.т.} + Q_{ос.} \pm Q_{л.} + Q_{сн.} \pm Q_{р.р.} \pm Q_{б.р.} \pm Q_{ф.} \pm Q_0 = 0, \quad (3.62)$$

где $Q_{б.п}$ — боковой приток; $Q_{и.т}$ — испарение с водной поверхности и транспирация влаги растительностью в зоне затопления и подтопления; $Q_{ос}$ — поступление воды от осадков, неучтенное Q_v и $Q_{б.п}$; $Q_{л}$ — потери воды на льдообразование и поступление воды от таяния льда; $Q_{сн}$ — поступление воды от таяния снега, неучтенное Q_v и $Q_{б.п}$; $Q_{р.р}$ и $Q_{б.р}$ — расходы воды руслового и берегового регулирования; $Q_{ф}$ — фильтрационный отток русловых вод, в том числе в депрессионные воронки, или приток подземных вод в русло, включая возврат оросительных вод подземным путем.

По характеру информации, используемой при составлении РВБ, можно выделить гидрометрические (Q_v , $Q_{и.т}$, $Q_{б.п}$), гидрофизические ($Q_{и.т}$, $Q_{ос}$, $Q_{л}$, $Q_{сн}$), гидрогеологические ($Q_{р.р}$, $Q_{б.р}$, $Q_{ф}$) и водохозяйственные (Q_v , Q_c) компоненты. Для получения этих данных проводятся различные виды наблюдений, каждый компонент уравнения РВБ может быть измерен с определенной точностью.

Если известны изменения элементов РВБ под влиянием хозяйственной деятельности, то восстановление естественного стока в замыкающем участке реки створе может быть выполнено по формуле

$$Q_{в.е} = Q_{ф} + \sum_1^n \Delta Q_i, \quad (3.63)$$

где n — число преобразованных элементов; $\sum \Delta Q_i$ — результирующая величина изменения элементов РВБ.

При наличии надежных данных о хозяйственной деятельности в пределах участка реки восстановление естественных значений стока в замыкающем створе производится по формуле

$$Q_{в.е} = Q_{ф} - \left(\sum_1^n Q_c - \sum_1^m Q_z \right), \quad (3.64)$$

где Q_c и Q_z — соответственно суммарные расходы воды, отводимой в реку n сбросами и забираемой из реки m водозаборами. Величина Q_c в уравнении (3.64) характеризует увеличение водности реки в рассматриваемом створе; может состоять из расходов воды, переброшенной из соседних рек, возвращенной после использования собственных речных вод, сработанной и профильтровавшейся при регулировании водохранилищ, отведенной в реку после использования подземных вод дренируемых и недренируемых водоносных горизонтов. Величина Q_z в уравнении характеризует уменьшение водности реки в замыкающем створе; может состоять из расходов воды, переброшенной в систему других рек, забранной для технических и бытовых нужд внутри участка реки, ушедшей на наполнение водохранилищ с водосборной площади реки до плотины, уходящей подземным путем к водозаборным сооружениям, располо-

женным в соседних речных бассейнах, в зону развития депрессионных воронок, забираемой водозаборными сооружениями из дренируемых и недренируемых исследуемой рекой водоносных горизонтов.

Определение потерь и приращений стока на участке выполняется по уравнению РВБ путем вычисления Q_0 .

Уравнение РВБ, решенное относительно Q_0 , служит основой для прогнозирования в замыкающем створе. При этом имеется в виду, что расходы воды в верхнем створе и на боковых притоках сохранили естественный режим и прогнозируются на основе зависимости от формирующих их факторов, а в нижнем створе могут быть предвычислены по величине потерь и приращений стока на участке реки. Как указывалось выше, зависимость Q_0 от исходных аргументов может быть построена в результате накопления данных об элементах РВБ.

Метод руслового водного баланса нашел свое применение в исследованиях водного баланса р. Амударьи [72, 79, 161 и др.], водных ресурсов на территории Южного Казахстана [146], Курской магнитной аномалии [54, 180 и др.], Московского артезианского бассейна [184] и других районов нашей страны.

Методика составления и определения элементов РВБ с учетом их точности получила свое дальнейшее развитие в работах [80, 137, 171 и др.].

В соответствии с методикой оценки погрешностей определения элементов РВБ, разработанной Карасевым и Савельевой, для корректного решения воднобалансовых задач необходимо, чтобы элемент, определяемый как остаточный член РВБ, был достаточно значимым по сравнению с предельной ошибкой расчета. При современной точности наблюдений наиболее точные результаты расчета элементов РВБ получают лишь для многолетних периодов. Однако практика планирования и контроля использования водных ресурсов требует решения воднобалансовых задач для более коротких промежутков времени: декады, месяца, фазовооднородных периодов. Надежно, по мнению авторов [80, 171], оценивается лишь величина водозабора Q_x для условия бесприточного участка, удовлетворяющая с доверительной вероятностью $P = 95\%$ неравенству

$$|Q_x| \geq m_{95\%} \geq 2\sigma_0, \quad (3.65)$$

где $m_{95\%}$ — предельная ошибка вычисления остаточного члена; σ_0 — средняя квадратическая погрешность расчета РВБ.

Точность расчета РВБ на бесприточном участке (без учета фильтрационных составляющих) можно выразить формулой

$$\sigma_0 = [2\sigma_Q^2 + \sigma_{p.p.}^2 + \sigma_{и.т.}^2 + \sigma_{у.з.}^2]^{1/2}, \quad (3.66)$$

где σ_Q , $\sigma_{p.p.}$, $\sigma_{и.т.}$ и $\sigma_{у.з.}$ — погрешности определения стока, руслового регулирования, потерь воды на испарение и транспира-

цию, а также той части водозабора, которая была учтена гидрометрическими измерениями. Число погрешностей, входящих в уравнение (3.66), зависит от количества составляющих уравнения РВБ.

Если абсолютную погрешность данных от учтенной части водозабора представить через его относительную погрешность $\sigma_{0.з}$ и долю к неучтенной части водозабора, то получим

$$\sigma_{у.з} = (1 - K) \bar{Q}_з \sigma_{0.з}, \quad (3.67)$$

где $\bar{Q}_з$ — средний многолетний водозабор. При $K=1$, когда отсутствует гидрометрический учет водозаборов, величина

$$Q_x = K \bar{Q}_з \quad (3.68)$$

представляет собой суммарный забор воды на участке.

Тогда, подставляя найденные значения в выражение (3.66), получаем

$$K \bar{Q}_з \geq 2 [2\sigma_Q^2 + \sigma_{р.р}^2 + \sigma_{и.т}^2 + (1 - K)^2 \bar{Q}_з^2 \sigma_{0.з}^2]^{1/2}, \quad (3.69)$$

из которого можно установить точность учета стока в ограничивающих створах, необходимую для получения неучтенной части водозабора $K \bar{Q}_з$:

$$\sigma_Q \leq 0,35 [K^2 \bar{Q}_з^2 - 4(1 - K)^2 \bar{Q}_з^2 \sigma_{0.з}^2 - 4\sigma_{р.р}^2 - 4\sigma_{и.т}^2]^{1/2}. \quad (3.70)$$

В тех случаях, когда русловое регулирование и потери влаги на испарение и транспирацию на участке реки не имеют места, тогда

$$\sigma_Q \leq 0,35 [K^2 \bar{Q}_з^2 - 4(1 - K)^2 \bar{Q}_з^2 \sigma_{0.з}^2]^{1/2}. \quad (3.71)$$

Если учет водозабора ведется инструментально с точностью 3 %, то для $K > 0,2$ рекомендуется пренебречь вторым членом неравенства (3.71) и тогда оно примет вид

$$\sigma_Q \leq 0,35 K \bar{Q}_з. \quad (3.72)$$

В соответствии с неравенством (3.72), например при $K=0,5$, потребуется учитывать сток в гидростворах с точностью 3 %, в то время как стандартная точность не превышает 5—8 %.

Изложенную методику определения погрешности, связанную с оценкой суммарного водозабора, нельзя считать окончательной, поскольку учет водозаборов ведется многочисленными измерительными средствами, характеризующимися различной точностью, а подчас и без их применения. Поэтому более верным следует считать дифференцированное определение точности каждого водозабора, а также и сброса, обуславливающих в конечном итоге (помимо прочих) погрешность остаточного члена уравнения РВБ.

Метод учетного водного баланса. Для оперативного контроля за водными ресурсами и степенью их использования, а также для проверки надежности данных государственного учета вод по единой системе в работе [138] предложен метод учетного водного баланса (УВБ). УВБ могут быть составлены по участкам рек, контурам городов, водохранилищам и озерам. УВБ для участка реки представляет одну из форм руслового водного баланса и решается относительно безвозвратного водопотребления, т. е. разности между суммарным забором Q_z и суммарным сбросом Q_c воды.

Безвозвратное водопотребление $Q_{б.вн}$ может быть определено гидрологическим путем по разности стока в замыкающих створах с учетом естественного притока и потерь воды на участке и по данным государственного учета вод, получаемых от водоиспользователей, как разность заборов и сбросов воды на участке.

Сопоставление двух значений одного и того же элемента (безвозвратное водопотребление), полученных указанными способами, позволяет устанавливать степень соответствия гидрологических (балансовых) и отчетных данных об использовании воды. Таким образом, расчет УВБ сводится к определению невязки $Q_{нев}$ между значениями безвозвратного водопотребления, найденными по гидрологическим Q_r и учетным Q_y данным:

$$Q_{нев} = Q_r - Q_y. \quad (3.73)$$

Средняя квадратическая погрешность $Q_{нев}$ оценивается суммарной ошибкой определения учетных естественных элементов, водозаборов и сбросов, а также неполнотой их учета

$$Q_{нев} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_y^2}. \quad (3.74)$$

Ненадежными считаются данные, если $Q_{нев}$ выходит за границы доверительного интервала, т. е. при

$$|Q_{нев}| > 2\sigma_{нев}. \quad (3.75)$$

Для уверенного суждения о надежности расчета Q_r должно соблюдаться неравенство

$$\sigma_r \leq \sigma_d = 0,5Q_r, \quad (3.76)$$

где σ_r — предельная, а σ_d — средняя квадратическая погрешности определения Q_r .

Если величина Q_y мала по сравнению со значениями стока, то погрешностью σ_y можно пренебречь, а погрешности определения стока σ_Q на участке принять одинаковыми как в ограничивающих створах, так и на створах боковых притоков.

В этом случае величина безвозвратного водопотребления при $P=95\%$ устанавливается с достаточной надежностью при условии

$$Q_y \geq 2,82\sigma_Q. \quad (3.77)$$

Как видим, определять безвозвратное водопотребление по разности стока в ограничивающих створах можно лишь в тех случаях, когда погрешность учета стока в них примерно в 3 раза меньше самой величины $Q_{б. \text{вп.}}$.

Аналогично УВБ могут быть составлены для участка реки и учетные балансы химических веществ (УБХВ), позволяющие осуществлять контроль за использованием водных ресурсов и охраной их от загрязнения.

Метод водохозяйственного баланса используется для установления соотношения водных ресурсов и водопотребления в границах водохозяйственного района. Границы районов определяются при составлении генеральных схем комплексного использования водных ресурсов с учетом экономических и природных факторов.

Для различных интервалов времени водохозяйственный баланс (ВХБ) выражается в виде уравнения

$$Q_p = Q_z - Q_c + Q_{т(с)}, \quad (3.78)$$

где Q_p — расход воды, характеризующий общие водные ресурсы водохозяйственного района; $Q_{т(с)}$ — минимальный заданный транзитный или санитарный расход.

Нормирование транзитного стока при планировании должно гарантировать удовлетворение нужд водопользователей, расположенных на нижележащих участках рек, а нормирование санитарных расходов — необходимое качество воды.

ВХБ составляются для каждого водохозяйственного района периодически по этапам разработки и уточнения водных ресурсов и степени их использования. Особенно необходимы ВХБ за короткие промежутки времени для участков (районов) напряженного водного режима или лимитированного водопользования. К ним относятся участки рек от истока или от верхнего (входного) створа до нижнего по течению створа, на которых наблюдается дефицит водных ресурсов в продолжении всего года или в отдельные его периоды.

Метод гидрометрических съемок. В основу метода положен анализ уравнения баланса русловых вод, которое решается относительно величин притока или потерь стока на участке реки.

При отсутствии стационарных наблюдений за стоком реки, расположенной в районе хозяйственной деятельности, восстановление естественных значений стока может быть произведено по данным эпизодических измерений расходов воды во время специальных полевых гидрометрических работ (гидрометрических съемок). В этом случае могут быть оценены по-

тери речных вод на инфильтрацию и сокращения подземного питания рек в зоне развития депрессионных воронок при условии гидравлической связи эксплуатируемого водоносного горизонта с рекой; установлены величины безвозвратного водопотребления в районах промышленных городов и орошаемого земледелия, определены размеры увеличения стока за счет сброса недrenируемых подземных вод, сработки водохранилищ и перебросок стока из других речных бассейнов.

Гидрометрический метод широко использован для оценки подземного питания и потерь русловых вод на участках рек с интенсивной эксплуатацией подземных вод в районах разработки полезных ископаемых и промышленных городов на территории КМА, МАБ, Урала, Казахстана и в других местах страны [58, 59, 146, 150, 180, 182 и др.]. Основные положения по организации гидрометрических съемок при изучении подземного стока наиболее полно изложены в работах [55, 162, 165].

Для условий орошаемого земледелия Средней Азии гидрометрический метод нашел свое значительное развитие в работах [72, 80, 146, 171 и др.]. Особенно важно указать на разработку методов определения точности гидрометрических данных, предложенных И. Ф. Карасевым, наиболее полно удовлетворяющих современным требованиям по измерению и расчетам стока [81].

3.3.3. Методы натурного (физического) и математического моделирования

Применительно к оценке влияния хозяйственной деятельности на гидрологический режим рек методы натурного (физического) и математического моделирования позволяют разработать приемы управления процессами формирования и использования водных ресурсов.

Метод натурного (физического) моделирования процессов формирования стока (уменьшенная копия объекта) заключается в том, что на основании теоретических предпосылок по определенным правилам рассчитываются параметры исследуемого явления, которое затем воспроизводится на модели. Модель представляет собой схематизацию (копию) натурального конкретного объекта в уменьшенном масштабе, удобном для изучения искомых характеристик, на которые не накладывается влияние второстепенных процессов и явлений.

Теоретической основой моделирования служит теория подобия явлений и процессов, наблюдаемых в природе и на модели; подобными считаются такие процессы и явления, которые описываются тождественными уравнениями.

Методы натурного моделирования разнообразны и особенно широко применяются в исследованиях потерь воды из каналов

и русел рек, русловых процессов и многих других сложных природных явлений, подвергающихся изменению под влиянием хозяйственной деятельности.

Применительно к расчетам потерь воды в каналах и руслах рек эти методы использованы, в частности, С. Ф. Аверьяновым и А. Н. Костяковым [2, 95]. Полученные при их помощи зависимости вида

$$Q_{\phi} = 0,0116kAL \quad (3.79)$$

нашли применение для расчета расходов фильтрационных потерь на участках рек, расположенных в зонах развития депрессионных воронок уровня подземных вод и не изученных в гидрологическом отношении. В формуле (3.79) Q_{ϕ} — фильтрационный расход русловых вод, м³/с; k — коэффициент фильтрации подстилающих русло пород, м/сут; A — морфометрические характеристики русла на участке; L — длина реки на участке, км.

Методы натурального моделирования русловых процессов обстоятельно рассмотрены в монографии Н. С. Знаменской [71].

Метод активного эксперимента применяется для установления степени антропогенного влияния на отдельные элементы водного баланса водосбора и характеристики речного стока. Активный эксперимент возможен лишь на тех водосборах, где имеются достаточно надежные данные гидрометеорологических наблюдений, позволяющие уверенно характеризовать условия формирования стока и водный баланс речного водосбора.

Сущность метода заключается в следующем: на исследуемом водосборе искусственно резко изменяется подстилающая поверхность (например, производится вырубка или посадка леса, распашка целинных земель, агротехнические или мелиоративные мероприятия, строительство различных сооружений и населенных пунктов и др.). После этого в течение ряда лет ведутся наблюдения за элементами водного баланса, позволяющие по разности значений гидрологических характеристик за периоды до и после антропогенного преобразования ландшафта водосбора определять величину изменений элементов водного баланса, степень влияния хозяйственной деятельности на различные гидрологические характеристики и роль того или иного фактора естественных условий в процессе формирования речного стока.

Чаще всего метод активного эксперимента применим лишь для малых водосборов, поэтому получаемые при его помощи выводы не всегда можно распространять на большие и средние реки. Вместе с тем имеется немало примеров, когда направленное вмешательство человека в естественные условия может рассматриваться как широкий активный эксперимент, представляющий возможность оценивать влияние того или иного вида хозяйственной деятельности на водный режим и ба-

ланс больших территорий. В принципе, с гидрологической точки зрения, освоение целинных и залежных земель в Казахстане, разработка месторождений полезных ископаемых на КМА, Урале и в других районах страны, вырубка лесов на больших площадях являются активным экспериментом, направленно изменяющим условия формирования стока рек.

Метод моделирования стокообразующих факторов на электроинтеграторах является более трудоемким, чем аналитические методы. Его целесообразно применять для решения сложных задач, к числу которых может быть отнесено изучение стокообразующих факторов, а также условий взаимодействия поверхностных и подземных вод в районах нарушений речного стока под влиянием хозяйственной деятельности.

В настоящее время, особенно в гидрогеологии, широко и эффективно используются сеточные электроинтеграторы из сопротивлений и емкостей типа RR и RC , модели из электропроводных жидких материалов (электролитическая ванна) и сплошные модели ЭГДА из электропроводных твердых материалов (электропроводная бумага, металлическая проволока, проводящая резина и т. п.).

Сеточные интеграторы более стабильны в решении, позволяют быстро изменять параметры модели, состоящей из сетки электрических сопротивлений, пропорционально моделирующих соответствующие участки (блоки) водосборной площади.

Электрические модели представляют собой неглубокий резервуар из непроводящего материала, заполненный электролитом слоем в несколько сантиметров.

Для практического применения, особенно с целью моделирования инфильтрационных процессов на значительных площадях в условиях установившегося режима фильтрации, весьма пригодными являются сплошные модели ЭГДА. При сплошном моделировании по картам обычно из электропроводной бумаги монтируется подобная изучаемой территории электрическая модель. Участки водосбора с различными условиями моделируются кусками бумаги различной электрической проводимости, которые склеивают между собой по контурам электропроводным клеем или соединяют на специальном вакуумном столе.

Решение различных конкретных задач методом электромоделирования имеет свои особенности. Подробно этот метод рассматривается в ряде советских и зарубежных работ [6, 30, 82, 136, 193].

Метод математического моделирования на аналоговых и электронных цифровых вычислительных машинах приобретает все большее значение для решения самых разнообразных и особо сложных задач, связанных с прогнозом изменений природных ресурсов.

В практических ситуациях именно задачи исследований определяют выбор математической модели объекта, адекватно отражающей не какую-то систему, а проблему, возникшую и изучаемую в этой системе [52, 158].

На современных аналоговых и электронных цифровых машинах может быть учтено и оценено взаимодействие множества компонент, характеризующих состояние системы. Например, при разработке комплексной экономико-математической модели для планирования развития водного хозяйства в бассейнах рек [33] учитываются мелиорация земель, водоснабжение, рыбное хозяйство, водный транспорт, гидрологические особенности на различных уровнях развития и информация о строении бассейна и размещении водопотребителей и водопользователей. Модель состоит из нескольких блоков, каждый из которых включает в себя отдельные группы переменных и уравнений. В частности, эти блоки могут содержать гидрологическую модель, модель прогноза водопотребления и водотока, модель водохозяйственного баланса и расчета полезных объемов водохранилищ, модель водохранилища, модель русловых систем, модель трансформации и определения режимов стока в русловой сети, модель систем подачи воды водопотребителям, программы определения затрат и оценки состава и параметров водохозяйственной системы. Блоки водопотребления и водных ресурсов могут состоять также из других динамических моделей.

Математические модели для оптимизации водного хозяйства отдельных территорий [131] представляются в настоящее время как значительный и сложный цикл исследований, требующих подготовки исходных данных и надежно действующих частных моделей и направленных на отражение конкретных условий использования водных ресурсов на любой уровень экономического развития.

Создание общей универсальной камерной модели Азовского бассейна, состоящей из целого ряда динамических моделей, позволяет проследить эволюцию всей экономико-биологической системы и оценить экономический эффект от водохозяйственного комплекса в зависимости от принятой схемы водопользования и водопотребления [52]. Предложены решения задач процессов очистки сточных вод с использованием методов математического моделирования [132].

4. ИЗМЕНЕНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЕТС ПОД ВЛИЯНИЕМ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

4.1. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ АНТРОПОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ НА РЕЧНОЙ СТОК

Оценка характера и величины изменений речного стока под влиянием хозяйственной деятельности выполнена по отдельным речным водосборам, расположенным на территории Московского артезианского бассейна и Курской магнитной аномалии в пределах северной части Днепровско-Донецкой впадины. Исследованиями охвачены районы интенсивного развития промышленности и сельского хозяйства, крупных разработок месторождений различных полезных ископаемых и изъятий подземных вод в центральной части Европейской территории СССР.

В расчетах использованы данные гидрометеорологических наблюдений на стационарной сети Госкомгидромета, эпизодической сети ГГИ, материалы о режиме подземных вод ГУЦР Министерства геологии РСФСР и литературные источники.

Анализ этой значительной по объему информации, выполненный за весь период нарушений водного режима отдельных речных бассейнов и за каждый год, позволил определить характер и размеры изменений речного стока в современных условиях антропогенного воздействия и в перспективе.

В границах МАБ и КМА влияние хозяйственной деятельности на речной сток оценивалось по данным гидрологических створов, расположенных в верхних частях бассейнов рек Волги, Западной Двины, Днепра, Десны и их притоков, а также на реках Сейме, Воронеже, Осколе, Северском Донце и их притоках. С целью освещения современных условий формирования речного стока ниже приводятся краткие сведения о природных особенностях территории.

Исследуемая территория представляет собой густонаселенный и исключительно развитый в экономическом отношении район. Здесь сосредоточено более 200 крупных промышленных городов и поселков, которые непрерывно и интенсивно растут, разрабатываются месторождения различных полезных ископаемых, значительно развито сельское хозяйство.

Для водоснабжения многоотраслевого народного хозяйства создана большая сеть крупных водозаборов поверхностных и подземных вод, системы водохранилищ, водоподъемных плотин

и осуществляется ряд других водохозяйственных мероприятий как в руслах, так и на речных водосборах. С целью улучшения водного режима некоторых рек в меженный период производится переброска части речных вод из одних речных бассейнов в другие.

Под влиянием некоторых мероприятий или их комплекса, проводимых на отдельных участках рек или в пределах речных бассейнов, преобразуется режим стока речных и подземных вод многих рек. Иногда нарушения стока в одном месте (например, в верховьях) приводят к его изменению по всей длине реки.

Современное состояние водных ресурсов в бассейнах с нарушенным режимом поверхностных и подземных вод на территории исследований в первую очередь определяется:

- 1) отбором подземных вод и последующего отведения их после использования в реки;
- 2) переброской волжской воды по каналу им. Москвы в систему рек Москвы и Клязьмы;
- 3) режимом наполнения и сработки (опорожнения) водохранилищ, а также режимом фильтрации воды из них;
- 4) отбором и отведением речных вод.

Современный отбор подземных вод на территории МАБ осуществляется сотнями крупных групповых и тысячами одиночных водозаборов, суммарный дебит которых достигает по ориентировочным данным 80—90 м³/с. Только в Московской области действует более 6 тыс. водозаборных скважин общей производительностью более 27 м³/с. При этом из клязьминского водоносного горизонта отбирается 3,9 м³/с, из касимовского — 6,2 м³/с, из мячковско-подольского — 11,2 м³/с, из каширского — 1,1 м³/с и из протвинско-серпуховско-окского — 4,7 м³/с подземных вод.

В результате многолетней эксплуатации подземных вод в основном каменноугольных водоносных горизонтов в центральной части МАБ наблюдается развитие региональных депрессионных воронок с максимальным понижением уровня подземных вод в районе г. Москвы до 70—100 м. Снижение уровня подземных вод в других городах менее значительно и колеблется от 10 до 50 м.

Современный отбор подземных вод на территории КМА происходит при разработке месторождений железных руд в районах Михайловского, Лебединского, Южно-Лебединского и Стойленского карьеров, при водоснабжении крупных промышленных городов: Курска, Воронежа, Белгорода, Железнодорожского, Губкина, Старого Оскола и др. Только в районе Лебединской группы месторождений и г. Губкина отбирается около 4,5 м³/с подземных вод. В результате многолетней эксплуатации подземных вод на территории КМА в различных водоносных горизонтах сформировались депрессионные воронки, о ха-

рактуре и размерах которых можно судить по данным табл. 2.6. В области развития региональных депрессионных воронок снижение уровня подземных вод в надюрском комплексе водоносных горизонтов составило 8—20 м, в среднедевонском 40—50 м, в архей-проторозойском от 70—75 м (Михайловский карьер) до 95—100 м (Лебединская группа карьеров). Опытное водопонижение, проведенное в с. Яковлево (Белгородская область) в 1956—1961 гг., при снижении уровня подземных вод до 300 м привело к образованию депрессионных воронок в отдельных водоносных горизонтах карбона площадью более 2 тыс. км² [150—153].

В условиях гидравлической связи подземных и речных вод, характерной для территории МАБ и КМА, площадь депрессионных воронок в речных бассейнах изменяется от 500—3000 км² (близкие к поверхности водоносные горизонты) до 20 000—25 000 км² (более глубокие водоносные горизонты). В зонах развития депрессионных воронок повсеместно сокращается подземное питание рек и потери русловых вод на фильтрацию в эксплуатируемые водоносные горизонты. Одновременно с этими процессами в руслах отдельных рек отмечается увеличение стока, обусловленное сбросами использованных подземных вод.

Значительным является влияние регулирования водохранилищ и перебросок воды из соседних речных бассейнов, что видно из данных табл. 2.11. Кроме указанных в таблице стокорегулирующих водохранилищ на р. Москве, например, действует целый каскад гидроузлов: у с. Петрово-Дальнее, Рублевский, Карамышевский и Перервенский. Действуют аналогичные гидроузлы и на других реках. Как отмечает В. Г. Андреев [5], плотины указанных гидроузлов не оказывают заметного регулирующего влияния на сток р. Москвы ввиду незначительного колебания уровней в межень при подпоре и могут не учитываться при расчете естественных значений стока. На наш взгляд, этот вывод недостаточно обоснован по той причине, что во всех случаях в результате фильтрации воды из водохранилищ происходит подъем уровней грунтовых вод и увеличение подземного притока в реки на участках ниже плотин.

Забор воды на технические и бытовые нужды городов непосредственно из рек преобразует сток многих рек территории, что также следует из табл. 2.4. Особенно значителен забор воды из Волги, Москвы, Сейма, Воронежа, Оки, Пахры, Клязьмы и многих других средних и малых водотоков. Например, забор воды из р. Москвы у д. Рублево составляет более половины всего среднего многолетнего стока реки, или более 10 м³/с. На нужды тепловых электростанций отбирается от 0,7 до 1,5 м³/с речных вод. Забор воды из рек на технические нужды обычно составляет от 2 до 15 % нормы стока.

Воды, изъятые из подземных источников, питающих реки, или из рек и водохранилищ, после использования возвращаются в реки недалеко от мест их изъятия. Исключение составляют воды, переброшенные из соседних речных бассейнов, в частности волжская вода. Суммарный объем воды, поступившей обратно в реку после использования, как правило, меньше суммарного объема воды, изъятый из водного источника. Безвозвратное водопотребление или безвозвратные для участка реки (части бассейна) потери речных и подземных вод после их использования составляют обычно 6—30 % суммарного водозабора. Только за счет безвозвратных потерь воды сток рек (особенно малых) может существенно уменьшиться.

Определенное преобразование стока, особенно в меженный период, происходит под влиянием прудов, которые имеются повсеместно. Созданы они для различных целей и нередко перехватывают весь сток ручьев и малых рек.

Таким образом, количественная оценка степени преобразования стока рек центральной части ЕТС требует учета многочисленных естественных и искусственных факторов его формирования.

4.2. ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ РЕЧНОГО СТОКА

Для определения степени изменения стока рек выявлены все основные водохозяйственные мероприятия, оказывающие влияние на сток, усовершенствованы методы определения нарушений стока в результате антропогенного воздействия, произведена количественная оценка этих нарушений применительно к годовым значениям общего речного и подземного стока, а также за период весеннего половодья.

Оценка нарушения стока выполнена по 180 гидрологическим створам стационарной сети Госкомгидромета и 90 гидрологическим створам временной сети экспедиций ГГИ. При этом для пунктов стационарной сети в зависимости от наличия и надежности исходных данных оценка нарушений речного стока в результате хозяйственной деятельности выполнена путем использования порядковых критериев и формул (3.1) — (3.49). Расчет нарушений речного стока для пунктов эпизодической сети произведен по формулам (3.60) — (3.64). Кроме того для оценки влияния интенсивного отбора подземных вод на речной сток использованы данные специальных гидрометрических съемок, выполненных ГГИ в районах крупных водопонижений в период 1963—1974 гг.

4.2.1. Результаты оценки нарушений общего речного стока

Неоднородность гидрологических рядов общего речного стока за периоды естественного и нарушенного режима рек качественно устанавливалась при помощи порядковых критериев

Вилькоксона и Ван дер Вардена (формулы (3.2)—(3.8)) и построения графических связей последовательно суммированных значений стока исследуемой реки и рек-аналогов (формула (3.1)).

Результаты этой оценки (табл. 4.1) почти во всех случаях подтверждают отсутствие или наличие отклонений годовых значений речного стока от их естественных значений. Последние устанавливались по графическим связям между последовательно суммированными значениями стока исследуемой реки

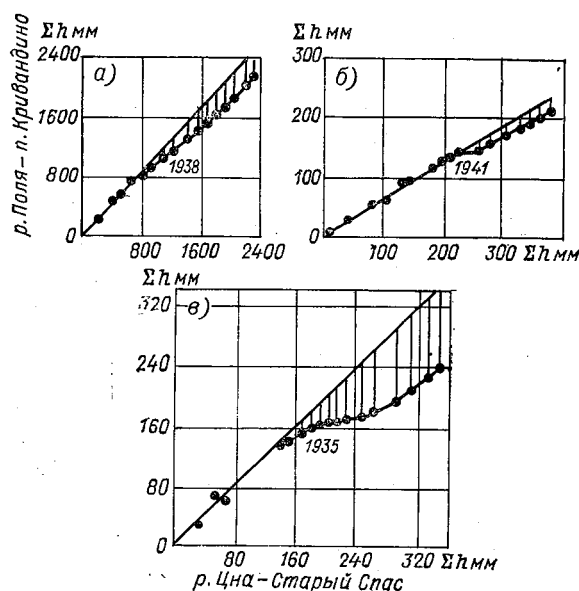


Рис. 24. Связь последовательно суммированных значений стока р. Поли — пос. Кривандино и реки-аналога (р. Цна).

а — годовой сток; б — сток весеннего половодья; в — подземный сток в летнюю межень.

и рек-аналогов. В качестве примера такие связи представлены на рис. 21 и 24.

Как видно из таблицы, неоднородность выборок стока, формирующегося в естественных условиях и при антропогенном влиянии, как по критерию Вилькоксона, так и по критерию Ван дер Вардена является значимой.

Степень неоднородности стоковых рядов за исследуемые периоды (см. табл. 4.1) характеризуется величиной β , которая находится по табл. 3.1 и легко вычисляется по формуле (3.7). Принимается, что степень неоднородности ряда будет тем больше, чем больше значение β . Обычно неоднородной

Т а б л и ц а

Оценка однородности рядов общего годового и подземного

Река — пункт	Характеристика стока	Год нарушения стока	Период наблюдений, использованный в расчетах
Влияние эксплуатации			
Протва — пгт Спас-Загорье	Годовой	1948	1938—40, 1942—69
	Зимний	1948	1938—69
	Летний	1948	1937—69
Руза — г. Покров	Годовой	1948	1930—35, 1949—66
	Зимний	1948	1930—36, 1949—66
	Летний	1948	1930—36, 1948—66
Руза — г. Руза	Годовой	1948	1925—40, 1943—52
	Зимний	1948	1925—53
	Летний	1948	1925—52
Озерна — д. Карповка	Годовой	1948	1930—63
	Зимний	1948	1930—64
	Летний	1948	1930—64
Пахра — д. Макарово	Годовой	1948	1926—65
	Зимний	1948	1927—65
	Летний	1948	1927—65
Поля — пос. Кривандино	Годовой	1937	1933—48
	Зимний	1937	1929—48
	Летний	1935	1929—48
Влияние комплекса			
Ока — г. Орел	Годовой	1948	1928—29, 1931—32, 1934—40, 1942—63
Ока — г. Белёв	Годовой	1948	1925—30, 1934—40, 1944—67
	Зимний	1948	1936—40, 1942—66
	Летний	1948	1936—42, 1944—67
Ока — г. Калуга	Годовой	1948	1922—67
	Зимний	1948	1922—69
	Летний	1948	1922—69
Ока — г. Кашира	Годовой	1948	1922—69
	Зимний	1948	1922—69
	Летний	1948	1922—69
Москва — д. Макарово	Годовой	1960	1929—40, 1943—59, 1961—65
	Зимний	1960	1929—65
	Летний	1960	1929—65

4.1

(зимнего и летнего) стока рек МАБ и КМА

Число лет наблюдений		Граница критической области				t_p	Степень неоднородности рядов стока по критерию Вильяксона β %
естественный режим	нарушенный режим	по Вилькоксоу		по Ван дер Вардену			
		$U_{95\%}$	U	$X_{95\%}$	X		

подземных вод

9	22	67—131	53	5,03	—6,02	1,98	96
13	19	72—174	58	—	—	2,51	98
11	22	70—172	57	—	—	2,48	98
5	19	20—75	47	—	—	0,04	3
7	18	31—94	47	—	—	0,97	68
7	19	32—100	52	—	—	0,84	63
21	5	22—83	52	—	—	0,03	2
23	6	33—102	33	—	—	1,94	95
23	5	25—91	35	—	—	1,35	84
18	16	104—184	119	5,24	—2,15	0,86	64
17	18	94—212	125	5,33	—2,60	0,96	67
17	18	94—212	125	5,33	—2,60	0,96	67
22	18	126—270	262	5,72	—5,26	1,56	91
23	20	150—310	142	5,97	—6,80	2,17	97
23	20	150—310	144	5,97	—6,87	2,12	96
4	12	8—40	40	3,61	—4,65	2,00	95
—	—	—	—	—	—	—	—
7	13	10—26	0	—	—	3,60	100

водохозяйственных мероприятий

18	18	100—224	146	5,42	—1,38	0,51	39
17	20	105—235	138	5,48	2,83	0,97	68
11	19	59—149	70	—	—	1,49	90
11	20	63—157	36	—	—	3,04	99
26	20	171—348	267	6,19	0,67	0,16	14
26	22	191—381	119	6,34	—11,5	3,40	100
26	22	191—381	136	6,34	—9,5	3,04	100
26	22	191—381	221	6,34	—4,47	1,29	80
26	22	191—381	188	6,34	—6,39	1,93	95
26	22	191—381	80	6,34	—13,69	4,11	100
29	5	32—113	108	—	—	1,75	93
34	6	50—154	76	—	—	1,74	93
34	6	50—154	76	—	—	1,74	93

Река — пункт	Характери- стика стока	Год наруше- ний стока	Период наблюдений, исполь- зованный в расчетах
Москва — г. Звенигород	Годовой Зимний Летний	1960 1960 1960	1924—40, 1942—70 1924—69 1924—69
Истра — с. Павловская Слобода	Годовой Зимний Летний	1935 1935 1935	1925—62 1925—69 1925—69
Истра — с. Павловская Слобода	Годовой Зимний Летний	1935 1935 1935	1925—34, 1935—44 1925—34 1925—34
Истра — с. Павловская Слобода	Годовой Зимний Летний	1935 1935 1935	1925—34, 1945—54 1925—34 1925—34
Истра — с. Павловская Слобода	Годовой Зимний Летний	1935 1935 1935	1925—34, 1955—64 1925—34 1925—34
Клязьма — г. Павловский Посад	Годовой Зимний Летний	1937 1937 1937	1922—68 1922—69 1922—69
Клязьма — г. Павловский Посад	Годовой Зимний Летний	1937 1937 1937	— 1922—51 1923—51
Клязьма — г. Павловский Посад	Годовой Зимний Летний	1937 1937 1937	— 1922—36, 1952—69 1922—36
Клязьма — г. Владимир	Годовой Зимний Летний	1937 1937 1937	1919—68 1918—69 1918—69
Сосна — г. Елец	Годовой Зимний Летний	1948 1948 1948	1928—35, 1938—40, 1943—63 — —
Воронеж — г. Воронеж	Годовой Зимний Летний	1948 1948 1948	1931—40, 1944—68 1931—41, 1943—68 1932—41, 1944—68
Тускарь — г. Курск	Годовой Зимний Летний	1948 1948 1948	1925—1964 1925—39, 1942—66 1925—40, 1942—66
Осколец — г. Старый Оскол	Годовой Зимний Летний	1958 1958 1958	1933—39, 1952—66 1952—57, 1958—66 1952—57, 1958—66

66
58
66
52
14

Число лет наблюдений		Граница критической области				t_p	Степень неоднородности рядов стока по критерию Вилькоксона $P\%$
естественный режим	нарушенный режим	по Вилькоксоу		по Ван дер Вардену			
		$U_{95\%}$	U	$X_{95\%}$	X		
35	11	116—268	238	—	—	1,16	75
36	10	106—254	62	—	—	3,14	100
36	10	106—254	56	—	—	3,30	100
10	28	81—199	189	3,55	—4,08	1,62	92
10	35	105—245	59	6,10	—7,44	3,58	100
10	35	105—245	85	6,10	—6,73	2,88	99
10	10	25—75	40	—	—	0,76	61
10	10	25—75	30	3,86	—2,87	1,52	90
10	10	25—75	42	3,86	—1,28	0,61	46
10	10	25—75	46	—	—	0,30	23
10	10	25—75	29	3,86	—2,91	1,59	91
10	10	25—75	32	3,86	—2,85	1,36	84
10	10	25—75	76	—	—	1,97	95
10	10	25—75	0	3,86	—7,18	3,79	100
10	10	25—75	5	3,86	—6,57	3,40	100
15	32	163—346	248	6,25	—1,36	0,18	15
15	33	159—336	403	—	—	3,44	100
15	33	159—336	347	6,34	—7,22	2,20	96
—	—	—	—	—	—	—	—
15	15	65—160	140	4,88	—3,15	1,14	74
15	15	65—160	218	4,88	—2,28	0,81	62
—	—	—	—	—	—	—	—
15	18	81—189	263	5,13	—11,7	4,64	100
15	18	81—189	218	5,13	—7,8	3,00	100
18	32	191—385	279	—	—	0,18	15
19	33	211—417	252	—	—	1,18	75
15	16	71—163	147	4,97	3,43	1,06	69
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
14	21	89—205	149	5,28	0,58	0,07	6
14	21	88—206	92	5,28	5,26	1,85	94
16	21	103—233	128	5,45	3,96	1,33	79
23	17	124—266	211	5,72	1,11	0,16	14
20	19	120—260	151	5,62	—2,83	1,09	72
19	22	134—284	117	5,81	7,52	2,40	98
13	9	29—87	36	4,01	—3,54	1,50	90
6	9	10—44	8	3,19	—3,74	2,24	97
6	9	10—44	3	3,19	—4,54	2,72	99

по сравнению с исходным естественным рядом считалась выборка при $\beta=70\%$ и больше.

Для оценки влияния на результаты расчета сравниваемых выборок разной продолжительности выполнена также проверка их однородности для различных вариантов расчленения исходного ряда (см. табл. 4.1, гидростворы Ока—Калуга, Истра—Павловская Слобода, Клязьма—Павловский Посад).

Продолжительность сравниваемых за исследуемый период выборок принималась для каждого отдельного пункта в пределах 10—20 лет.

Указанная проверка показала, что резкая неоднородность рядов общего речного и подземного стока по сравнению с исходным рядом отмечается спустя несколько лет после начала действия антропогенного фактора и, как правило, особенно значительна для последующего десятилетия. Учитывая, что неоднородность стока рек исследуемой территории за естественный период и период нарушений водного режима могла быть вызвана неоднородностью в распределении атмосферных осадков, с помощью порядковых критериев была исследована также однородность выборок атмосферных осадков. Пример результата такого анализа представлен в табл. 4.2 для четырех метеостанций, расположенных в различных частях МАБ. Из таблицы видно, что осадки теплого и холодного времени года за периоды естественного и нарушенного водного режима рек однородны. Однородны они и по территории исследования. Некоторое исключение составляют данные по г. Коврову за холодный сезон года, что, по-видимому, связано с погрешностями в измерениях твердых осадков. Приведенные результаты анализа неоднородности отдельных выборок речного стока пока-

Таблица 4.2

Оценка однородности атмосферных осадков за периоды естественного и нарушенного режима рек территории МАБ

Метеостанция	Период наблюдений	Число лет наблюдений		По Вилькоксоу			
		естественный режим	нарушенный режим	теплый период (IV—X)		холодный период (XI—III)	
				$U_{95\%}$	U	$U_{95\%}$	U
г. Суздаль	1926—1928						
	1930—1964	21	17	111—245	161	111—245	129
г. Ковров	1928—1966	20	21	136—284	252	136—284	88
г. Можайск	1929—1966	19	21	127—271	205	127—271	137
г. Юрьев-Польский	1929—1968	19	21	127—271	205	127—271	171

зывают, что она обусловлена эксплуатацией подземных вод в речном бассейне или другими хозяйственными мероприятиями при одинаковом распределении осадков.

Количественная оценка неоднородности рядов общего речного стока, включающая восстановление естественных его значений и расчет степени нарушений, выполнялась в зависимости от исходных данных различными способами. Например, методом парной и множественной линейной корреляции определена неоднородность рядов стока рек в районах развития отдельных региональных депрессий уровня подземных вод на территории МАБ и КМА, методом баланса русловых вод — в бассейнах рек Москвы, Клязьмы, Истры, Оскола, Оскольца, Тускари, Северского Донца и их притоков, по формулам (3.43) — (3.45) — для всей исследуемой территории.

Рассматривая вопрос о нарушении речного стока, следует отметить, что еще в 1957 г. А. А. Лучшева [126] при анализе данных о годовом стоке рек Мещерской низменности обратила внимание на более низкую водность рек Поля, Ушма, Понарь, Бужа и Пра, чем рек соседних территорий. Уменьшение годового стока этих рек на 30—45 мм/год ($1,0\text{—}1,5\text{ л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$) она связывала с более высокой испаряющей способностью водосборов, имеющих высокую заболоченность и озерность.

Не отрицая в принципе возможность уменьшения стока рек за счет более значительного испарения влаги с сильно заболоченных и озерных бассейнов, необходимо указать, что такое уменьшение стока для рек Мещерской низменности прослеживается нечетко и не может быть выражено количественно (табл. 4.3). Особенно показательны в этом отношении данные о стоке рек в период устойчивой зимней межени, когда влияние заболоченности и озерности водосборов на сток (в условиях отсутствия испарения влаги с водной поверхности) почти полностью исключено.

Аналогичный вывод следует из данных работы В. И. Бабкина [7]. Оценив методом множественной линейной корреляции влияние различных физико-географических факторов на внутригодовую зарегулированность стока (коэффициент φ) рек Европейской территории СССР, Бабкин находит, что для исследуемой нами территории влияние заболоченности (при $f_{\text{бол}} = 0\div 24\%$) и озерности (при $f_{\text{оз}} = 0\div 2\%$) крайне незначительно (частный коэффициент корреляции между φ и $f_{\text{бол}}$ равен $0,21\pm 0,16$) и может не учитываться в расчетных формулах.

Этот вывод подтверждается также исследованиями К. А. Ключевой [86], выполненными на основании анализа многолетних материалов наблюдений за стоком и испарением в 40 бассейнах рек Белорусской ССР с различной степенью заболоченности.

Таким образом, уменьшение стока рек в пределах Мещерской низменности обусловлено преимущественно влиянием

Таблица 43

Средний многолетний сток (л/(с·км²)) рек Мещерской низменности, водосборы которых характеризуются различной заболоченностью $f_{\text{бол}}$ и озерностью $f_{\text{оз}}$

Река — пункт	Площадь водосбора		Период наблюдений	Средний за период наблюдений		Приведенный к много- летнему периоду	
	общая, км ²	занятая		головой	подземный		
		болотами, %			озерами, %		зима
						подземный зима + лето 2	

1. Реки с естественным режимом подземных вод

Солотча — д. Ванда	172	30	1	1935—1960	8,78	0,94	1,24	1,75
Пра — г. Спасс-Клепки	3400	10	3	1935—1954	3,94	0,60	1,01	1,02
Пра — д. Борисово	3590	10	3	1955—1969	4,57	0,66	1,20	1,00
Пра — д. Деулино	4170	10	2	1955—1969	5,14	0,87	1,39	1,10
Нарма — с. Шеенка	795	1	1	1955—1969	5,00	1,32	0,95	1,12
Мурмага — с. Богородское	72	0	0	1948—1952	5,28	1,24	1,39	1,25

2. Реки с нарушенным режимом подземных вод

Нерская — г. Куровское	612	12	1	1959—1970	4,82	0,95	0,98	0,85
Цна — д. Старый Спас	767	7	1	1929—1946	4,83	0,56	0,65	0,60
Гусь — д. Милошево	1560	0	1	1955—1969	4,30	1,11	0,74	0,80
Бужа — д. Мочаловка	275	16	1	1937—1954	(5,20)	0,21	0,38	0,43
Бужа — д. Избище	1100	20	1	1950—1969	4,82	0,68	0,56	0,67
Поль — с. Савинское	395	9	1	1940—1946	(4,96)	0,33	0,43	0,46
Поль — д. Ерликс	560	24	1	1937—1951	3,46	0,37	0,33	0,39
Понарь — д. Аксеново	77	0	0	1936—1947	4,42	0,50	0,42	0,41
Поля — пос. Кривандино	500	16	1	1929—1948	4,24	0,49	0,35	0,40

Примечание. Значения годового и подземного стока рек с нарушенным режимом подземных вод приведены к многолетнему периоду без учета нарушений стока.

эксплуатации подземных вод водозаборами, расположенными в бассейне р. Поли.

С развитием депрессионных воронок в бассейне р. Поли и на водосборных площадях смежных с нею рек изменились соотношения гидростатических напоров подземных вод, в результате чего появились благоприятные условия для инфильтрации поверхностных и подземных вод в нижележащие водоносные горизонты. На тех участках депрессионных воронок, где четвертичные отложения лежат непосредственно на породах карбона («гидрогеологические окна»), интенсивность инфильтрации оказалась наибольшей. Поскольку р. Поля и соседние с нею реки в межень питаются за счет подземных вод четвертичных и меловых отложений, то очевидно, что сокращение ресурсов последних должно приводить к уменьшению стока этих рек. Действительно, анализируя данные табл. 4.3, все реки Мещерской низменности можно уверенно разделить на две группы:

- 1) реки с естественным режимом подземных вод;
- 2) реки, водный режим которых нарушен эксплуатацией подземных вод водозаборами крупных промышленных городов.

Первая группа рек (Солотча, Мурмага, Нарма и др.), текущих за границами влияния депрессионных воронок, характеризуется высокими значениями модулей стока. Например, средний многолетний модуль подземного стока в эти реки равен $0,8—1,2 \text{ л/(с} \cdot \text{км}^2)$.

Вторая группа рек (Ушма, Понарь, Поля, Бужа и др.), бассейны которых расположены в пределах влияния депрессионных воронок, имеют пониженный сток. Модуль подземного притока этих рек равен $0,4—0,6 \text{ л/(с} \cdot \text{км}^2)$.

То же отмечается в отношении значений годового общего стока, хотя выражено это менее четко. Так, например, реки первой группы характеризуются модулем от 4,8 до $5,2 \text{ л/(с} \cdot \text{Х км}^2)$, тогда как в пределах влияния депрессионных воронок годовой сток, как правило, значительно ниже и колеблется от 3,8 до $4,9 \text{ л/(с} \cdot \text{км}^2)$.

Таким образом, под влиянием изъятий подземных вод, осуществляемых в бассейне р. Поли, подземный сток всех рек, оказавшихся в пределах депрессионной воронки, сократился примерно на 50 %, а годовой сток — на 15—20 %.

Важно отметить, что по данным гидрометрических измерений, выполненных летом 1969 г. на реках Мещерской низменности, сток р. Поли в устье оказался значительно выше стока рек, расположенных за пределами влияния депрессионных воронок (табл. 4.4). Это обусловлено сбросом использованных подземных вод в р. Воймегу (правый приток р. Поли), которые отнимаются водозаборами из подземного питания соседних рек. Если из величины сбросов исключить величину привлекаемого водозаборами подземного питания, тогда сразу же

расход воды р. Поли в устье становится близким к естественным значениям и сравнимым со значениями стока рек, приведенными в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Характеристика стока некоторых рек Мещерской низменности в летнюю межень 1969 г. (по данным измерений ГГИ и УГКС)

Река — пункт	Площадь водосбора, км ²	Расход воды, м ³ /с	Модуль стока, л/(с·км ²)	Примечание
Поля — пос. Кри- вандино	500	0,42	0,84	Влияние депрессионных воронок
Поля — устье	1560	3,13	2,02	Сброс подземных вод
Воймега — лес- промхоз	240	0,21	0,88	Влияние депрессионных воронок
Бужа — д. Из- бище	1100	1,10	1,00	Влияние депрессионных воронок
Пра — д. Калдево	3146	3,06	0,97	Возможно влияние депрессионной воронки
Пра — д. Бори- сово	3590	4,89	1,36	Условно естественный режим
Пра — д. Деулино	4170	5,90	1,41	То же
Колпь — д. Новая Александровка	1280	2,69	2,10	„
Гусь — д. Милу- шово	1560	1,90	1,22	Незначительное влияние депрессионных воронок
Нарма — с. Шеен- ка	795	0,88	1,11	Возможно влияние опытных водопонижений

Достаточно продолжительный период наблюдений за стоком р. Поли позволяет детально рассмотреть вопрос изменения речного стока в процессе эксплуатации подземных вод. Оценка этих изменений выполнена методом гидрологической аналогии и путем сравнения основных характеристик стока за периоды естественного и нарушенного режима подземных вод с учетом интегральных кривых стока и осадков (рис. 25), а также данных о многолетних колебаниях годового и минимального стока, приведенных в работах [56, 108] для исследуемого района.

При подборе пунктов-аналогов для р. Поли обращалось внимание на расположение бассейнов-аналогов строго в одном районе синхронных колебаний стока. В качестве аналогов по стоку были приняты три речных водосбора: р. Цна у д. Старый Спас ($F=767$ км²), р. Озерна у д. Карповка ($F=483$ км²) и р. Пахра у д. Макарово ($F=1760$ км²). Для этих объектов имелись данные о стоке за синхронные годы наблюдений и сток их не был нарушен водохозяйственными мероприятиями или эти нарушения были несущественными.

Для характеристики условий формирования стока в пределах выбранных в качестве аналогов водосборов подсчитаны го-

довые суммы осадков, осредненные по метеостанциям Коломна, Павловский Посад, Куровская, Черусти, Рязань. О характере изменений осадков во времени и в пространстве можно судить по рис. 25. Значения осадков использованы для расчета коэффициентов годового стока р. Поли и рек-аналогов. Сравнение коэффициентов годового стока, установленных по графикам связи (см. рис. 21) за периоды предполагаемого естественного (до 1938 г.) и нарушенного (с 1939 г.) режима подземных вод, позволило оценить степень его изменений в процессе эксплуатации подземных водозаборов (см. табл. 3.6).

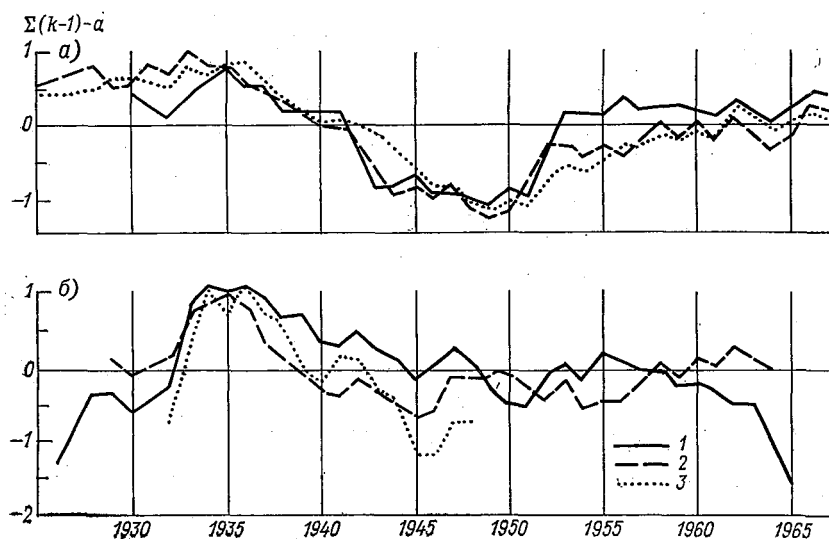


Рис. 25. Разностные интегральные кривые годовых сумм атмосферных осадков (а) и годовых значений общего речного стока (б) на территории Мещерской низменности.

Осадки по метеостанциям: 1 — Павловский Посад, 2 — Рязань, 3 — Черусти; сток: 1 — р. Пахра — д. Макарово, 2 — р. Озерна — д. Карповка, 3 — р. Поля — пос. Кривандино.

Для более детальной оценки влияния эксплуатации подземных вод на сток рек и определения его отклонений от естественных значений по годам выполнено восстановление измененных значений стока р. Поли по естественному стоку рек-аналогов. С этой целью графически (см. рис. 25) по средним значениям годового и подземного стока р. Поли установлены периоды естественного и нарушенного режима реки. Несмотря на то что к началу наблюдений за стоком в бассейне р. Поли (1929 г.) уже более 10 лет производился отбор подземных вод, представленные на графиках (см. рис. 25 а—б) данные, четко характеризуют начало изменения водности реки. По-видимому, в первое время депрессионные воронки водозаборов имели

ограниченные размеры и не могли заметно влиять на режим общего и подземного стока р. Поли.

Водный режим р. Поли, близкий с естественному, в устойчивую летнюю межень прослеживается до 1935—1936 гг., в целом за год — до 1937—1938 гг. (см. рис. 25 а). За период весеннего половодья (см. рис. 25 б) сток р. Поли не претерпевает существенных изменений, поскольку нарушения подземного притока в это время незначительны. Аналогичные выводы можно сделать при сравнении данных о стоке р. Поли и рек-аналогов.

Восстановление естественных значений годового стока р. Поли, нарушенного эксплуатацией подземных вод, произведено по формуле (3.9). Так как теснота связи между значениями годового стока р. Поли и рек-аналогов за естественный период характеризуется относительно низкими коэффициентами корреляции ($r=0,7 \div 0,8$), точность значений восстановленного по годам стока невысока. Тем не менее их сравнение с фактическими данными однозначно характеризует направленность изменения водного режима р. Поли. Последнее хорошо видно из табл. 4.5.

Таблица 4.5

Сравнение фактического и восстановленного годового стока р. Поли у пос. Кривандино, мм

Сток	Год							
	1933	1934	1935	1936	1937	1938	1939	1940
Фактический	250	(206)	94	184	91	104	(64)	104
Восстановленный	252	186	128	164	110	122	128	134
Отклонение от восстановленного	мм	—2	(20)	—34	20	—19	—18	(—64)
	%	1	(10)	25	12	17	15	(50)

Сток	Год								
	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	среднее
Фактический	183	127	76	112	47	127	183	150	136
Восстановленный	195	170	110	134	101	168	196	156	155
Отклонение от восстановленного	мм	—12	—43	—34	—22	—54	—41	—13	19
	%	6	25	31	16	53	24	7	12

Примечание. В скобки заключены сомнительные значения.

Данные таблицы и рис. 25 а показывают, что годовой сток р. Полю у пос. Кривандино начиная с 1937 г. уменьшается; уменьшение стока следует за увеличением отбора подземных вод. Однако закономерность этого уменьшения не выдержана, что, по-видимому, объясняется различиями в формировании стока по годам и точностью его восстановления.

Показательно (рис. 26), что в годы с малой водностью влияние эксплуатации подземных вод на сток реки более значительно, чем в годы с высокой водностью, поскольку при больших значениях стока удельный вес нарушений менее значителен. Так, например, в 1939, 1943 и 1945 гг. (годы низкой водности) сток р. Полю был ниже естественных значений на 35—65 мм, а в 1941, 1944 и 1947 гг. (годы высокой водности) — всего на 12—22 мм (рис. 27).

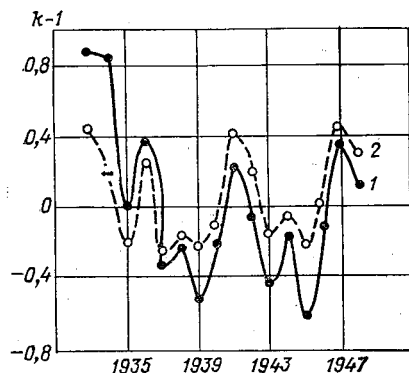


Рис. 26. Изменение модульных коэффициентов ($k-1$) общего речного стока р. Полю и рек-аналогов за период с 1933 по 1948 г.

1 — р. Полю — пос. Кривандино; 2 — значения, осредненные по рекам-аналогам.

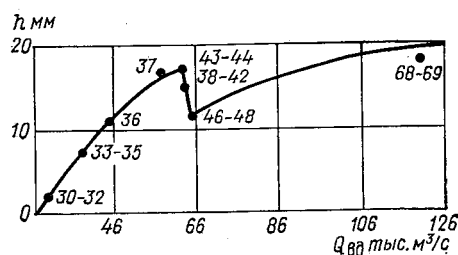


Рис. 27. Зависимость сокращения подземного стока в р. Полю от суммарного отбора подземных вод $Q_{вд}$ в ее бассейне.

Цифры у точек — годы.

Сокращение стока р. Полю в связи с эксплуатацией подземных вод за весь период наблюдений (1933—1948) составило в среднем 19 мм/год ($0,6 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$), или немного более 12 % нормы.

Изъятие подземных вод в бассейне р. Полю наиболее значительно сказалось на ее подземном притоке, восстановление которого выполнено, как и годового стока, по естественному стоку рек-аналогов. Для этой цели, однако, использована формула (3.27), так как расчет по формуле (3.9) приводил к значительным погрешностям восстановленных значений из-за низкой тесноты связи между подземным притоком р. Полю и рек-аналогов (коэффициенты корреляции $0,6-0,7$). Применение методов множественной линейной корреляции улучшило точность восстанавливаемых значений подземного стока, так как совместное использование данных о стоке р. Полю и рек-аналогов

повышало общий коэффициент корреляции между ними до 0,9 и более.

Для восстановления естественных значений подземного стока в р. Полю у пос. Кривандино ($Q_{в.е}$), нарушенного эксплуатацией подземных вод, получено уравнение вида

$$Q_{в.е} = 0,98Q_{a1} + 0,14Q_{a2} - 0,288, \quad (4.1)$$

в котором Q_{a1} — подземный приток р. Цны у д. Старый Спас; Q_{a2} — подземный приток р. Озерны у д. Карповки.

Вычисленные по этому уравнению значения подземного стока в р. Полю за летнюю межень и их отклонения от фактических представлены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Сравнение фактических $h_{ф}$ и восстановленных естественных $h_{в.е}$ значений подземного стока в р. Полю, мм

Сток	Год									
	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936	1937	1938	1939
h_{Φ}	28	32	0	100	18	11	1	1	1	1
$h_{в.е}$	30	30	0	105	26	17	8	14	6	10
Отклонение от восста- новлен- ного										
мм	-2	2	0	-5	-8	-6	-7	-13	-5	-9
%	7	7	0	5	31	35	88	93	83	90

Сток	Год									
	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	
h_{Φ}	2	4	4	9	13	11	15	13	14	
$h_{в.е}$	13	26	17	39	17	28	27	22	24	
Отклонение от восста- новлен- ного										
мм	-18	-22	-13	-30	-4	-17	-12	-9	-10	
%	85	85	77	77	24	61	44	41	42	

Как видно из таблицы, подземный сток в р. Полю постепенно сокращался, к концу 30-х годов достиг минимальных значений, а затем снова несколько приблизился к естественному. В среднем, несмотря на повышение подземного стока

в конце 40-х годов, его общее снижение в летнюю устойчивую межень по отношению к восстановленным значениям составило более 40 %. Очень важно, что сокращение подземного стока р. Поли находится в прямой зависимости от величины изъятия подземных вод водозаборами, расположенными в ее бассейне (рис. 27). Вместе с тем режим потерь речного стока определяет производительность водозабора подземных вод. Так, интенсивный рост потерь речного стока в первые 15 лет работы водозабора создает благоприятные условия для притока речных вод в депрессионную воронку. В последующие 3—4 года потери речного стока заметно сокращаются. Затем с увеличением отбора подземных вод потери речного стока, а следовательно, и восполнение запасов подземных вод эксплуатируемого водоносного горизонта снова возрастают, но менее интенсивно, чем в начале.

Выводы А. В. Лебедева [117] и В. А. Ковалевского [135] относительно режима инфильтрационного питания подземных вод в районе действующего водозабора и М. Ф. Фадеевой [184] относительно развития депрессионных воронок по мере увеличения отбора подземных вод подтверждаются результатами оценки потерь речного стока, выполненной для условий эксплуатации крупных водозаборов подземных вод на территории Мещерской низменности [184].

Замедление роста инфильтрационного питания подземных вод эксплуатируемого водоносного горизонта в пределах депрессионной воронки в этих условиях можно объяснить или кольтмацией пород на пути движения воды к водозаборам, или сжатием водоупорных глин, разделяющих эксплуатируемый и вышележащий водоносные горизонты.

Интенсивность уменьшения стока р. Поли в условиях современного отбора подземных вод мало чем отличается от интенсивности прошлых лет; отмечается некоторый рост потерь стока по сравнению с периодом 1946—1948 гг. По данным измерений стока р. Поли у пос. Кривандино в 1968—1969 гг. и его сравнения со стоком рек-аналогов, находящихся за пределами влияния депрессионных воронок, уменьшение водности р. Поли находится в пределах 15—17 мм (в пересчете на год).

Степень нарушения речного стока детально рассмотрена также на примере р. Осколец, в бассейне которой ведутся интенсивные работы по осушению пород, лежащих в кровле железорудных месторождений, и добыче железных руд. В бассейне р. Осколец сосредоточены месторождения богатых железных руд, имеющих сравнительно неглубокое залегание (60—100 м). Добыча железных руд на Коробковском месторождении ведется шахтным способом, на Лебединском и Стойленском — открытыми карьерами.

Водопонизительные работы в районе Лебединского рудника начались в декабре 1957 г., а в 1959 г. этот рудник вступил

в строй. В 1963 г. начались вскрышные работы на Стойленском, а в 1965 г. — на Южно-Лебединском рудниках. Освоение железорудных месторождений вызвало строительство комплекса вспомогательных предприятий, развитие населенных пунктов.

В бассейне р. Осколец осуществляются три крупных забора подземных вод (г. Губкин, Лебединский и Стойленский рудники), два водозабора речных вод, 12 сбросов подземных вод в реку, два водосброса в гидроотвалы и один за пределы бассейна в отстойники р. Чуфички. Изменился характер гидрографической сети р. Осколец. С 1958 г. участок реки протяженностью 10 км канализован. Параллельно канализованному руслу по правому берегу реки от устья Иотовской балки к Лебединскому мосту идет канал для сброса осветленных вод из Иотовского водохранилища. В бассейне сооружено пять водоемов-хвостохранилищ.

Все эти мероприятия в значительной степени изменили условия связи речных и подземных вод в пределах почти всей площади речного бассейна р. Осколец, водный режим реки, характер и величину притока воды в карьеры. Для оценки характера и степени изменения водности р. Осколец выполнено сравнение ее водного режима с режимом рек-аналогов за периоды до и после начала эксплуатации рудников. В качестве аналогов естественного ненарушенного водного режима приняты пять ближайших к ее бассейну речных водосборов, имеющих достаточно продолжительные ряды гидрологических наблюдений: р. Тим у с. Новые Савины ($F=909 \text{ км}^2$), р. Кшень у д. Серебряковка ($F=1160 \text{ км}^2$), р. Сейм у с. Зуевка ($F=2320 \text{ км}^2$), р. Псёл у г. Обоянь ($F=1100 \text{ км}^2$) и р. Оскол у г. Старый Оскол ($F=1540 \text{ км}^2$).

Для анализа использованы данные совместных наблюдений во всех сравниваемых пунктах за период с 1952 по 1970 г. Сравнение выполнено по графикам связи между значениями стока, а также между интегральными, последовательно суммированными значениями стока р. Осколец у г. Старый Оскол и рек-аналогов по четырем основным характеристикам водности рек: общему годовому стоку, стоку за период весеннего половодья, стоку за остальную часть года и подземному стоку в реки. Построение графиков позволило выделить периоды естественного и нарушенного водного режима р. Осколец и определить средние соотношения между значениями основных характеристик водности р. Осколец и рек-аналогов, имеющих место до начала нарушений (см. табл. 3.7).

Как видно из графиков на рис. 21, приведенных в качестве примера только для реки-аналога Тим, естественный водный режим р. Осколец прослеживается до 1959—1960 гг. В последующий период водности реки стала последовательно увеличиваться, что позволяет считать водный режим в этот период на-

рушенным. Исключение составляет весенний сток р. Осколец, не претерпевший заметных изменений, поскольку нарушения имеют в нем незначительный удельный вес. Аналогичную картину дают графики и по другим рекам-аналогам.

Полученные соотношения распространены на период нарушений водного режима р. Осколец и использованы для восстановления естественных значений речного стока по формуле (3.9), а после их осреднения по всем аналогам — для оценки характера и степени нарушений стока по формуле (3.10). Отклонения фактического стока р. Осколец от предполагаемого естественного за весь расчетный период приведены в табл. 3.8. Начало изменения водного режима реки совпадает по времени с вводом в эксплуатацию Лебединского рудника (1959 г.), и это изменение целиком связано в дальнейшем с развитием водопонижительных работ в районе карьеров. Однако оценка изменений стока р. Осколец по замыкающему створу не характеризует нарушений водного режима реки в зоне развития депрессионной воронки. Для характеристики нарушения стока у карьеров были использованы данные специальных гидрологических исследований, проведенных ГГИ в 1964—1967 гг.

Совместный анализ данных этих исследований, гидрогеологических материалов и сведений о водохозяйственных мероприятиях, проводимых в бассейне р. Осколец, позволил выделить основные искусственные факторы, обуславливающие водный режим реки в настоящее время, и дать их количественную оценку. Было установлено, что на формирование стока реки оказывают влияние отбор подземных и речных вод, характер и величина их суммарного отведения после использования в реку, сокращение питания реки подземными водами и фильтрация русловых вод в пределах развития депрессионной воронки.

Количественная оценка всех водозаборов и водосбросов выполнена путем их непосредственных измерений по трем категориям предприятий. Суммарные значения водозаборов и водосбросов получены по годам за период с 1955 по 1966 г. При этом отмечается, что объем извлекаемых подземных вод из года в год увеличивается вместе с увеличением добычи железных руд и ростом городов. Если в 1957 г. отбор подземных вод в бассейне р. Осколец составлял около 150 л/с, то к 1970 г. он достиг уже 3300 л/с, т. е. увеличился более чем в 20 раз.

Возрастающие заборы воды из р. Осколец не вызывают заметных потерь стока в бассейне, так как они, как правило, являются возвратными. Основная часть подземных и речных вод (90—95 % суммарного водозабора) отводится в р. Осколец; незначительная часть (до 7 % в отдельные годы) через р. Чуфичку сбрасывается из Стойленского карьера в р. Оскол, за пределы бассейна р. Осколец; безвозвратно теряется от 5 до 10 % всех используемых в бассейне вод.

Количественная оценка влияния депрессионной воронки на водный режим р. Осколец выполнена по материалам гидрометрических съемок путем расчета баланса русловых вод для отдельных участков реки. Для расчета фильтрационных потерь и сокращения питания реки подземными водами в зоне депрессионной воронки использованы данные многократных измерений речного стока в меженный период 1964—1967 гг. Результаты расчета фильтрационных потерь и снижения питания реки подземными водами представлены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Результаты оценки фильтрационных потерь и снижения питания р. Осколец подземными водами под влиянием отбора подземных вод, л/с

Год гидрометрической съемки	Фильтрационные потери на участке		Снижение питания реки	
	Иотовский мост — д. Бродок	д. Бродок — г. Старый Оскол	полного	частичного
1964	9654	—	80	196
1965	654	0	80	196
1966	673 9673	212	130	217
1967	775 9775	(50)	—	—
Принятые средние значения	720	130	130	217

Характер изменения по длине реки баланса поверхностных вод для наглядности представлен на рис. 28. На рис. 28 а показан продольный профиль р. Осколец, совмещенный с профилем уровня подземных вод в депрессионной воронке. На графике б точками нанесены значения элементов баланса в расходах воды, отнесенные к середине участков. По этим точкам проведены сглаженные кривые, отражающие предполагаемое более детальное распределение величин питания и фильтрации. При сравнении графиков а и б отчетливо видно совпадение по длине реки точек нулевого баланса с точками равных отметок дна реки и уровня подземных вод, а также совпадение области наибольшей фильтрации с областью наибольшего снижения уровня подземных вод. Совпадение зоны фильтрации с зоной депрессионной воронки и идентичность результатов, полученных в разные годы, позволяет установленные размеры фильтрации из р. Осколец считать достаточно надежными.

Данные о структуре и размерах нарушений водного баланса р. Осколец позволяют оценивать водный режим реки по ее длине в естественных и нарушенных условиях на примере 1964 г. Рассмотрены две характеристики водного режима: средний годовой сток и расходы воды в период межени при проведении гидрометрической съемки (10—11/X). При этом

приняты следующие варианты условий формирования водного режима реки: естественные условия (вариант I в табл. 4.8), нарушенные фактически (вариант II), нарушенные условно (вариант III). В последнем случае условно предполагаются сбросы всех промышленных вод за пределы бассейна при наличии депрессионной воронки подземных вод. Такой вариант вполне возможен как для промышленного узла Лебединского

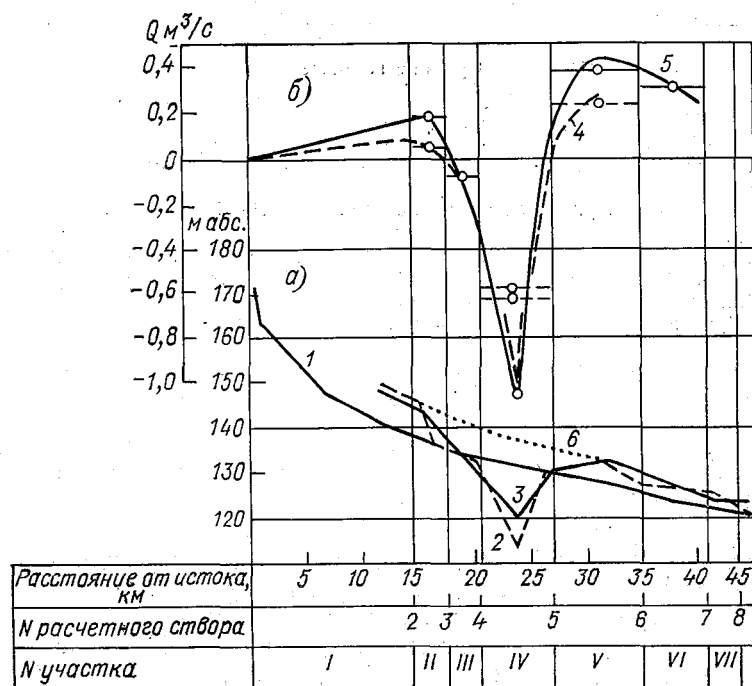


Рис. 28. Профиль депрессии уровня подземных вод (а) и график изменения по длине р. Осколец баланса речных вод в районе Лебединского и Стойленского карьеров (б).

1 — продольный профиль реки; 2, 3 — профиль уровня подземных вод в 1964 и 1965 гг.; 4, 5 — кривые изменения по длине реки баланса речных вод по данным 1964 и 1965 гг.; 6 — профиль уровня подземных вод в естественных условиях.

рудника, так и при сооружении на территории КМА других подобных ему горнорудных предприятий.

Анализ данных наблюдений по стационарным гидрологическим постам Кондаурово, Иотовский мост и Старый Оскол показывает, что средние годовые расходы воды при варианте I в 1964 г. равномерно нарастали бы по всей длине р. Осколец пропорционально увеличению водосборной площади. Иначе говоря, модуль годового стока на всех участках р. Осколец был бы примерно одинаковым, равным 4,6—4,2 л/(с·км²) (см. табл. 4.8).

Таблица 4.8

Расходы воды по длине р. Осколец в 1964 г. при различных вариантах нарушений стока (I, II, III)

Пункт	F км²	I		II	III	В % от расходов варианта I		
		Q м³/м	qл/(с·км²)	Q м³/с	Q м³/с	I	II	III

Средние годовые

с. Кондаурово	52	0,24	4,6	0,24	0,24	100	100	100
Иотовский мост	292	1,23	4,2	1,23	1,23	100	100	100
г. Старый Оскол	494	2,07	(4,2)	2,87	1,04	100	139	50

При съемке в период межени (10—11/X)

с. Кондаурово	52	0,11	2,1	0,11	0,11	100	100	100
с. Салтыково	202,4	0,42	2,1	0,42	0,42	100	100	100
Иотовский мост	292	0,60	2,04	0,60	0,48	100	100	96
Ниже сбросов	328,1	0,67	(2,04)	0,64	0,38	100	95	57
ТЭЦ								
Лебединский мост	362	0,74	(2,04)	0,59	прсх	100	80	0
Бродок	454	0,93	(2,04)	0,84	0,06	100	91	66

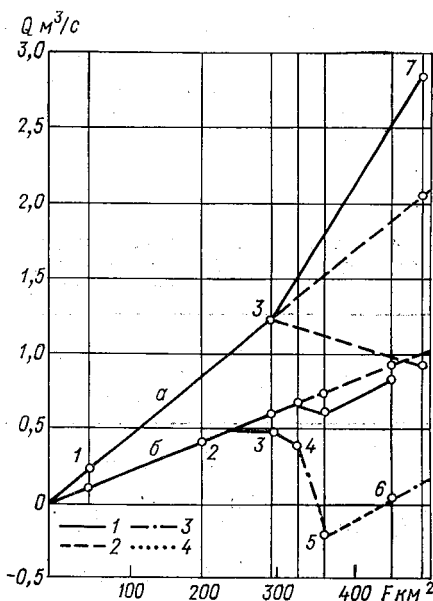
Примечание. Вариант нарушений: I — предполагаемый естественный; II — фактическое нарушение, III — нарушение при условии сброса промышленных вод за пределы бассейна р. Осколец.

Средние годовые расходы воды на этих трех гидрологических постах для естественных условий определены: по посту у с. Кондаурово — по фактическим наблюдениям, поскольку выше поста нарушения отсутствуют; по посту у Иотовского моста — также по фактическим наблюдениям, поскольку потери стока за счет частичного отклонения подземного питания (0,12 м³/с) компенсируются сбросами из руч. Теплый Колодезь выше поста (0,10 м³/с); по посту у г. Старый Оскол естественный сток (2,07 м³/с) восстановлен по связи с реками-аналогами. Фактический сток у г. Старый Оскол в 1964 г. (вариант II) составлял 2,87 м³/с, что на 39 % больше предполагаемого естественного. При варианте III условий формирования стока, т. е. при сбросах всех промышленных вод за пределы бассейна реки, средний годовой сток у г. Старый Оскол снизился бы против естественного на суммарную величину его потерь (0,93 м³/с) за счет частичного и полного отключения грунтового питания и фильтрации речных вод в зону депрессионной воронки и составлял бы 1,04 м³/с, что на 50 % меньше естественного (см. табл. 4.8). Как видно из графика (см. рис. 28), все существенные изменения расходов воды в обоих случаях начинаются в районе створа № 3 (Иотовский мост).

Более детальную картину распределения речного стока в бассейне р. Осколец можно проследить по материалам гидрометрической съемки в период межени 1964 г. на густой сети временных гидрологических постов. В качестве характеристики естественных расходов воды по длине реки при варианте II приняты модули расходов по постам Кондаурово, Салтыково и Иотовский мост (соответственно 2,1; 2,1; 2,04 л/(с·км²)), распространенные на все нижележащие участки р. Осколец. Фактическое распределение расходов воды в период гидрометрической съемки приведено в табл. 4.8. На участках нарушений они несколько ниже естественных (у Лебединского моста на 20 %) за счет того, что в период съемки сбросы промышленных вод были минимальными и не покрывали суммарных потерь. Наиболее важным является рассмотрение для межени варианта III условий формиро-

Рис. 29. Нарастание средних годовых (а) и меженных (б) расходов воды р. Осколец в 1964 г. по мере увеличения площади водосбора при различных условиях эксплуатации Лебединского карьера.

1 — фактический сток в условиях нарушений; 2 — восстановленный сток; 3 — нарушенный сток при условии отведения откачиваемых подземных вод за пределы бассейна р. Осколец; 4 — прекращение подземного стока в р. Осколец. Цифры у точек 1—7 — посты с. Кондаурово, с. Салтыково, Иотовский мост, ниже сбросов ТЭЦ, Лебединский мост, с. Бродок, г. Старый Оскол.



вания стока. Расчет предполагаемых расходов воды по постам выполнен по данным табл. 4.8 вычитанием из фактических расходов суммарных значений сбросов, производимых выше каждого поста. Как видно из таблицы, где приведены результаты этих расчетов, ниже Иотовского моста речной сток имел бы резкое снижение и в районе Лебединского моста река бы полностью пересохла. В замыкающем реку створе у г. Старый Оскол расход воды составлял бы не более 0,10 м³/с, или менее 10 % естественного. Изменение расходов воды по длине р. Осколец при различных условиях формирования стока иллюстрировано графиками (рис. 29).

Аналогичные исследования выполнены также в бассейне р. Чернь и ее притоков, в районе г. Курска на реках Тускарь и Сейм, в бассейне р. Оскол и в районе г. Белгорода на реках

Северский Донец и Везелка. Сравнение стока исследуемых рек со стоком рек-аналогов за периоды предполагаемых его нарушений показало, что заметных изменений водности рек в стационарных пунктах наблюдений не происходит. Об этом свидетельствуют данные табл. 4.9, в которой приведены результаты сравнения коэффициентов стока рек за естественный и нарушенный периоды их водного режима. Однако в целом ряде случаев (реки Чернь, Осколец, Ворскла и др.) отмечается увеличение водности рек за счет сброса в них недренируемых (глубоких) подземных вод. Кроме того, на участках развития депрессионных воронок уровня подземных вод имеют место сокращение подземного питания рек и фильтрация русловых вод в эксплуатируемые водоносные горизонты. По данным гидрометрических съемок величина такого общего сокращения речного стока на 1967 г. для р. Чернь (район Михайловского карьера) равна 140 л/с, для р. Сейм (район г. Курска) — 1330 л/с, для р. Везелки (район г. Белгорода) — до 100 л/с.

Таблица 4.9

Сравнение коэффициентов общего годового стока осредненных за периоды естественного (первая строка) и нарушенного (вторая строка) режима подземных вод в речных бассейнах

Периоды	Осадки (исправлен- ные), мм/год	Сток, мм/год	Коэффициент стока	Метеостанции, использованные для подсчета средних по бассейну осадков
р. Осколец — г. Старый Оскол, $F=494 \text{ км}^2$				
1952—1957	700	128	0,18	Старый Оскол, Тим, Большое Фенино
1958—1964	579	153	0,26	
р. Оскол — г. Старый Оскол, $F=1540 \text{ км}^2$				
1946—1957	622	149	0,24	Старый Оскол, Тим, Большое Фенино
1958—1964	579	150	0,26	
р. Северский Донец — с. Дальние Пески, $F=1700 \text{ км}^2$				
1945—1956	647	108	0,17	Ржава, Белгород, Большое Троицкое
1957—1964	635	97	0,15	
р. Свапа — г. Старый Город, $F=3690 \text{ км}^2$				
1945—1958	690	166	0,24	Дмитриев, Дмитровск- Орловский, Фатеж
1959—1964	647	163	0,25	
р. Свапа — с. Локтиново, $F=419 \text{ км}^2$				
1951—1958	730	146	0,20	Дмитриев, Дмитровск- Орловский, Фатеж
1959—1964	644	116	0,18	

Потери русловых вод в депрессионную воронку составляют 30—35 % величины общего сокращения стока.

Наиболее широко для оценки нарушений стока рек исследуемой территории использованы зависимости вида (3.43) и (3.44).

Уравнение вида (3.44) получено по средним многолетним данным о естественном стоке рек однородных физико-географических районов. Различия в природных особенностях определяют различный характер зависимостей расходов воды от площади водосбора.

Следует отметить высокую тесноту связей между расходами воды и площадями водосборов, коэффициенты корреляции которых превышают 0,9, что позволяет считать используемые зависимости надежными, а получаемые по ним результаты весьма точными. Учитывая, что на формирование речного стока оказывает влияние целый комплекс факторов (залесенность, заболоченность, распаханность водосбора, распределение осадков), сделана попытка оценить вклад каждого из них.

Оценка вкладов указанных факторов применительно к естественному формированию общего годового стока и подземного притока на исследуемой территории выполнена по методике Г. А. Алексеева [4]. Для всех пунктов наблюдений был выбран единый период продолжительностью 10 лет (1960—1969). Результаты расчета позволяют утверждать, что основную роль в формировании как общего годового стока, так и подземного притока на территории КМА и МАБ играет площадь водосбора, вклад которой для подземного стока достигает 90 %, а для общего годового стока — 98 %.

Зависимости вида (3.43) определены для общего годового стока, стока за период половодья, минимального суточного, минимального 30-суточного зимнего и летнего стока, а также для подземного годового, зимнего и летнего стока в реки. Для каждой кривой найдены аналитические выражения, параметры которых сведены в табл. 4.10.

Необходимо отметить, что зависимости, аналогичные зависимости (3.43), были предложены А. М. Владимировым для расчета средних многолетних естественных значений минимального стока неизученных малых и средних рек, бассейны которых по совокупности однородных признаков представляют отдельные физико-географические районы, и широко используются в настоящее время при строительном проектировании [178].

Приведенные по районам параметры a и n также использованы для определения средних многолетних значений атмосферных осадков для рек с короткими рядами наблюдений, характеризующихся как естественным, так и нарушенным режимом подземных и поверхностных вод.

Полученные таким образом средние многолетние расходы воды по основным гидрологическим характеристикам

Т а б л и ц а
Значения параметров a и n в формуле (3.43)

Физико-географический район	Годовой		Весеннее поло- водье		Мини	
					Суточный	
	a	n	a	n	a	n
Бассейн р. Оки (р. Ока до с. Половское, левые притоки р. Оки до устья р. Москвы)	8,17	0,97	27,6	0,93	0,77	1,04
Бассейн р. Клязьмы (р. Клязьма до г. Коврова, левые притоки р. Клязьмы)	7,60	0,97	27,6	0,93	0,96	1,04
Речные бассейны Мещерской низменности (правые притоки р. Клязьмы и левые притоки р. Оки) и лесостепной зоны (правые притоки р. Оки)	6,3	0,97	19,6	0,93	0,126	1,04

Примечание. Для сокращения записи значение параметра a увели-

использованы для восстановления естественных значений стока, преобразованного в результате различных водохозяйственных мероприятий и интенсивной эксплуатации подземных вод.

Восстановление естественных значений стока выполнено по формуле (3.44), и его результаты представлены в табл. 4.11—4.13. В этих же таблицах приведены результаты оценки характера и степени нарушений речного стока под влиянием различных водохозяйственных мероприятий, выполненной путем сравнения фактических и восстановленных значений расходов воды за период нарушенного водного режима реки по формуле (3.44).

В отдельных случаях для тех речных бассейнов, по которым имелись надежные сведения о каждом водохозяйственном мероприятии, оценка суммарного их влияния на сток как в целом за период нарушений, так и за каждый год выполнялась по формулам (3.63) и (3.64). Результаты оценки по отдельным речным бассейнам территории по общему годовому и подземному стоку приведены в табл. 4.14.

Использование указанных формул позволяет восстановить естественные значения расходов воды, измененные в результате осуществления различных водохозяйственных мероприятий, и определить направленность и степень этих нарушений.

Приведенные в табл. 4.14 значения речного стока, измененные хозяйственной деятельностью, также подтверждают выводы о неоднородности рядов стока за два исследуемых периода.

4.10

для определения средних многолетних значений стока рек МАБ

мальный				Подземный					
30-суточный				годовой		зимний		летний	
зимний		летний							
<i>a</i>	<i>n</i>	<i>a</i>	<i>n</i>	<i>a</i>	<i>n</i>	<i>a</i>	<i>n</i>	<i>a</i>	<i>n</i>
1,10	1,04	1,15	1,04	1,00	1,04	0,96	1,04	1,26	1,04
1,74	1,04	1,91	1,04	1,67	1,04	1,38	1,04	1,60	1,04
0,60	1,04	0,63	1,04	0,85	1,04	0,63	1,04	0,70	1,04

чено в 1000 раз.

Анализируя данные табл. 4.5, 4.6, 4.11—4.14, можно сделать следующие выводы относительно нарушений речного стока на территории центра ЕТС.

1. Под влиянием интенсивной эксплуатации подземных вод за счет сокращения подземного питания рек и потерь русловых вод на инфильтрацию в пределах развития депрессионных воронок уменьшается:

- а) общий годовой сток на 10—25 %;
- б) сток за период весеннего половодья от нуля до 20 %;
- в) минимальный суточный, 30-суточный зимний и летний сток на 15—40 %;
- г) подземный сток в реки — годовой, зимний и летний — на 25—70 %.

2. Под влиянием интенсивной эксплуатации подземных вод за счет сброса в реки после использования недренируемых подземных вод увеличивается как общий годовой сток (на 10—20 %), так и меженный (от 10—20 до 100—300 % и более).

Увеличение стока наблюдается, как правило, в небольших реках, таких, как Варя, Поля, Шерна, Пекарка, Осколец, Чернь, Речица, Северский Донец (верховье) и др.

3. Под влиянием регулирования водохранилищ уменьшается на 5—20 % общий годовой сток, на 10—70 % — сток за период весеннего половодья и увеличивается на 20—200 % меженный сток. Такие изменения стока отмечаются на реках Москва (до

Таблица 4.11

Результаты оценки нарушений общего годового стока и стока за период весеннего половодья рек МАБ, преобразованного влиянием различных водохозяйственных мероприятий

Река — пункт	F км ²	Коэффициент естественной водности рек за период нарушений стока K_t		Расход воды за период нарушений стока, м ³ /с			Величина нарушений стока		
				естественный, рассчитанный по формуле (3.44) $\bar{Q}_t$		нарушенный фактический $\bar{Q}_{tn}$	м ³ /с		в % от $\bar{Q}_t$
		год	весна	год	весна		год	весна	

Влияние эксплуатации подземных вод

Протва — пгт Спас-Загорье	3640	0,96	0,96	21,6	59,0	20,0	51,3	-1,6	-7,7	-7	-15
Нара — д. Папино	971	0,94	0,98	5,85	17,0	5,05	12,3	-0,8	-4,7	-14	-28
Искона — д. Новинки	472	0,97	0,92	3,04	8,3	2,47	6,5	-0,57	-1,8	-19	-22
Руза — г. Покров	1140	0,97	1,00	7,8	20,6	7,94	20,8	-0,14	0,2	-2	1
Руза — г. Руза	1930	0,96	0,88	12,4	29,8	12,8	29,5	0,4	-0,3	3	-1
Озерна — д. Карповка	483	1,00	0,99	3,20	9,1	3,50	8,8	0,3	-0,3	9	-3
Медвенка — д. Большое Сареево	21,5	0,96	0,96	0,154	0,47	0,114	0,292	-0,04	-0,18	-26	-37
Медвенка — д. Большое Сареево	40,0	0,96	0,96	0,28	0,85	0,215	0,52	-0,065	-0,33	-23	-39
Зака — д. Большое Сареево	17,0	0,96	0,96	0,122	0,38	0,092	0,206	-0,03	-0,17	-25	-45
Пахра — д. Макарово	1760	0,97	0,98	11,4	30,4	8,80	24,2	-2,7	-6,2	-23	-20

Река — пункт	F км ²	Коэффициент естественной водности рек за период нарушения стока $\bar{K}_t$		Расход воды за период нарушений стока, м/с				Величина нарушений стока			
				естественный, восстановленный по формуле (3.44) $\bar{Q}_t$		нарушенный фактический $\bar{Q}_{fn}$		м ³ /с		в % от $\bar{Q}_t$	
		год	весна	год	весна	год	весна	год	весна	год	весна
Пахра — д. Стрелковская фабрика	1690	0,96	0,91	11,0	28,0	—	—	—	—	—	—
Нерская — г. Куровское	612	0,98	0,92	3,64	10,6	3,22	8,5	-0,42	-2,1	-12	-20
Цна — д. Старый Слас	767	0,91	0,98	3,62	9,6	3,30	9,6	-0,32	-0,0	-9	0
Бужа — д. Избище	1100	1,00	1,05	5,62	14,4	5,45	14,7	-0,17	0,3	-3	2
Поль — д. Ерликс	560	0,88	1,02	2,60	7,5	1,94	7,7	-0,66	0,2	-25	3
Воря — д. Мишнево	947	0,96	0,96	5,70	16,6	6,40	14,2	0,7	-2,4	11	-14
Серая — д. Новинки	293	0,98	1,00	1,78	5,7	1,82	6,4	0,04	0,7	2	-12
Понарь — д. Аксеново	77	0,92	0,98	0,40	1,10	0,33	0,95	-0,07	-0,15	-18	-14
Кривандино — пос. Кривандино	500	0,91	1,10	2,39	7,3	1,86	7,0	-0,53	-0,3	-22	-4

Влияние комплекса водохозяйственных мероприятий

Ока — г. Орел	4 900	0,96	1,02	22,9	83	20,9	59,1	-2,0	-24	-9	-29
Ока — г. Белёв	17 500	0,96	1,02	79	270	79,6	200	0,6	-70	0	-26
Ока — г. Калуга	54 900	0,96	1,02	305	810	284	700	-21	-110	-7	-14
Ока — г. Кашира	68 700	0,96	1,02	376	990	362	850	-14	-140	-4	-14
Ока — с. Половское	99 000	0,94	1,00	532	1368	500	1218	-32	-150	-6	-9

Река — пункт	F км ²	Коэффициент естественной водности рек за период нарушений стока K_t		Расход воды за период нарушений стока, м/с				Величина нарушений стока			
				естественный, восстановленный по формуле (3.44) $\bar{Q}_t$		нарушенный фактический $\bar{Q}_{fn}$		м ³ /с		в % от $\bar{Q}_t$	
		год	весна	год	весна	год	весна	год	весна	год	весна
Упа — Щекинская ГРЭС	1 370	0,97	1,08	6,7	18,2	6,0	5,1	-0,7	-13,1	-10	-72
Упа — г. Тула	3 550	1,08	1,10	18,9	45	16,4	40	-25	-5,0	-13	-11
Упа — с. Орлово	8 210	0,96	1,02	37,9	93	39,6	96,7	1,7	3,7	4	4
Москва — д. Макарово	1 420	0,94	0,88	9,0	22,2	8,1	8,5	-0,9	-13,7	-10	-62
Москва — г. Звенигород	5 000	0,97	0,92	31,5	76	29,5	69,2	-2,0	-7,0	-6	-9
Москва — г. Москва	8 850	0,94	1,00	54,0	141	65,5	119	11,5	-22,0	21	-16
Лусьянка — д. Черники	170	0,98	1,00	1,20	3,5	1,23	3,5	0,03	0	2	0
Колоць — с. Бородино	266	0,96	1,19	1,76	6,2	1,80	5,7	0,04	-0,5	2	-8
Истра — с. Павловская Слобода	1 950	0,94	1,00	12,1	34,0	10,7	22,0	-1,4	-12,0	-12	-35
Клязьма — г. Щелково	1 210	1,08	1,03	7,92	22,4	6,02	8,2	-1,9	-14,2	-24	-63
Клязьма — г. Павловский Посад	5 440	0,94	1,00	32,5	90	32,0	64	-0,5	-25,5	-5	-29
Клязьма — р. п. Городище	8 040	0,91	1,00	41,6	129	42,5	108	0,9	-21,0	2	-16
Клязьма — г. Владимир	15 200	0,94	1,00	82,3	236	79,0	189	-3,3	-47,0	-4	-20
Клязьма — г. Ковров	25 800	0,94	1,00	139,0	387	137,0	340	-2,0	-47,0	-1	-12

Таблица 4.12

Результаты оценки нарушений минимального (суточного, 30-суточного зимнего и летнего) стока рек МАБ, преобразованного влиянием различных водохозяйственных мероприятий

Коэффициент естественной водоности рек за период нарушений стока K_t				Расход воды за период нарушений стока, м³/с				Величина нарушения стока			
				естественный, восстановленный по формуле (3.44)		нарушенный фактический $\bar{Q}_{\text{фн}}$		м³/с		в % от $\bar{Q}_t$	
суточный	зимний	летний	летний	суточный	зимний	летний	суточный	зимний	летний	суточный	зимний

Влияние эксплуатации подземных вод

1,16	1,18	1,18	3,80	6,50	6,80	4,25	5,82	6,08	0,45	-0,68	-0,72	12	-10	-11
1,18	1,19	1,19	0,88	1,64	1,73	0,84	1,30	1,09	-0,04	-0,34	-0,64	-5	-21	-37
1,08	1,17	1,17	0,37	0,72	0,78	0,19	0,37	0,33	-0,18	-0,35	-0,45	-49	-49	-58
1,16	1,21	1,21	1,56	2,00	2,10	0,54	1,01	0,79	-0,92	-0,99	-1,31	-59	-49	-62
1,16	1,12	1,12	1,84	3,24	3,38	1,73	3,15	3,40	-0,11	-0,09	0,02	-6	-3	1
1,38	1,27	1,21	0,48	0,85	0,88	0,67	1,00	1,03	0,19	0,15	0,15	40	18	17
1,16	1,21	1,21	0,023	0,036	0,036	0,008	0,024	0,023	-0,015	-0,012	-0,012	-65	-34	-34
1,16	1,21	1,21	0,042	0,061	0,061	0,035	0,043	0,042	-0,007	-0,018	-0,019	-17	-30	-31
1,16	1,21	1,21	0,017	0,025	0,025	0,012	0,023	0,022	-0,005	-0,002	-0,002	-30	-8	-8
1,16	1,22	1,22	1,68	3,22	3,36	1,25	2,26	2,04	-0,43	-0,96	-1,32	-26	-30	-39
1,00	1,08	1,08	1,75	2,70	2,80	0,60	1,27	0,60	-1,15	-1,53	-2,20	-66	-57	-78
1,08	1,25	1,25	0,13	1,09	1,14	0,12	0,70	0,60	-0,01	-0,39	-0,54	-8	-36	-47
1,08	0,95	0,95	0,147	0,51	0,60	0,13	0,39	0,47	-0,017	-0,12	-0,13	-12	-24	-22
1,16	1,21	1,21	0,40	1,05	1,10	0,35	0,88	0,82	-0,05	-0,17	-0,28	-16	-16	-25
1,08	0,96	0,96	0,068	0,41	0,44	0,06	0,20	0,26	-0,008	-0,21	-0,18	-12	-51	-41
1,08	1,18	1,18	1,18	2,58	2,40	1,31	2,70	2,68	0,13	0,12	0,28	10	5	12
1,15	1,18	1,18	0,40	0,74	0,81	0,41	0,67	0,73	0,01	-0,07	-0,08	-3	-9	-10

Коэффициент естественной водности рек за период нарушения стока K_t				Расход воды за период нарушений стока, м³/с				Величина нарушения стока			
				естественный, восстановленный по формуле (3.44) $\bar{Q}_t$				нарушенный фактический $\bar{Q}_{fn}$			
суточный	зимний	летний	интервал	суточный	зимний	летний	интервал	суточный	зимний	летний	интервал
1,08	0,93	0,93		0,013	0,052	0,053		0,044	0,037	0,012	30
1,08	0,89	0,89		0,094	0,32	0,34		0,23	0,13	-0,09	-62
Влияние комплекса водохозяйственных мероприятий											
1,16	1,21	1,21		3,35	4,9	5,2		2,0	2,62	2,14	
1,16	1,21	1,21		23,1	34,5	36,0		21,2	21,9	30,0	
1,16	1,21	1,21		75,3	91,0	118		69,5	87,8	109	
1,16	1,21	1,21		94,6	143	149		104	131	141	
1,15	1,13	1,13		141	192	206		157	195	227	
1,32	1,12	1,21		0,89	1,22	1,39		1,52	1,87	1,83	
1,34	1,19	1,25		2,74	3,50	3,90		3,74	5,44	5,44	
1,16	1,21	1,21		6,00	8,60	9,40		11,8	12,3	14,0	
1,07	1,27	1,27		1,20	2,10	2,19		3,56	2,65	2,51	
1,20	1,21	1,21		5,37	9,20	9,7		8,60	12,9	11,6	
1,15	1,13	1,13		9,70	16,3	16,7		15,9	33,0	37,2	
1,15	1,18	1,18		0,126	0,26	0,24		0,12	0,23	0,21	
1,25	1,23	1,23		0,22	(0,35)	0,38		0,20	(0,30)	0,31	
1,09	1,27	1,17		1,76	3,38	3,53		2,47	6,06	5,06	
1,14	1,31	1,31		1,73	3,61	3,92		4,15	4,15	4,97	
1,08	1,21	1,21		8,00	16,1	14,8		11,6	16,3	16,7	
0,88	0,88	0,88		9,7	17,1	17,8		11,8	17,9	16,6	
1,08	1,21	1,21		23,0	29,8	31,2		22,4	28,3	32,4	
1,08	1,21	1,21		(40,4)	51,9	54,3		33,6	47,9	51,6	
				в % от $\bar{Q}_t$							
				суточный	зимний	летний	интервал				
				-23	-23	-23	30				
				-14	-28	-62					
				-40	-46	-59					
				-8	-37	-17					
				-8	-4	-8					
				10	-8	-5					
				11	2	10					
				71	53	32					
				37	7	39					
				97	43	49					
				196	26	15					
				60	40	20					
				64	102	123					
				-5	-11	-12					
				-9	-14	-18					
				40	80	43					
				60	15	25					
				45	1	13					
				22	5	-7					
				-4	-5	4					
				(-17)	-8	-5					

Таблица 4.13

Результаты оценки нарушений подземного стока (год, зима, лето) в реки МАБ, преобразованного влиянием различных водохозяйственных мероприятий

Коэффициент естественной водности рек за период нарушений стока $\bar{K}_t$				Расход воды за период нарушений стока, м³/с				Величина нарушений стока, рассчитанного по формуле (3.18)			
				естественный, восстановленный по формуле (3.44) $\bar{Q}_t$				нарушенный фактический $\bar{Q}_{fn}$			
год	зима	лето		год	зима	лето		год	зима	лето	
								м³/с			
								в % от $\bar{Q}_t$			
								год			
								зима			
								лето			
								год			
								зима			
								лето			

Влияние эксплуатации подземных вод

1,18	1,29	1,10	5,90	6,20	6,17	5,75	5,70	5,80	-0,15	-0,50	-0,37	-3	-8	-6
1,28	1,27	1,08	1,61	1,54	1,52	1,22	1,35	1,10	-0,39	-0,19	0,42	-24	-12	-28
1,17	1,34	1,06	0,74	0,78	0,72	0,28	0,31	0,26	-0,46	-0,47	-0,46	-62	-60	-64
1,20	1,32	1,10	1,22	1,29	1,17	1,25	1,36	1,09	0,03	0,07	-0,08	2	5	-7
1,12	1,20	1,07	2,93	3,02	3,16	2,80	2,66	2,93	-0,13	-0,36	-0,26	-4	-12	-7
1,21	1,30	1,09	0,76	0,78	0,77	0,94	0,95	0,93	0,18	0,17	0,16	24	22	21
1,17	1,29	1,10	0,028	0,030	0,030	0,023	0,024	0,022	-0,005	-0,006	-0,008	-18	-20	-27
1,17	1,29	1,10	0,055	0,050	0,057	0,042	0,043	0,042	-0,013	-0,007	-0,015	-23	-14	-26
1,17	1,29	1,10	0,022	0,023	0,023	0,022	0,022	0,022	0	-0,001	-0,001	0	-4	-4
1,18	1,30	1,10	2,84	2,99	2,95	1,93	2,07	2,02	-0,91	-0,92	-0,93	-32	-31	-31
1,20	1,30	1,10	2,74	2,83	2,80	0,82	1,27	0,60	-1,92	-1,56	-2,20	-70	-55	-79
1,27	1,25	1,05	0,87	0,62	0,57	0,57	0,58	0,60	-0,30	-0,04	(0,01)	-34	-6	(2)
1,50	0,80	0,82	0,78	0,50	0,57	0,58	0,44	0,37	-0,20	-0,06	-0,20	-26	-12	-35
1,28	1,28	1,08	1,28	1,16	1,09	0,53	0,59	0,72	-0,75	-0,57	-0,37	-58	-49	-34
0,99	0,93	0,85	0,61	0,42	0,43	0,21	0,19	0,16	-0,40	-0,23	-0,27	-66	-55	-63
1,15	1,28	1,08	2,40	2,23	2,18	2,50	2,58	2,54	0,10	0,35	0,36	4	16	16
1,18	1,33	1,10	0,71	0,66	0,64	0,68	0,65	0,69	-0,03	0	0,05	-4	0	8

Коэффициент естественной водности рек за период нарушений стока $\bar{K}_t$				Расход воды за период нарушений стока, м³/с				Величина нарушений стока, рассчитанного по формуле (3.18)			
				естественный, восстановленный по формуле (3.44)				нарушения фактический $\bar{Q}_H$			
				$\bar{Q}_t$				м³/с			
год	зима	лето	год	зима	лето	год	зима	лето	год	зима	лето
0,92	0,80	0,81	0,071	0,046	0,052	0,030	0,036	0,032	-0,041	-0,020	-39
0,95	0,85	0,81	0,49	0,35	0,36	0,19	0,23	0,17	-0,30	-0,19	-53

Влияние комплекса водохозяйственных мероприятий											
1,17	1,29	1,10	5,40	5,6	5,3	4,18	4,49	3,86	-1,22	-1,11	-27
1,17	1,29	1,10	33,3	32,0	34,0	31,4	28,2	34,7	-1,9	0,7	-2
1,17	1,29	1,10	100	112	104	102	99,1	103	2,0	-3,8	-1
1,17	1,29	1,10	125	133	132	120	120	120	-5,0	-12,9	-9
1,07	1,15	1,04	169	175	185	203	185	216	34	-13,0	17
1,37	1,43	1,05	1,83	1,6	1,3	2,40	2,47	2,34	0,57	10,0	6
1,10	1,13	1,04	3,6	3,5	3,6	6,80	6,60	6,93	3,2	0,80	80
1,17	1,29	1,10	9,5	9,6	9,1	15,2	14,5	16,0	5,7	3,1	50
1,08	1,27	1,15	2,06	(2,13)	2,20	2,24	2,21	(2,42)	0,18	3,4	89
1,20	1,31	1,07	8,85	8,70	8,37	9,85	12,0	12,1	1,00	6,9	94
1,17	1,18	1,04	15,0	14,6	15,0	33,7	28,9	37,5	18,2	0,22	10
1,18	1,33	1,10	0,25	0,28	0,26	(0,21)	0,19	0,15	(-0,04)	3,73	44
1,23	1,35	1,10	0,35	0,43	0,41	(0,30)	0,28	0,20	(-0,05)	22,5	150
1,07	1,12	1,05	2,81	2,82	3,10	5,23	5,85	4,52	-0,21	11	38
1,36	1,41	1,08	3,59	3,08	2,74	4,46	3,93	4,73	(-14)	16	98
1,17	1,16	1,00	15,1	12,4	12,4	18,0	15,0	15,1	-0,11	86	42
0,90	0,88	0,77	16,8	13,6	13,8	17,0	15,5	14,7	-0,15	1,42	51
1,17	1,16	1,00	26,2	24,8	35,8	28,3	27,4	35,8	0,85	1,99	46
1,17	1,16	1,00	45,6	43,4	63,8	46,8	43,7	63,0	2,7	2,7	73
									0,9	1,9	22
									0,2	0,9	7
									0,8	0	0
									1,2	-0,8	-1

Таблица 4.14
Сравнение средних за период нарушений годовых значений речного стока, восстановленных разными методами, м³/с

Характеристика	п. Москва — п. Макарово	п. Москва — п. Звенигород	р. Клязьма — г. Щелково	р. Клязьма — г. Павловский Посад	р. Клязьма — г. Владимир	р. Поля — пос. Криван- дино	р. Осколец — г. Старый Оскол	р. Чернь — с. Останово
Общий сток								
Q_1 (август)	9,6	29,8	6,8	—	—	2,33	1,74	2,75
Q_2 (март)	8,6	29,3	6,6	37,0	78,0	2,36	1,69	2,0
Q_3	8,6	30,3	6,4	41,7	90,0	2,46	1,95	2,15
$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_2} \cdot 100\%$	12	2	3	—	—	—1	3	38
$\frac{Q_3 - Q_2}{Q_2} \cdot 100\%$	0	3	—3	13	15	4	15	8
Подземный сток								
Q_1	2,0	9,7	—	—	—	0,34	0,64	—
Q_2	1,9	9,7	4,1	16,3	25,8	0,36	0,62	0,43
Q_3	1,7	8,6	3,5	12,9	26,8	0,38	0,59	0,43
$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_2} \cdot 100\%$	5	0	—	—	—	—6	3	—
$\frac{Q_3 - Q_2}{Q_2} \cdot 100\%$	—11	—11	—15	—21	4	6	—5	0

Примечание. Q_1 , Q_2 , Q_3 — восстановленные соответственно по формулам (3.9), (3.44) и (3.64).

г. Звенигорода), Руза, Озерна, Истра, Клязьма, Уча, Упа, Воронеж и других, где есть водохранилища.

4. Значительны размеры нарушений стока за счет переброски части воды из р. Волги в реки Клязьму, Учу, Язу и Москву. Так, например, общий годовой сток р. Москвы у Перервинского гидроузла (г. Москва) увеличился в среднем за период нарушений на 21 %, а меженный — на 100—120 %. Увеличение стока за счет переброски волжских вод отмечается не только в самой р. Москве, но и в р. Оке до с. Половского, хотя доля его в более высоких расходах воды заметно уменьшается.

Значительный интерес представляет оценка искусственных изменений стока за каждый отдельный год периода нарушений. Помимо данных, полученных различными методами и приведенных выше, такая оценка выполнена также по формулам (3.43)—(3.46). Результаты расчета приведены в табл. 4.15.

Анализ средних годовых расходов воды, восстановленных различными методами за каждый год периода нарушений, позволяет выбрать наиболее простой и достаточно надежный способ расчета нарушений речного стока. Например, из табл. 4.14 видно, что значения стока, восстановленные по методу множественной линейной корреляции и формуле (3.44), различаются между собой незначительно. Однако расчеты по формуле (3.44) более просты и менее трудоемки, чем по формулам множественной линейной корреляции. К тому же по формуле (3.44) можно выполнять массовые расчеты для всех рек с нарушенным режимом стока, в то время как по формулам множественной линейной корреляции можно определять нарушения лишь для пунктов, имеющих совместные с пунктами-аналогами ряды наблюдений в естественном периоде продолжительностью от 5 лет и более.

Сравнение значений стока, восстановленных при помощи формулы (3.44) и уравнений баланса русловых вод (формулы (3.63) и (3.64)), дает также неплохие результаты, хотя, как видно из табл. 4.15, различия между ними заметно больше. Кроме того, не всюду еще ведется учет составляющих, входящих в уравнения (3.63) и (3.64), а если они и ведутся, то часто со значительными погрешностями.

По некоторым пунктам, приведенным в табл. 4.16, имеются значения общего речного стока, восстановленные по годам в УГКС [144] и В. Г. Андреяновым и Г. С. Семеновой [5], что позволило сравнить их со значениями стока, восстановленными Б. С. Устюжаниным [183]. В основном расхождения между восстановленными значениями стока невелики, однако в ряде случаев достигают 20—40 % (см. табл. 4.15). Восстановленные значения стока, заимствованные из работ [5, 144], как правило, выше значений, приведенных Устюжаниным. Причина таких расхождений, по-видимому, в том, что авторами указанных работ не учитывались, например, сбросы в реку после использования

Таблица 4.15

Сравнительная оценка средних годовых значений речного стока, восстановленных по формуле (3.44) и методом руслового водного баланса [5], м³/с

Характеристика	Год												
	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962
р. Клязьма — г. Павловский Посад													
Q_1	24,0	29,0	37,0	38,0	24,0	34,6	31,8	35,6	42,0	37,0	32,5	31,6	54,1
Q_2	37,6	36,9	43,1	44,6	27,2	49,7	40,4	38,7	39,9	41,7	—	—	—
$\frac{Q_2 - Q_1}{Q_1} \cdot 100\%$	53	27	16	17	13	44	27	9	-5	13	—	—	—
р. Клязьма — г. Владимир													
Q_1	67,6	82,5	105	108	68,0	102	90,0	98,0	102	78	—	—	—
Q_2	80,6	85,3	107	118	66,5	140	111	88,0	88,2	92,6	—	—	—
$\frac{Q_2 - Q_1}{Q_1} \cdot 100\%$	19	3	2	9	-2	37	23	-10	-14	-17	—	—	—
р. Клязьма — г. Ковров													
Q_1	115	140	178	183	115	166	153	167	174	132	—	—	—
Q_2	137	130	167	185	103	225	227	166	158	175	—	—	—

Характеристика	Год												
	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962
$\frac{Q_2 - Q_1}{Q_1} \cdot 100\%$	19	-7	-6	1	-10	35	48	-1	-9	33	—	—	—
р. Истра — с. Павловская Слобода													
Q_1	8,7	10,6	13,4	13,8	8,7	12,6	11,6	12,6	18,2	10,0	11,7	11,3	19,0
Q_3	9,5	10,7	11,6	16,4	9,9	15,5	12,9	14,0	15,3	12,5	15,2	12,3	13,5
$\frac{Q_3 - Q_1}{Q_1} \cdot 100\%$	9	1	-13	19	13	23	11	11	-16	25	30	8	-29
р. Москва — Перервинский гидроузел													
Q_1	32	47,8	60,5	63,2	39,5	57,2	52,2	57,8	82,0	45,5	53,0	52	87,3
Q_3	52	48	56	72	44	64	52	59	69	50	69	54	78
$\frac{Q_3 - Q_1}{Q_1} \cdot 100\%$	63	0	-7	14	11	11	0	2	-18	10	30	4	-11

Примечание. Q_1 — расход воды, восстановленный по формуле (3.44); Q_2 — восстановленные расходы воды [5]; Q_3 — по ОГХ, т. 10.

Таблица 4.16
Сравнительная оценка водных ресурсов отдельных речных бассейнов территории МАБ, вычисленных с учетом и без учета нарушений речного стока, млн. м³

Река — пункт	Площадь водосбора, км²	Общий сток						Подземный					
		за 1968 г.						средний многолетний					
		с учетом на- рушений естественного	без учета нарушений	ошибка вы- числения в % от	с учетом на- рушений естественного	без учета нарушений	ошибка вы- числения в % от	с учетом на- рушений естественного	без учета нарушений	ошибка вы- числения в % от	с учетом на- рушений естественного	без учета нарушений	ошибка вы- числения в % от
Влияние эксплуатации подземных вод													
Пахра — д. Макарово	1760	372	302	-19	290	229	-21	76	59	-22	88	59	-35
Нара — д. Папино	971	196	159	-19	138	113	-18	40	35	-12	43	35	-19
Нерская — г. Куровское	612	117	101	-14	84	64	-24	21	18	-14	23	12	-49
Поля — пос. Кривандино	500	82	66	-20	—	—	—	17	6	-64	—	—	—
Бужа — д. Избище	1100	177	172	-3	132	121	-8	39	20	-49	40	10	-75
Воря — д. Мишнево	947	186	202	9	124	165	33	66	81	23	66	81	23
Влияние комплекса водохозяйственных мероприятий													
Москва — г. Звенигород	5 000	1020	990	-3	712	814	14	218	271	24	234	560	140
Москва — Перервинский гидроузел	8 850	1820	2060	13	1170	2090	79	400	1040	185	276	1820	560
Истра — с. Павловская Слобода	1 950	403	356	-12	249	305	22	83	151	82	86	167	94
Клязьма — г. Щелково	1 210	231	189	-18	82	176	115	83	136	64	79	170	90
Клязьма — г. Павлов-ский Посад	5 440	1020	990	-3	760	950	25	410	435	6	425	560	55
Клязьма — г. Владимир	15 200	2680	2490	-7	1900	2090	10	750	840	12	734	788	7

недренируемых подземных вод, фильтрация воды из водохранилищ в нижний бьеф плотин и перехват воды депрессионными воронками у соседних речных бассейнов.

В связи с тем что сток многих рек исследуемого района значительно преобразован различными хозяйственными мероприятиями, использование гидрологических характеристик по этим рекам для получения коэффициентов вариации и других

Таблица 4.17

Коэффициенты вариации C_v общего и подземного годового стока исследуемых рек за периоды естественного и нарушенного режима

Река — пункт	Общий сток			Подземный сток		
	за весь период наблюдений	за период с естественным режимом	за весь период с учетом нарушений (по восстановленным значениям)	за весь период наблюдений	за период с естественным режимом	за весь период с учетом нарушений (по восстановленным значениям)
Москва — д. Макарово	0,28	0,38	0,24	0,49	0,38	0,38
Москва — г. Звенигород	0,25	0,22	0,27	0,32	0,22	0,21
Москва — Перервинский гидроузел	0,26	—	0,26	0,32	—	0,24
Истра — с. Павловская Слобода	0,22	0,27	0,26	0,20	0,27	0,20
Пахра — д. Макарово	0,29	0,26	0,28	0,24	0,26	0,27
Нара — д. Папино	0,31	—	0,31	0,14	—	0,14
Ока — с. Половское	0,20	—	0,20	0,18	—	0,18
Клязьма — г. Павловский Посад	0,22	0,35	0,26	0,24	0,35	0,23
Клязьма — г. Владимир	0,25	0,41	0,27	0,29	0,41	0,27
Воря — д. Мишнево	0,22	—	0,27	0,15	—	0,15
Серая — д. Новинки	0,21	0,19	0,21	0,19	0,19	0,19
Нерская — г. Куровское	0,32	—	0,31	0,32	—	0,14
Цна — д. Старый Спас	0,27	—	0,25	0,24	—	0,24
Бужа — д. Избище	0,42	—	0,38	0,45	—	0,15
Поль — д. Ерликс	0,18	—	0,18	0,34	—	0,34
Понарь — д. Аксеново	0,59	—	0,24	0,19	—	0,19
Поля — пос. Кривандино	0,47	—	0,32	0,74	—	0,49

расчетных параметров по общему ряду наблюдений не является правомочным и может приводить к большим погрешностям.

Для оценки влияния отдельных хозяйственных мероприятий на многолетнюю изменчивость стока рек были подсчитаны коэффициенты вариации общего стока и подземного притока некоторых рек с нарушенным водным режимом. Вычисления производились за периоды наблюдений от 15 лет и более по данным общего ряда, включая годы нарушений стока, и по данным естественных рядов, включая восстановленные значения стока. Сравнение коэффициентов вариации, вычисленных по этим рядам и приведенных в табл. 4.17, показывает, что естественная изменчивость стока, обусловленная многолетней изменчивостью климатических факторов и его естественной зарегулированностью, испытывает значительное влияние различных водохозяйственных мероприятий. Из них особенно большое влияние оказывает эксплуатация подземных вод, усиливающая изменчивость речного стока.

Как видно из табл. 4.17, вариация стока рек, бассейны которых находятся в пределах развития депрессионных воронок, в 1,2—2,5 раза выше его естественных значений. Особенно значительным оказывается влияние эксплуатации подземных вод на изменчивость стока маловодных периодов (подземный сток) и маловодных лет.

Коэффициенты вариации стока крупных рек (Ока, Москва, Клязьма) в результате влияния на сток различных водохозяйственных мероприятий изменяются в небольших пределах. Тем не менее при расчете коэффициента C_v по естественному ряду, имеющему небольшую продолжительность наблюдений, он может сильно отличаться от действительных его значений.

4.2.2. Оценка точности восстановления естественных значений стока, преобразованного эксплуатацией подземных вод и другими водохозяйственными мероприятиями

Как видно из приводимых в п. 4.2.1 материалов, восстановление естественных значений преобразованного стока выполнено различными методами, из которых применительно ко всем рекам с нарушенным водным режимом использован метод, основанный на районной зависимости $Q=f(F)$. Полученные по этому методу результаты сравнивались с результатами восстановления естественных значений преобразованного стока, вычисленными другими методами (см. табл. 4.14). Сравнение показывает, что больших расхождений в значениях стока, восстановленного различными методами, не обнаруживается. Поэтому оценка точности восстановленных значений преобразованного стока исследуемых рек и степени нарушений их водного

режима дается на примере использования районных зависимостей вида (3.43) и (3.44). Поскольку входящие в эти формулы величины Q_T и $\bar{K}_t$ связаны между собой, точность восстановленных по ним значений стока оценивается по закону случайных ошибок (см. формулы (3.47) — (3.49)).

Расчет средней квадратической погрешности Q_T и $\bar{K}_t$ выполнен по данным 14 рек Московского артезианского бассейна (табл. 4.18) для годовых значений общего и подземного стока. Абсолютная погрешность определения Q_T по этим рекам составила для общего стока $6,4 \text{ м}^3/\text{с}$, а для подземного стока в реки — $1,39 \text{ м}^3/\text{с}$.

Абсолютная средняя квадратическая погрешность определения по данным о коэффициентах водности $\bar{K}_t$ отдельных рек аналогов для всех видов стока принята равной 0,07.

Коэффициент корреляции между средним многолетним расчетным расходом воды Q_T и коэффициентом водности $\bar{K}_t$ определен для всех изучаемых пунктов по формуле (3.16). Для годовых значений общего речного стока значение $r_{Q_T, \bar{K}_t}$ равно — 0,065, для подземного стока в реки равно — 0,135, т. е. практически связь между Q_T и $\bar{K}_t$ отсутствует и величину $2r_{Q_T, \bar{K}_t} \sigma_{Q_T} \sigma_{\bar{K}_t}$ в формуле (3.47) можно не учитывать.

Подставляя найденные величины Q_T , $\bar{K}_t$ и $r_{Q_T, \bar{K}_t}$ в формулу (3.47), определяем, что абсолютная средняя квадратическая погрешность годовых значений средних многолетних естественных расходов воды, восстановленных по формуле (3.44), равна для общего стока $6,3 \text{ м}^3/\text{с}$ и для подземного стока в реки — $1,38 \text{ м}^3/\text{с}$.

Относительная средняя квадратическая погрешность восстановленного расхода воды определена по формуле

$$\sigma_{Q_T} = \frac{\sigma_{Q_T}}{Q_T} \cdot 100. \quad (4.2)$$

Значение σ_{Q_T} составило для общего годового стока 8,7 %, для подземного стока в реки 6,7 %.

Точность определения средних многолетних значений стока и восстановления естественных расходов воды для рек, нарушенных эксплуатацией подземных вод и другими хозяйственными мероприятиями, оценивалась также независимым путем по рекам с естественным (или близким к нему) водным режимом. В этих случаях норма стока определялась по формуле (3.43). Затем расчетные значения сравнивались с фактическими, наблюдаемыми за принятый период значениями стока.

Таблица 4.18
Точность определения нормы стока рек центральной части Московского артезианского бассейна

Река — пункт	F км²	Число лет наблюдений в естественном режиме	Головой сток				Подземный сток			
			м³/с		отклонение		м³/с		отклонение	
			по формуле (3.43)	по ряду QT, набл	QT, расч	от QT, набл	по формуле (3.43)	по ряду QT, набл	QT, расч	от QT, набл
			QT, расч	по ряду QT, набл	м³/с	%	QT, расч	по ряду QT, набл	м³/с	%
Бассейны рек Москвы и Оки										
Москва — д. Макарово	1 420	31	9,6	10,1	-0,5	-5	1,90	1,56	0,34	22
Москва — г. Звенигород	5 000	36	32,5	32,6	-0,1	0	6,92	7,55	-0,63	-9
Лусьянка — д. Черники	170	16	1,20	1,23	-0,03	-2	0,21	0,18	0,03	14
Колодь — с. Бородино	266	6	1,80	1,80	0,0	0	0,33	0,25	0,08	25
Руза — г. Руза	1 930	29	12,9	13,1	-0,2	-2	2,63	2,80	0,17	6
Истра — с. Павловская Слобода	1 950	10	12,9	13,3	-0,4	-3	2,63	2,90	0,27	9
Ока — г. Калуга	54 900	66	318	297	21	7	85,1	83,5	1,60	2
Ока — г. Кашира	68 700	26	392	385	7	2	107	104	3,0	3
Протва — с. Спас-Загорье	3 640	32	21,4	19,8	1,6	8	5,01	4,77	0,24	5
Бассейн р. Клязьмы										
Клязьма — г. Павловский Посад	5 440	17	32,4	30,5	1,9	6	13,0	12,3	0,7	6
Клязьма — г. Владимир	15 200	19	85,2	79,0	6,2	8	22,4	21,9	0,5	2
Клязьма — г. Ковров	25 800	19	145	143	2,0	1	39,0	42,5	3,5	8
Реки Мещерской низменности										
Гусь — д. Милошово	1 560	14	7,8	7,3	0,5	7	1,77	1,48	0,29	20
Нарма — д. Шеенки	795	14	4,16	3,96	0,2	5	0,87	0,86	-0,01	-1

Примечание. По гидротворам р. Клязьмы даны площади водосборов до строительства канала им. Москвы и системы водохранилищ.

Примечание. По гидротворам р. Клязьмы даны площади водосборов до строительства канала им. Москвы и системы водохранилищ.

Результаты сравнения нормы стока, вычисленной по зависимости $Q = f(F)$ и по ряду непосредственных наблюдений, представлены в табл. 4.18. Как следует из таблицы, погрешность определений средних многолетних значений годового стока не превышает $\pm 8\%$; погрешность определения нормы подземного стока в реки более высока, но в среднем не превышает $\pm 10\%$. Отдельные отклонения значений, вычисленных по зависимости (3.43), от фактических, определенных по ряду непосредственных наблюдений, можно объяснить или коротким периодом наблюдений, не характеризующим средний многолетний сток, или влиянием водохозяйственных мероприятий, которое стало сказываться на речном стоке раньше, чем это принято в расчетах.

Точность восстановленных значений стока за период с нарушенным водным режимом рек также достаточно высока, о чем можно судить по данным табл. 4.19, приведенным в качестве примера для годовых величин. Ошибка восстановления расходов воды за период нарушения водного режима рек не превышает во всех приведенных случаях $\pm 8\%$.

Таблица 4.19

Точность восстановления естественных расходов воды за период нарушения водного режима рек центральной части МАБ

Река — пункт	F км ²	Период среднег	Средний расход воды, м ³ /с		Ошибка восстанов- ления	
			восстановлен- ный по фор- муле (3.44) Q _{в.с}	фактический	м ³ /с	в % от Q _{в.с}
Ока — г. Калуга	54 900	1935—70	305,0	284	21	7,4
Ока — г. Кашира	68 700	1935—70	376,0	362	14	3,9
Воря — с. Ильин- ский	888	1956—68	5,9	5,6	0,3	5,4
Ресса — д. Лазино	2 440	1957—68	14,9	14,2	0,7	4,9
Протва — с. Спас- Загорье	3 640	1949—67	21,1	20,0	1,1	5,5
Москва — д. Мака- рово	1 420	1943—59	9,6	10,4	0,8	7,7
Лусянка — д. Чер- ники	170	1955—70	1,2	1,23	0,03	2,4
Колочь — д. Боро- дино	266	1954—59	1,76	1,80	0,04	2,2
Клязьма — г. Ков- ров	25 800	1937—69	136,0	143,0	7,0	4,9
Серая — д. Новин- ки	293	1955—70	1,78	1,82	0,04	2,2

4.3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗАДАЧ

Количественная оценка влияния различных водохозяйственных мероприятий на водный режим речных бассейнов и восстановление естественных гидрологических характеристик являются необходимыми элементами гидрологического обоснования планомерного и рационального использования водных ресурсов и их охраны от истощения. Полученные результаты для рек территории КМА и МАБ позволили решить ряд важных в практическом и научно-методическом отношении задач. Из них наибольший интерес представляют:

- учет нарушений речного стока при оценке водных ресурсов;
- определение восполнения запасов подземных вод в районах крупных водопонижений по величине сокращения речного стока;
- прогноз изменений режима речного стока под влиянием различных водохозяйственных мероприятий.

4.3.1. Учет нарушений речного стока при оценке водных ресурсов

Основной характеристикой водных ресурсов территорий является средний многолетний расход воды, или норма стока. Под нормой стока понимается его среднее значение за многолетний период с неизменными физико-географическими условиями, относящимися к современной эпохе, и с одним уровнем хозяйственного освоения реки [45]. Для обоснованного определения нормы стока необходимо располагать достаточно продолжительными рядами наблюдений в отдельных гидрометрических створах при условии отсутствия водохозяйственных и других мероприятий в исследуемом речном бассейне, существенно искажающих условия формирования поверхностных и подземных вод.

Анализ материалов о стоке показывает, что в целом ряде случаев фактические наблюдаемые расходы воды в значительной мере искажены влиянием различных хозяйственных мероприятий. Поэтому использование данных непосредственных наблюдений без учета величины нарушений приводит к значительным погрешностям в определении нормы стока и, следовательно, водных ресурсов исследуемых территорий.

Для подтверждения этого вывода в табл. 4.16 показаны результаты расчета общих водных ресурсов и ресурсов подземных вод отдельных речных бассейнов, выполненного без учета и с учетом нарушений стока. Как видно из приводимой таблицы, разница в определении средних многолетних значений

общих водных ресурсов может достигать 15—20 %, а по ресурсам подземных вод 18,5 %; в отдельные годы объем стока, вычисленный без учета нарушений, может в 1,5—6,0 раз отличаться от его восстановленных значений. Необходимо подчерк-

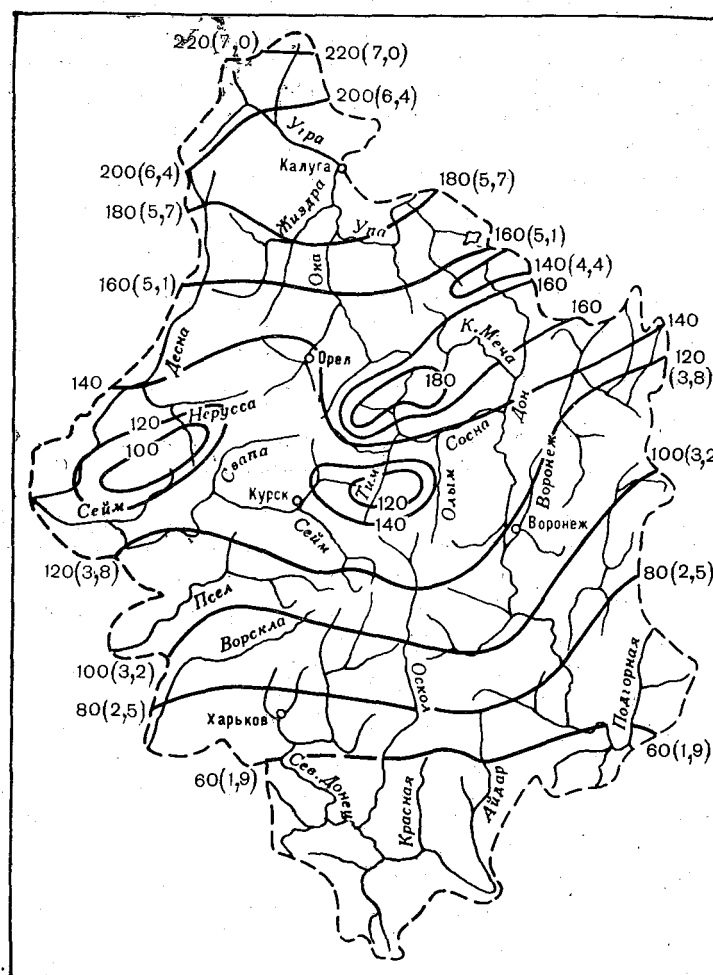


Рис. 30. Распределение общего речного стока на территории КМА, мм; л/(с·км²).

нуть также, что преобразованные значения стока не могут быть использованы для картирования, потому что при нанесении на карты они могут существенно исказить территориальное распределение естественных водных ресурсов.

Учитывая большое практическое значение данных о водных ресурсах исследуемых территорий, в качестве примера на рис. 30 и 31 приведены карты распределения средних многолетних годовых значений общего и подземного естественного

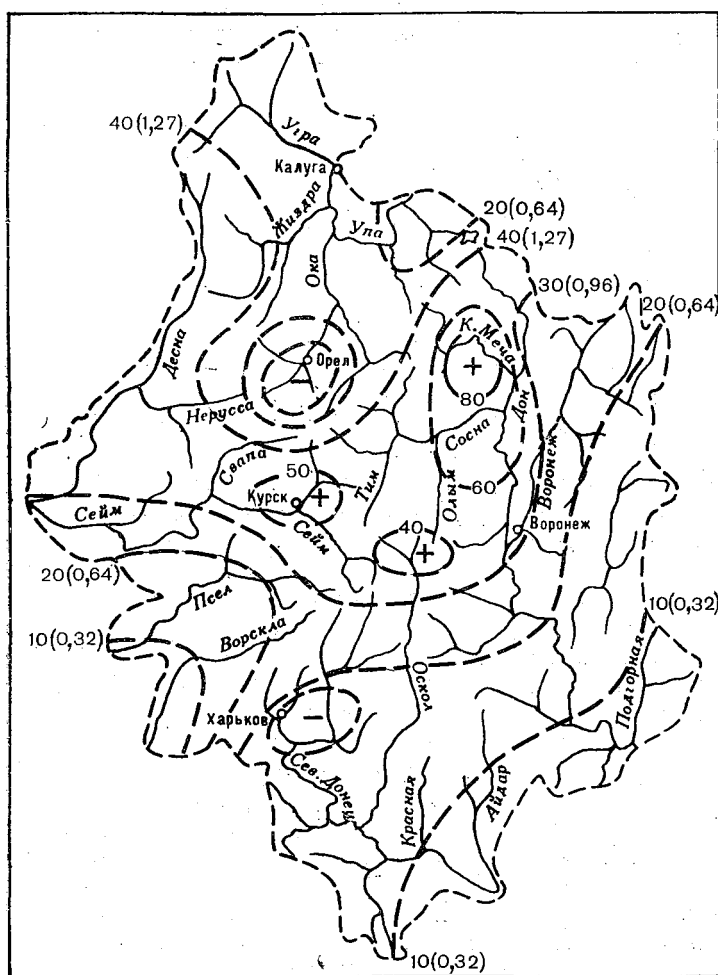


Рис. 31. Распределение подземного стока на территории КМА, мм; л/(с · км²).

стока, построение которых выполнено нами с учетом нарушений стока. Представленные на картах данные можно использовать для характеристики естественного стока неизученных рек и оценки водных ресурсов исследуемых районов. Для

Таблица 4.20

**Естественные водные ресурсы бассейна основных рек центральной части
МАН и Московской области**

Район	Площадь водосбора, км ²	Объем стока, млн. м ³ /год		Модуль стока, л/(с·км ²)	
		общий сток	подзем- ный сток	общий сток	подземный сток
Бассейн р. Москвы	17 600	3077	800	5,6	1,4
Бассейн р. Оки (от г. Каширы до с. По- ловского)	30 300	4992	1215	5,2	1,3
Бассейн р. Клязьмы (до г. Владимира)	15 200	2577	833	5,4	1,7
Бассейн р. Московской обл.	44 000	7848	1933	5,3	1,3

примера в табл. 4.20 приведены результаты расчета естественных общих ресурсов и ресурсов подземных вод, выполненного по данным этих карт для бассейнов основных рек центральной части МАН.

Для характеристики обеспеченности Московской области естественными водными ресурсами в табл. 4.21 приведены данные о водных ресурсах по ее отдельным районам перспективного водопотребления и их потребность в воде на 1980 и 2000 гг.

Как видно из приведенных данных, лишь в 15 районах из 27 естественные ресурсы подземных вод обеспечивают потребности в воде на 1980—1985 гг. На 2000 г. потребность в воде за счет естественных ресурсов подземных вод обеспечивается лишь в шести районах. При этом дефицит в ресурсах подземных вод в целом по Московской области в 1980—1985 гг. составит 452 млн. м³/год, а в 2000 г. — 1931 млн. м³/год.

Из анализа данных этой таблицы следует, что для обеспечения водой населения и отраслей народного хозяйства Московской области необходима разведка новых источников водоснабжения и различные мероприятия по более рациональному использованию имеющихся водных ресурсов. Наиболее важными из них являются magazинирование поверхностных вод, устройство инфильтрационных поверхностных водохранилищ для восполнения запасов подземных вод и переброска части воды из соседних речных бассейнов.

Характеристика естественных общих водных ресурсов и ресурсов подземных вод по отдельным административным областям исследуемой территории приведена в табл. 4.22.

Как следует из данных табл. 4.22, лучше всего обеспечены водными ресурсами Калининская, Костромская и Смоленская области. В среднем по территории доля подземных вод в общем

Таблица 4.21

Естественные водные ресурсы и потребность в воде отдельных районов перспективного водопотребления Московской области, млн. м³/год

Район	Площадь водосбора, км ²	Естественные водные ресурсы		Потребность в воде		Обеспеченность ресурсами подземных вод	
		общие	подземных вод	1980—1985 гг.	2000 г.	1980—1985 гг.	2000 г.
г. Москва	1 460	262	101	—	—	—	—
Дмитровский, Талдомский, Загорский	5 050	983	193	148	157	45	36
Клинский	1 670	328	54	38	88	16	—34
Щелковский	1 910	345	140	220	315	—80	—175
Солнечногорский	1 240	236	70	57	157	13	—87
Волоколамский, Шаховский, Лотошинский	1 420	289	48	22	50	26	—2
Истринский	1 130	223	53	38	173	15	—120
Ногинский	1 630	274	108	164	227	—56	—119
Орехово-Зуевский	1 780	294	90	92	110	—2	—20
Шатурский	2 660	419	90	25	57	65	33
Воскресенский, Егорьевский	2 350	375	89	101	142	—12	—53
Раменский	1 620	266	92	204	330	—112	—228
Рузский	1 130	232	44	16	57	28	—13
Звенигород	1 115	213	62	145	254	—83	—192
Можайский	2 510	515	99	25	63	74	36
Наро-Фоминский	2 260	430	113	41	60	72	53
Подольский	1 760	302	95	151	240	—56	—145
Серпуховский	2 100	340	91	82	176	9	—85
Ступинский	2 300	374	78	82	145	—4	—67
Коломенский	1 630	258	51	74	274	—23	—223
Луховицкий	1 240	185	39	22	57	17	—18
Зарайский	910	135	29	19	220	10	—191
Балашихинский	151	26	11	38	63	—27	—52
Реутов	158	27	11	—	—	—	—
Серебряно-Прудский	820	123	26	63	25	20	1
Шаховский	1 050	214	33	6,3	10	27	23
Лотошинский	880	180	28	6,3	135	22	—107
Всего	43 934	7848	1933	1825	3685	7	—1749

речном стоке составляет 25—30 %. Наиболее значительна разгрузка подземных вод в верховьях Дона и Красивой Мечи, а также в междуречье Сейма, Оскола и Северского Донца. Здесь речные водосборы интенсивно расчленены гидрографической сетью и сложены весьма водообильными породами. Максимальная доля подземного стока в реки на этих участках достигает 40—50 %.

Таблица 4.22

Естественные водные ресурсы рек и ресурсы подземных вод зоны дренирования речной сетью центра ЕТС

Административная область	Площадь области, тыс. км ²	Средние многолетние водные ресурсы						Ресурсы подземных вод 95 %-ной обеспеченности		
		объем стока, млн. м ³		расход воды, м ³ /с		модуль стока, л/(с·км ²)		объем, млн. м ³	расход воды, м ³ /с	модуль стока, л/(с·км ²)
		общий	в т. ч. подземный	общий	в т. ч. подземный	общий	в т. ч. подземный			
Московская	47,0	8 614	2 263	274	72,0	5,8	1,5	1 607	51,0	1,1
Владимирская	29,0	4 770	1 406	151	44,6	5,2	1,5	1 097	34,8	1,2
Ярославская	32,8 *	7 350	1 366	233	43,4	7,1	1,3	732	23,2	0,7
Калининская	84,1	20 191	5 228	640	166,0	7,6	2,0	2 578	81,8	1,0
Костромская	60,1	14 264	3 225	452	102,4	7,5	1,7	2 138	67,9	1,1
Ивановская	23,9	4 164	1 509	132	47,9	5,5	2,0	958	30,4	1,3
Смоленская	49,8	10 219	2 325	324	73,8	6,5	1,5	1 466	46,5	1,0
Брянская	23,8 **	4 080	1 023	129	32,5	5,4	1,4	606	19,2	0,8
Орловская	24,7	3 521	1 114	112	35,3	4,5	1,4	761	24,2	1,0
Калужская	29,9	5 450	1 400	173	44,4	5,8	1,5	1 150	36,5	0,9
Тульская	25,7	4 040	1 343	128	42,6	5,0	1,7	944	30,0	1,2
Рязанская	39,6	5 600	1 321	178	42,0	4,5	1,1	797	25,3	0,6
Липецкая	24,1	2 937	1 006	93	31,9	3,9	1,3	770	24,4	1,0
Вся территория	498,1	95 200	24 112	3019	778,8	6,1	1,5	15 604	494,0	1,0

* Площадь Рыбинского водохранилища 3,6 тыс. км².

** Частично в пределах территории.

Примечание. Расчет выполнен Н. А. Болдыревой (ГГИ).

4.3.2. Определение восполнения запасов подземных вод в районах крупных водопонижений

Определение восполнения запасов подземных вод в районах крупных водопонижений представляет важную задачу современной гидрогеологии. Эта задача может быть решена путем расчета по формулам гидродинамики, моделированием процессов взаимодействия поверхностных и подземных вод или путем проведения опытных откачек подземных вод. Все перечисленные способы весьма трудоемки и требуют обширных гидрогеологических данных.

Гидрологические расчеты, выполненные на основе использования многолетних и эпизодических наблюдений за стоком рек в районах интенсивной эксплуатации подземных вод, дают возможность оценить восполнение запасов подземных вод более простым способом — по величине сокращения речного стока в пределах развития депрессионной воронки.

В основу оценки положен анализ связей величин сокращения речного стока и отбора подземных вод, формирующего депрессионную воронку вокруг водозаборов. Более надежной является связь между величинами сокращения стока за период устойчивой межени (подземный сток) и отбора подземных вод (см. рис. 27).

Из этого рисунка следует, что в условиях длительной эксплуатации подземных вод сокращение речного стока стремится к своему пределу, обусловленному максимальной инфильтрационной способностью речного водосбора в зоне развития депрессионной воронки.

Динамика инфильтрационного питания подземных вод в зоне крупных водопонижений хорошо видна также из графиков связи интенсивности отбора и скорости снижения уровня подземных вод эксплуатируемого водоносного горизонта, приведенных в качестве примера на рис. 19.

Совместный анализ гидрологических и гидрогеологических данных показывает, что в условиях относительно стабильного положения депрессионной воронки в речном бассейне при длительной эксплуатации систем водозаборов в постоянном режиме общее сокращение стока приближается к величине отбора подземных вод. Это подтверждает вывод Е. Л. Минкина [139] о том, что ущерб речному стоку возрастает с увеличением продолжительности эксплуатации подземных вод, приближаясь к предельным значениям, в большинстве случаев соответствующим величине отбора подземных вод. Следовательно, сокращение речного стока в районах влияния крупных водопонижений является показателем восполнения запасов подземных вод.

Для расчета величины восполнения запасов подземных вод в районах крупных водопонижений по гидрологическим данным предлагается простая формула

$$Q_{в.д} = \frac{M_d}{1000} F_d T, \quad (4.3)$$

где $Q_{в.д}$ — величина восполнения запасов подземных вод эксплуатируемого водоносного горизонта, м³; M_d — модуль инфильтрационного питания подземных вод в пределах площади депрессионной воронки, л/(с·км²); F_d — общая площадь депрессионной воронки, км²; T — расчетный период, с.

Модуль инфильтрационного питания определяется по величине сокращения стока и площади депрессионной воронки водосбора исследуемой реки $F_{д1}$, т. е. $M_d = M_{ср} \frac{F}{F_{д1}}$.

Для расчета модуля инфильтрационного питания могут быть использованы многолетние или эпизодические данные о сокращении подземного стока в реки как осредненные за весь период его нарушений, так и за каждый год наблюдений.

В случаях развития депрессионной воронки в пределах всего исследуемого речного водосбора, т. е. когда $F_d = F_{д1}$, модуль инфильтрационного питания равен модулю потерь речного стока, что характерно для условий длительного и постоянного по величине отбора подземных вод.

Примером оценки восполнения запасов подземных вод в районе значительных водопонижений по величине сокращения речного стока может служить расчет притока поверхностных и подземных вод к водопонижительным и дренажным сооружениям в бассейне р. Осколец для полного осушения месторождений железных руд.

В результате гидрологических исследований установлено, что общее сокращение стока р. Осколец на площади водосбора в 494 км² в районе Лебединского и Стойленского карьеров в 1966 г. достигло 1441 л/с, или 2,92 л/(с·км²). В пересчете площадь депрессионной воронки в пределах площади водосбора 292 км² модуль инфильтрационного питания подземных вод составил

$$M_d = 2,92 \frac{494}{292} = 4,94 \text{ л/(с} \cdot \text{км}^2\text{)}.$$

Площадь всей депрессионной воронки в 1966 г., по материалам гидрорежимных наблюдений [154], была равна 416 км², и ее влияние распространилось по эксплуатируемым водоносным горизонтам на соседние водосборы Оскола, Стужени, Чуфички и других водотоков.

Подставляя найденные значения F_d и M_d при $T=1$ с в формулу (4.3), получаем общий приток речных и подземных вод

к водопонижительным системам карьеров и к водозаборам г. Губкина:

$$Q_{в. д} = \frac{4,94}{1000} \cdot 416 \cdot 1 = 2,055 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По данным об откачках и потреблении воды этот фактический водоприток в среднем за 1966 г. составил 2,131 м³/с, что всего на 76 л/с (4 %) больше расчетного значения водопритока. Из общего фактического водопритока в Лебединский карьер поступало 1254 л/с, в Стойленский карьер 385 л/с и к водозаборам г. Губкина 492 л/с.

В условиях относительно установившегося режима эксплуатации водопонижительно-дренажных систем и водозаборов, наблюдавшегося в 1966 г., общий водоприток формировался за счет вод, профильтровавшихся в депрессионную воронку из р. Осколец в размере 925 л/с (43 %), подземных вод, разгружавшихся до разработки месторождений в р. Осколец в размере 516 л/с (24 %), и вод, перехваченных депрессионной воронкой в пределах соседних речных бассейнов в размере 612 л/с (29 %).

Незначительное расхождение расчетных и фактических значений общего водопритока можно объяснить ошибками расчета или тем, что в фактическом водопритоке учитываются глубокие подземные воды, не дренируемые реками в естественных условиях.

При последующей эксплуатации месторождений доля подземных вод глубоких водоносных горизонтов в общем водопритоке должна возрастать. Поэтому ошибка расчета общего водопритока в карьеры и к водозаборам по величине сокращения речного стока также возрастет.

Примером оценки восполнения запасов подземных вод в районе значительных водопонижений по сокращению стока рек может служить расчет притока воды к водозаборам, расположенным в бассейне р. Поли.

Как показано выше, под влиянием длительного и интенсивного отбора подземных вод в бассейне р. Поли до пос. Кривандино ($F=500 \text{ км}^2$) произошло сокращение речного стока в период устойчивой межени (подземный сток) в среднем за многолетие на 250 л/с, или 0,50 л/(с·км²) (см. табл. 4.6).

Для указанного водосбора к 1969 г. при площади депрессионной воронки 424 км² модуль инфильтрационного питания составил

$$M_d = 0,50 \cdot \frac{500}{424} = 0,59 \text{ л/(с} \cdot \text{км}^2\text{)}.$$

Для всей площади депрессионной воронки, сформировавшейся к 1969 г. в бассейне р. Поли и соседних с нею рек и равной 2400 км², восполнение запасов подземных вод оценивается

122 000 м³/сут. Эта величина практически равна современному отбору подземных вод в бассейне р. Поли и согласуется с данными моделирования В. С. Плотникова (0,5 л/(с·км²), или 103 680 м³/сут) [154].

Следует отметить, что при моделировании на сетчатом электроинтеграторе условий взаимосвязи речных и подземных вод, расположенных в зоне «литологического окна» в междуречье Поли и Пра, для которого характерны высокие коэффициенты вертикальной фильтрации пород ($K_f = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м/сут), Плотников получает более высокие значения перетекания поверхностных вод и вод четвертично-мелового водоносного горизонта в депрессионную воронку. В пересчете на модуль величина этого перетекания составляет 1,05 л/(с·км²), что более чем в 1,5 раза превышает величину инфильтрационного питания, определенную для бассейна р. Поли по величине сокращения речного стока. Однако следует иметь в виду, что величина перетекания поверхностных вод в эксплуатируемые водоносные горизонты, полученная Плотниковым, характеризует самые благоприятные условия фильтрации воды только в пределах площади 100 км², где полностью размыты юрские глины, разделяющие поверхностные воды и воды каменноугольных водоносных горизонтов. Указанная выше величина инфильтрационного питания, полученная по гидрологическим данным [193], характеризует средние условия фильтрации воды в депрессионную воронку на площади 424 км².

На высокую фильтрационную способность юрских глин Мещерской низменности, обеспечивающую возможность основного питания эксплуатируемых водоносных горизонтов из поверхностных водных источников, указывают также Д. И. Ефремов, Н. А. Лебедева и Е. И. Авдошин [65]. По данным этих авторов, коэффициент вертикальной фильтрации юрских глин Мещерской низменности изменяется в пределах $6,5 \cdot 10^{-4} \div 6,5 \times 10^{-3}$ м³/сут.

Результаты расчета восполнения запасов подземных вод в районе действующего водозабора способом, изложенным выше, могут быть перенесены на район проектируемого водозабора, если последний по своим природным условиям аналогичен первому.

Необходимо отметить, что расчет модуля инфильтрационного питания может быть выполнен по данным натурных наблюдений за изменением объемов воды в озерах и водохранилищах в результате отбора подземных вод. Такие работы были проведены для бассейна р. Пра на Мещерской низменности и дали положительные результаты.

Данные о существующих и возможных нарушениях речного стока дают возможность оценить восполнение запасов подземных вод в пределах речного бассейна для рекомендаций по более рациональной работе водозабора.

4.3.3. Прогноз изменений речного стока под влиянием интенсивной эксплуатации подземных вод и других водохозяйственных мероприятий

Достоверность прогноза изменений речного стока под влиянием интенсивной эксплуатации подземных вод на перспективу зависит от надежности гидрологической и гидрогеологической информации для изучаемого водного объекта и возможности объективного установления связей между величиной нарушений стока рек и различными гидрогеологическими параметрами (площадь депрессионной воронки, скорость снижения уровня подземных вод и др.).

Целесообразно различать региональные (фоновые) прогнозы изменения речного стока, когда оцениваются изменения стока для обширной территории в пределах нескольких речных бассейнов, и локальные (местные) — для отдельных участков речных бассейнов.

Для региональных прогнозов используются натурные данные, обобщаемые на картах районирования территории по условиям влияния интенсивной эксплуатации подземных вод на речной сток. При этом незначительные нарушения стока рек, происходящие под влиянием других водохозяйственных мероприятий, не учитываются. При значительных размерах таких нарушений их можно выделить на картах в отдельные районы по каждому виду хозяйственной деятельности.

Участки речных бассейнов, в пределах которых ожидаются изменения водного режима, определяются при помощи графических связей, изображенных на рис. 15.

Методика прогноза региональных изменений речного стока под влиянием интенсивной эксплуатации подземных вод рассмотрена ниже на примере рек Московской области.

Заявленная потребность в воде на 1980 г. по отдельным административным районам Московской области превышает величину современного отбора подземных вод примерно в 3 раза (см. табл. 4.21). Если эта потребность в перспективе будет удовлетворяться из подземных водных источников, то значительное увеличение отбора подземных вод вызовет дальнейшее развитие депрессионных воронок в речных бассейнах центральной части ЕТС и преобразование их водного режима. Чтобы представить характер и размеры этого преобразования в перспективе, на основании многолетних данных о существующих нарушениях речного стока (см. табл. 4.11—4.13) выделены основные районы современного влияния интенсивной эксплуатации подземных вод и водохозяйственных мероприятий на общий речной сток и сток за период устойчивой межени. Результаты этого районирования, отражающие сокращение речного стока под влиянием существующих региональных депрессионных воронок (Московская и Мещерская) и его увеличение в отдельных

реках за счет сбросов в них недренируемых подземных вод, представлены на картах (рис. 32 и 33). На этих же картах выделены участки рек, где сток сокращается под влиянием регулирования водохранилищ и заборов воды из рек или увеличивается за счет переброски части воды из р. Волги и сработки

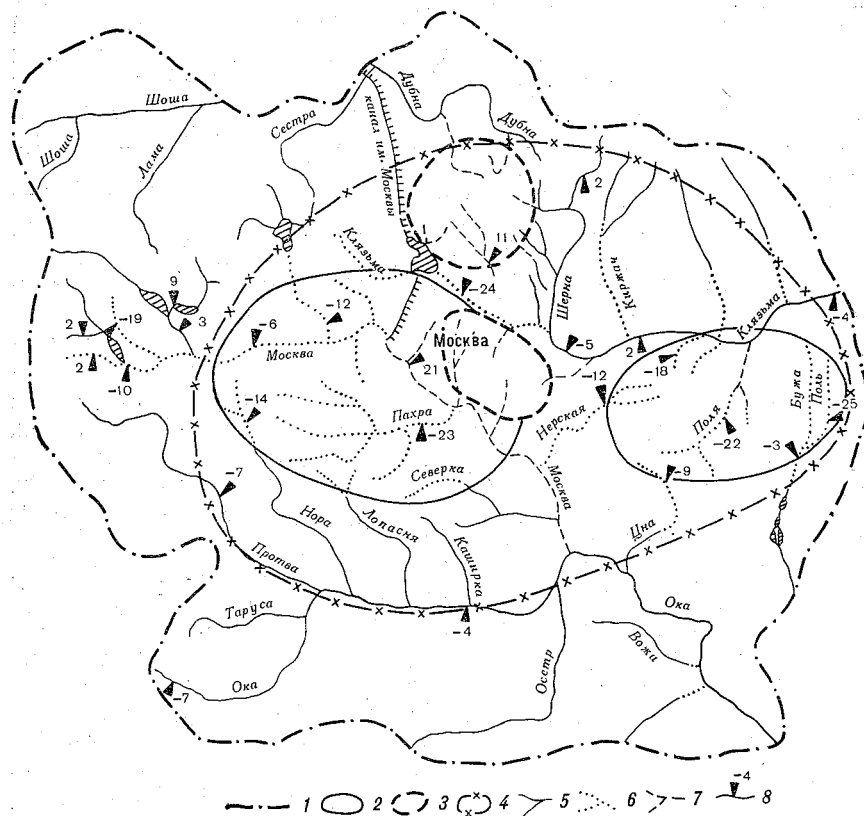


Рис. 32. Районирование территории МАН по степени влияния эксплуатации подземных вод на общий сток рек.

1 — граница района работ ГГИ в 1969—1972 гг.; 2 — районы сокращения речного стока в пределах влияния депрессионных воронок уровня подземных вод; 3 — районы увеличения речного стока за счет отведения в реки после использования недренируемых подземных вод; 4 — границы воронки уровня подземных вод на 1980—2000 гг.; 5 — реки, сток которых не изменился; 6 — реки, сток которых сокращается; 7 — реки, сток которых увеличивается; 8 — увеличение или сокращение стока в процентах от годового его значения в замыкающих створах УГКС.

водохранилищ. Даже в случаях увеличения стока на отдельных участках рек или в отдельных реках (в основном увеличение стока наблюдается в меженный период) за счет указанных выше мероприятий в районах крупных водопонижений происходит частичное сокращение русловых вод, связанное с потерями на питание эксплуатируемых водоносных горизонтов.

В пределах центральных частей депрессионных воронок наблюдается сокращение стока всех рек: общего годового на 15—25 %, стока за период межени на 40—60 %. На краевых участках депрессионных воронок, где влияние водопонижений проявляется, по-видимому, только в годы малой водности, сокращение речного стока незначительное и не превышает для общего речного стока 3—7 %, для подземного — 7—15 %.

Для новых районов водопонижений с учетом их гидрогеологических особенностей средние многолетние значения сокра-

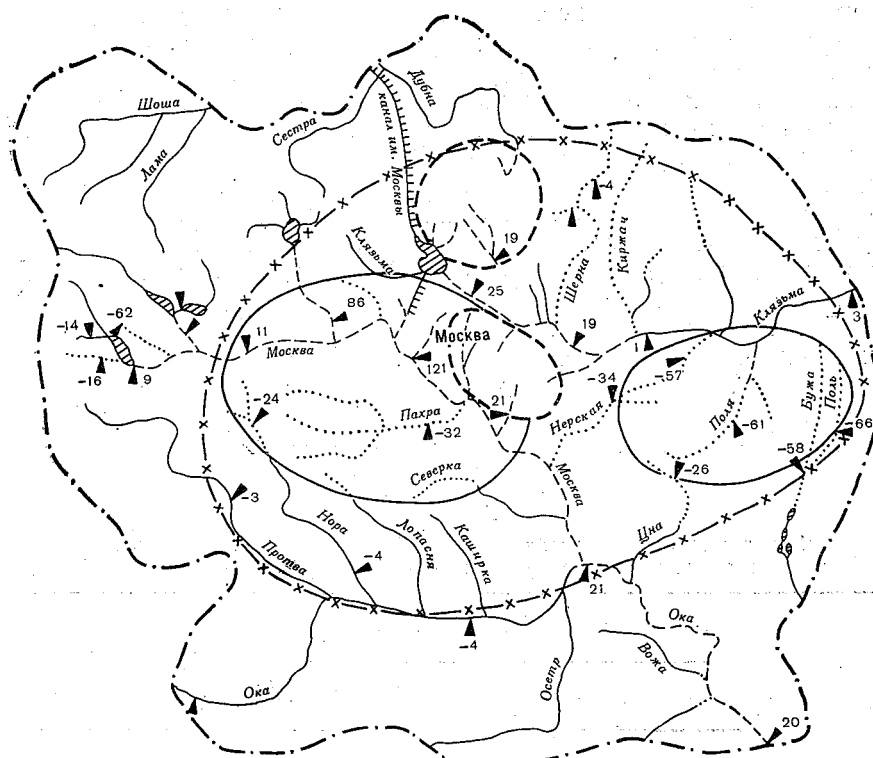


Рис. 33. Районирование территории МАБ по степени влияния интенсивной эксплуатации подземных вод на их сток в реки.

Усл. обозначения см. рис. 32.

щения речного стока приняты на будущее по существующим водозаборам-аналогам. При этом предполагается, что фильтрационные особенности речных водосборов в современных условиях и в будущем в пределах районов, одинаковых по гидрогеологическим условиям, будут характеризоваться в среднем многолетнем разрезе теми же показателями.

Прогнозная площадь депрессионных воронок определена по графикам связи $F_d = f(Q_{в.д.})$, приведенным на рис. 15, а также

путем моделирования на электроинтеграторах с использованием гидрогеологических материалов [154].

Примеры прогноза изменений речного стока, происходящих под влиянием интенсивной эксплуатации подземных вод на локальных участках речного бассейна, даны для случаев сокращения стока (р. Поля — пос. Кривандино) и увеличения (р. Осколец — г. Старый Оскол).

Прогноз изменений стока р. Поли производился по связи между значениями суммарного отбора подземных вод $Q_{в.д}$ и сокращения стока в период устойчивой межени $Q_{ф}$ по годам (см. табл. 4.6), приведенной на рис. 27. По размерам перспективного отбора подземных вод легко определить сокращение стока реки в пределах влияния депрессионной воронки. Так как в будущем не предполагается увеличение производительности подземных водозаборов, расположенных в бассейне р. Поли, то изменения ее стока, связанные с эксплуатацией этих водозаборов, останутся такими же, какими они наблюдаются в настоящее время. Площадь депрессионной воронки в перспективе при увеличении производительности водозаборов определяется по зависимости, приведенной на рис. 15.

Прогноз локального изменения стока р. Осколец под влиянием интенсивной эксплуатации подземных вод, связанной с разработкой месторождений железных руд, выполнен на основании данных об отборе подземных и речных вод, их сбросах после использования в реки, о фильтрационных потерях русло-

Таблица 4.23

Характеристика нарушений стока р. Осколец у г. Старый Оскол в результате разработки месторождений железных руд

Год	Отклонение стока от естественного				Размер нарушений стока	
	годового		за период устойчивой межени			
	л/с	мм	л/с	мм	л/с	мм
1955	—30	—2	190	12	94	6
1956	220	14	—15	—1	156	10
1957	190	12	170	11	186	12
1958	—105	—7	—170	—11	—332	—21
1959	170	11	94	6	—21	—1
1960	400	25	63	4	121	8
1961	595	38	345	22	305	20
1962	425	27	377	24	387	25
1963	(1100)	(70)	595	38	435	28
1964	800	51	780	50	682	44
1965	1060	68	930	59	984	63
1966	491	31	420	27	278	18

вых вод и сокращении подземного питания рек в пределах депрессионных воронок. Наличие этих данных позволяет произвести расчет размеров нарушений стока р. Осколец в замыкающем створе у г. Старый Оскол и увязать полученные значения за каждый год с величиной отклонений речного стока от его восстановленных естественных значений.

Построение связи по исходным величинам, приведенным в табл. 4.23, выполнено для двух характеристик: общего речного стока и стока за период устойчивой межени. Полученные связи (рис. 34) пригодны для прогнозирования изменений стока р. Осколец у г. Старый Оскол на перспективу с учетом различных водохозяйственных мероприятий.

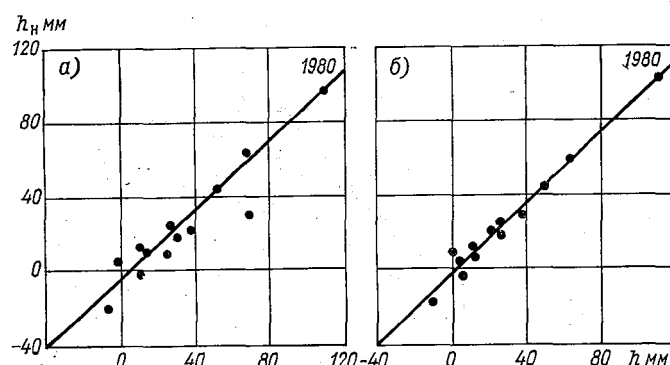


Рис. 34. Зависимость изменений годовых значений общего стока (а) и подземного притока (б) р. Осколец — г. Старый Оскол от результирующего влияния различных водохозяйственных мероприятий, осуществляемых на ее водосборе h_n .

Прогноз сбросов подземных вод осуществлен с учетом различных водохозяйственных вариантов по графической связи между отбором подземных вод и сбросом их в реку (рис. 35). При этом суммарный отбор подземных вод определяется или по данным перспективных планов проведения водохозяйственных работ в исследуемом речном бассейне, или по связи между суммарным отбором подземных вод в пределах водосбора и объемом осушенных пород (см. рис. 14).

Используя прогнозное положение депрессионной воронки для расчета объема осушенных пород в бассейне р. Осколец к 1980 г. и связи на рис. 14, получаем суммарный отбор подземных вод равным 3300—3400 л/с. Затем по связи на рис. 35 находим величину сбросов воды в р. Осколец, равную 3200—3250 л/с. Часть сбросных вод в естественных условиях не дренировалась рекой, поэтому за счет этих вод происходит увеличение ее водности.

Так как современное и прогнозное положения депрессионной воронки по длине реки практически одинаковы, то размеры

фильтрационных потерь и сокращения подземного питания на 1980 г. можно принять равными их современным значениям (см. табл. 4.7). Однако водный режим р. Осколец в будущем в значительной степени будет определяться также условиями отведения подземных вод, которые, как показывает анализ данных предшествующего периода, не оставались постоянными. Как видно из табл. 4.23, величина нарушений стока и его отклонений от естественных значений достигла максимума в 1965 г.,

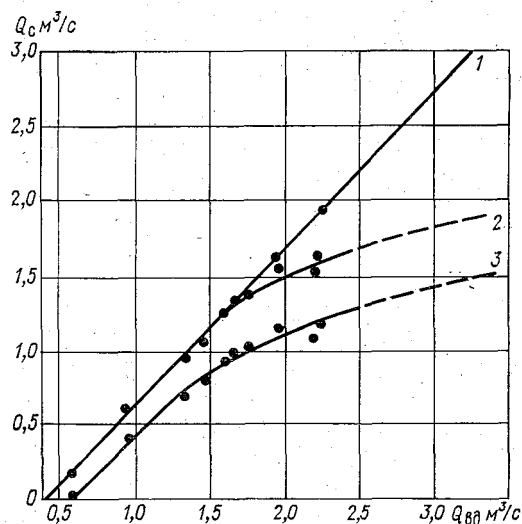


Рис. 35. Связь годовых значений отбора $Q_{вд}$ и сброса $Q_{с}$ подземных вод, осуществляемых в бассейне р. Осколец.

1 — суммарный сброс подземных вод в р. Осколец после их использования; 2 — частичное отведение использованных подземных вод Стойленского карьера за пределы бассейна р. Осколец; 3 — сброс в р. Осколец использованных подземных вод с Лебединского карьера.

затем в 1966 г. резко уменьшилась и водность реки стала более близкой к естественной. Причины уменьшения нарушений стока в 1966 г. были связаны с отведением части подземных вод, увеличивающих расходы воды в замыкающем створе, за пределы бассейна р. Осколец и увеличением безвозвратных потерь речного стока за счет более высокого использования подземных вод в оборотном водоснабжении карьеров. Если бы характер отведения подземных вод из карьеров, отмеченный для 1966 г., сохранился на будущее, тогда водность р. Осколец оставалась бы близкой к естественной. Но уже в последующие годы (1967—1970) использованные воды отводились в р. Осколец, причем в гораздо больших объемах из-за ввода в действие Южно-

Лебединского карьера. В табл. 4.24 приведены результаты прогноза изменений стока р. Осколец у г. Старый Оскол, выполненные с учетом различных вариантов отведения подземных вод в реки. Из таблицы видно, что в случаях отведения подземных вод в р. Осколец сток реки в замыкающем створе будет превышать его естественные значения, а в случаях отведения использованных вод за пределы речного бассейна — резко сократится. В последнем случае расход воды р. Осколец у г. Старый Оскол в 1980 г. будет меньше естественного на 894 л/с.

Таблица 4.24

**Прогноз изменений стока р. Осколец в связи с освоением
железорудных месторождений в районе г. Губкина**

Характеристика варианта	Размер нарушений		Отклонение стока от естественного			
			годового		за период устойчивой межени	
	л/с	мм	л/с	мм	л/с	мм
Объем депрессионной воронки 25 км ² ; все изъятые подземные воды сбрасываются в р. Осколец	1559	100	1790	114	1720	110
При тех же размерах воронки подземные воды Стойленского карьера отводятся в р. Чуфичку, т. е. сбрасываются за пределы бассейна р. Осколец	905	58	1063	68	1010	64
При тех же размерах воронки подземные воды Стойленского и Лебединского карьеров отводятся за пределы бассейна	—965	—62	—894	—57	—876	—56

Определенный интерес может представлять еще один вариант прогноза изменений стока р. Осколец при эксплуатации водозабора подземных вод в верховьях реки (район с. Кондаурово), распространении влияния депрессионной воронки на всю площадь ее бассейна и сбросах использованных вод в р. Осколец. В стоке реки произойдут следующие преобразования. Прежде всего прекратится естественное питание реки подземными водами в размере 620 л/с (среднее многолетнее значение). Фильтрационные потери речных вод по всей длине реки (45 км) будут составлять около 1200 л/с, в связи с чем на отдельных ее участках до мест сбросов русло реки большую часть года будет сухим. Ниже мест сбросов, особенно к устью, водность реки будет возрастать за счет рудничных вод, перехваченных депрессионной воронкой у соседних речных бассейнов и глубоких

водоносных горизонтов. Увеличение стока р. Осколец у г. Старый Оскол будет несколько выше значений, приведенных в первом варианте.

Следует указать, что с увеличением добычи железных руд и ростом г. Губкина в условиях развития депрессионной воронки будет наблюдаться увеличение суммарного притока подземных вод к водозаборным системам карьеров и города. К 1980 г. суммарный водоприток составит 3500—4000 л/с. Из них водоприток в Лебединский и Южно-Лебединский карьеры, по-видимому, будет равняться 2000 л/с, а в Стойленский и к водозаборах г. Губкина не будет превышать 1000 л/с в каждый. При этом приток подземных вод будет характеризовать величину их восполнения за счет атмосферных осадков, поступление речных вод в депрессионные воронки и приток подземных вод, которые в естественном состоянии формировали подземный приток реки, а в связи с освоением железорудных месторождений стали поступать к водозаборным системам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гидрологические исследования в центральной части Европейской территории СССР, результаты которых представлены в настоящей монографии, являются примером практического решения задачи по оценке водных ресурсов, формирующихся в условиях резко выраженного и прогрессирующего преобразования режима поверхностных и подземных вод, связанного с интенсивной эксплуатацией крупных водозаборов, месторождений полезных ископаемых и осуществлением в пределах речных бассейнов других водохозяйственных мероприятий. Влияние интенсивной эксплуатации подземных вод на водные ресурсы и сток рек обуславливается развитием депрессионных воронок уровня подземных вод, приводящим к расширению границ подземного водосбора, перехвату подземного стока, разгружающегося в реки, и потере части речного (поверхностного) стока на фильтрацию через русла. Одновременно с понижением уровня подземных вод происходит сокращение потерь воды на испарение с поверхности эксплуатируемого водоносного горизонта. Под влиянием эксплуатации подземных вод сток рек сокращается, однако за счет сброса в отдельные реки той части использованных подземных вод, которые в естественных условиях ими не дренировались, водность их увеличивается. Как установлено, степень влияния интенсивной эксплуатации подземных вод на сток рек зависит в основном от природных физико-географических условий того или иного района, а также характера взаимосвязи речных и подземных вод. По степени влияния эксплуатации подземных вод на речной сток реки центра ЕТС могут быть подразделены на три основных типа:

- 1) реки, сток которых не изменяется, несмотря на значительные нарушения режима подземных вод;
- 2) реки, сток которых сокращается;
- 3) реки, сток которых увеличивается.

В районах крупных водопонижений общий речной сток сокращается на 15—25 % естественного среднего многолетнего его значения. Сокращение средних годовых значений стока достигает 30—40 %. За период весеннего половодья средний многолетний сток практически не сокращается, хотя в некоторые годы по отдельным рекам он может уменьшаться на 10—15 %. Наиболее существенным преобразованиям подвергается сток рек в меженный период. Его уменьшение в это время

в среднем за многолетний период составляет 30—60 %. В отдельные годы на некоторых участках рек возможно полное прекращение стока. Сокращение речного стока происходит на всей гидрографической сети, расположенной в пределах развития депрессионных воронок, и приблизительно оценивается величиной суммарного отбора подземных вод, осуществляемого в речном бассейне всеми водозаборными сооружениями (колодцы, скважины, дренажные установки и т. п.).

За счет концентрированного отведения в реки использованных подземных вод, которые в естественных условиях не участвовали в формировании водных ресурсов и режима рек, на отдельных реках наблюдается увеличение стока на 10—20 %, а в период межени, особенно на малых реках, в 1,5—3,0 раза и более. Характер и степень увеличения речного стока зависят как от сброса недренируемых рекой подземных вод, так и от ее водности. Так как водность реки повышается с увеличением площади водосбора, доля сбросных вод, приводящих к увеличению стока, постепенно уменьшается. Поэтому по мере удаления от мест сброса подземных вод их влияние на водность рек уменьшается. В ряде случаев уменьшение стока на одних участках речного бассейна и увеличение на других приводит лишь к перераспределению водных ресурсов и не вызывает заметных изменений водности рек в замыкающих створах.

Методы и результаты количественной оценки изменений речного стока под влиянием интенсивной эксплуатации подземных вод и проведения других водохозяйственных мероприятий, полученные в процессе обобщения натурных данных по центральной части ЕТС, могут быть использованы при решении аналогичных задач в других районах страны с целью обоснования комплексного использования и охраны водных ресурсов в условиях интенсивного развития народного хозяйства. Дальнейшее изучение этого вопроса требует организации специальных стационарных наблюдений за стоком в районах проектируемой и существующей эксплуатации подземных вод, потому что ныне действующая наблюдательная сеть недостаточно учитывает расположение водозаборных систем в речном бассейне и его гидрогеологические особенности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авакян А. Б., Шарапов В. А. Водохранилища и основные аспекты их изучения.— В кн.: Проблемы изучения и использования водных ресурсов. М., 1972, с. 84—100.
2. Аверьянов С. Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод.— В кн.: Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод. М., 1956, вып. 1, с. 85—447.
3. Аверьянов С. Ф., Усенко В. С. Способ расчета систематического вертикального дренажа.— В кн.: Управление поверхностными и подземными водными ресурсами и их использование. М., 1961, с. 145—160.
4. Алексеев Г. А. Объективные методы выравнивания и нормализации корреляционных связей.— Л.: Гидрометеиздат, 1971.— 363 с.
5. Андреянов В. Г., Семенова Г. С. Восстановление естественных характеристик стока зарегулированных рек бассейна Верхней Волги.— Сборник работ Московской гидрометеообсерватории, 1963, вып. 2, с. 4—63.
6. Аравин В. И. Расчеты и моделирование плановой фильтрации.— Л.: Госэнергоиздат, 1963.— 78 с.
7. Бабкин В. И. Внутригодовая зарегулированность стока рек равнинной территории Европейской части СССР и факторы, ее определяющие.— Труды ГГИ, 1969, вып. 174, с. 59—95.
8. Бабкин В. И., Воскресенский К. П. Современная оценка водных ресурсов Советского Союза.— Водные ресурсы, 1976, № 5, с. 5—13.
9. Бабушкин В. Д., Прохоров С. П. Оценка общего притока воды в шахты угольных месторождений.— Разведка и охрана недр, 1962, № 9, с. 55—61.
10. Бабушкин В. Д., Лосев Ф. И. Опыт гидрогеологических прогнозов на месторождениях полезных ископаемых путем моделирования на сеточных машинах.— В кн.: Обобщение опыта гидрогеологического изучения месторождения твердых полезных ископаемых. М., 1969, тем. сб. 18, с. 6—13.
11. Баркалов И. А. Опыт гидрогеологических исследований при освоении Джезказганского полиметаллического месторождения.— В кн.: Обобщение опыта гидрогеологического изучения месторождения твердых полезных ископаемых. М., 1969, тем. сб. 18, с. 51—67.
12. Берлянд М. Е., Кондратьев К. Я. Города и климат планеты.— Л.: Гидрометеиздат, 1972.— 40 с.
13. Берлянд М. Е. Защита атмосферы от загрязнения.— В кн.: Человек и среда обитания. Л., 1974, с. 57—66.
14. Боголюбов С. Н., Богомазова З. П. О роли подземного питания в годовом стоке рек и временных водотоков.— Труды ГГИ, 1956, вып. 52 (106), с. 5—41.
15. Болдаков Е. В. Проблемы мостовых переходов.— М.: Транспорт, 1974.— 215 с.
16. Большая советская энциклопедия. Т. 9.— 3-е изд.— М.: Советская энциклопедия, 1972.— 623 с.

17. Борисов А. А. Изменился ли климат Ленинграда? — Л.: Изд. ЛГУ, 1967. — 22 с.
18. Бородавченко И. И., Толстихин О. Н. Водные ресурсы: рациональное использование и охрана. — Коммунист, 1975, № 14, с. 42—52.
19. Бочков А. П. Влияние леса и агролесомелиоративных мероприятий на водность рек лесостепной зоны Европейской части СССР. — Л.: Гидрометеиздат, 1954. — 12 с.
20. Брук С. И., Козлов В. И., Покшишевский В. В. Прогнозы численности и некоторые структурные изменения населения Земли. — В кн.: Человек и среда обитания. Л., 1974, с. 12—32.
21. Будыко М. И. Полярные льды и климат. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1962, № 6, с. 3—10.
22. Будыко М. И. Изменение климата. — Л.: Гидрометеиздат, 1969. — 37 с.
23. Будыко М. И. Климат и жизнь. — Л.: Гидрометеиздат, 1971. — 472 с.
24. Будыко М. И. Влияние человека на климат. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 47 с.
25. Будыко М. И. Возможные климатические последствия хозяйственной деятельности человека. — В кн.: Человек и среда обитания. Л., 1974, с. 44—56.
26. Будыко М. И. Возможное будущее климата. — Человек и стихия, 1974, с. 10—11.
27. Булавко А. Г., Булавко М. Т. Современные представления о влиянии осушительной мелиорации на водные ресурсы и качество вод. — Метеорология и гидрология, 1973, № 6, с. 108—112.
28. Булавко А. Г. Прогнозирование изменений водного баланса под влиянием хозяйственной деятельности. — Водные ресурсы, 1973, № 4, с. 50—57.
29. Булавко А. Г. Осушительная мелиорация и водные ресурсы. — Гидротехника и мелиорация, 1974, № 2, с. 93—97.
30. Булдей В. Р. Моделирование гидромелиоративных систем. — Киев: Наукова думка, 1973. — 199 с.
31. Ван дер Варден Б. Л. Математическая статистика. — М.: Изд. иностр. лит., 1960. — 480 с.
32. Васин М. Чистое небо. — М.: Советская Россия, 1973. — 176 с.
33. Великович П. А. Разработка комплексных экономико-математических моделей для планирования водного хозяйства в бассейнах рек. — В кн.: Тезисы докладов Всесоюзного НТС «Комплексное использование водных ресурсов». Минск, 1975, с. 12—16.
34. Вендров С. Л., Гангардт Г. Г. Водные ресурсы. — В кн.: Союз Советских Социалистических Республик. 1917—1967 гг. Энциклопедический справочник. М., 1967, с. 86—90.
35. Владимиров А. М. Особенности формирования и расчет минимального стока малых рек СССР. — Труды ГГИ, 1966, вып. 133, с. 148—174.
36. Владимиров А. М. Минимальный сток рек СССР. — Л.: Гидрометеиздат, 1970. — 214 с.
37. Владимиров А. М. Сток рек в маловодный период года. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 295 с.
38. Влияние человека на глобальные климатические условия. Пер. с англ. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 83 с.

39. Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза.— Гидрометеиздат, 1967.— 169 с.
40. Водный баланс СССР и его преобразование/Под ред. М. И. Львовича.— М.: Наука, 1969.— 377 с.
41. Возможность управления нарушенным горнопромышленными мероприятиями режимом грунтовых вод в зонах открытой разработки бурогольных месторождений с помощью современных гидравлических методов моделирования/Д. Лаутербах, Л. Лукнер, Д. Пойкер, И. Кваст. Пер. с нем.— Берлин: Отпеч. на множит. аппарате Ин-та водного хозяйства, 1974.— 17 с.
42. Водогрецкий В. Е. Расчет питания грунтовых вод и оценка влияния на него агролесомелиоративных мероприятий.— Труды ГГИ, 1973, вып. 206, с. 52—91.
43. Водогрецкий В. Е. Влияние агролесомелиоративных мероприятий на водные ресурсы территорий.— В кн.: Влияние орошения и мелиорации на сток. М., 1973, с. 26—33.
44. Волеваха Н. М., Морозов Г. В. Биография климата.— Киев: Наукова думка, 1973.— 88 с.
45. Воскресенский К. П. Нормы и изменчивость годового стока рек Советского Союза.— Л.: Гидрометеиздат, 1962.— 546 с.
46. Воскресенский К. П., Соколов А. А., Шикломанов И. А. Ресурсы поверхностных вод Советского Союза и влияние на них хозяйственной деятельности человека.— В кн.: Человек и среда обитания. Л., 1974, с. 67—88.
47. Гаврюхина А. А. Воды каменноугольных отложений Москвы и их современное состояние.— Труды Лабор. гидрогеол. проблем им. Ф. П. Саваренского, 1959, т. 24.— 94 с.
48. Гаврюхина А. А. Опыт использования разновременных данных для характеристики депрессионных воронок в подземных водах.— Труды Лабор. гидрогеол. проблем им. Ф. П. Саваренского, 1955, т. 12, с. 106—113.
49. Гармонов И. В., Коноплянец А. А. Влияние искусственного понижения уровня подземных вод на состояние земной поверхности.— Разведка и охрана недр, 1964, № 2, с. 44—48.
50. Географические аспекты урбанизации.— М.: Знание, 1971.— 78 с.
51. Гидрогеология СССР. Сводный том, вып. 4. Влияние производственной деятельности человека на гидрогеологические и инженерно-геологические условия.— М.: Недра, 1973.— 278 с.
52. Горстко А. Б., Сурков Ф. А. Математика и проблемы сохранения природы.— М.: Знание, 1975.— 61 с.
53. Доброумов Б. М. Гидрометрическая оценка подземного стока в реки при изучении водных ресурсов на территории Курской магнитной аномалии.— В кн.: Материалы междуведом. семинара по методике гидрометрической оценки подземного стока в реки. Валдай: Отпеч. на множит. аппарате. ГГИ, 1966, с. 34—45.
54. Доброумов Б. М., Образцов И. Н., Устюжанин Б. С. Оценка влияния эксплуатации железорудных месторождений на режим стока р. Осколец.— Труды ГГИ, 1967, вып. 139, с. 206—223.
55. Доброумов Б. М. К оценке подземного питания рек на территории ЦЧО.— Сборник работ по гидрологии, 1968, № 8, с. 112—120.
56. Доброумов Б. М. Некоторые закономерности многолетних коле-

баний минимального стока рек ЕТС в зимний период.— Труды ГГИ, 1970, вып. 182, с. 169—183.

57. Доброумов Б. М. Методика расчета норм подземного стока в малые реки.— Сборник работ по гидрологии, 1970, № 10, с. 89—96.

58. Доброумов Б. М., Устюжанин Б. С. Статистический анализ рядов подземного стока в реки в районах интенсивной эксплуатации подземных вод.— Труды ГГИ, 1972, вып. 188, с. 105—113.

59. Доброумов Б. М., Устюжанин Б. С. Количественная оценка естественных ресурсов подземных вод центральной части Московского артезианского бассейна.— В кн.: Взаимосвязь поверхностных и подземных вод. М., 1973, с. 10—12.

60. Доманицкий А. П., Дубровина Р. Г., Исаева А. И. Реки Советского Союза.— Л.: Гидрометеониздат, 1971.— 104 с.

61. Драчев С. М. Борьба с загрязнением рек, озер и водохранилищ промышленными и бытовыми стоками.— М.; Л.: Наука, 1964.— 273 с.

62. Дроздов О. А., Калинин Г. П., Львович М. М. Водообмен в природе.— В кн.: Труды IV Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 1. Л., 1975, с. 167—180.

63. Ежов Ю. А. Классификация шахт Кизилковского угленосного района по водообильности.— Разведка и охрана недр, 1964, № 10, с. 46—51.

64. Еремин М. А. Метод определения вероятных величин среднегодового шахтного стока по связи с поверхностным.— Изв. высш. учебных заведений. Горный журнал, 1967, № 1, с. 3—9.

65. Ефремов Д. И., Лебедева Н. А., Авдошин Е. И. Опыт изучения условий взаимосвязи водоносных горизонтов через слабопроницаемые глинистые слои.— В кн.: Подземный сток и методы его исследования. М., 1972, с. 105—114.

66. Зекцер И. С. Закономерности формирования подземного стока и научно-методические основы его изучения.— М.: Наука, 1977.— 173 с.

67. Зеленой А. И. О морфометрическом способе изучения и картирования подземного стока в реки Нижнего Приамурья.— Труды ГГИ, 1969, вып. 166, с. 161—170.

68. Зимонт И. Л., Лобанская Н. П. Воднобалансовые характеристики однопиковых паводков с заостренных территорий.— Труды ВОДГЕО, 1973, вып. 41, с. 38—47.

69. Зимонт И. Л., Зимонт В. Л. Метод расчета поверхностного стока с застроенных территорий.— В кн.: Тезисы докладов IV Всесоюз. гидрол. съезда. Секция водного баланса и расчетов стока. Л., 1974, с. 83—84.

70. Змиева Е. С., Субботин А. И. Пространственная неравномерность весеннего стока и потерь в речном бассейне.— Труды Гидрометцентра СССР, 1973, вып. 113, с. 31—64.

71. Знаменская Н. С. Донные наносы и русловые процессы.— Л.: Гидрометеониздат, 1976.— 190 с.

72. Иванов Ю. Н., Туляганов А. Х. Русловой водный баланс нижнего течения р. Амударьи и причины его невязок.— Труды ГГИ, 1976, вып. 234, с. 35—51.

73. Идзон П. Ф. Влияние лесохозяйственных и лесомелиоративных мероприятий на сток рек.— Водные ресурсы, 1974, № 1, с. 48—73.

74. Идзон П. Ф., Пименова Г. С. Влияние леса на сток рек.— М.: Наука, 1975.— 110 с.

75. Изменение погоды человеком/Пер. с англ.— М.: Прогресс, 1972.— 240 с.
76. Калинин Г. П., Абальян Г. С. Об определении подземного питания рек.— Метеорология и гидрология, 1957, № 5, с. 12—20.
77. Калинин Г. П. Проблемы глобальной гидрологии.— Л.: Гидрометеиздат, 1968.— 376 с.
78. Калинин Г. П. Некоторые вопросы теории управления режимом вод суши.— В кн.: Проблемы изучения и использования водных ресурсов. М., 1972, с. 7—49.
79. Карасев И. Ф., Савельева А. В. Оценка элементов руслового водного баланса в среднем течении р. Амударьи.— Труды ГГИ, 1972, вып. 185, с. 87—114.
80. Карасев И. Ф., Савельева А. В. Методическое обоснование русловых водных балансов рек.— В кн.: Труды IV Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 2. Л., 1976, с. 110—121.
81. Карасев И. Ф. Методы и оценка точности гидрометрического учета стока.— Труды ГГИ, 1976, вып. 234, с. 52—71.
82. Карплюс У. Моделирующие устройства для решения задач теории поля.— М.: Изд. иностр. лит., 1962.— 487 с.
83. К вопросу экономического обоснования рекультивации земель на территории КМА/А. М. Бурыкин, Г. В. Коротаев, А. И. Стифеев, В. Г. Селютин.— Т. VIII, вып. 4, Воронеж, 1972, с. 37—41.
84. Климат и город. [Материалы Всесоюзной междуведомственной конференции «Климат—город—человек»].— М.: Знание, 1974.— 152 с.
85. Клименко О. А., Тарасов М. Н. Некоторые итоги загрязненности р. Кубани в 1966 г.— Гидрохимические материалы, 1969, т. 50, с. 142—154.
86. Ключева К. А. Влияние заболоченности водосборов на средний многолетний сток рек Белорусской ССР.— Труды ГГИ, 1956, вып. 52 (106), с. 107—140.
87. Ключева К. А. Влияние осушительной мелиорации на гидрологический режим рек Белоруссии.— В кн.: Междунар. симпозиум по гидрологии заболоченных территорий, т. 2. Минск, 1973, с. 75—87.
88. Колесов Г. П., Грейсер Е. Л. Оценка роли напорных подземных вод в формировании речного стока (на примере р. Тосны).— Труды ГГИ, 1972, вып. 182, с. 26—50.
89. Колесников Б. П. Рекультивация техногенных ландшафтов.— В кн.: Человек и среда обитания. Л., 1974, с. 220—232.
90. Комар И. В. Обмен веществ «природа—общество—природа».— Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1969, № 5, с. 43—57.
91. Комплексное исследование особенностей метеорологического режима большого города на примере г. Запорожья (КЭНЭКС-72)/ М. Е. Берлянд, К. Я. Кондратьев, О. Б. Васильев и др.— Метеорология и гидрология, 1974, № 1, с. 14—23.
92. Коносите Т., Сонда Т. Изменение стока, обусловленное урбанизацией.— В кн.: Международный симпозиум по паводкам и их расчетам. Л., 1969, кн. 2, с. 217—225.
93. Корзун В. И., Соколов А. А. Состояние и перспективы развития гидрологии.— В кн.: Труды IV Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 1. Л., 1975, с. 24—61.

94. Коронкевич Н. И. Преобразование водного баланса.— М.: Наука, 1973.— 119 с.
95. Костяков А. Н. О влиянии оросительных каналов и систем на режим грунтовых вод земельных массивов и методы управления ими.— В кн.: Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод. М., 1956, вып. 1, с. 5—9.
96. Котлов Ф. В. Изменение природных условий г. Москвы под влиянием деятельности человека и их инженерно-геологическое значение.— М.: Изд. АН СССР, 1962.— 263 с.
97. Кочерин Д. И. Вопросы инженерной гидрологии.— М.; Л.: Энергоиздат, 1932.— 208 с.
98. Кошевой Н. С. Формирование подземного стока в условиях интенсивного дренажа подземных вод.— Разведка и охрана недр, 1971, № 8, с. 55—58.
99. Красник М. Г., Лифшиц И. М. О применении порядковых критериев при анализе гидрологических рядов.— В кн.: Многолетние колебания стока и вероятностные методы его расчета. М., 1967, с. 152—159.
100. Кратцер П. А. Климат города.— М.: Изд. иностр. лит., 1958.— 239 с.
101. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Гидрологические основы речной гидротехники.— М.; Л.: Изд. АН СССР, 1950.— 392 с.
102. Крюков В. Ф. Исследование территориальной неоднородности максимального дождевого стока рек на примере Среднерусской возвышенности. Метеорология и гидрология, 1967, № 5, с. 69—74.
103. Куделин Б. И. Гидрогеологический анализ и методы определения подземного питания рек.— М.; Л.: Изд. АН СССР, 1949.— 179 с.— (Труды Лабор. гидрогеол. проблем им. Ф. П. Саваренского, т. 5).
104. Куделин Б. И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод.— М.: Изд. МГУ, 1960.— 344 с.
105. Куделин Б. И., Коробейникова З. А., Лебедева Н. А. Естественные ресурсы подземных вод Центрально-Черноземного района и методика их картирования.— М.: Изд. МГУ, 1963.— 148 с.
106. Кузнецова Л. П. Роль рельефа и лесов в распределении количества осадков на равнине.— Труды ГГО, 1957, вып. 72, с. 76—91.
107. Кузин П. С. Водный баланс СССР.— Природа, 1950, № 11, с. 12—24.
108. Кузин П. С. Циклические колебания стока рек северного полушария.— Л.: Гидрометеиздат, 1970.— 178 с.
109. Кузник И. А. Агролесомелиоративные мероприятия, весенний сток и эрозия почвы.— Л.: Гидрометеиздат, 1962.— 220 с.
110. Куприянов В. В. Гидрологические аспекты урбанизации.— Труды ГГИ, 1973, вып. 206, с. 122—133.
111. Куприянов В. В., Скакальский Б. Г. Урбанизация и ее влияние на режим и качество поверхностных вод.— Водные ресурсы, 1973, № 2, с. 172—182.
112. Куприянов В. В., Устюжанин Б. С., Джус Л. Е. Гидрологическая роль урбанизации. Обзор.— Обнинск: Отпеч. на множит. аппарате ВНИИГМИ—МЦД, 1975.— 34 с.
113. Куприянов В. В., Устюжанин Б. С. Водный баланс го-

рода.— В кн.: Вопросы антропогенных изменений водных ресурсов. М., 1976, с. 112—124.

114. Куракова Л. И. Беседы о природе, обществе и человеке.— М.: Знание, 1975.— 189 с.

115. Кутырин И. М., Беличенко Ю. П. Охрана водных ресурсов — проблема современности.— Л.: Гидрометеиздат, 1971.— 55 с.

116. Лаппо Г. М. Проблемы развития городских агломераций.— Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1973, № 5, с. 27—37.

117. Лебедев А. В. Экспериментальный метод определения испарения грунтовых вод и их питания за счет инфильтрации атмосферных осадков в естественных условиях.— В кн.: Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. М., 1953, с. 19—27.

118. Лебедев А. В. Методы изучения баланса грунтовых вод.— М.: Гостеолиздат, 1963.— 223 с.

119. Лебедев А. В. Водоохранное значение леса в бассейнах Оби и Енисея.— М.: Наука, 1964.— 63 с.

120. Лебедева Е. Н., Каплин В. Т. Шахтные воды [обзор литературы].— Обнинск: Отпеч. на множит. аппарате ВНИИГМИ—МЦД, 1970.— 19 с.

121. Лебедева Н. А. Естественные ресурсы подземных вод Московского артезианского бассейна.— М.: Наука, 1972.— 148 с.

122. Лебедев П. Н. О нормах стока.— В кн.: Труды I Всероссийского гидрол. съезда. Л., 1925, с. 410—411.

123. Леви Л. З. Прогноз максимальных водопритоков в горные выработки вероятностно-статистическими методами.— М.: Недра, 1973.— 95 с.

124. Левин А. П. Водный фактор в размещении промышленного производства.— М.: Стройиздат, 1973.— 167 с.

125. Леонов Е. А. Изменение термического режима рек под влиянием хозяйственной деятельности.— Труды ГГИ, 1977, вып. 239, с. 49—78.

126. Лучшева А. А. Вопросы стока Мещерской низменности.— Метеорология и гидрология, 1957, № 2, с. 35—38.

127. Львович М. И. Изменение речного стока под влиянием земледелия.— В кн.: Колебания и изменения речного стока. М., 1960, с. 58—88.

128. Львович М. И. Будущее водных ресурсов.— В кн.: Преобразование стока и водные ресурсы. М., 1973, с. 20—48.

129. Львович М. И. Мировые водные ресурсы и их будущее.— М.: Мысль, 1974.— 448 с.

130. Макаренко Ф. А. О подземном питании рек.— Труды Лабор. гидрогеол. проблем им. Ф. П. Саваренского, 1948, т. 1, с. 67—71.

131. Математическая модель для оптимизации водного хозяйства страны и крупного региона/С. Г. Агарков, И. П. Дружинин, Э. П. Коноваленко, А. Н. Кузнецов.— В кн.: Тезисы докладов Всесоюзного НТС «Комплексное использование водных ресурсов». Минск, 1975, с. 67—70.

132. Математическое моделирование процессов очистки сточных вод/А. П. Истомина, О. Н. Литвин, А. П. Нетюхайло и др.— В кн.: Тезисы докладов Всесоюзного НТС «Комплексное использование водных ресурсов», Минск, 1975, с. 34—38.

133. Материалы Межведомственного семинара по методике гидрометрической оценки подземного стока в реки.— Валдай: Отпеч. на множит. аппарате ГГИ, 1966.— 229 с.

134. Методические основы расчета водных ресурсов и водного баланса территории СССР/В. И. Бабкин, К. П. Воскресенский, И. Б. Иванова и др.—Труды ГГИ, 1977, вып. 241, с. 11—28.

135. Методическое руководство по изучению режима подземных вод/Сост. В. А. Ковалевский.—М.: Изд. ВСЕГИНГЕО, 1968.—197 с.

136. Методическое руководство по электрическому моделированию гидрогеологических задач.—М.: Изд. ВСЕГИНГЕО, 1970, Ч. 2.—124 с.

137. Методические указания управлениям гидрометслужбы № 90.—Л.: Гидрометеиздат, 1977.—103 с.

138. Методические рекомендации по оценке точности и гидрологическому контролю данных государственного учета вод и их использования.—Л.: Гидрометеиздат, 1977.—116 с.

139. Минкин Е. Л. Взаимосвязь подземных и поверхностных вод и ее значение при решении некоторых гидрологических и водохозяйственных задач.—М.: Стройиздат, 1973.—103 с.

140. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли.—Л.: Гидрометеиздат, 1974.—637 с.

141. Молчанов А. А. Гидрологическая роль леса.—М.: Изд. АН СССР, 1960.—487 с.

142. Моторина Л. В., Забелина Н. М. Рекультивация земель, нарушенных горнодобывающей промышленностью.—М.: Изд. ВИНТИСХ, 1968.—89 с.

143. Непреднамеренные воздействия на климат/Пер. с англ.—Л., Гидрометеиздат, 1973.—260 с.

144. Оценка изменений гидрогеологических условий под влиянием производственной деятельности/Под ред. В. М. Фомина.—М.: Недра, 1978.—264 с.

145. Оценка режима и баланса подземных вод крупных регионов методом моделирования на примере КМА (Методические рекомендации)/В. Д. Бабушкин, Н. Н. Ванькова, Ф. И. Лосев, А. А. Саар.—М.: Изд. ВСЕГИНГЕО, 1972.—56 с.

146. Оценка ресурсов поверхностных и подземных вод в условиях проведения горнорудных работ (на примере юго-западного склона хребта Каратау)/Под ред. И. Б. Вольфуна и К. И. Смирнова.—Л.: Гидрометеиздат, 1974.—196 с.

147. Пашнев Г. С. К вопросу аккумуляции стока прудами. В кн.: Комплексное использование водных ресурсов. М., 1972, с. 46—47.

148. Перевозников Б. Ф. Расчеты максимального стока при проектировании дорожных сооружений.—М.: Транспорт, 1975.—304 с.

149. Перехрест С. М. Влияние прогрессивных методов осушения болот и комплексных водохозяйственных сооружений на водные ресурсы Днепра.—Труды ГГИ, 1963, вып. 207, с. 173—179.

150. Писанец Е. П., Мироненко В. А. Водопонижение на карьерах КМА.—М.: Недра, 1968.—134 с.

151. Плотников В. С. Прогноз изменения режима подземных вод в Михайловском железорудном бассейне КМА.—В кн.: Геология и разработка Михайловского железорудного месторождения КМА. Воронеж, 1964, с. 55—58.

152. Плотников В. С. О методике подсчета эксплуатационных запасов подземных вод крупного городского водозабора.—Разведка и охрана недр, 1964, № 7, с. 42—47.

153. Плотников В. С. Региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод КМА.— В кн.: Гидрогеология и осушение месторождений КМА. М., 1964, с. 37—46.
154. Плотников В. С., Гоголь И. Л., Небосенко В. Ф. Моделирование условий разгрузки артезианских вод в центральной части Мещерской низменности.— Труды ГГИ, 1973, вып. 213, с. 187—200.
155. Подземный сток на территории СССР/Под ред. Б. И. Куделина.— М.: Изд. МГУ, 1966.— 303 с.
156. Положение о государственном учете вод и их использовании.— М.: Гидрометеиздат, 1975.— 6 с.
157. Попов О. В. Подземное питание рек.— Л.: Гидрометеиздат, 1968.— 292 с.
158. Применение вычислительной техники при гидрогеологических исследованиях.— М.: Недра, 1969.— 224 с.
159. Принципы оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод в речных долинах.— М.: Изд. МГУ, 1978.— 228 с.
160. Просенков В. И. Гидрогеотермическая характеристика и процессы формирования подземных вод интенсивно эксплуатируемых водоносных горизонтов Москвы и Подмосковья.— М.: Советская геология, 1972, № 9, с. 149—153.
161. Проскуряков А. К. Водный баланс р. Амударьи от г. Керки до г. Нукуса.— Л.: Гидрометеиздат, 1953.— 89 с.
162. Ратнер Н. С. Точность экспедиционных гидрометрических работ при изучении подземного стока.— Труды ГГИ, 1972, вып. 182, с. 51—72.
163. Рахманов В. В. Водоохранная роль лесов.— Л.: Гослесбумиздат, 1962.— 234 с.
164. Рахманов В. В. Водорегулирующая роль лесов.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.— 192 с.
165. Региональная оценка подземного питания рек СССР/Под ред. О. В. Попова, А. И. Чеботарева.— Л.: Гидрометеиздат, 1968.— 176 с.— (Труды ГГИ, Вып. 154).
166. Рождественский А. В., Лобанова А. Г. Приведение рядов речного стока к длительному периоду методом множественной линейной коррекции.— Труды ГГИ, 1968, вып. 163, с. 9—18.
167. Рождественский А. В., Чеботарев А. И. Статистические методы в гидрологии.— Л.: Гидрометеиздат, 1974.— 422 с.
168. Рудаков В. К. Методы прогноза влияния гидрологического режима поверхностных водоемов на режим и ресурсы подземных вод в береговой зоне.— В кн.: Труды IV Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 8. Л., 1976, с. 357—365.
169. Сидоркина Л. М. О влиянии леса на гидрологический режим рек.— Труды ЛГМИ, 1956, вып. 5—6, с. 86—107.
170. Савельева А. В. Русловой водный баланс среднего течения р. Амударьи.— Труды ГГИ, 1976, вып. 234, с. 17—34.
171. Савельева А. В. Расчет элементов руслового водного баланса рек.— Труды ГГИ, 1976, вып. 234, с. 127—148.
172. Соколов А. А. О зональных и аazonальных факторах стока.— Сборник работ по гидрологии, 1961, № 2, с. 17—25.
173. Соколов А. А. О влиянии леса на максимальный сток весеннего половодья.— Труды ГГИ, 1962, вып. 99, с. 79—140.

174. Соколовский Д. Л. Речной сток.—Л.: Гидрометеиздат, 1968.—539 с.
175. Софер М. Г. Проблема пресной воды. Л., Общ. «Знание», 1974. 37 с.
176. Статистические методы в гидрологии. Пер. с англ.—Л.: Гидрометеиздат, 1970.—271 с.
177. Унст Р. де. Гидрогеология с основами гидрологии суши.—М.: Мир, 1969.—312 с.
178. Указания по определению расчетных минимальных расходов воды рек при строительном проектировании. СН 346—66.—Л.: Гидрометеиздат, 1966.—17 с.
179. Устюжанин Б. С. О роли овражно-балочной сети в питании грунтовых вод и методе определения ее площадей.—Труды ГГИ, 1967, вып. 139, с. 224—232.
180. Устюжанин Б. С. Об исследовании влияния интенсивной эксплуатации подземных вод на сток рек.—Труды ГГИ, 1970, вып. 182, с. 113—127.
181. Устюжанин Б. С. Годовой сток рек Среднерусской возвышенности и его зависимость от заселенности речных бассейнов.—Сборник работ Курской ГМО, 1971, вып. 5, с. 90—98.
182. Устюжанин Б. С. Оценка изменений стока рек и восполнение запасов подземных вод в районах интенсивной эксплуатации последних.—Труды ГГИ, 1972, вып. 188, с. 86—104.
183. Устюжанин Б. С. Оценка изменений стока рек центральной части Московского артезианского бассейна под влиянием крупных водозаборов подземных вод.—Труды ГГИ, 1974, вып. 213, с. 127—151.
184. Фадеева М. В. Формирование воронок депрессии подземных вод в районе действующего водозабора вблизи реки.—Доклады АН БССР, 1965, т. 9, № 3, с. 180—182.
185. Федоров Е. К. Взаимодействие общества и природы.—Л.: Гидрометеиздат, 1972.—88 с.
186. Физико-географическое районирование СССР (масштаб 1:10 000 000)/Под ред. Н. А. Гвоздецкого.—М.: ГУГК при СМ СССР, 1967.—1 л.
187. Формирование подземных вод района Североуральских бокситовых месторождений/А. А. Колодяжная, М. А. Сунцов, А. А. Огильви, В. К. Хмелевский.—М., Изд. АН СССР, 1961.—143 с.
188. Харченко С. И. Исследования влияния орошения на водные ресурсы и водный баланс речных бассейнов, разработка методики определения возвратных вод и безвозвратных потерь.—Труды ГГИ, 1973, вып. 208, с. 9—47.
189. Чеботарев А. И. Общая гидрология.—Л.: Гидрометеиздат, 1975.—543 с.
190. Чеботарев А. И., Харченко С. И. О влиянии зяблевой вспашки на сток.—Труды ГГИ, 1962, вып. 82, с. 34—49.
191. Черкавский С. К., Коноплянцев А. А. Научные и организационные основы единой государственной системы учета вод, их использования и ведения Водного кадастра СССР.—В кн.: Труды IV Всесоюз. гидрол. съезда. Генеральные доклады и решения съезда. Том I. Л., 1975, с. 152—166.
192. Чуприн С. Ф. Температура воздуха в Подмоскowie постепенно повышается.—Человек и стихия, 1974. с. 37—38.

193. Шикломанов И. А. Об использовании электро моделирующего устройства для расчета гидрографа паводков.— Труды ЛГМИ, 1964, вып. 26, с. 3—16.
194. Шикломанов И. А. О методах оценки влияния комплекса факторов хозяйственной деятельности на водные ресурсы и водный режим водосборов.— Труды ГГИ, 1973, вып. 206, с. 3—21.
195. Шикломанов И. А. О влиянии орошения на годовой сток рек Куры, Терека и Кубани.— Труды ГГИ, 1973, вып. 208, с. 60—79.
196. Юнусов Г. Р. К методике расчета водного баланса в связи с хозяйственной деятельностью на водосборе.— Труды ГГИ, 1965, вып. 127, с. 101—123.
197. Anderson D. G. Effects of urban development on floods in Northern Virginia.— Geological Survey Water — Supply Paper, 1970.— 200 p.
198. Bates C. G., Henry A. T. Forecast and stream — flow experiment at Wagon — Wheel Gap, Colorado.— Mon. Wea. Rev., 1928, Suppl., N 30.
199. Berry K. Gypsy Race, a very intermittent stream of the Yorkshire Worlds.— Weather, 1967, vol. 22, N 11, p. 434—439.
200. Carter R. W. Magnitude and frequency of floods in suburban areas, in short papers in the geologic and hydrologic sciences.— Geol. Survey Prof. Paper, 1961, 424-B, p. 9—14.
201. Changnon S. A. Recent studies of urban effects on precipitation in the United States.— Amer. Meteorol. Soc. Bull., 1969, vol. 50, N 6.
202. Changnon S. A. In advertent weather and precipitation modification by urbanization.— J. Irrigation and Drainage Div. ASCE Proc., 1973, vol. 99, N 1.
203. Effects of man on the interfare of the hydrological cycle with the physical environment. Proc. Paris symp. IAHS—AJSH, 1974, Publication, N 113.— 157 p.
204. Gissler A. Zusammenhänge zwischen Uferfiltration und Grundwasserbildung dargelegt am Beispiel der Wassergewinnungsanlagen in der Saale-Elster-Aul bei Beesen.— Leipzig: Karl-Marx-Univ., 1955, Bd 5, N 4.
205. Golf W. Abflussveränderungen durch Grubenwassereinleitungen in kleinen Vorflutern des Spreegebietes.— Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 1968, Bd 18, N 2, p. 56—59.
206. Hantush M. S. Depletion of flow in right-angle stream bends by steady wells.— Water Resources Res., 1967, vol. 3, N 1, p. 235—240.
207. Harris E. E., Rantz S. E. Effect of urban growth on streamflow regimes of permanente creek, Santa Clara Country, California.— U. S. Geological Survey Water-Supply Pap., 1964, 1591—B, p. 1—18.
208. Houdaille A., Marsily G. de Debits Soutraits a riviere par un pompage effectue dans une nappe alluviale Implication aux periodes d'etiage.— Eau, 1969, vol. 56, N 1.
209. Huisman L. Ground water in deltas.— In: Scient. Probl. Humid. trop. Zone "Deltas Implic".— Paris, 1966, p. 157—168.
210. Kiel H. Das Problem der Grundwasserabsenkung im Erftgebiet.— Gas — und Wasserwach, 1958, Bd 99, N 40, S. 1005—1012.
211. Management of urban storm runoff. ASCE Urban Water Resources Research Programm.— Technical Memo. N 24. N. Y., ASCE, 1974.— p. 99.
212. Manson P. W. e. a. Effect of pothole drainage on deep groundwater supplies.— Trans. ASAE, 1967, vol. 10, N 5, p. 643—644.

213. Massing H. Effect of lignite mining of urbanization on the water cycle in the federal republic of Germany. UNESCO, Subgroup on Effects of Urbanization on Hydrological Environment.—Krefeld, 1973.—31 p.

214. Matyi S. F. Az eszszakbakonyi szenbanyak vizemelesenek hatasa a Gajapafuk vizhaztasara es a karsztvizszin alakulasara.—Hidrol. Közlöny, 1966, vol. 46, N 3, p. 128—135.

215. Peterson J. T. The climate of cities: a survey of recent literature.—Washington, D. C.: U. S. Government Printing Office, 1968—48 p.

216. Schneider W. J., Rickert D. A., Spieker A. M. Role of Water in urban planning and management.—Geol. Surv. Circular, 1973, p. 1—9.

217. Seaburn G. E. Effects of the urban development on direct runoff to East Meadow Brook, Nassau Country.—Long Island Geol. Surv. Prof. Pap., 1970, 627—D.

218. Sternberg L. M. e. a. Hydrology of surface mining. A case study.—Water Resources Res., 1968, vol. 9, N 2, p. 363—568.

219. Treatment and disposal of wastes.—Rep. WHD Sci. Group.—Geneva, 1967.

220. Urban Climates.—Tech. Note N 108, WMO — N 254.—197 p.

221. Walton W. C. Estimating the infiltration rate of a streambed by aquifer—test analysis.—Pull. Assoc. Internat. Hydrol. Sci., 1964, N 63, p. 409—420.

222. Weeks E. P., Ericson D. W., Holt L. R. e. a. Ir. Hydrology of the Little Plover River Basin Portage Country, Wisconsin, and the effects of water resource development.—Geol. Surv. Water—Supply Paper, 1965, N 1811, 78 p.

223. Weiss L. L., Wilson W. T. Evaluation of significance of slope changes in double mass curves.—Trans. Am. Geoph. Un., 1953, vol. 34.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
1. Современная оценка водных ресурсов, методы их изучения и учета	9
1.1. Методы оценки ежегодных значений ресурсов поверхностных вод	11
1.2. Методы оценки ресурсов подземных вод	13
2. Факторы преобразования речного стока и общая схема типизации речных бассейнов по условиям антропогенного влияния на их водные ресурсы	36
2.1. Общие положения	36
2.2. Факторы антропогенного преобразования речного стока. Основные особенности и характер влияния хозяйственной деятельности на водный режим	37
2.3. Типизация рек по условиям антропогенного воздействия на их водные ресурсы	88
3. Методика исследований влияния хозяйственной деятельности на водный режим рек	95
3.1. Установление начала нарушений водного режима на водосборе под влиянием хозяйственной деятельности	95
3.2. Определение существенности (значимости) расхождений в однородности исходной информации	98
3.3. Методы количественной оценки антропогенного влияния на водные ресурсы	107
4. Изменение водных ресурсов центральной части ЕТС под влиянием хозяйственной деятельности	143
4.1. Основные факторы антропогенного влияния на речной сток	143
4.2. Оценка изменений речного стока	146
4.3. Использование результатов исследований для решения различных водохозяйственных задач	189
Заключение	207
Список литературы	209

Борис Михайлович Доброумов
Борис Сергеевич Устюжанин
ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ
И РЕЖИМА РЕК ЦЕНТРА ЕТС

Ответственный редактор О. В. Попов

Редактор О. Н. Потапова. Художник А. П. Голованов
Художественный редактор В. В. Быков. Технический редактор Н. Ф. Грачева
Корректор Г. С. Макарова

ИБ № 501

Сдано в набор 11.12.79. Подписано в печать 25.02.80. М-23258. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага
тип. № 1. Лит. гарн. Печать высокая. Печ. л. 14. Уч.-изд. л. 15,58. Тираж 1600 экз.
Индекс ГЛ-162. Заказ № 524. Цена 2 р. 50 к.

Гидрометеиздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Ленинградская типография № 8 ЛПО «Техническая книга» Союзполиграфпрома при
Государственном комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.
190000, Ленинград, Прачечный пер., 6.

ВНИМАНИЮ СПЕЦИАЛИСТОВ!

Во II квартале 1980 года в Гидрометеоиздате выйдет монография И. Ф. Карасева «Речная гидрометрия и учет водных ресурсов». Объем 20 л. Цена 3 р. 40 к.

В книге систематизируются принципы размещения оптимальной гидрологической сети и метеорологического обоснования выполняемых на ней наблюдений. Выделяются наиболее эффективные методы изучения гидрологического режима рек, повышения оперативности и надежности учета стока. Предложены объективно-аналитические методы учета стока на ЭВМ по измеренным расходам воды. Освещается методика составления русловых и учетных водных балансов для гидрологического контроля данных о водных ресурсах и их использования в народном хозяйстве.

Рассчитана на гидрологов и гидротехников, специалистов водного транспорта, мелиорации и водного хозяйства.

Заказы принимает специализированный магазин Гидрометеоиздата: 197101, Ленинград, Большой пр., д. 57, магазин № 15 Ленкниги.

ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ

ГОТОВИТСЯ К ВЫПУСКУ В 1980 ГОДУ

«Водные ресурсы и гидрологический режим Нечерноземной зоны РСФСР».

**Под ред. д-ра геогр. наук А. А. Соколова, д-ра техн. наук
С. И. Харченко и канд. геогр. наук Б. М. Доброумова.**
30 л. 2 р. 40 к.

Приводятся сведения о водных ресурсах, весеннем и дождевом максимальном стоке и влиянии на него агротехнических мероприятий. Представлены результаты по минерализации речных вод, режиму подземных вод и их связи с речным стоком, о болотах Нечерноземной зоны и влиянии осушения на сток с болот и рек. Значительное внимание уделено методике расчета испарения с водной поверхности и суши, влагообеспеченности и водному балансу сельскохозяйственных полей. Даются сведения по оценке изменения водно-физических свойств и тепловому режиму деятельного слоя торфяных и минеральных почв.

Рассчитана на специалистов гидрологов, мелиораторов, агрометеорологов.

ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ