551.49
П.58

О. В. ПОПОВ

ПОДЗЕМНОЕ ПИТАНИЕ РЕК

Д/19516

БИБЛИОТЕКА
Ленинградского
Гидрометеорологического
Института

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕНИНГРАД • 1968

УДК 551.49

В книге освещается современное состояние проблемы по изучению взаимосвязи поверхностных и подземных вод, рассматриваются методы изучения и расчетов подземного питания и минимального стока рек, дается описание региональных закономерностей формирования и количественная оценка подземного стока в реки на территории СССР.

Монография содержит не только теоретические, но и практические сведения, так как в ней приводятся рекомендации по использованию данных о подземном стоке при решении водохозяйственных задач. Содержащийся в книге большой фактический материал позволяет использовать ее как справочное пособие для оценки подземного питания рек различных районов СССР.

Книга рассчитана на специалистов гидрологов, гидрогеологов, гидротехников, водохозяйственников и студентов гидрометеорологических институтов и географических факультетов университетов.

The book is concerned with the problem of surface and subsurface waters interrelation, methods of investigation and estimation of base flow, regularities of subsurface flow formation in different regions, quantitative evaluation of subsurface flow running into rivers on the territory of the U.S.S.R.

In addition to theoretical information, the monograph contains some recommendations on how the data on subsurface flow can be used in water management. Due to a great number of actual data collected in this monograph, it can also serve as a reference-book on evaluation of the subsurface alimentation for rivers in different regions of the U.S.S.R. territory.

The book is meant for specialists in hydrology, hydrogeology, hydraulic engineering, water management and for students of Hydrometeorological Institutes and Geographical Faculties of the Universities.

2-9-7
93-1967

ВВЕДЕНИЕ

Огромные масштабы потребления воды в современной промышленности и сельском хозяйстве приводят к необходимости всестороннего планирования использования водных ресурсов. О размерах этого потребления можно судить по многочисленным фактическим данным и расчетам. Кажущиеся фантастическими цифры, утверждающие, что наша страна «выпивает» в секунду поток воды, равный расходу Волги, что ежегодный расход воды при этом составляет около 500 млрд. м³ (около 2000 т на душу населения), только отражают реальное водопотребление.

Действительно, если учесть, например, что для производства одной тонны стали требуется 150 м³ воды, а одной тонны бумаги — 250 м³ воды и для полива одного гектара сельскохозяйственного поля с влаголюбивой зерновой культурой приходится иногда израсходовать до 22 тыс. м³ поливных вод, то становится ясным, какие огромные расходы воды должны обеспечивать развивающиеся все более быстрыми темпами промышленность, сельское и коммунальное хозяйство в нашей стране.

Сложная задача возникает из-за роста городов, в которых на ограниченной территории сосредоточивается огромное количество людей — до 5, 10, 15 миллионов, что при потреблении 1000 л воды в сутки на человека создает трудно разрешимую проблему. Одним из ярких примеров этого могут служить голодные пайки воды в Токио.

Не менее сложно обстоит дело с водой для гидроэнергетики. Например, подсчитано, что в 2000 г. во Франции общий суммарный объем воды, циркулирующий в тепловых электростанциях и гидростанциях, будет равен суммарному годовому стоку всех ее рек.

Современная цивилизация и ее развитие требует огромных водных ресурсов. И в первую очередь это должно идти за счет наиболее доступного источника воды — стока рек.

Ни одна страна мира не обладает таким количеством рек, как Советский Союз, в котором насчитывается их около 780 тысяч. В среднем за год эти реки несут в моря около 4400 км^3 воды. Но, несмотря на это, из-за неравномерного распределения водных ресурсов по территории страны и наличия обширных засушливых и маловодных областей обеспеченность водой единицы площади СССР почти в два раза ниже, чем в США, в 5,6 раза ниже, чем в Норвегии. Особенно тяжело обстоит вопрос с водой в пределах запада и юга страны, на которые приходится только около 20% всех ресурсов речного стока, а вместе с тем здесь расположены основные потребители воды и уже сейчас отмечается ее недостаток.

Трудное положение с водой имеет место во многих других странах мира. Почти 60% всей площади суши земного шара относятся к территориям, где чистая пресная вода возводится уже сейчас в ранг дефицитного полезного ископаемого. Так, например, чистая вода Женевского озера является предметом экспорта в ФРГ, куда она доставляется в специальной упаковке.

В дальнейшем, с развитием промышленности и сельского хозяйства, с ростом городов и неизбежностью не только роста водопотребления, но и загрязнения вод, нужно ждать увеличения дефицита воды. Так, например, подсчитано, что в 1980 г. в США для удовлетворения потребности в воде будет необходимо использовать весь сток рек, протекающих на их территории, а к 2000 г. их уже не будет хватать.

Еще более напряженное положение с водными ресурсами складывается в нашей стране в связи с бурным ростом народного хозяйства и неравномерной обеспеченностью ее территории водой.

В этих условиях решение проблемы планового использования и охраны Большой воды для страны представляет собой важный вопрос. Для этого прежде всего требуется оценка водных ресурсов.

Практическая необходимость обеспечения народного хозяйства данными о воде для решения этой проблемы, возникшей в связи с планированием развития народного хозяйства СССР в многолетней перспективе, предъявляет к этой оценке высокие требования в отношении практической достоверности и точности цифр.

В обоснование схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов такой огромной территории, как Советский Союз, в первую очередь должно быть положено глобальное решение вопроса о всех общих водных ресурсах. Это ставит перед гидрологами и гидрогеологами задачу объективной количественной и качественной оценки современного состояния поверхностных и подземных водных ресурсов СССР.

Решение этой задачи в отношении речного стока обеспечивается наличием достаточно широко развитой по территории всей страны сети пунктов гидрометрических наблюдений за стоком рек, позволяющей дать достаточно точную оценку общего стока по бассейнам крупных рек. Однако требования к повышенной точности гидрологических расчетов для региональной количественной характеристики водных ресурсов и связанное с этим создание надежных методов прогноза водности территории приводят к необходимости дальнейшего развития теории стока на основе генетического анализа его формирования.

В учении о речном стоке широкое распространение имеют теория изохрон стока и основанные на ней генетические формулы стока, позволяющие в теоретическом плане правильно раскрывать закономерности формирования речного стока. Сложность применения этих формул и самой теории изохрон в практике гидрологических расчетов и прогнозов в настоящее время заключается в недостаточной изученности процессов формирования стока в натуре. В этих условиях основной задачей является получение возможности учета добегания элементарных объемов стока от момента образования поверхностного стока на водосборе до поступления его в русловую сеть. Трудность решения этой задачи обусловлена главным образом асинхронностью поступления воды на поверхность бассейна и ее стока, которая возникает за счет разницы во времени между моментами поступления в русловую сеть воды, стекающей по поверхности бассейна, и воды, прошедшей через толщу почвогрунтов подземного водосбора путем подземного стекания.

Рассматривая вопросы теории формирования дождевого стока и методики расчета максимального дождевого стока, Д. Л. Соколовский на III Всесоюзном гидрологическом съезде (1957 г.) прямо указывал: «Большинство существующих теорий дождевого стока основаны либо на умозрительном соображении, либо на экспериментальных исследованиях скоростей стекания по склонам. Однако такие исследования освещают лишь одну небольшую сторону процесса формирования дождевых паводков, а именно поверхностное стекание по склонам...» [76].

В значительной мере это положение относится и к теории стока вообще. За время, прошедшее после съезда, такое состояние вопроса об учете в теории стока различных форм стекания воды изменилось незначительно, хотя необходимо отметить развитие в этом направлении экспериментальных исследований на отдельных репрезентативных небольших бассейнах, аналогичных проводимым в Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории ГГИ.

Для учета различных скоростей добегания в общей схеме процесса формирования стока возникает необходимость

выделения двух основных последовательных генетических этапов его развития. На первом этапе, после поступления атмосферных вод на поверхность водосбора, формируется поверхностный сток и происходит подземное стекание воды (просачивание и подземный сток) в толще почво-грунтов речного бассейна, в результате чего создается приток в русловую сеть.

В течение второго этапа под влиянием русловой трансформации и водообмена между рекой и прирусловыми объемами почво-грунтов формируется речной сток, общие закономерности которого в интегральной форме (для всего бассейна в целом) находят отражение в гидрографе речного стока в замыкающем створе.

Закономерности формирования речного стока в связи с основными обусловливающими его физико-географическими факторами определяются процессами, происходящими именно на первом этапе.

Учитывая наличие многоводных и маловодных лет и внутригодовых изменений стока, вследствие которых во многих случаях за короткие периоды половодий и паводков до 60—80% поверхностных вод быстро сбрасываются в моря и большую часть года реки остаются немноговодными, чрезвычайно важно знать и раскрыть причины этих колебаний стока. Для этого большое значение имеет обеспечение возможности выделения из общего речного стока его основных составных частей, отражающих различную степень регулирующего влияния поверхностного и подземного водосборов бассейна. Часть стока, характеризующаяся относительным постоянством, устойчивостью, в первую очередь формируется в результате сложного процесса подземного стекания и в некоторой степени за счет сработки русловых запасов воды. Другая часть стока хотя и испытывает регулирующее влияние поверхности водосбора, но отличается неустойчивостью.

Выделение устойчивой части стока и анализ условий ее формирования внутри речного бассейна в значительной мере должны способствовать развитию теории стока, как указывалось выше, опиравшейся ранее лишь на данные о поверхностном стекании.

Такое выделение имеет большое практическое значение, так как открывает прямую возможность оценки той части речного стока, которая благодаря большой устойчивости может быть использована в народном хозяйстве без искусственного регулирования гидротехническими сооружениями.

Требование схемы комплексного использования водных ресурсов нашей страны об удовлетворении потребности народного хозяйства в воде в первую очередь за счет местных водных ресурсов поставило перед гидрологами вопрос об оценке стока малых рек. Относительная ограниченность ресурсов малых рек

при проектировании их использования приводит к необходимости высокой точности расчета их величин и прогноза возможной изменчивости этих ресурсов во времени. Сложность расчетов и прогноза элементов водного режима малых рек заключается при этом в учете влияния местных условий формирования стока, главным образом гидрогеологических, которые в основном и определяют различия в величинах стока в бассейнах этих рек.

При определении гарантированных расходов воды рек при строительном проектировании как отдельная проблема водных исследований возникает задача о расчете минимального стока рек. Понятием «минимальный сток» объединяются различные характеристики низкого стока рек (абсолютный минимум, срочные и месячные величины низкого стока за каждый год, средние многолетние суточные и месячные его значения, с разделением их для зимних и летних периодов года), который рассматривается как фактор, лимитирующий водоснабжение. Так как минимальный сток, как правило, наблюдается в период, когда реки переходят на подземное питание, формирующееся подземным стеканием воды, то значение оценки последнего для решения этой проблемы очевидно. Полное и глубокое изучение минимального стока на бо́льшей части территории СССР должно базироваться на установлении закономерностей подзе́много стекания и учете гидрогеологических особенностей речных бассейнов, их определяющих.

Уже перечисленное позволяет судить о большом значении при разработке совершенных методов расчета и прогноза стока изучения подземного стекания, как одного из особо важных процессов его формирования.

В то же время оценка подземного стекания воды в реки открывает большие практические возможности для получения региональных количественных характеристик по большим территориям и другой части стока, формирующейся за счет поверхностного стекания.

Если оценивать реальные возможности определения поверхностного стока в речную систему со склонов для целого бассейна, то получение такой характеристики представляется задачей весьма сложной и требующей обширных натурных данных. Получение таких данных даже для небольших площадей водосбора связано с оборудованием специальных стоковых площадок или гидрометрических сооружений на временных водотоках. Однако и в этом случае переход от измеренных величин поверхностного стока со склонов на элементарном участке водосбора, каким, по сути дела, всегда является исследуемый малый водосбор временного водотока, а тем более и участок склона — стоковая площадка, к общей величине поверхностного стока, поступающего в речную сеть со всего бассейна, в настоя-

щее время еще достаточно не определен и не обеспечивает положительных результатов исследований стока на больших территориях нашей страны. В то же время практический опыт составления карт подземного стока СССР в работах ГГИ, МГУ и ВСЕГИНГЕО показал возможность достаточно точного выделения подземной составляющей речного стока методом генетического расчленения гидрографа реки.

Не менее сложной является задача по оценке подземных вод для проектирования комплексного использования водных ресурсов нашей страны.

В последние годы главным образом в связи с быстрым развитием сельского хозяйства на юге страны возникает проблема более широкого использования для водоснабжения подземных вод. Действительно, использование ресурсов подземных вод открывает практически неисчерпаемые возможности решения задачи водоснабжения в очень многих районах страны. Вместе с тем, оценивая среднегодовой объем возобновляемых запасов (естественных ресурсов) подземных вод СССР ориентировочной цифрой около 1000 км^3 (по данным карты подземного стока СССР [42] — 1019,3 км^3), приходится констатировать, что в настоящее время из этого количества воды используется только 10—12%.

Наибольший интерес для использования в народном хозяйстве имеют пресные подземные воды, сток которых формируется под дренирующим воздействием гидрографической сети, озер и морей, а также под воздействием бессточных впадин в аридных и полуаридных областях, где подземные воды разгружаются, расходуясь на испарение. Во всех случаях пресные подземные воды создаются в процессе подземного стекания атмосферных осадков — одном из наиболее важных звеньев круговорота воды на Земле. В этом общем движении воды создается основная особенность водных ресурсов — их непрерывная возобновляемость.

Если степень ежегодного возобновления общих ресурсов речного стока можно охарактеризовать годовым гидрологическим циклом водности и запасы речных вод, переходящие из года в год, сравнительно невелики, то при оценке количества подземных вод необходимо строго различать естественные ресурсы и геологические запасы.

Естественные ресурсы подземных вод, по определению Б. И. Куделина, показывают естественную производительность водоносных горизонтов и выражаются расходом подземного потока («приток или отток подземных вод, обеспеченный питанием»). Общими геологическими запасами оценивается на данный момент весь объем подземных вод всех категорий и форм, находящийся в зонах насыщения, кроме прочно связанной воды. Если естественные ресурсы определяют ежегодное восполнение

подземных вод, то геологические запасы формируются в течение длительных циклов круговорота природных вод и, по выражению Куделина, являются «продуктом геологической истории земли».

Пресные подземные воды в районах с постоянно действующей гидрографической сетью формируются за счет подземного стока в реки. Поэтому на большей части территории Советского Союза их естественные ресурсы могут быть оценены величиной подземного стекания — подземной составляющей речного стока.

При количественной оценке подземных вод для использования существенно важным является определение как естественных ресурсов, так и геологических запасов. Проектирование потребления подземных вод в размерах естественных ресурсов обеспечивает их ежегодное возобновление. Использование геологических запасов в размерах, бóльших величины естественных ресурсов, приводит к прогрессивному истощению запасов подземных вод. Несмотря на ограниченное использование подземных вод в нашей стране, в отдельных районах уже сейчас могут быть отмечены примеры такого истощения. Так, в Крыму для поливного земледелия отбирается воды из подземных горизонтов в 2—4 раза больше, чем восполняется.

Особенно пристальное внимание гидрогеологов привлекают огромные «подземные моря», находящиеся именно там, где географическая карта окрашена желтым цветом пустынь и сухих степей, показывающим малую водность территории или практическое отсутствие постоянной речной сети. Сложность решения вопроса о воде здесь затрудняет создание и развитие городов, мешает целесообразному размещению промышленных предприятий и не позволяет в сельском хозяйстве быстро и широко освоить засушливые, но весьма плодородные земли. Одним из таких районов страны является территория Казахстана, для которой прогнозные карты размещения артезианских и грунтовых вод, составленные под руководством У. М. Ахмедсафина, позволяют предполагать о наличии здесь до 7 триллионов $м^3$ пресных подземных вод. Запасы этих вод постоянно возобновляются, и их естественные ресурсы оцениваются авторами карт в 40 млн. $м^3$ в год. Огромные запасы таких подземных вод имеются и в других районах земного шара. Так, например, в северо-западной части Сахары в 1965 г. обнаружено подземное пресное «озеро» площадью 60 тыс. $км^2$, расположенное на глубине 420 м.

Однако, как бы ни были велики запасы этих вод, восстановление их идет очень медленно.

Развитие потребления подземных вод в будущем может поставить под угрозу даже кажущиеся неисчерпаемыми геологические запасы этих «подземных морей».

Поэтому проблема оценки естественных ресурсов подземных вод ложится краеугольным камнем в работы по обеспечению схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов суши. Если рассматривать успехи советской гидрогеологии за последние годы, то необходимо прямо отметить, что метод региональной оценки естественных ресурсов подземных вод по величине подземного стока в реки, использованный по предложению Б. И. Куделина для составления карт подземного стока Советского Союза, обеспечил прогрессивное развитие советского гидрогеологического картирования, придав гидрогеологическим картам совершенно новое содержание — объективные региональные количественные показатели интенсивности подземного стока.

Помимо получения прямых показателей размера возможных изъятий подземных вод для использования в народном хозяйстве в пределах их ежегодного гарантированного восполнения, региональные данные об интенсивности подземного стока на территории всей страны открывают широкие перспективы для более обоснованного изучения многих процессов, протекающих в литосфере. Определение темпов водообмена в общем круговороте природных вод суши, количественная оценка миграции химических элементов с подземным стоком, перенос тепла в процессе подземного стекания, влияющий на тепловой режим атмосферы и геотермический режим земной коры, и решение целого ряда других теоретических и практических задач в настоящее время в значительной мере обеспечиваются объективными количественными характеристиками подземного стока на основе картирования естественных ресурсов подземных вод.

Как можно видеть, и в гидрогеологии процессы изучения подземного стекания вод в речных бассейнах, по сути дела представляющие собой основную часть процесса формирования подземных вод зоны интенсивного водообмена, так же как и в гидрологии, занимают одно из наиболее важных мест.

Огромные масштабы потребления водных ресурсов и проектирование его дальнейшего увеличения придают особое значение изучению подземного стока в решении задач по охране водных ресурсов. Формирование всех видов водных ресурсов в общем круговороте вод суши делает их едиными и взаимно связанными.

Изъятие вод из одного источника ресурсов приводит к изменению количества их в другом. Основным звеном в связи подземных и речных вод является подземный сток. Выделение подземной составляющей речного стока дает возможность прямой оценки его изменений в условиях известного потребления подземных вод из водоносных горизонтов, связанных с рекой.

Если при существующих размерах использования подземных вод вопрос об истощении подземного питания рек в региональном аспекте еще не требует практической постановки таких задач, то для локальных участков в отдельных речных бассейнах решение их становится актуальным. Примером тому может быть территория Курской магнитной аномалии (КМА). В условиях тесной взаимосвязи речных и подземных вод, когда для эксплуатации железорудных месторождений здесь осуществляются значительные водопонизительные мероприятия с расходами воды по отдельным пунктам до 3—5 тыс. м³/час, а создаваемые при этом депрессионные воронки вокруг рудного тела достигают в радиусе десятков километров (при снижении напора в отдельных горизонтах до 200 м и более), некоторые реки на участках у месторождений изменяют режим. Вместо подземного питания реки здесь начинают формировать подземные потери речных вод. Так, например, в воронке депрессии у рудника «Лебедь» поглощается большая доля речных вод р. Осколец и фильтрационные потери оцениваются расходом около 2000 м³/час, составляя до 50% общего расхода реки. Определение таких потерь речного стока имеет значение одновременно как для оценки его возможных изменений, так и для проектирования водопонизительных мероприятий с учетом дополнительных объемов речных вод, поступающих к депрессионным воронкам. Существенно важным является изучение такого водообмена в карстовых районах страны.

На примере Урала можно видеть, что правильное проектирование разработок полезных ископаемых в первую очередь требует решения вопроса о возможных потерях речных вод на участках, где в процессе их эксплуатации требуется создавать водопонижения.

С развитием наиболее эффективного и в большинстве случаев экономически выгодного способа открытой разработки месторождений, получающего в настоящее время широкое распространение в очень многих районах нашей страны, работы по количественной оценке взаимосвязи речных и подземных вод для определенных объектов приобретут особое значение. В то же время широкое использование подземных вод, проектируемое в будущем, может поставить практическую задачу регионального учета влияния на речной сток изъятия подземных вод. Влияние на речной сток водопонижений и мероприятий по борьбе с шахтными водами в Донбассе может уже в настоящее время служить доказательством реальности таких предположений.

Изучение подземного стекания может иметь особое значение при решении задач об искусственном пополнении подземных вод речным стоком и поверхностными водами вообще.

Неравномерное распределение подземных вод в засушливых районах при большом речном стоке окружающих предгорий,

иногда бесцельно сбрасываемом в пески пустыни и там расходующимся на испарение, уже практически сейчас ставит вопрос о магазинировании подземных вод. Разработка инженерных методов увеличения подземного стока и его дальнейшего использования должна базироваться на знании закономерностей подземного стекания.

Решение проблемы захоронения промышленных отходов в водоносных пластах также требует учета особенностей формирования в них подземного стока, взаимосвязи пластов с реками.

С общими вопросами оценки водных ресурсов неразрывно связана проблема прогноза запасов почвенной влаги для обеспечения сельского хозяйства прямыми данными о влагообеспеченности произрастания сельскохозяйственных культур. Помимо самостоятельного значения, эта проблема органически входит в исследования особенностей формирования речного и подземного стока, так как закономерности водного режима почвы, в процессе которого создаются запасы почвенной влаги, определяют особенности начальной стадии подземного стекания. В наиболее наглядной форме это было показано А. А. Роде в учении о типах водного режима почв: «Почва представляет собой верхнюю оболочку суши — оболочку, на поверхности и в толще которой сосредоточены явления трансформации влаги атмосферных осадков в воды поверхностного, почвенного и подземного стока и явления возврата влаги в атмосферу, т. е. важнейшие слагаемые гидрологического процесса» [72, стр. 154].

К сожалению, до самого последнего времени исследования водного режима почв, общих свойств почвенного покрова в аспекте влияния их на закономерности формирования речного стока и полного учета в режиме подземных вод не получили достаточно широкого развития, особенно в необходимом для этого региональном направлении.

Подземное стекание воды — это сложное сочетание процессов просачивания воды в почву, связанное с формированием «потерь» поверхностного склонового стока и режимом почвенной влаги, процессов более глубокого движения воды в зоне аэрации, определяющего питание подземных вод, и дальнейшего движения ее подземным стоком в водоносных пластах, когда осуществляется формирование естественных ресурсов подземных вод, а также процессов подземного питания рек. Оценивая общую изученность подземного стекания, следует отметить значительный разрыв между необходимыми и имеющимися данными об этих явлениях. Фактические материалы, хотя и обширные, в ближайшее время в лучшем случае могут позволить выявить лишь общие качественные закономерности подземного стекания и некоторые генетические связи его с отдельными природными факторами. Для полного же решения проблемы комплексного использования и охраны водных ресурсов необходимы точные

количественные характеристики региональных закономерностей и генетических связей во всех этих явлениях.

Сущность поставленной в нашей стране проблемы водных ресурсов заключается в создании управляемого водного режима всей ее территории. При этом, как указывает М. И. Львович, ставится задача «расширенного воспроизводства водных ресурсов» [54]. В основу такого воспроизводства должно быть положено глубокое изучение водного баланса речных бассейнов и тех закономерностей связи между комплексами природных факторов, которыми определяется естественный режим этих бассейнов. Только на основе объективных и четких представлений о возможном ходе процессов формирования водных ресурсов конкретных объектов в условиях хозяйственной деятельности могут быть разработаны мероприятия по управлению водным режимом территории. При этом охарактеризованное выше значение процессов подземного стекания в формировании водного баланса речных бассейнов показывает, что их изучение лежит в основе правильного решения вопроса о возможных изменениях водного режима на преобразуемых водосборах. Проектирование агротехнических мероприятий, направленных на обеспечение влагой сельскохозяйственных полей, окончание вечной дискуссии о влиянии на сток этих мероприятий и лесонасаждений, в значительной мере составляющих одну из основ проблемы управления водными ресурсами, невозможны без количественной оценки естественной зарегулированности стока вод в процессе подземного стекания.

Вся сложность разработки генеральной схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов и заключается в том, что практикой народного хозяйства перед гидрологами и гидрогеологами поставлены такие задачи, которые в теории и натурных исследованиях еще не получили окончательного полного решения.

Развитие существующих скупых сведений о закономерностях подземного стекания в природных условиях в необходимых для теории и практики масштабах требует дальнейшего исследования сложного процесса движения воды, происходящего в многообразной и чрезвычайно неоднородной среде почво-грунтов, при непрерывных изменениях условий стекания воды в зависимости от состояния этой среды. Проведенные в этой области натурные наблюдения, теоретические и экспериментальные исследования, в которых работы советских ученых играют ведущую роль, показывают реальные возможности получения положительных результатов. Однако сбор фактического материала для обширных пространств нашей страны и его региональное обобщение в количественном выражении потребуют продолжительного времени. Поэтому гидрологи и гидрогеологи для решения своих неотложных задач вынуждены искать хотя бы комплексные,

Таблица 1

Водный баланс территории Советского Союза по бассейнам морей

Бассейн моря	Площадь, тыс. км²	Элементы водного баланса[1]										Коэффициенты стока		
		объем, км³					слой, мм							
		осадки	сток рек			испарение	осадки	сток рек			испарение	общего	поверхностного	подземного
			общий	поверхностный	подземный			общий	поверхностный	подземный				
Белого и Баренцева	1 170	834	399	321	77,8	435	713	341	274	67	372	0,48	0,39	0,09
Балтийского	653	500	169	131	37,6	331	765	259	201	58	506	0,34	0,26	0,08
Черного и Азовского	1 322	875	152	100	52,1	723	662	115	76	39	547	0,17	0,11	0,06
Каспийского	2 832	1 411	290	193	96,6	1121	498	102	68	34	396	0,21	0,14	0,07
Карского	6 251	3 350	1283	995	288	2267	568	205	159	46	363	0,36	0,28	0,08
Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского	5 048	2 135	1038	901	137	1097	423	206	179	27	217	0,48	0,42	0,06
Берингова, Охотского и Японского	2 549	1 736	789	597	192	947	680	309	234	75	371	0,45	0,34	0,11
Бессточные районы Средней Азии и Казахстана	2 188	653	88[3]	—	57,3[4]	565	298	40	—	26	258	0,14	—	—
Территория всех бассейнов в пределах СССР	22013[2]	11 694	4208[3]	—	939	7486	531	191	—	43	340	0,36	—	0,08

[1] Осадки, общий сток и испарение приведены по данным монографии «Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза» (Гидрометеоиздат, Л., 1967). Расчет подземного стока в реки дан по материалам к картам подземного стока СССР масштаба 1 : 2 500 000 [29].

[2] Без крупных островов Северного Ледовитого океана общей площадью 10 тыс. км² и без площади, занимаемой крупными бессточными водоемами (Аральское море, Балхаш и Иссык-Куль), равной 88,5 тыс. км².

[3] Без учета потерь стока на испарение, инфильтрацию и безвозвратный водозабор в засушливых районах (учтенные потери для Средней Азии и Казахстана равны 112 км³, для всей территории СССР около 150 км³).

[4] Для горной части территории площадью 591 тыс. км².

нерасчлененные на составляющие количественные показатели суммарного эффекта подземного стекания. Таким показателем для речного бассейна в целом является величина подземного питания реки. В ней, как было показано выше, для речного стока находит выражение его подземная составляющая, устойчивый сток реки, а для подземных вод зоны интенсивного водообмена — величина их естественных ресурсов. Насколько существенную роль играют подземные воды в общем водном балансе страны, можно видеть из табл. 1.

Более детальное рассмотрение составляющих водного баланса по отдельным районам страны может показать, что подземные воды зоны интенсивного водообмена в ряде речных бассейнов могут составлять более 50% общего стока рек. К ним можно отнести в первую очередь бассейны рек Сыр-Дарьи, Теджена, Мургаба, Зеравшана, районов Ферганской котловины, Араратской долины и многих других водных объектов.

Наряду с устойчивой частью водных ресурсов данные табл. 1 показывают огромные запасы вод поверхностного стока, быстро сбрасываемые в моря. В условиях управляемого водного режима эти воды в первую очередь должны изменить свои пути. Часть их при помощи гидротехнических сооружений будет зарегулирована в водохранилищах и пойдет на выработку электрической энергии и на орошение. Некоторые реки должны будут сменить свои привычные дороги, по которым они двигались испокон веков, и их направят на обводнение Каспийского, Аральского морей и засушливых районов.

И при решении таких задач необходимо учитывать особенности водообмена между почво-грунтами и руслами рек, каналами, водохранилищами (учет подземных потерь при переброске рек, расчет и прогноз водного баланса водохранилищ в измененных при подпорах условиях подземного стекания, оценка возможного заболачивания и засоления почво-грунтов на подтопляемых территориях у водохранилищ).

Поэтому в современных исследованиях водного баланса и режима страны, в особенности при генетическом направлении изучения закономерности их формирования для усовершенствования методов расчета и прогноза водных ресурсов как в гидрологическом, так и в гидрогеологическом аспектах, изучение подземного питания рек четко вырисовывается как одна из основных проблем.

Учитывая все вышеизложенное, автор в настоящей работе рассматривает общее состояние исследований подземного питания рек, возможности и направление их развития, дает конкретные рекомендации по постановке натурного изучения процесса подземного стока в реки и по анализу материалов для количественной оценки величины подземного стока в реки. На основе материалов изучения и расчета подземного стока, полученных

при составлении карт его основных характеристик для территории всего Советского Союза в работах ГГИ, МГУ и ВСЕГИНГЕО под общим научным руководством Б. И. Куделина, а также литературных данных дается характеристика основных закономерностей формирования подземного питания рек в различных физико-географических условиях.

Сложность рассматриваемых явлений, относительно слабая их изученность и как следствие — отсутствие теории, строго описывающей процессы подземного стока в многообразных природных условиях, не позволяют в настоящее время дать единую систему решений, предложить законченные и универсальные методы расчета и прогноза подземного питания рек.

Однако при составлении настоящей книги автор стремился к возможно более систематическому изложению вопросов, к критическому рассмотрению существующих подходов в изучении сложного процесса формирования подземного стока в реки и сделал попытку объективно оценить возможные пути решения проблемы.

ЧАСТЬ I

ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНОГО ПИТАНИЯ РЕК И ЕГО ИЗУЧЕНИЕ

Глава 1

РАЗВИТИЕ И СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОДЗЕМНОГО ПИТАНИЯ РЕК

2/1957/6

Выяснить современное состояние исследований подземного питания рек как комплексной гидролого-гидрогеологической проблемы и подойти к оценке перспективы их развития наиболее полно можно, лишь рассмотрев историю этих исследований и связанные с ними вопросы изучения взаимосвязи речных и подземных вод, критически оценив отдельные решения, полученные на различных этапах исследований. Однако автор не ставит перед собой цели полностью осветить историю развития проблемы и ограничивается рассмотрением только некоторых сторон этого вопроса с тем, чтобы выявить пути возникновения отдельных способов и приемов изучения и расчетов подземного питания рек и тем самым показать их практическую значимость и роль в дальнейшем развитии проблемы.

Через все исследования подземного питания рек красной нитью проходит стремление использовать для количественной оценки величины подземного стока в реки практически наиболее удобный метод — анализ гидрографа речного стока. Поэтому этому вопросу автор уделяет наибольшее внимание. В то же время, учитывая, что сложность проблемы, многообразие задач, в решении которых необходима количественная оценка подземного питания рек, и личные склонности исследователей обусловили появление и других, самых различных методов и приемов его изучения и анализа, приходится уделить внимание и этим вопросам.

Историю развития исследований подземного питания рек принято начинать с классической ссылки на труд римлянина Марка

БИБЛИОТЕКА
Ленинградского
Гидрометеорологического

Витрувия Поллия «De architectura» (I в. до н. э.), где указывается, что просачивающиеся с поверхности земли воды образуют подземные воды, снова вытекают на поверхность, давая начало ключам и источникам [77]. Другой пример того, что у людей уже давно сложилось ясное представление об участии в формировании речного стока подземных вод, можно видеть из древней русской поговорки: «Из студеного ключа речка бежит».

Практически в нашей стране проблема подземного питания рек возникла как гидрологическая задача в связи с необходимостью прогноза водности рек для судоходства в период засухи, когда отсутствует их непосредственное дождевое питание поверхностным (склоновым) стоком. В условиях сравнительно малой изученности подземных вод гидрологи стояли перед весьма сложной задачей хотя бы грубой количественной оценки подземного питания реки в наиболее важный для судоходства период низких (меженных) расходов реки. Естественно, что при этом в первую очередь было обращено внимание на питание рек за счет источников — родникового стока. Для количественной оценки размеров возможного родникового питания рек определялось так называемое инфильтрационное число (Парамелль), характеризующее соотношение между выпавшими дождевыми осадками и дебитом источников, питающих реку. Инфильтрационное число k определялось эмпирическим путем по данным, полученным при замерах дебита источников Q, и по количеству осадков h, выпавших на известную площадь водосбора ω, по соотношению

$$k = \frac{Q}{\omega h}. \qquad (1)$$

Вычисление инфильтрационного числа давало практически применимые результаты только для небольших речных водосборов с простыми условиями подземного питания. Поэтому для практического решения задачи определения низкого (меженного) стока гидрологи были вынуждены искать дальнейшие пути определения подземного питания рек. Таким путем явился так называемый способ «срезки» гидрографа общего стока реки по прямой линии через низкие точки гидрографа. Этот способ явился самой грубой и условной схемой выделения «устойчивого стока», не учитывающей существовавших уже и в то время представлений о некоторой динамичности подземного питания. Но практическое удобство приема определения обеспеченного питания реки в период межени и возможность использования относительно большого гидрометрического материала по стоку рек обусловило широкое его применение в инженерно-гидрологических исследованиях. Этот прием, введенный в практику французскими инженерами еще в 60-х годах прошлого столетия, как будет показано ниже, существует в различных вариантах до настоящего времени.

При проведении комплексных гидротехнических и гидрогеологических исследований в России (Экспедиция для исследования источников главнейших рек Европейской России, работавшая в конце прошлого столетия) такой «инженерный подход» к оценке подземного питания рек впервые встретил резкое возражение со стороны гидрогеологов. При этом обнаружилось два противоположных мнения о возможности количественной оценки подземного («ключевого») питания рек верховий бассейна Днепра, Дона, Волги.

Гидрогеологический отдел, руководимый С. Н. Никитиным, отказался от количественной оценки подземного питания рек и ограничился качественной характеристикой гидрогеологических условий формирования подземного стока.

Гидротехническим отрядом экспедиции были сделаны попытки количественной оценки подземного питания рек по величине расходов в период летней и зимней межени, в основе которых лежал тот же принцип срезки. При этом необходимо отметить, что в своих теоретических положениях руководитель работ Г. Ф. Зброжек исходил из положения, что величина подземного питания не остается постоянной в течение года, так как она обусловлена питанием из постоянных и перемежающихся ключей. Несмотря на это, из-за отсутствия практической возможности учета динамичности этой величины она в работах Отдела принималась постоянной и за ее показатель принимался расход реки в период летней или зимней межени. В этом примере наглядно видна совершенно сознательная, но вынужденная схематизация сложного процесса подземного стока в реки, проводимая гидрологами.

В результате работ Экспедиции, начатых, как указывалось, еще в конце прошлого столетия, были получены первые количественные характеристики подземного питания рек Европейской России, в настоящее время имеющие только историческую ценность.

В дальнейшем вопрос о подземном питании рек продолжает привлекать к себе внимание исследователей как путь к предсказанию низких «горизонтов стояния воды в реках» для судоходства.

В 1911 г. на XIII Съезде русских деятелей по водным путям А. И. Булгаков формулирует положение о прогнозе речного стока в зависимости от запасов подземных вод в бассейне: летняя межень определяется величиной весеннего подъема уровня грунтовых вод.

Однако реальные возможности разработки и использования в практике этого способа прогноза уровня воды в реках не были обеспечены фактическими данными об уровнях подземных вод в речных бассейнах. Скудные сведения о режиме подземных вод в лучшем случае ограничивались лишь весьма редкими данными

наблюдений по отдельным колодцам, эпизодическим замерам дебита родников.

Отсутствие данных о режиме подземных вод, изменении их запасов принуждало гидрологов использовать приемы расчленения гидрографа без учета динамики подземного питания рек, что находило отражение в применении для анализа гидрографов простейших прямых «срезок».

Развитие гидрологических расчетов и необходимость повышения их точности приводит гидрологов к необходимости расчленения стока на «элементарные части» с выделением этих частей по генетическому признаку.

В. Г. Глушковым [18] впервые (1928 г.) был предложен принцип генетического расчленения общего речного стока с выделением четырех категорий питания рек: 1) глубокими подземными водами; 2) аллювиальными водами и верховодкой; 3) большими скоплениями поверхностных вод (половодье); 4) малыми количествами поверхностных вод (паводки).

В отношении подземных вод, поступающих в речной сток, Глушков указывает, что первая категория наиболее равномерна и постоянна и не подвержена сезонным колебаниям, «ослабевая и усиливаясь лишь в результате исторически редких засух и обильных осадков». «Вторая категория питания менее устойчива, обнаруживает колебания не только многолетние, но и сезонные; многолетние колебания связаны с колебаниями годовых сумм осадков, сезонные колебания отражают на себе периоды интенсивной отдачи аллювиальных и верхних грунтовых вод, следующих за их накоплением (после длительных подъемов уровня воды в реке, насыщающих аллювий своей долины, после таяния снегов при талой почве, после затяжных осенних дождей); в периоды, предшествующие такому накоплению, когда запас вод истощен, питание второй категории подвержено сезонному минимуму; сдвиг периодов накопления и отдачи таких вод меняется в зависимости от длины пути и скорости передвижения, изменяется от нескольких дней (галечный аллювий речных долин) до месяца и более («лесная вода», меженные воды); при быстрой отдаче размер питания этой категории зависит от суммы поступивших сезонных осадков; при медленной — сезонные колебания сглаживаются и проступают лишь многолетние» [18, стр. 44]. Принцип предлагался Глушковым для приближенного расчета стока при «недостаточности гидрометрических данных», но отвечал случаю практически полного отсутствия региональных данных о режиме подземных вод, их динамике внутри гидрологического года. Поэтому автор в основу выделения двух категорий подземного питания реки вынужден положить анализ самого гидрографа, способ, который в последующем нашел отражение в работах американских гидрологов при расчленении гидрографов с помощью кривых истощения. Наименьшие расходы на

многолетнем графике стока принимались за показатель питания реки глубокими подземными водами. Прямые, проведенные по точкам таких наименьших расходов, отчленяли на гидрографе устойчивое «зарегулированное» питание указанной категории подземных вод. Линия, срезающая все пики подъема половодий и паводков, отражала динамику «аллювиальных и верхних грунтовых вод». Как видно из приведенной цитаты, при характеристике динамики подземного питания реки «аллювиальными и верхними грунтовыми водами» находит отражение сложный процесс отдачи речных вод после их накопления вследствие «длительных подъемов уровня воды в реке, насыщающих аллювий своей долины». В последующем этот водообмен между рекой и грунтами берегов в строгом гидрогеологическом обосновании получил название «берегового регулирования».

Достоинство предложенного Глушковым принципа расчленения стока заключается в том, что выделение подземной составляющей производится в предположении о динамичности подземного стока в реки. Вследствие отсутствия гидрогеологических данных эта динамичность учитывалась грубо схематизированно и устанавливалась на гидрографе приближенно по характерным расходам реки.

Из обзора многочисленных работ гидрологов по оценке подземного питания рек, выполненных в последующие годы, видно, что прием схематизации процесса подземного стока в реки при анализе гидрографов нашел широкое применение, в особенности при региональных обобщениях, часто, к сожалению, отражая в каждом отдельном случае субъективное представление автора о динамике подземного стока внутри года. Характерной особенностью таких схематизаций является стремление большинства авторов к унификации своих схем расчленения для всех объектов. Основным различием между схемами разных авторов при этом является положение линии, расчленяющей гидрограф реки на подземную и поверхностную составляющие в период половодья.

В 1930 г. В. С. Советов [39] предлагает схему расчленения стока р. Ижоры, допуская, что подземное питание реки с началом половодья увеличивается до максимума, наступающего примерно через месяц после прохождения пика половодья, с последующим медленным уменьшением подземного стока к межени.

В эти же годы А. В. Огиевский [61] разрабатывает схему расчленения, считая, что в период подъема воды в реке при половодье увеличение подземного питания происходить не может и оно остается постоянным, ограничиваясь только «глубоководной своей частью». В последующем увеличение подземного питания наступает одновременно с началом спада воды в реке.

Схема расчленения гидрографа рек по Б. В. Полякову [64]

отличалась от схемы А. В. Огиевского предположением, что влияние увеличения гидростатического давления речных вод при половодье и паводках на разгрузку в реку глубоких водоносных горизонтов полностью прекратит и ее глубоководное подземное питание; при подъеме уровня речных вод подземный сток в реку не происходит. В этом случае река служит источником питания подземных вод прибрежных зон.

Несмотря на стремление гидрологов к объективной оценке подземного питания рек с учетом динамики подземного стока, отсутствие гидрогеологического обоснования и фактического материала о режиме подземных вод в значительной мере снижало эффект различных предложений по учету динамики подземного стока в реку в период значительных и длительных изменений уровня воды в ней. Особенно сложно обстоял вопрос с учетом динамики подземного питания рек в работах, требующих получения региональных характеристик подземного питания рек на больших территориях по большому количеству разнообразных объектов. Необходимость выполнения массовых расчетов приводила гидрологов к использованию приемов приближенных оценок подземного стока в реки по упрощенным схемам расчленения. В качестве примера возможности получения при этом положительных результатов можно привести количественную оценку величины подземного питания рек по типовым гидрографам, выполненную М. И. Львовичем для классификации рек по генетическим признакам питания [53]. Полученные результаты позволили автору в первом приближении оценить размеры подземного питания отдельных рек на всей территории страны в классификационных целях.

Широкое применение приближенных приемов расчленения гидрографов без достаточных гидрогеологических обоснований характерно до самого последнего времени для американских и большинства других иностранных гидрологов. Наиболее ярко это выражено в американской школе. В ней главной задачей расчленения гидрографа ставится определение объема поверхностного (склонового) стока (direct runoff) по данным ливня. Считается, что вне зависимости от принятого метода расчленения получаются приблизительно одинаковые объемы этого стока, и поэтому «выбор того или иного метода не играет существенной роли, необходимо лишь систематически пользоваться одним и тем же методом» [47, стр. 459]. Исходя из такого утилитарного положения, и строятся приемы расчленения.

Считается, что положение участка гидрографа подземного стока в реку для периода подъема воды в ней точно не может быть определено. Поэтому основное внимание обращается на построение ветви его спада. Для этого на гидрографе реки определяют участок, характеризующий расходование аккумулированной в бассейне воды при отсутствии поверхностного (склоно-

вого) стока, когда питание реки происходит только за счет подземных вод. Этот участок, таким образом, соответствует кривой спада подземного питания реки. Обратной экстраполяцией ее от начала послепаводочного периода строят ветвь спада подземного питания. Время наступления пика гидрографа подземного стока в реку и форму кривой подъема рекомендуется выбирать произвольно. Примером такого построения, в частности, может служить схема Н. Риггса [66], в которой линия расчленения проводится путем двойной экстраполяции кривой спада подземного питания на гидрографе реки. Риггс предполагает, что в начале паводка подземное питание продолжает уменьшаться в соответствии с кривой спада. Максимум подземного питания, по Риггсу, должен наступать в период образования пика паводка. В соответствии с этим и производится экстраполяция кривой спада от конца предпаводочного периода до момента наступления пика паводка и от начала послепаводочного

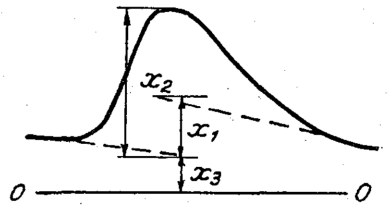


Рис. 1. Расчленение гидрографа (по Н. Риггсу).

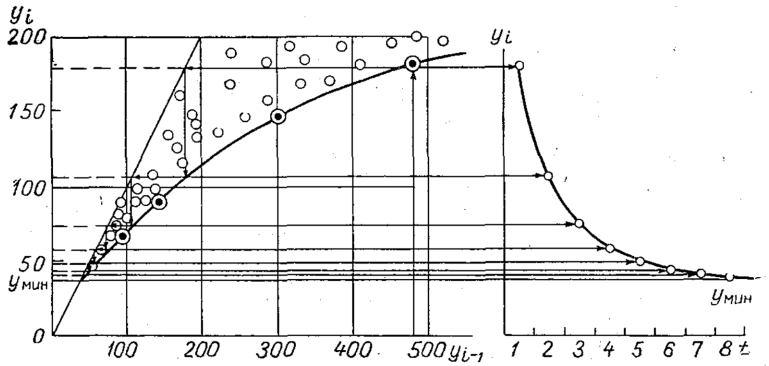


Рис. 2. Схема построения «кривой истощения» по нижней огибающей, по М. И. Гуревичу.

периода до того же момента пика; при наступлении пика паводка происходит резкое скачкообразное повышение подземного питания (рис. 1).

Одновременно кривая спада находит применение в немецких исследованиях, начиная с Вундта, который считает, что при одинаковых условиях погоды и при сходных почвенном и растительном покровах кривые спада имеют одинаковую форму, и предлагает называть их «кривой истощения стока» (рис. 2, по Р. Келлеру [31]). В этих исследованиях кривая истощения стока

рекомендуется для оценки подземного питания реки в среднем за многолетний период.

Несмотря на всю условность таких предложений и отсутствие в них конкретного гидрогеологического обоснования, нужно отметить, что приемы объективного построения «кривых истощения (спада)» (рис. 2) могут представить в настоящее время известный интерес для дальнейшего использования в анализе гидрологического и гидрогеологического материалов при изучении подземного питания рек.

Наряду с приемами расчленения гидрографа при помощи кривой спада в работах очень многих иностранных гидрологов, как упоминалось, до настоящего времени находит место схема расчленения по низким точкам гидрографа. Примером этому могут служить схемы расчленения Е. Натерманна, В. Фридриха, в которых линией раздела поверхностного и подземного стока служит «нижняя огибающая», проходящая через низкие точки гидрографа [31, 39, 66 и др.]. Допущение того, что каждая такая точка характеризует чистое подземное питание реки, настолько в настоящее время представляется условным, что такой способ в большинстве случаев не может быть применен.

Объективные предпосылки потенциальных возможностей к более глубокому гидрогеологическому обоснованию исследований подземного питания рек начинали складываться в нашей стране в связи с развитием изучения подземных и поверхностных вод в их естественных взаимосвязях. Работы эти были организованы в Государственном гидрологическом институте в конце 20-х годов и были начаты под руководством В. Г. Глушкова и Б. Л. Личкова. Длительный период организации наблюдений, сложность получения регионального материала для всей территории страны не позволили быстро собрать необходимые данные о режиме подземных вод и до настоящего времени в полной мере не обеспечивают строгих расчетных решений проблемы подземного питания рек на больших территориях.

Однако участие и заинтересованность гидрогеологов в изучении подземного стока в реки в значительной мере способствовали более правильному направлению этих исследований с учетом гидрогеологической сущности этого сложного явления.

Необходимость изучения подземного питания рек в гидрогеологическом аспекте возникла в первую очередь в связи с разработкой метода оценки естественных ресурсов («динамических запасов») подземных вод, основанного на высказанном Ф. А. Макаренко в 1937—1939 гг. простом и ясном положении: «... полная величина динамических запасов грунтовых вод, не использованных природой и человеком, равна в среднем балансовом выражении полной величине их дренирования» [56]. Таким образом, в качестве количественного показателя естественных ресурсов грунтовых вод Макаренко предложил принимать вели-

чину подземного стока в реку. При этом впервые в анализ величин подземного питания реки им вводится гидрогеологический критерий изменчивости подземного стока в бассейне реки, определяемый независимым способом по данным специальных гидрогеологических наблюдений за режимом дебита опорных родников.

Рассматривая вопросы оценки динамических запасов грунтовых вод в бассейнах горных рек (Сочи-Гагринский район), где с увеличением запасов грунтовых вод синхронно растет и подземное питание реки, Ф. А. Макаренко [56] в последующем допускает ошибку, придавая своей схеме унифицированное значение для всех рек страны, без учета фактической динамики подземного стока в зависимости от различных гидродинамических условий взаимосвязи водоносных горизонтов с реками. Несколько позже К. П. Воскресенский [15] предложил аналогичное схематизированное расчленение гидрографа, в котором принимал, что с началом половодья происходит постепенное увеличение подземного стока в реку с максимумом в конце половодья.

Постановкой «Проблемы взаимосвязи подземных вод и поверхностного стока» в Лаборатории гидрогеологических проблем Академии наук СССР и связанными с ее решением работами под руководством Ф. П. Саваренского в середине 40-х годов было положено начало широкому развитию гидрогеологического обоснования исследований подземного питания рек. К этому времени был накоплен некоторый фактический материал натурных наблюдений за взаимосвязью рек с подземными водами, появились режимные данные об уровнях подземных вод в речных бассейнах. Правда, данные эти были весьма ограничены, но уже позволяли более объективно оценивать возможные закономерности взаимосвязи реки и подземных вод, различие в динамике подземного стока в реки в зависимости от различных условий гидравлической связи последних с водоносными горизонтами, их питающими.

Теоретической основой правильной постановки вопроса о закономерности подземного стока является деление подземных вод по принципу вертикальной гидродинамической зональности, предложенное Б. Л. Личковым. Причиной этой зональности является наличие в пределах суши большого количества базисов эрозии, дренирующих водоносные горизонты (комплексы). Эти базисы эрозии расчленяют толщу земной коры на две основные, качественно резко различные зоны: верхнюю — зону интенсивного водообмена и нижнюю — зону замедленного водообмена, различающихся по возобновляемости вод в сотни и тысячи раз.

Основным базисом дренирования вод суши служит поверхность моря. Для горных областей таким базисом является поверхность прилегающих равнин.

Учение о вертикальной гидродинамической и связанной с ней гидрохимической зональности подземных вод в последующем нашло всестороннее развитие в работах Ф. А. Макаренко, Н. К. Зайцева, В. А. Сулина, Н. И. Толстихина и др.

Характерной особенностью подземных вод внутри отдельных зон является увеличение вверх динамичности — возобновляемости вод и соответственно уменьшение с глубиной степени воздействия атмосферы, связи с поверхностными водами и участия в формировании речного стока.

Ф. А. Макаренко, рассматривая всю область распространения подземных вод в земной коре в трехчленной гидродинамической зональности [зона замедленного водообмена у него подразделяется на две: зону замедленного стока (напорные артезианские воды) и зону относительного застоя (глубокие артезианские и «глубинные воды)], дает следующую оценку динамичности возобновления подземных вод в трех зонах: принимая показатель динамичности вод зоны активного водообмена за 1,0, динамичность средней зоны можно оценить коэффициентом 0,1—0,01, ниже — 0,001.

Отмечая особую динамичность вод верхней зоны, Макаренко объясняет это тем, что их циркуляция происходит выше местных базисов дренирования, рассекающих эту зону на мелкие бассейны.

Подземная миграция в этих блоках может завершаться «иногда лишь на первых метрах от поверхности и в весьма ограниченные сроки — в годы, сезоны и дни» [58].

Из положения о гидродинамической зональности подземных вод вытекает, что при оценке условий формирования подземного питания рек конкретных бассейнов необходимо учитывать возможность многоярусного залегания подземных вод, их гидродинамическую зональность и различную возобновляемость подземных вод отдельных зон водообмена, одновременно характеризующую и интенсивность подземного стока из водоносных горизонтов этих зон.

Главным направлением в исследовании по проблеме «Взаимосвязи подземных и поверхностных стоков», связанным с изучением подземного питания рек гидрогеологами в 40-х годах, явилось выявление гидрогеологической сущности процесса подземного стока в реки, выявление закономерности формирования подземного стока в речных бассейнах и динамики поступления его в реки из водоносных пластов, находящихся в различной гидравлической связи с реками. Особое место в этих исследованиях занимают работы Б. И. Куделина [39, 40, 41].

В исследованиях Куделина получили развитие общие вопросы постановки генетического изучения подземного стока в реки и впервые на гидрогеологической основе предложена схема классификации подземного питания рек.

Автор схемы характеризует взаимосвязь подземных и речных вод двумя противоположными процессами: подземным питанием поверхностных водотоков и водоемов за счет подземного стока из водоносных горизонтов речного бассейна и «отрицательным подземным питанием» рек — подземными потерями поверхностных вод на питание подземных.

Достоинством предложенной схемы явилось объективное отражение в ней возможного многообразия источников подземного питания (различные водоносные пласты речного водосбора), а также динамики непосредственного поступления подземного стока в речное русло в зависимости от характера гидравлической связи речных и подземных вод. Подземное питание рек в схеме делится на грунтовое и артезианское.

Динамика подземного стока в реки из отдельных водоносных горизонтов определяется степенью гидравлической связи их с рекой. Куделин при изучении подземного питания рек предлагает выделять: 1) грунтовые воды, гидравлически не связанные с рекой; 2) грунтовые воды, гидравлически связанные с рекой; 3) смешанное грунтовое питание; 4) смешанное грунтовое и артезианское питание.

Автор схемы классификации подземного питания рек в своих работах детально освещает вопрос о закономерностях подземного питания рек при гидравлической связи их с водоносными горизонтами и физически раскрывает значение прирусловых объемов этих горизонтов «как естественного сезонного регулятора речного стока». На основе обширного анализа данных о взаимосвязи уровней подземных вод в приречной части водоносных пластов и речных вод, с использованием приемов гидродинамических расчетов методом конечных разностей Куделиным были выявлены основные закономерности водообмена между рекой и гидравлически связанными с ней водоносными пластами в период половодья или паводков. Процесс этого водообмена был назван береговым регулированием речного стока. Изучение берегового регулирования на отдельных участках больших рек, а также средних и малых рек с руслом в широко развитом аллювии (Волга, Ока, Казанка и др.) позволили автору сделать следующие основные выводы о закономерности берегового регулирования речного стока:

1) общая продолжительность берегового регулирования речного стока занимает время, равное приблизительно общему периоду весеннего половодья (отдельного паводка);

2) в процессе берегового регулирования происходит лишь перераспределение речного стока внутри самого весеннего половодья (отдельного паводка);

3) «... только за весь период половодья и только с точки зрения водного баланса половодья для каждого створа (поперечника) реки можно принимать

грунтовое питание из водоносных горизонтов, гидравлически связанных с рекой, равным нулю» [40, стр. 93];

4) за счет аккумуляции подземных вод в водоносных пластах, не находящих стока в реку из-за подпора в период весеннего половодья, создаются запасы подземных вод, которые оказывают заметное влияние на водоносность реки в меженный период.

Детальное изучение общего процесса подземного питания этих же объектов позволило исследователю установить следующие общие закономерности развития грунтового стока в реку из водоносных пластов, гидравлически связанных с рекой:

1) режим подземного стока в реку находится в полной зависимости от режима реки. Изменение уровня воды в реке является основным определяющим фактором динамики грунтовых вод аллювиальных отложений. Все другие факторы (литологические особенности и водные свойства пород, условия питания грунтовых вод и др.) имеют подчиненное значение;

2) подземный сток из водоносных пластов, гидравлически связанных с рекой, весьма динамичен. Эта динамичность в период подземного питания реки («положительный подземный сток») объясняется «гидрогеологическими причинами», в которых находит выражение изменение режима грунтового стока в зависимости от условий питания водоносных пластов. В период половодья и паводков при превышении уровня речных вод над поверхностью гидравлически связанных с ними грунтовых вод (при подземных потерях — «отрицательный подземный сток») решающим фактором является изменение уровня воды в реке;

3) общая закономерность отдельных фаз подземного питания реки (максимум, минимум, начало и окончание фазы подземных потерь и т. п.) по длине реки характеризуется запаздыванием в сроках наступления в нижнем створе по сравнению с верхним на так называемый период «добегания» паводочной волны между створами;

4) основным положением всей рассматриваемой схемы принимается: «Аллювий служит тем обязательным транзитным путем, через который осуществляется связь подземных и речных вод» [40, стр. 228].

Существенно важное значение для развития исследований подземного питания рек имело обсуждение этой проблемы на III Всесоюзном гидрологическом съезде в 1957 г. На секции подземных вод и проблем подземного питания рек съезда были детально рассмотрены общие вопросы методики изучения подземного питания рек, а также результаты некоторых региональных исследований подземного стока в различных физико-географических условиях. Основной особенностью обсуждения поставленных вопросов явилось их рассмотрение в аспекте принципа изу-

чения единства и взаимосвязи всех природных вод, как задачи, имеющей большое научное и практическое значение.

В решении секции отмечается необходимость развития «методики учета гидрогеологических условий в гидрологических расчетах» применительно к различным физико-географическим особенностям отдельных речных бассейнов и прямо указывается, что исследования подземного питания рек должны проводиться на основе анализа гидрогеологических, геологических и геоструктурных условий конкретных речных бассейнов с учетом режима подземного стока в реки из всех водоносных пластов зоны дренирования [71]. Решение вопроса о роли подземных вод в формировании половодья и паводков без учета геолого-гидрогеологических условий конкретных речных бассейнов не может привести к положительным результатам.

В то же время в решении проблемы подземного питания рек большое значение должны иметь работы по изучению просачивания, процессов питания подземных вод, режима временных водоносных пластов (верховодки), процессов конденсации и исследования по учету влияния на режим подземных вод гидрометеорологических факторов.

В разработках проблемы подземного стока одновременно с Б. И. Куделиным приняли участие А. Т. Иванов, Ф. М. Макаренко, Б. В. Поляков, М. П. Распопов и позднее другие исследователи.

В результате сложились условия для разработки основ комплексного гидролого-гидрогеологического метода изучения подземного питания рек и решения вопроса о принципах региональной оценки естественных ресурсов подземных вод.

На этом этапе развитие исследований подземного питания рек получает связь с практическим широким изучением ресурсов подземных вод, что обеспечивает привлечение в этих работах обширного гидрогеологического материала.

Теоретические основы метода региональной оценки естественных ресурсов подземных вод получили обобщение в фундаментальной работе Б. И. Куделина [40], явившейся по сути дела первым этапом практического осуществления широких работ по оценке естественных ресурсов подземных вод и их картирования в масштабах территории всей страны.

В гидрогеологии и раньше существовал метод определения естественных ресурсов подземных вод, основанный на вычислении их величины по формуле расхода подземного потока. Метод этот, основанный на детальных, разведочных, опытных и лабораторных работах большой трудоемкости, применялся И. В. Гармоновым и Г. Н. Каменским [17] для определения естественных ресурсов (динамических запасов) грунтовых вод Печорско-Купавенского района. Наибольшее развитие метод расчета расхода подземного потока получил при оценках эксплуатационных

ресурсов подземных вод для решения вопросов водоснабжения отдельных объектов и изучения условий в районах конкретных водозаборов. Метод обеспечивает возможность установления изменения количества подземных вод в различных участках водоносных пластов в зависимости от их неоднородности. Однако использование такого способа для оценки ресурсов подземных вод больших речных бассейнов, а тем более всей территории страны совершенно нереально.

В то же время потребность в такой региональной оценке возникла в связи с широким и все развивающимся использованием подземных вод в народном хозяйстве Советского Союза. Решение этой задачи стало возможным благодаря предложенному Б. И. Куделиным комплексному гидролого-гидрогеологическому методу расчленения гидрографа реки, сочетающему в себе качественные обобщения по гидрогеологическим условиям формирования подземного стока в речном бассейне с количественной оценкой этого стока путем определения величины подземного питания данной реки на гидрографе.

Успешное применение метода для количественной характеристики естественных ресурсов подземных вод на большей части территории СССР было обеспечено возможностью получения объективной гидрогеологической характеристики условий формирования подземного стока в реки в границах расчетных бассейнов, замыкаемых гидрометрическими створами постоянных наблюдений Гидрометслужбы.

В то же время использование гидрометрического материала наблюдений за речным стоком по большому количеству пунктов Гидрометслужбы обеспечило количественную оценку подземного питания рек по бассейнам и последующее широкое региональное картирование подземного стока по всей территории страны.

Практическая возможность осуществления принципов региональной оценки естественных ресурсов подземных вод на основе результатов расчета его величин методом расчленения гидрографа была доказана работами по Центрально-Черноземному району, Московскому артезианскому бассейну, Центрально-Промышленному району, на территории площадью свыше 13 млн. км^2, выполненных в 1955—1960 гг. под руководством Б. И. Куделина [42].

В 1959 г. начиналось проведение широких исследований по региональной оценке подземного стока на территории СССР в совместных работах геологического факультета МГУ, ГГИ с участием Гидрорежимной экспедиции ВСЕГИНГЕО. Общее руководство этими работами осуществлял Б. И. Куделин. Исследования эти по сути дела представляют собой второй этап комплексного гидролого-гидрогеологического изучения процессов формирования подземного стока зоны интенсивного водообмена. Главной задачей работ этого этапа явилось составле-

ние региональных обобщений в виде комплексов карт для территории Советского Союза в масштабе 1 : 5 000 000 и 1 : 2 500 000 по основным параметрам подземного стока в реки как показателям величины естественных ресурсов подземных вод основных водоносных горизонтов (комплексов) зоны интенсивного водообмена. Одновременно эти карты, как следует из сущности явления подземного стока зоны интенсивного водообмена, дают ценную характеристику ресурсов речного стока в отношении величины его подземной составляющей — подземного питания рек, а также дают возможность оценить соотношение ресурсов речных и подземных вод, весьма важное для планирования их комплексного использования. Фактически уже в самом начале эти работы получают связь с разработками Генеральной схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов СССР, что придает им большую практическую значимость. В связи с этим в 1962 г. вопросы методики оценки подземного стока были детально рассмотрены на специальном семинаре в Москве, организованном Институтом географии АН СССР, ГГИ, кафедрой гидрогеологии МГУ и институтом «Гидропроект».

Наряду с решением конкретной задачи о данных по подземному стоку для Генеральной схемы обсуждение методических вопросов и рекомендации семинара способствовали дальнейшему развитию исследований по проблеме подземного стока как одной из наиболее актуальных задач в гидрологии и гидрогеологии.

В рекомендациях семинара [71] по методическим вопросам даются следующие предложения.

1. Практически реальным методом оценки подземного стока в реки для обоснования Генеральной схемы может служить комплексный гидролого-гидрогеологический метод генетического расчленения гидрографов, основным достоинством которого является возможность использования массовых материалов многолетних наблюдений за речным стоком на сети Гидрометслужбы с учетом физико-географических и гидрогеологических факторов формирования стока.

2. Самый сложный вопрос расчленения гидрографа для периодов половодья и паводков в связи со сложной динамикой подземного стока в реки из-за изменений в эти периоды условий связи между русловыми и подземными водами может быть решен следующими путями:

а) для генерализованных решений, например, для составления мелкомасштабных карт (менее 1 : 10 000 000) подземного стока в реки, при выделении подземной составляющей речного стока в период половодья и паводков, схематизируя процесс питания рек подземными водами, можно рекомендовать, ориентироваться на предпаводочный и послепаводочный расход воды с некоторым увеличением суммарного подземного стока на спаде

50 000 км². Применение схем расчленения гидрографов, учитывающих сложное сочетание трех основных типов режима подземного стока в реку (преимущественно подпорного, преимущественно нисходящего и смешанного), обеспечило получение объективных количественных характеристик подземного стока с учетом конкретных гидрогеологических условий реальных расчетных бассейнов.

Все карты подземного стока строились по результатам расчета с учетом характеристики однородности гидрогеологических условий формирования подземного стока (обводненность пород, условия питания и разгрузки подземных вод, общая характеристика их режима), что позволяет произвести всесторонний анализ сложных закономерностей формирования подземного стока в региональном аспекте на больших территориях.

Карты подземного стока показывают в количественном выражении общие закономерности формирования стока подземных вод под влиянием трех основных факторов — климата, геоструктурных особенностей (и связанного с ними рельефа) и гидрогеологических условий. Влияние климата придает распределению подземного стока черты ярко выраженной географической зональности. Геоструктурные особенности оказывают наиболее сильное влияние на интенсивность подземного стока горноскладчатых областей. Гидрогеологические условия (и в особенности карст) определяют более локальные закономерности распределения величин подземного стока.

Карты дают возможность расчета подземного стока в реки и естественных ресурсов подземных вод по каждому заданному району СССР для определения величин подземного питания рек, питания подземных вод при региональной оценке их эксплуатационных ресурсов, для водохозяйственных и воднобалансовых расчетов и перспективного планирования всех водных ресурсов в народном хозяйстве.

Говоря о рассмотренных картах подземного стока, необходимо отметить, что и до этих работ делались попытки составления региональных характеристик этого элемента водного баланса для больших территорий. В первую очередь это относится к составленной Б. В. Поляковым [64] карте по региональной оценке подземного питания рек Европейской территории СССР, выраженного через «модульный коэффициент» [отношение минимального модуля стока к среднемноголетней величине (норме) модуля общего речного стока]. Изменение подземного питания рек по территории на этой карте выражено в условных относительных единицах и в общем виде отражает некоторые черты географической зональности подземного стока. Вследствие условности принятого показателя величины подземного стока и ее схематичности карта Полякова не могла быть ши-

роко использована в практических работах по количественной оценке подземного питания рек.

Попытка регионального обобщения «нормы грунтового стока» и его величин в процентах от общего речного стока была предпринята Н. П. Лобанской [68] на основе применения к ограниченному количеству створов унифицированной схемы расчета грунтового стока по многолетнему внутригодовому распределению общего стока.

Особо следует отметить карту подземной составляющей полного речного стока, составленную в Институте географии АН СССР [55, 21].

В работах по расчету величин подземного стока в реки для этой карты, выполненных под руководством М. И. Львовича, вновь был применен уточненный прием расчленения гидрографа по «срезке» прямой, соединяющей на нем точки, «соответствующие величинам питания реки подземными водами до и после половодья». Основанием для этого явилось следующее положение.

В условиях бассейнов средних рек подземный сток в них осуществляется из водоносных горизонтов, как гидравлически связанных с рекой, так и гидравлически не связанных. Поэтому питание большинства средних рек осуществляется по смешанному типу, когда «аналогично процессу интерференции паводков» в периоды половодья происходит взаимная компенсация уменьшения стока из гидравлически связанных горизонтов с нарастающим подземным стоком водоносных пластов, гидравлически не связанных с рекой.

Не останавливаясь здесь на оценке получаемой в каждом из рассмотренных случаев точности определения величин подземного стока, необходимо отметить основной недостаток этих работ — отсутствие гидрогеологических критериев для выбора схемы и учета реальных гидродинамических условий связи рек с подземными водами для расчетных бассейнов. Составленные без достаточно объективного гидрогеологического обоснования, карты модульных коэффициентов подземного питания рек, «нормы грунтового стока» и подземной составляющей речного стока не содержат гидрогеологических характеристик условий формирования подземного стока. Это ограничивает возможность широкого использования их в дальнейших исследованиях подземного питания рек, когда открываются практические возможности привлечения фактического материала по режиму подземных вод, накопление которого с каждым годом все увеличивается и увеличивается.

Необходимость использования метода генетического расчленения гидрографа при массовой обработке гидрометрических материалов в большинстве случаев придавала практическим приемам расчленения черты схематизации. Другие существующие

методы изучения и расчета подземного питания рек достаточно полно описаны в монографиях и отдельных статьях [39, 40, 66], поэтому ниже сделаны лишь общие замечания о двух методах, рекомендуемых при организации полевых исследований по проблеме.

Одним из основных методов изучения подземного стока является гидрогеологический (гидродинамический) метод определения расходов подземного стока в реку при изучении баланса грунтовых вод в речном бассейне. Метод этот в наибольшей степени отвечает современным принципам проведения водобалансовых гидрологических и гидрогеологических исследований, так как дает возможность независимого и прямого определения величин подземного стока в реке по расходам потоков [8, 28, 39].

Методика гидрогеологических работ указанного направления основана на проведении детальных комплексных гидролого-гидрогеологических стационарных исследований и хотя и отличается сложностью и большой трудоемкостью организации натурных исследований, но обеспечивает для отдельных экспериментальных речных бассейнов при многолетнем периоде наблюдений получение наиболее полных количественных результатов и возможность выявления генезиса явления (более подробно см. главу 6).

Если в гидродинамическом методе величина подземного питания определяется по расходу воды в водоносных пластах, то так называемый гидрометрический метод расчета водообмена (питание или потери) между рекой и пластом использует возможность измерения подземных вод, поступающих в реку между двумя гидрометрическими створами. Практически целесообразно определение приращения (уменьшения) расхода реки производить в характерные периоды года, когда на изучаемом участке формирование стока происходит только за счет подземного питания (поверхностный склоновый сток в реку отсутствует), а боковая приточность речных вод может быть измерена с достаточной точностью.

Гидрометрический метод был применен в 1887—1888 гг. инженерами В. Г. Шуховым, Е. К. Кнорре и К. Элембке для оценки естественных ресурсов подземных вод надюрского водоносного горизонта по зимнему расходу р. Яузы и ее притоков, дренирующих этот горизонт. Для непосредственной оценки подземного питания рек этот метод был применен В. Н. Вальманом, Б. В. Поляковым, Б. И. Куделиным, Г. Н. Петровым и др. [59].

С учетом изменения объемов воды в русловой сети метод применялся Г. П. Калининым, О. Е. Мейцером и другими для определения подземной составляющей речного стока речных бассейнов ограниченных размеров.

В самые последние годы метод гидрометрической оценки подземного стока в реки под термином «гидрометрической съемки» получает широкое распространение в практике комплексных геолого-гидрогеологических съемок для региональной характеристики естественных ресурсов подземных вод при их средне- и крупномасштабном картировании [59]. Гидрометрическая съемка занимает существенно важное место в натурных исследованиях подземного стока в реки и поэтому специально рассматривается в главе 5.

Глава 2

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ КАК ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ РЕК

1. Источники подземного питания рек

Процесс поступления подземных вод в поверхностные водотоки и водоемы принято называть общим термином *подземное питание рек.*

Подземное питание является результатом сложной взаимосвязи речных и подземных вод, в общем случае характеризующейся двумя противоположными процессами — подземным стоком в реки и потерями речных вод на питание подземных — *подземными потерями* («отрицательное подземное питание», по Б. И. Куделину).

Источниками подземного питания рек являются постоянные и временные подземные воды, под которыми в данной работе подразумевается капельно-жидкая вода под дневной поверхностью, заполняющая поры и пустоты почвы или горной породы при общей сплошности и обладающая способностью вытекать из естественных или искусственных разрезов. К категории «подземных вод» в этом случае по формам воды в почво-грунтах относится «подпорная свободная гравитационная влага водоносного горизонта» (по А. А. Роде) или «свободная вода грунтового потока» (по С. И. Долгову). В условиях сплошного скопления подземных вод на водоупорах проявляется основная гидродинамическая особенность этой категории вод — способность формировать *подземный сток* — движение воды по водоносным пластам под действием гидравлического напора или стекания ее по водоупорному ложу под действием силы тяжести.

Основное подземное питание рек формируется *постоянными подземными водами* в водоносных пластах, существующими в течение ряда лет. *Временные подземные воды* существуют меньше, чем годовой цикл изменений водности, в отдельные сезоны года. Синонимом временных (сезонных) подземных вод является термин *верховодка* [73]. В гидрогеологии принято выделять два основных типа верховодки: воды, приуроченные

к поверхности линз водонепроницаемых пород среди проницаемых, и воды в толще почво-грунтов, залегающих на поверхности отдельных пластов, обладающих меньшей инфильтрационной способностью («слой глинистого или мелкозернистого песка среди толщи среднезернистых песков или слой более плотного суглинка среди более рыхлых суглинков», «иллювиальный горизонт под почвой» и т. п.).

Временные водоносные пласты с верховодкой первого типа, как правило, не имеют сплошного распространения по площади, и их дренирование может происходить лишь на ограниченном участке временных и малых водотоков. В подземном питании рек такая верховодка может принимать малое участие, в большинстве случаев просачиваясь с краев линз в нижележащие постоянные водоносные пласты, дренируемые данной рекой.

Верховодка второго типа обладает большим пространственным распространением и поэтому в формировании подземного питания малых водотоков и ручейковой сети может иметь значение в первую очередь в зоне избыточного увлажнения.

Скопление подземных вод, залегающих только в пределах почвенной толщи и гидравлически не связанных с нижележащими водоносными пластами, целесообразно выделить как особую категорию — *почвенные воды* (А. А. Роде). В отличие от более глубоких подземных вод, эти воды резко отличаются своим химическим составом, тепловым режимом, интенсивностью водообмена с атмосферой и значением биологических процессов в формировании особенностей их режима. Почвенные воды могут быть постоянным скоплением лишь в почвах болотного типа, почему их в большинстве случаев следует относить к категории временных подземных вод и по предложению А. А. Роде называть «почвенной верховодкой» [72].

Особый интерес в отношении оценки источников подземного питания рек представляют грунтовые воды.

Грунтовыми водами, по определению Б. Л. Личкова, называют все неглубоко залегающие безнапорные и с местным напором подземные воды в водоносных пластах, дренируемых реками или вскрываемых эрозионной сетью и понижениями рельефа. В таком определении для грунтовых вод характерна возможность залегания в нескольких водоносных пластах друг под другом. В гидрогеологии существует и более узкий термин «грунтовые воды», который относят только к подземным водам первого от дневной поверхности водоносного пласта (по С. И. Никитину).

Грунтовые воды, которые «постоянно или по меньшей мере периодически» находятся в гидравлической связи с влагой, содержащейся в почвенной толще, называются *почвенно-грунтовыми водами* [72]. Гидравлическая связь при этом может проявляться в том, что в пределах почвенной толщи появляется

зеркало или верхняя граница капиллярной каймы грунтовых вод. К этой группе Роде относит воды пойменных террас.

К разновидности почвенно-грунтовых вод следует отнести *болотные* («болотные грунтовые») *воды* — грунтовые воды, зеркало которых находится в торфяной залежи участков, на которых произрастает специфическая болотная растительность (болота). Особенности болотно-грунтовых вод как источника подземного питания рек в первую очередь определяются водными свойствами торфяной залежи. Содержащуюся в торфяной залежи воду можно разделить по характеру ее связи с торфяной массой на две основные формы — свободную, стекающую из торфяной залежи под действием силы тяжести в болотную гидрографическую сеть, и связанную — не отделяющуюся от торфяной массы под действием силы тяжести. Наличие связанной воды приводит к тому, что даже при наличии дренажной сети на болоте в торфяной залежи влажность ее не падает ниже 85%, и лишь испарение, затрагивающее связанную воду, приводит к уменьшению содержания влаги в торфе. Ограниченное содержание свободной воды в торфяной залежи имеет первостепенное значение для оценки роли болотных вод в питании и режиме реки, более детально рассматриваемой ниже.

По своему большому значению в формировании подземного питания рек среди грунтовых вод должны быть особо выделены *аллювиальные воды*, залегающие в аллювиальных отложениях современных и древних речных долин. Это значение обусловлено тем, что сток аллювиальных вод принимает непосредственное участие в питании реки. Одновременно с этим через водоносные пласты аллювиальных вод осуществляется транзит подземных вод из других водоносных пластов со всего водосбора в реку. Особенно характерно это для большинства равнинных рек, в долинах которых вдоль русла наблюдается широкое развитие аллювиальных отложений. В то же время именно в прирусловой зоне распространения аллювиальных вод развивается процесс берегового регулирования, который, как будет показано дальше, в очень многих случаях определяет особенности режима подземного питания рек.

Подземные воды ниже первого водоносного пласта, непосредственно связанного с атмосферой, залегают между пластами водоупорных или слабопроницаемых пород и поэтому их называют *межпластовыми водами.*

По характеру развития напоров в межпластовых водах следует выделять: *безнапорные подземные воды* со «свободной» поверхностью, когда водопроницаемый пласт, в котором развиты межпластовые воды, заполнен не на всю мощность; «свободная» поверхность таких вод, в отличие от первого водоносного пласта, непосредственно с атмосферой не связана; *напорные подземные воды,* находящиеся постоянно под

гидростатическим (гидродинамическим напором; в большинстве случаев межпластовые воды являются напорными; *смешанные напорно-безнапорные подземные воды,* характеризующиеся сменой условий питания и режима на различных участках одного и того же водоносного пласта.

По характеру скопления все подземные воды подразделяются на два основных типа: *пластовые* и *трещинно-жильные.*

В *пластовых водах* по условию распространения их в различных водовмещающих породах следует различать: *порово-пластовые воды* — в рыхлых обломочных породах, в которых скопление и движение воды происходят в мелких порах-пустотах между зернами обломочного материала; *трещинно-пластовые воды* — в слоистых сцементированных трещиноватых породах, в которых накопление и движение воды связаны с наличием трещин; *карстово-пластовые воды* — в пластах закарстованных пород с хорошо выраженной слоистостью, трещинами и карстовыми пустотами, в которых происходит скопление и движение воды.

Основной особенностью всех вод пластового типа является более или менее равномерное распределение воды по всему пласту и зависимость их движения от характера слоистости, строения и залегания водовмещающих пород.

Трещинно-жильные воды получают развитие в массивных изверженных, в сильно метаморфизированных осадочных породах, в которых накопление и движение воды возможны лишь по трещинам, или в закарстованных породах, в которых пластовая слоистость в характере скопления и движения воды имеет второстепенное значение. В отношении режима питания и разгрузки трещинно-жильные воды в общем случае можно предложить подразделять по степени связи с дневной поверхностью на открытые и закрытые. К открытым трещинным жильным водам относятся воды, имеющие свободный водообмен с дневной поверхностью; к закрытым водам — при затрудненном, иногда весьма затрудненном водообмене.

В зависимости от формы скопления подземных вод и условий дренирования находится характер их выхода на земную поверхность в местах разгрузки. При этом следует различать: *пластовые выходы,* когда подземный поток разгружается на относительно большом участке склона земной поверхности (в русло или ложе водоема), и *родники* (источники, ключ) — сосредоточенный естественный выход подземных вод. [1]

Разгрузка подземных вод пластовыми выходами является основной формой подземного питания большинства рек и детально рассматривается ниже. В большинстве случаев сток род-

[1] Наиболее полная классификация родников дана в 1958 г. М. Е. Альтовским [5].

ников, принимающий непосредственное участие в формировании речного стока, имеет меньшее значение. Однако режим родников в определенных условиях может служить показателем динамики общего подземного стока из дренируемого водоносного пласта, и поэтому данные о нем должны широко использоваться в расчетах подземного питания.

Родники по условиям питания делятся на *нисходящие* и *восходящие*.

Нисходящие родники питаются безнапорными подземными водами при движении воды в области питания родника по слабо изогнутым линиям тока, для которых родник является точкой наименьшего напора.

Восходящие (напорные) *родники* питаются напорными водами при движении их к месту разгрузки снизу вверх.

При изучении подземного питания рек по времени действия целесообразно выделять: *постоянно действующие родники,* характеризующиеся непрерывной деятельностью в течение многих лет, и *периодически действующие родники*, сток которых временно прекращается вследствие особых условий питания (сезонно действующие, ритмично действующие и т. п.).

Для оценки динамичности подземного стока в реки существенно важной является классификация родников по степени изменчивости их расхода (дебита), выражаемой коэффицинтом динамичности родникового (подземного) стока — отношением наименьшего расхода к наибольшему за заданный период времени в году (месяц, сезон и т. п.). Такая классификация, по М. А. Альтовскому, в несколько измененном виде дана в табл. 2.

Таблица 2

Классификация родников по степени изменчивости их расходов

Характеристика родников	Внутригодовой коэффициент динамичности	Группа
Весьма постоянные	1 : 1	1
Постоянные	от 1 : 1 до 1 : 2	2
Переменные	от 1 : 2 до 1 : 10	3
Весьма переменные	от 1 : 10 до 1 : 30	4
Исключительно непостоянные	от 1 : 30 и менее	5

Из описания основных типов скопления подземных вод можно видеть, что для пластовых вод могут наблюдаться пластовые выходы и родники, в то время как для трещинно-жильных вод характерным является разгрузка через родники.

2. О режиме основных источников подземного питания рек

В гидрогеологии под режимом подземных вод обычно понимают проявление процесса их формирования, представляющего собой сложную совокупность явлений, происходящих во времени и в пределах определенного пространства [38]. Режим характеризуется изменениями во времени и пространстве количества и качества (состав, состояние и свойства) подземных вод, выражаемых конкретными показателями по отдельным элементам (уровни, расходы, уклоны, скорость движения, температура, химический и газовый состав и др.).

Изучение режима подземных вод составляет обширную область гидрогеологических исследований, и изложение этого вопроса представляет большую самостоятельную работу. Поэтому ниже даются лишь общие представления о режимах подземных вод, необходимые для учета особеностей формирования подземных вод в речных бассейнах, влияющих на подземное питание рек. В первую очередь это относится к характеристикам режима уровней (расходов) подземных вод как показателей особенностей питания и стока подземных вод.

Наибольший интерес при изучении подземного питания рек представляют подземные воды зоны интенсивного водообмена, которые залегают в неглубоких водоносных пластах и принимают основное участие в формировании подземного стока в реки.

Зоной интенсивного водообмена при изучении подземного питания рек целесообразно называть верхний ярус сравнительно неглубоко залегающих обычно пресных или солоноватых безнапорных и напорных вод, которые находятся в сфере дренирующего воздействия речных систем, озер, бессточных впадин или разгружаются в прибрежной зоне непосредственно в море [42]. Под дренирующим воздействием гидрографической сети могут находиться и более глубокие воды которые в гидрогеологии относят к зоне замедленного водообмена, но их участие в подземном питании, как правило, ограниченно.

Подземные воды зоны интенсивного водообмена находятся под интенсивным воздействием гидрометеорологических факторов. Это относится как к первому от поверхности водоносному пласту, находящемуся в непосредственной связи с атмосферой, так и к пластам межпластовых вод, изолированным друг от друга в большинстве случаев относительными водоупорами. Верхние водоносные пласты с учетом гидрогеологических особенностей водоносных пород являются наиболее мощными и обильными коллекторами воды.

Воздействие на подземные воды зоны интенсивного водообмена гидрометеорологических факторов, изменяющихся во времени, определяет их неустановившийся режим.

В гидрогеологических расчетах различных сооружений, особенно при оценке длительных многолетних периодов, учитывается, что проектируемые сооружения в большинстве случаев приводят к более резким изменениям основных элементов фильтрационного потока (средняя величина напоров, скоростей и расходов), чем это происходит в естественных условиях под действием природных факторов, и допускается использование средних величин этих элементов, квазипостоянных во времени. «Исключением являются лишь прирусловые части крупных рек, где колебания горизонта воды и связанные с ними колебания уровня подземных вод в береговой полосе могут быть весьма значительными» [8].

В исследованиях подземного питания рек оценка влияния неустановившегося режима подземных вод на динамику подземного стока в реки, особенно при характеристике распределения подземного питания внутри года, требует специального рассмотрения.

Возможность допущения в таких расчетах осредненных во времени значений отдельных элементов фильтрационных потоков, в первую очередь уровней и расходов, должна определяться поставленной задачей и достигаемой в зависимости от обеспеченности фактическими материалами точностью расчетов.

Особенность питания и стока подземных вод можно охарактеризовать режимом уровней (расходов) подземных вод, учитывая, что их изменение определяется общим балансом водоносного пласта, соотношением его приходных и расходных составляющих. В этом отношении подземным водам, залегающим в зоне интенсивного водообмена на различной глубине, может быть дана следующая общая характеристика.

Почвенные воды и грунтовые воды в первом от поверхности водоносном пласте:

— питание в основном формируется за счет просачивания талых и дождевых вод; в отдельных случаях в питании могут принимать участие речные (озерные) воды, подпитывание из нижележащих напорных водоносных пластов, а также конденсация;

— расход для почвенных вод — испарение и транспирация, в большинстве случаев преобладающие над почвенным стоком;

— расход для грунтовых вод — подземный сток в реки (основной) в отдельных физико-географических районах и на отдельных участках водоносных пластов неглубокого залегания — испарение и транспирация (десукция); в отдельных случаях может происходить транзитный и подрусловой сток;

— соотношение испарения и подземного стока определяется глубиной залегания водоносного пласта: при мощности зоны аэрации до 0,5 м испарение преобладает над стоком; при мощности 0,5—4,0 м сток преобладает над испарением, при

мощности более 4 м испарение имеет подчиненное значение [38].

Для почвенных и грунтовых вод может наблюдаться расход воды на просачивание через относительные водоупоры в нижележащие пласты («глубокое просачивание»).

Грунтовые межпластовые безнапорные воды:

— питание — талые и дождевые воды в областях питания и просачивание из вышележащих водоносных пластов (основное), поступление речных и озерных вод, подпитывание из напорных пластов;

— расход — подземный сток в реки (основной), а также глубокое просачивание.

Напорные воды:

— питание — просачивание талых и дождевых вод в областях питания (основное), глубокое просачивание (может наблюдаться преимущественно на водораздельных участках района распространения напорного пласта), поступление речных и озерных вод, подпитывание из нижележащих напорных пластов;

— расход — подземный сток в реки, транзитный подземный сток, подпитывание вышележащих пластов, глубокое просачивание.

Как видно из приведенного описания различных типов подземных вод, питание их и его изменчивость для всех водоносных пластов зоны интенсивного водообмена в той или иной мере связаны или с непосредственным поступлением атмосферных осадков к поверхности подземных вод, или с просачиванием их через относительные водоупоры вышележащих водоносных пластов. Основной расход подземных вод, залегающих на глубине более 0,5 м, формируется преимущественно за счет подземного стока в реки.

Оценка величины и условий питания подземных вод является одной из основных задач в изучении их режима. Одновременно с этим ее решение в отношении определения периодов и абсолютных значений величины питания имеет большое значение в исследованиях подземного питания рек, так как дает возможность наиболее полно оценить динамику стока подземных вод, поступающих к дренирующим руслам рек, а тем самым определить и динамику непосредственного поступления подземных вод в реку с учетом трансформирующего влияния последней.

Питание верхних водоносных пластов подземных вод происходит неравномерно во времени и по площади распространения водоносного пласта.

Основным признаком наступления периода повышенного питания водоносного пласта является подъем уровня (увеличение напора) подземных вод. Анализ гидрогеологических данных показывает, что основное возобновление запасов подземных вод,

принимающих участие в подземном питании рек, на большей части территории СССР происходит в весенне-летний период в результате интенсивного поступления влаги при снеготаянии и дождях, в условиях более высокого увлажнения почво-грунтов зоны аэрации. Для подземных вод, питание которых происходит глубоким просачиванием, наибольшее увеличение запасов будет наблюдаться в период более высокого подъема уровня (напора) подземных вод в вышележащих пластах. Лишь в отдельных аридных районах страны может наблюдаться осенне-зимне-весенний подъем уровня подземных вод, характеризующий в условиях положительных средних зимних температур воздуха питание водоносных пластов интенсивными и продолжительными атмосферными осадками при низком испарении.

Для оценки возможных изменений гидравлических уровней в водоносных пластах при исследовании подземного стока в реки чрезвычайно важно знать время и амплитуду колебания уровня подземных вод.

Время и амплитуда колебания уровня подземных вод первого от поверхности водоносного пласта, зависящие от комплекса природных условий, в первую очередь состава водовмещающих пород и пород зоны аэрации, водного баланса последней, глубины залегания подземных вод, интенсивности поступления и количества талых и дождевых вод могут быть охарактеризованы на территории СССР следующими общими закономерностями.

В северных районах страны интенсивные подъемы с относительно большой амплитудой колебаний могут происходить в теплое время года по нескольку раз. При этом наиболее высокий и продолжительный подъем наблюдается при поступлении талых вод в весенний период. В южных районах подъем при прочих равных условиях приурочен к более короткому сроку — конец зимы (ранняя весна) — начало весны; а затем подъемы вообще могут наблюдаться не более 1—2 раз в год.

По высоте подъема уровня грунтовых вод в литературе имеются крайне скудные сведения, и фактический материал гидрогеологических наблюдений еще требует детального анализа. В первом обобщении этого материала, сделанном во ВСЕГИНГЕО [38] для ЕТС, можно найти сведения о величине и соотношении весенней и годовой амплитуд колебания грунтовых вод (см. табл. 3, 4).

Величина весенней амплитуды изменяется в общем направлении с севера на юг. В северных районах территории (зона избыточного увлажнения) весенний подъем в основном определяет годовую амплитуду. В зоне недостаточного увлажнения весенняя амплитуда подъема значительно уменьшается. Годовую амплитуду грунтовых вод здесь формирует летний спад в условиях высокого испарения.

Таблица 3

Величина отношения весенней амплитуды грунтовых вод к годовой в зоне избыточного увлажнения

Территория	Номера скважин	Амплитуда весеннего подъема, м	Годовая амплитуда, м	Отношение весенней амплитуды к годовой
Ленинградская область	108	1,65	2,45	0,70
	83	1,45	1,65	0,89
	869	0,80	0,80	1,00
	145а	0,48	0,48	1,00
Силурийское плато	1г	1,40	1,43	0,98
Пехорско-Купавинское междуречье Подмосковья	19	0,48	0,53	0,91
	21	0,80	0,84	0,95
	25	0,55	0,55	1,00

Таблица 4

Величина отношения весенней амплитуды к годовой в зоне недостаточного увлажнения

Территория	Номера скважин	Амплитуда весеннего подъема, м	Годовая амплитуда, м	Отношение весенней амплитуды к годовой
Прикаспийская низменность	1	0,05	0,28	0,18
	2	0,26	0,36	0,72
	3	0,04	0,19	0,21
	4	0,19	0,31	0,61
	5	0,28	0,36	0,77
Терско-Кумская низменность	6	0,4	0,54	0,79

Для характеристики величины амплитуды в различных физико-географических условиях, но при одинаковых гидрогеологических условиях залегания подземных вод в указанной работе находим следующие сведения: в условиях Пехорского-Купавинского междуречья амплитуда весеннего подъема грунтовых вод при глубине залегания 1,5 м составила 1,1 м, при глубине залегания 2,25 м — 0,7 м; на краевой части лимана Тажи (Прикаспийская низменность) в аналогичных гидрогеологических условиях амплитуда весеннего подъема не превышала 0,3 м.

Анализ режима грунтовых вод территории ЕТС показывает, что осенние осадки могут оказывать влияние на колебания уровня подземных вод во всех зонах увлажнения. Характер и величина амплитуд осеннего подъема закономерно изменяются в зависимости от степени увлажненности территории. При переходе из зоны избыточного увлажнения к зонам умеренного и недостаточного увлажнения осенний подъем смещается на более поздние сроки и уменьшается по своим размерам.

В зоне избыточного увлажнения при определенной глубине залегания водоносного пласта могут четко проявляться небольшие летние подъемы, хорошо связанные со временем и количеством отдельных дождей, что практически не наблюдается уже в зоне недостаточного увлажнения.

Как было отмечено выше, расход грунтовых вод, принимающих основное участие в подземном питании рек, формируется подземным стоком. В связи с этим спад уровней подземных вод таких водоносных пластов в большинстве случаев будет характеризовать истощение запасов подземных вод главным образом за счет подземного стока в реки. Это не относится к зоне избыточного увлажнения при относительно высоком залегании грунтовых вод, а также к отдельным участкам водоносных пластов в других зонах увлажнения, когда небольшая глубина залегания подземных вод обусловливает значительную роль в водном балансе испарения и транспирации. Особое значение такие расходы грунтовых вод могут иметь на пойменных участках рек, где этот процесс обусловливает уменьшение транзитного подземного стока и, следовательно, подземного питания реки.

Влияние испарения на изменение уровня грунтовых вод объясняется капиллярным подтоком воды в зону аэрации, компенсирующим потери влаги, вызванные испарением. Однако часто этот расход грунтовых вод условно называют испарением с зеркала грунтовых вод.

Глубина от поверхности земли до зеркала грунтовых вод, на которой этим влиянием практически можно пренебречь, называется критической (Δ_0) и может быть приближенно рассчитана по эмпирической формуле Ковда

$$\Delta_0 = 170 - 8\,t_{ср} \pm 15 \text{ см}, \qquad (2)$$

где $t_{ср}$ — среднегодовая температура воздуха.

Для районов умеренного климата критическая глубина в зависимости от литологических свойств пород зоны аэрации грубо ориентировочно может изменяться от 120 до 150 см, в южных районах нашей страны (Средняя Азия, Закавказье, Южная Украина) — от 200 до 400 см [74].

В литературе встречаются лишь разрозненные сведения о зависимости интенсивности «испарения» от глубины залегания зеркала грунтовых вод. Так, например, Н. А. Кенесарин для Бухарского оазиса приводит следующие данные [33]:

Глубина залегания зеркала грунтовых вод, м	Среднесуточное испарение, мм
0,5	12,87
1,0	9,04
1,5	6,82

Изменение интенсивности испарения и расхода влаги из водоносного пласта в зону аэрации в зависимости от глубины его залегания хорошо иллюстрируется семейством кривых, полученных в условиях Араратской равнины (рис. 3) [2].

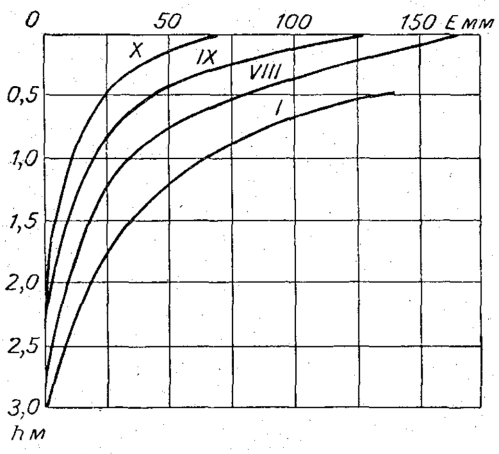


Рис. 3. Расход грунтовых вод на суммарное испарение E и влагонасыщение в зоне аэрации в зависимости от глубины грунтовых вод h (Армения, Араздаянская степь, по А. С. Акопяну).

Существенно важное воздействие на колебания уровня грунтовых вод (режим) оказывает мощность зоны аэрации, обусловливающая трансформацию осадков, поступающих на питание водоносного пласта. Для всех физико-географических условий графики зависимости амплитуды колебания подземных вод от мощности зоны аэрации отражают следующую общую закономерность (рис. 4). При близком к поверхности залегания грунтовых вод (до 0,5 м) амплитуда колебания уровня незначительна вследствие большого расхода воды на испарение, а также небольшой мощности водовмещающей толщи. При увеличении мощности зоны аэрации влияние испарения заметно уменьшается и амплитуда колебания увеличивается за счет более интенсивного транзитного потока воды через зону аэрации. При дальнейшем увеличении мощности водоудерживающая способность пород зоны аэрации уменьшает количество осадков, просачивающихся до грунтовых вод, и при определенных глубинах сезонность в колебаниях уровня подземных вод практически не наблюдается (диспульсивный тип режима грунтовых вод, по Г. Н. Высоцкому).

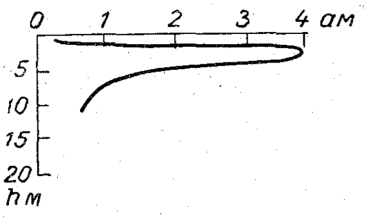


Рис. 4. Зависимость амплитуды колебания уровня грунтовых вод (a) от мощности зоны аэрации (h) (песок, Белоруссия [38]).

На колебания уровней грунтовых вод при идентичных условиях питания определяющее влияние оказывает различие литологического состава пород зоны аэрации и водовмещающих пород. Решающее значение при этом имеют коэффициент

фильтрации и так называемая величина μ, характеризующая изменение количества воды в порах при колебании свободной поверхности подземного потока.

Коэффициент фильтрации пород зоны аэрации выражает их водопроницаемость, от которой зависит величина инфильтрационного потока атмосферных осадков, поступающих на питание, и скорости его движения к поверхности грунтовых вод. Чем выше этот коэффициент, тем больший поток и быстрее может поступать к подземным водам.

В то же время с коэффициентом фильтрации водоносного пласта связан расход воды на отток. В этом случае величина оттока, а следовательно, и понижения уровня грунтовых вод будет находиться в прямой зависимости от коэффициента фильтрации.

Величине μ при опускании свободной поверхности потока соответствует *коэффициент водоотдачи* $\mu_в$, при ее повышении — *коэффициент недостатка насыщения* $\mu_н$:

$$\mu_н W_н - W_е - W_в, \tag{3}$$

$$\mu_н = W_н - W_е, \tag{4}$$

где $W_н$ — объем воды при насыщенном состоянии, $W_с$ — объем связанной воды, $W_е$ — объем воды при естественном воздушно-сухом состоянии, $W_в$ — объем подземного воздуха.

Учитывая, что для различных пород коэффициент фильтрации изменяется в очень широких пределах (от 0,001 и меньше для глин и других плотных пород до десятков метров в сутки для галечников и трещиноватых пород), а величина μ различается в сотни и тысячи раз (от 0,0002 для слабо трещиноватых пород до 0,35 в галечниках), можно судить о возможных различиях в колебаниях уровня грунтовых вод даже при одинаковом количестве атмосферных осадков, поступающих на поверхность водосбора.

Изменение годовых амплитуд колебания уровня грунтовых вод для различных зон увлажнения с учетом глубины залегания водоносного пласта при близком литологическом составе водовмещающих пород (песчано-суглинистые отложения) можно видеть из табл. 5 [38].

Совершенно особые условия формирования режима подземных вод создаются на участках вблизи дренирующих понижений и в первую очередь в местах непосредственной связи подземных и речных (озерных) вод. Взаимосвязь водоносного пласта с рекой более детально рассматривается ниже. Здесь же ограничимся лишь общими замечаниями о влиянии дренирующих понижений на режим уровня грунтовых вод. Основное влияние дрены на режим водоносного пласта в первую очередь

Таблица 5

Значение годовых амплитуд в зонах избыточного, умеренного и недостаточного увлажнения в зависимости от глубины залегания грунтовых вод

Зона	Среднегодовая глубина залегания, м	Гидрогеологическая станция	Годовая амплитуда, м
Избыточного увлажнения	<1	Северо-Западная	1,02
		Белорусская	1,02
		Щемиловский стационар ВСЕГИНГЕО	1,12
Умеренного увлажнения	<1	Средневолжская	1,42
Недостаточного увлажнения	<1	Северо-Казахстанская	0,47
Избыточного увлажнения	1—3	Северо-Западная	1,17
		Белорусская	1,37
		Щемиловский стационар ВСЕГИНГЕО	1,35
Умеренного увлажнения	1—3	Средневолжская	1,39
		Центрально-Черноземной полосы	2,83
Недостаточного увлажнения	1—3	Волго-Донская	0,72
		Северо-Кавказская	0,34
		Южно-Украинская	0,92
Избыточного увлажнения	3—5	Белорусская	2,0
		Горьковская	1,89
		Щемиловский стационар ВСЕГИНГЕО	1,18
Умеренного увлажнения	3—5	Центрально-Черноземной полосы	1,67
		Средневолжская	5,23
Недостаточного увлажнения	3—5	Волго-Донская	1,10
		Северо-Кавказская	0,34
		Южно-Украинская	0,21
Избыточного увлажнения	>5	Белорусская	0,75
		Горьковская	1,15
Умеренного увлажнения	>5	Центрально-Черноземной полосы	1,48
		Средневолжская	1,20
Недостаточного увлажнения	>5	Южно-Украинская	0,58
		Волго-Донская	0,35
		Северо-Кавказская	0,12
		Прикаспийская	0,44

должно сказываться на величине подземного стока из него. Прямая зависимость интенсивности дренирования водоносного пласта от густоты и глубины вреза эрозионной сети иллюстрирует их влияние на уровни подземных вод (уменьшение высоты подъема и увеличение скорости спада при высокой степени дренирования) и объясняется почти исключительно высокими расходами подземных вод на подземный сток.

Скорость спада уровня воды под влиянием дрены можно определить по формуле Буссениска для определения расстояния между дренами при отсутствии инфильтрации [38]

$$\frac{H-h}{\Delta t} = \frac{KHh}{\mu S^2}, \qquad (5)$$

где H — начальная глубина грунтовых вод, h — глубина при понижении уровня за время Δt, K — коэффициент фильтрации, μ — коэффициент водоотдачи, S — расстояние до дрены.

Из уравнения (5) прямо вытекает, что скорость спада уровня при отсутствии инфильтрации тем больше, чем меньше расстояние до дрены (обратно пропорционально квадрату расстояния до дрены). Зависимость интенсивности подземного стока от степени дренированности территории в географическом аспекте дается при региональном обзоре во второй части работы.

В характеристике многолетней изменчивости подземного питания рек некоторое значение могут иметь данные об изменении режима подземных вод в многолетнем разрезе. Однако выполненный до настоящего времени анализ многолетних наблюдений позволяет сформулировать лишь общие черты закономерностей многолетних колебаний средних годовых уровней грунтовых вод [38].

За два последних десятилетия на территории СССР в 1944, 1948, 1957 и 1960 гг. наблюдались в одних районах наивысшие, в других наинизшие положения средних годовых уровней грунтовых вод. При этом время наступления наивысших и наинизших уровней для большинства районов ЕТС синхронно. Для Азиатской части в те же годы отмечается обратный ход уровня, в годы с максимальным уровнем в Европейской части здесь устанавливается минимум и наоборот. При этом исследователи отмечают, что эта асинхронность отмечается даже в пределах одного региона для различных пунктов.

Одновременно с этим наблюдаются ритмические колебания уровней грунтовых вод, характеризующие периоды лет со спадом и с подъемом уровня. Многолетние колебания уровней грунтовых вод и их величины характеризуются соотношениями многолетних средних годовых амплитуд и многолетней амплитуды общего колебания уровня за большой период (разность между минимальным и максимальным уровнями грунтовых вод в многолетнем разрезе), приведенными в табл. 6 [38].

Наибольшее различие между многолетними и среднемноголетними годовыми амплитудами указанные авторы отмечают для суглинков. При залегании воды на глубине 4—5 м в суглинках многолетняя амплитуда равна 3—5 м, среднемноголетняя годовая — около 1,0 при соотношении амплитуд, равном 3—5.

Таблица 6

Основные данные многолетних наблюдений за уровнем грунтовых вод в различных районах СССР

Гидрологические станции	Годы наблюдений	Литолого-петрографический состав водоносного горизонта	Среднемноголетняя глубина залегания грунтовых вод, м	Многолетние амплитуды, м	Среднемноголетние годовые амплитуды, м	Отношение величины многолетней амплитуды к среднемноголетней годовой амплитуде
Северо-Западная	1947, 1960	Известняки	10,08	6,95	3,90	1,78
Московская (скв. 1)	1935, 1960	Суглинки с прослоями песка и глины	4,93	3,25	0,95	3,42
Московская (скв. 2)	1944, 1960	Пески с гравием и прослоем суглинков	4,55	3,80	1,58	2,40
Центрально-Черноземной полосы (скв. 1)	1915, 1960	Суглинки	6,70	5,70	1,54	3,70
Центрально-Черноземной полосы (скв. 2)	1915, 1960	„	около 5,5	5,75	1,22	4,71
Средневолжская	1945, 1960	Сведений нет	9,29	1,35	0,46	2,93
Северо-Казахстанская (скв. 1)	1915, 1960	Пески, покрытые суглинками	4,11	2,15	0,87	2,47
Северо-Казахстанская (скв. 2)	1949, 1960	То же	2,21	2,45	1,24	1,97
Волго-Донская	1946, 1960	Пески	8,98	1,05	0,14	7,66
Северо-Украинская	1946, 1953	„	около 28,0	0,90	0,37	2,40
Прикаспийская	1951, 1960	Суглинки	от 5,00 до 5,5	1,45	0,36	4,03
Азербайджанская	1949, 1959	Супеси	2,02	2,80	1,37	2,04
Хорезмская	1934	Пески	1,46	3,00	1,25	2,40
Алма-Атинская	1936, 1960	Пески с галькой	1,47	3,50	0,60	4,16
Ферганская	1934, 1960	Суглинки	около 2,0	2,00	1,54	1,37
Бухарская	1932, 1860	Пески	около 3,5	3,50	1,39	2,51
Горьковская (скв. 1)	1938, 1958	Пески аллювиальные	2,88	2,09	1,08	1,92
Горьковская (скв. 2)	1933, 1960	Мергели	18,58	2,98	1,18	2,52

Приведенные данные показывают, что многолетние колебания уровней грунтовых вод могут оказывать заметное влияние на условия подземного стока в реки. Но необходимо учитывать, что факторы, определяющие эту изменчивость, одновременно могут влиять и на режим речных вод, от которого тоже зависит подземное питание, причем может наблюдаться противоположное влияние одних и тех же факторов.

Учитывая многообразие связи подземного стока с природными условиями, в настоящее время целесообразно проводить оценку многолетней изменчивости подземного питания рек путем прямого анализа связей величин подземного стока в реки с гидрометеорологическими факторами.

Общие закономерности режима уровней грунтовых вод в различных природных условиях можно видеть на графиках рис. 5.

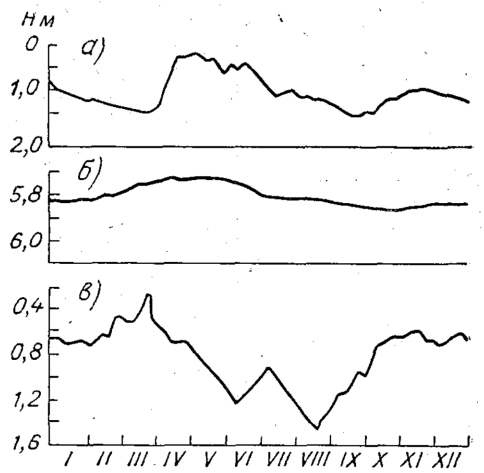


Рис. 5. Изменение уровня грунтовых вод в различных природных зонах.

а — зона избыточного увлажнения, *б* — зона умеренного увлажнения, *в* — зона недостаточного увлажнения.

При региональном изучении и обобщении закономерностей подземного питания рек для учета особенностей формирования подземных вод в бассейнах большое значение имеет типизация режима подземных вод. В гидрогеологии предложено большое количество различных классификаций подземных вод по их режиму. Но для решения задачи о районировании такой обширной территории, как Советский Союз, большой интерес представляет принципиальное положение генетической классификации режима грунтовых вод, разработанной А. А. Коноплянцевым и В. С. Ковалевским [37] (табл. 7). Положительной особенностью предложенной классификации является попытка авторов увязать в ней водно-балансовый принцип характеристики режима подземных вод в отношении питания (в некоторой степени и расхода) в зависимости от соотношения величин осадков и испарения грунтовых вод в различных климатических условиях с учетом взаимосвязи подземных и речных вод и гидродинамической зональности подземных вод (в зависимости от степени дренированности). Общий принцип построенной классификации дает возможность оценить режим подземных вод с различной степенью детальности.

Таблица 7

Классификационная схема режима грунтовых вод

Тип	Подтип	Класс
Кратковременного, преимущественно летнего питания (мерзлотный)	Обильного питания (островной мерзлоты)	Слабодренированных областей
		Дренированных „
		Сильнодренированных „
	Умеренного питания (*таликовой* мерзлоты)	Слабодренированных „
		Дренированных „
		Сильнодренированных „
	Скудного питания (почти сплошной мерзлоты)	Слабодренированных „
		Дренированных „
		Сильнодренированных „
	Гидрологический	
Сезонного, преимущественно весеннего и осеннего питания	Обильного питания	Слабодренированных „
		Дренированных „
		Сильнодренированных „
	Умеренного питания	Слабодренированных „
		Дренированных „
		Сильнодренированных „
	Скудного питания	Слабодренированных „
		Дренированных „
		Сильнодренированных „
	Гидрологический	
Круглогодичного, преимущественно зимнего питания	Обильного питания	Слабодренированных „
		Дренированных „
		Сильнодренированных „
	Умеренного питания	Слабодренированных „
		Дренированных „
		Сильнодренированных „
	Скудного питания	Слабодренированных „
		Дренированных „
		Сильнодренированных „
	Гидрологический	

Практическое значение классификации Коноплянцева и Ковалевского определяется тем, что она положена в основу развития исследований режима подземных вод на территории СССР и создания опорной режимной наблюдательной гидрогеологической сети наблюдений в нашей стране.

Наиболее крупной единицей классификации, принятой указанными авторами, является *тип режима,* определяемый возможностью питания и расходования грунтовых вод в зависимости от климатических условий. Для территории СССР выделяются три зональных типа: 1) тип кратковременного питания, или «мерзлотный» (преимущественно летнего питания); 2) тип

сезонного питания (преимущественно весенне-осеннего); 3) тип круглогодичного питания (преимущественно зимнего).

Особенностью режима мерзлотного типа является возможность одновременного питания и разгрузки грунтовых вод лишь в течение короткого (летнего) периода существования потока грунтовых вод.

Для типа сезонного питания характерно отсутствие притока к грунтовым водам в зимний период (вследствие промерзания верхних слоев почво-грунтов) и возможность круглогодичной разгрузки водоносных пластов.

При круглогодичном питании имеет место постоянное пополнение запасов грунтовых вод, обычно особенно интенсивное в зимнее время.

Типы режима подразделяются на зональные *подтипы*, выделяемые по интенсивности питания. Интенсивность питания характеризуется различным соотношением величин осадков и испарения. В подтипах особое место занимает гидрологический подтип режима грунтовых вод, получающий развитие в приречных полосах и около водоемов, где на режиме грунтовых вод сказывается влияние режима поверхностных вод, особо рассматриваемое ниже.

Схема предусматривает разделение каждого подтипа на классы по степени дренированности территории с учетом геологоструктурных признаков. Класс I характерен для слабодренированных районов низин или равнин со слабо разветвленной неглубокой эрозионной сетью. Слабая дренированность водоносных пластов обусловливает малые по сравнению с другими классами скорости подземного стока и более плавные колебания уровней.

Класс II является типичным для дренированных районов, «представляющих собой в орографическом отношении возвышенности с разветвленной глубокой эрозионной сетью, обусловливающей большую дренированность грунтовых вод и возможность большего подземного стока».

Более дробное разделение классов на подклассы производится по признаку различия литологического состава водовмещающих пород, условий залегания водоносных пластов и т. д.

Существенное значение для оценки условий формирования подземного питания рек имеет принятое в классификации выделение в подклассах видов режима грунтовых вод — междуречного, склонового, террасового и приречного (приморского, приозерного). Выделение первых трех видов производится на основе учета особенностей баланса грунтовых вод на отдельных участках их движения, характерных для различных геоморфологических элементов данного района. Последний вид режима должен быть целиком отождествлен с гидрологическим подтипом.

Некоторые положения приведенной классификации режима грунтовых вод используются ниже в анализе закономерностей взаимосвязи подземных и речных вод в процессе формирования подземного питания рек.

Несмотря на то что напорные воды в подземном питании рек имеют в большинстве случаев подчиненное значение, оценка их режима при изучении подземного стока в реки из напорных водоносных пластов необходима.

Если в отношении режима грунтовых вод проведены широкие исследования, особенно в последнее время, собран значительный материал и выполнены некоторые обобщения, то для оценки режима межпластовых напорных вод такие работы в региональном аспекте находятся только в стадии развития.

Напорные (артезианские) водоносные пласты распространены в различных геологических структурах. Участки геологической структуры более или менее значительного размера, содержащие в себе напорные воды, называются *артезианскими бассейнами*. В большинстве случаев артезианские бассейны представляют собой системы или комплексы водоносных пластов, разделенных слабопроницаемыми слоями, через которые может осуществляться гидравлическая связь между отдельными водоносными пластами.

Для каждого напорного водоносного пласта (артезианского бассейна) следует выделять область распространения и область питания, в которой преимущественно происходит поступление воды на питание пласта (бассейна).

Режим напорных вод при прочих равных условиях зависит от соотношения площадей распространения и питания. По соотношению площадей распространения и областей питания Г. Н. Каменский выделяет две группы межпластовых напорных водоносных пластов (горизонтов):

1) водоносные горизонты, связанные с дневной поверхностью на сравнительно ограниченном пространстве; области питания таких водоносных пластов в десятки и сотни раз меньше, чем площади их распространения;

2) водоносные горизонты, практически несвязанные с дневной поверхностью; области питания здесь «несоизмеримо малы по сравнению с областями распространения».

Возможность гидравлической связи между отдельными пластами систем (комплексов) в артезианских бассейнах обусловливает восполнение или расходование запасов воды в этих пластах в зависимости от соотношения напоров в них на различных участках бассейна.

Схема гидравлической взаимосвязи напорных водоносных пластов в масштабе крупных артезианских бассейнов впервые дана А. Н. Мятиевым и нашла подтверждение в работах целого ряда исследователей [8, 16, 60].

В соответствии со схемой Мятиева на водораздельных повышенных участках рельефа может происходить нисходящее движение подземных вод, находящее отражение в уменьшении напора с глубиной. На таких участках бассейна происходит питание нижележащих пластов. В депрессиях, как правило, наблюдается восходящая фильтрация (напоры с глубиной возрастают), и поэтому в долинах современных рек может происходить разгрузка напорных вод.

В напорных водоносных пластах (артезианских бассейнах) принято выделять области питания, напора и разгрузки, различающиеся по режиму. В областях питания режим напорных вод связан в первую очередь с поступлением атмосферных осадков и поэтому отражает влияние тех же факторов, которыми определяется режим грунтовых вод (гидрометеорологические и др.). В областях напора влияние этих факторов ослабевает и решающее значение приобретают геологические факторы (геоструктурные особенности территории, литологические особенности водовмещающих пород и определяемые ими водно-физические свойства и др.). Области разгрузки — участки выхода напорных водоносных пластов на поверхность земли или в почво-грунты вблизи дренирующих понижений — характеризуются напорно-безнапорным режимом движения подземных вод. Пьезометрические уровни спускаются ниже кровли пласта, и режим подземных вод отражает зависимость от поверхностных агентов, в первую очередь от влияния рек и водоемов.

При изучении напорных вод принято выделять бассейны платформ геосинклинальных областей, различающиеся особенностями режима [38].

Артезианские бассейны платформ (обширных областей земной коры, сложенных горизонтально залегающими осадочными породами) отличаются, как правило, обширными распространениями и значительной мощностью по глубине. На режим напорных вод в таких бассейнах оказывает заметное влияние степень дренированности гидрографической сетью. В соответствии с законом гидродинамической зональности подземных вод динамичность режима напорных вод уменьшается с глубиной. На участках выше уровня дренирования степень дренированности, а следовательно, и общая динамичность режима более высокие; в зоне ниже поверхности дренирования до определенных глубин в зависимости от геологоструктурных особенностей бассейнов эта динамичность, следуя за уменьшением степени дренирования, тоже уменьшается. В более глубоких водоносных пластах при еще более слабой дренированности (зона замедленного и весьма замедленного водообмена) практическое изменение напоров во времени не происходит.

Бассейны напорных вод горноскладчатых областей могут быть приурочены к зонам краевых горизонтов, представляющих собой крупные участки земной коры, на которых пласты горных пород в силу тектонических причин имеют вогнутую форму. Водоносные пласты таких бассейнов, имеющих, как правило, большую мощность, отличаются высокими напорами за счет интенсивного питания из горных областей. Колебание напоров в этих пластах уменьшается от области питания в сторону платформ, где происходит основная разгрузка напорных вод.

В горноскладчатых областях наблюдается также развитие напорных вод в бассейнах, приуроченных к конусам выноса предгорий, и в межгорных впадинах. Интенсивное питание с гор обусловливает в таких бассейнах высокие напоры. Относительная ограниченность площади распространения и небольшая мощность напорных пластов в условиях высокого питания может приводить к тому, что изменение напоров отражает изменчивость гидрометеорологических условий в областях питания.

При оценке подземного питания рек напорными водами принято считать, что «пъезометрические уровни артезианских водоносных горизонтов связаны с многолетними и вековыми климатическими изменениями в их областях питания и с эпейрогеническими колебаниями земной коры. Следовательно, сезонные и годовые колебания стока при прочих равных условиях могут вызываться лишь режимом реки» [41, стр. 124]. Указанное положение без оговорки можно отнести к напорным водоносным пластам (бассейнам), слабо связанным с дневной поверхностью. В условиях ограниченных площадей распространения при относительно высокой дренированности водоносных пластов в расчетах подземного питания рек высокой точности может возникнуть необходимость учета сезонной и годовой динамичности стока напорных вод. Однако решение этого вопроса может быть получено только для конкретных гидрогеологических условий и требует рассмотрения материалов наблюдений за режимом межпластовых вод.

В заключение общей оценки режима подземных вод кратко рассмотрим вопрос о неравномерности распределения питания подземных вод по площади водосбора. Помимо значения для характеристики общего режима водоносного пласта, при изучении подземного питания рек этот вопрос должен учитываться при оценке возможной реакции прирусловых участков водоносных пластов на подъемы уровня от повышенного питания подземных вод по площади бассейна в зависимости от величины этих подъемов и расположения участков повышенного питания по отношению к реке.

Неравномерность распределения питания грунтовых вод определяется общими гидрогеологическими условиями в бассейне

реки. Повышенное и неравномерное во времени питание на прибрежных участках водоносных пластов приводит, как правило, к большой динамичности подземного стока в реку, тогда как аналогичное по величине основное питание на водораздельных участках окажет меньшее влияние на изменение величины подземного питания реки.

В зонах умеренного и недостаточного увлажнения неравномерность питания грунтовых вод связана с рельефом и микрорельефом. В этих условиях установлено, что питание грунтовых вод происходит преимущественно в понижениях рельефа. В этих понижениях происходит скопление талых и дождевых вод, обусловливающее наибольшее увлажнение почво-грунтов зоны аэрации и повышенные условия просачивания — питания подземных вод («очаги питания»).

Очагами питания в определенных условиях могут служить и овраги — временные водотоки, в которых происходит скопление значительных запасов снега. Повышенная инфильтрация талых вод в борта оврагов может служить значительным дополнительным источником питания подземных вод.

Только при наличии «очагов питания» в условиях невысокого общего влагосодержания зоны аэрации, характерной для степных и лесостепных районов СССР, может иметь место сезонное изменение питания грунтовых вод, признаваемое для этих районов большинством исследователей.

Благодаря общей зарегулированности подземного стока в водоносных пластах учет такой неравномерности питания имеет второстепенное значение при изучении подземного питания рек, но для представления о механизме подземного стекания в процессе формирования подземного стока в реки эта особенность должна быть учтена. В этом случае характеристика общей увлажненности почво-грунтов зоны аэрации не может служить показателем условий питания подземных вод. В формировании подземного питания реки «очаговое питание» оказывает сглаживающее влияние на общий гидрограф подземного стока, поступающего к дренирующим руслам.

Глава 3

ВЗАИМОСВЯЗЬ РЕК И ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Взаимосвязь поверхностных и подземных вод характеризуется двумя противоположными процессами: подземным питанием поверхностных водотоков и водоемов и подземными потерями речных вод на питание подземных вод. Оба этих процесса в речных бассейнах протекают в сложном сочетании по площади водосбора и во времени.

Основные закономерности взаимосвязи рек и подземных вод определяются в первую очередь условиями залегания подземных вод и положением мест разгрузки по отношению к врезу речного русла — степенью гидравлической связи речных и подземных вод. В то же время на закономерности процессов этой взаимосвязи оказывает влияние тип выходов подземных вод на поверхность земли, при котором осуществляется связь реки и подземных вод, а также режимы речного стока и подземного стока в речном бассейне.

В зависимости от степени гидравлической связи рек с подземными водами взаимосвязь между ними может осуществляться при следующих основных условиях (рис. 6).

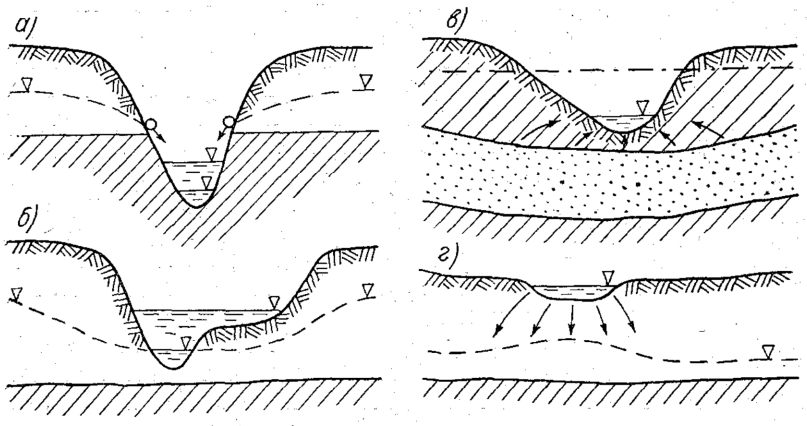


Рис. 6. Основные типы гидравлической взаимосвязи речных и подземных вод.

Подземное питание рек: *а* — при отсутствии гидравлической связи; *б* — при гидравлической связи; *в* — напорные; *г* — подземные потери.

1. Подземное питание реки происходит из водоносных пластов, не имеющих с ней гидравлической связи (рис. 6 *а*). Подземные воды, выклиниваясь в понижения рельефа в виде отдельных родников или пластовых выходов, стекают в водотоки, в отдельных случаях переходя даже в поверхностный склоновый сток. При этом, как правило, русло водотока врезано в водонепроницаемые породы.

Режим подземного питания в этом случае определяется только режимом подземного стока дренируемого водоносного пласта на водосборе. В отдельных случаях на величине подземного стока в реку могут сказываться его потери на испарение после разгрузки подземных вод, что особенно характерно для горных районов Средней Азии и Казахстана.

2. Подземное питание происходит из безнапорных водоносных пластов, имеющих постоянную гидравлическую связь с ре-

кой (рис. 6 *б*). В этом случае поступление подземных вод в реку будет происходить в условиях наклона поверхности подземного потока в сторону русла. Периодические подъемы уровня в реке могут приводить к инфильтрации речных вод в берега (временные подземные потери) и к подпору подземных вод, что в известных условиях может создать обратные уклоны в прирусловых участках водоносных пластов и вызвать прекращение подземного питания реки. Спад уровня воды в реке приводит к возвращению речных вод, ранее инфильтровавшихся в берега и в русло, и к возобновлению подземного стока в реку. Происходит процесс берегового регулирования речного стока.

Режим подземного питания рек при гидравлической связи их с подземными водами в период берегового регулирования определяется дренирующим влиянием водотока и закономерностями водообмена при береговом регулировании, зависящими от соотношения уровней речных и подземных вод. В этом случае взаимосвязь речных и подземных вод для данных гидрогеологических условий определяется как режимом подземных вод в бассейне, так и водным режимом реки, причем в период половодья и паводков влияние последнего может явиться решающим.

3. Подземное питание происходит из напорного водоносного пласта, имеющего постоянную гидравлическую связь с рекой (рис. 6 *в*). Подземный сток в реку происходит путем подпитывания водотока водами из нижележащего напорного пласта через относительные водоупоры его крыши или через родники («ключи»), приуроченные к трещинам или отдельным ходам в водоупорной крыше пласта. Режим напорного подземного питания при такой связи зависит от сочетания изменений пьезометрических напоров на участках, где происходит напорная фильтрация в русла, и уровней речных вод.

В этом случае в широких долинах при неглубоком залегании напорных водоносных пластов с высоким коэффициентом фильтрации водовмещающих пород большие подъемы уровней речных вод в период половодья и паводков могут создавать значительные (до нескольких метров) напоры, которые могут передаваться в таком водоносном пласте на большие расстояния и оказывать известное влияние на уменьшение напорного питания реки.

4. Подземные потери речных вод на питание подземных вод происходят путем фильтрационного потока из реки в безнапорный водоносный пласт, лежащий ниже среза русла (рис. 6 *г*) или имеющий уклон подземного потока от реки.

Такой тип связи наблюдается в первую очередь для засушливых районов, имеющих постоянные или временные водотоки, для отдельных горных рек (в особенности на конусах выноса), в карстовых районах и в некоторых случаях на искусственных

водохранилищах в различных физико-географических условиях при заполнении водой до уровня, превышающего уровни подземных вод в окружающем бассейне.

Режим таких подземных потерь определяется прежде всего изменением уровней поверхностных вод в водотоке или водоеме. На нем также сказывается режим подпитывания водоносного пласта.

Рассмотренные основные элементарные схемы взаимосвязи речных и подземных вод в природных условиях в пределах даже отдельных бассейнов встречаются в сложном и многообразном пространственном сочетании. Для одного и того же водного объекта может наблюдаться несколько типов взаимосвязи, а также изменение их по временам года.

Для речных бассейнов больших площадей изменение типов взаимосвязи и их сочетаний определяется различным пространственным распространением и высотным положением отдельных водоносных горизонтов (комплексов) на водосборе, а также различным врезом дренирующих их понижений. В этих условиях в зависимости от глубины вреза гидрографической сети может наблюдаться изменение схемы связи реки с подземными водами даже для одного и того же водоносного горизонта.

В качестве примера изменения типа взаимосвязи во времени года можно привести частный случай водоносного пласта, имеющего периодическую гидравлическую связь с рекой [40]. Русло реки, врезанное в водоупорные породы, на которых развит водоносный пласт, при низких уровнях речных вод дренирует его по схеме для условий отсутствия гидравлической связи. При подъеме уровня в реке выше подошвы водоносного пласта речные воды вступают в гидравлическую связь, и в период высоких уровней подземное питание происходит по соответствующей схеме для гидравлически связанных вод.

Возможное многообразие условий взаимосвязи речных и подземных вод как по источникам питания (различные водоносные пласты в бассейне), так и по схеме непосредственного поступления подземных вод в речное русло в зависимости от их гидравлической связи обусловливает необходимость исследований подземного питания рек на основе комплексного гидролого-гидрогеологического анализа условий формирования подземного стока в реки из всех водоносных пластов, дренируемых ими, с учетом гидрогеологических, геологических и геоструктурных особенностей реальных речных бассейнов и их водного режима.

Наиболее широкое распространение имеет подземное питание рек в условиях гидравлической связи их с подземными водами. При постоянном уровне воды в реке взаимодействие с ней подземного потока, питающего реку, описывается простейшей схемой (рис. 7).

При подходе безнапорного потока к руслу свободная поверхность его выходит на откос в точке B (в точке высачивания), находящейся выше уреза воды A. Образуется участок высачивания AB. Так как давление в речном потоке распространяется по гидростатическому закону и в каждой точке живого сечения контура русла AD напор будет иметь постоянную величину $H_р$, разгрузка подземного потока происходит по всему смоченному периметру реки и его расход q в русло на единицу длины реки может быть в простейшем случае определен по формуле

$$q = KP\frac{H_б - H_р}{l}, \qquad (6)$$

где K — коэффициент фильтрации водовмещающих пород, P — смоченный периметр русла, $H_б$ — напор подземных вод в бассейне на участке потока, не претерпевшего депрессию, $H_р$ — напор в реке, l — участок подземного потока в пределах кривой депрессии, обусловленной дренирующим воздействием реки.

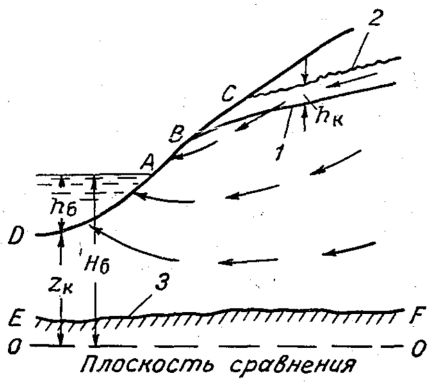


Рис. 7. Элементарная схема дренирования водоносного пласта рекой.
1 — кривая депрессии, *2* — поверхность капиллярной зоны, *3* — водоупор.

Рассматривая возможность решения вопроса об оценке подземного питания рек в различных условиях их взаимосвязи с подземными водами, необходимо отметить, что наиболее трудной задачей является определение величин подземного стока в реки при гидравлической связи для периодов половодья и паводков. В период половодья и паводков возникает сложный водообмен между рекой и дренируемым водоносным пластом — береговое регулирование, степень развития которого определяет закономерности подземного питания реки в периоды колебаний уровней речных вод.

Береговое регулирование речного стока наблюдается при интенсивном поступлении поверхностного стока в русла рек в период половодий и паводков. В условиях гидравлической связи реки с подземными водами процесс берегового регулирования оказывает значительное влияние на режим подземного стока в реку за счет подпора подземных вод, а также уменьшения гидравлического уклона и расходов подземных потоков, поступающих в русло. В известной степени береговое регулирование всегда приводит к образованию обратных уклонов

подземных вод на прирусловых участках, а следовательно, и к прекращению подземного питания реки в периоды обратных уклонов.

Таким образом, полный эффект берегового регулирования речного стока одновременно сказывается на регулировании русловых вод, на динамике подземного стока в реку, а также на аккумуляции подземных вод во всем бассейне. Последнее вызывается тем, что в периоды подпора и обратных уклонов в подземном водосборе происходит определенное накопление подземных вод, что в последующие за половодьем и паводками меженные периоды может приводить к увеличению подземного питания. Следовательно, береговое регулирование речного стока приводит к регулированию и подземного стока в речном бассейне.

Закономерности и масштабы развития берегового регулирования зависят от сложного комплекса гидрогеологических условий и водного режима реки и должны определяться для конкретных речных бассейнов по натурным данным о режиме подземных и речных вод.

Решающее значение при этом имеет правильная оценка гидродинамических условий изучаемого процесса в конкретных природных условиях и возможности использования гидродинамических методов расчета расходов подземных потоков, участвующих в береговом регулировании. Ниже автор делает попытку простейшего описания гидродинамической сущности берегового регулирования для наиболее типичных случаев взаимосвязи речных и подземных вод.

В явлении берегового регулирования речного стока следует выделять два основных процесса: инфильтрацию речных вод в берега в восходящей стадии половодья и паводка (фаза инфильтрации) и стекание инфильтровавшихся речных вод в русло в период спада (фаза стекания). В определении объемов речных вод, участвующих в водообмене в различные фазы, и продолжительности этих фаз и заключается основная оценка берегового регулирования. Для характеристики объемов речных вод, могущих принимать участие в береговом регулировании, в табл. 7 приведены результаты расчетов потерь речного стока в берега в период половодья для некоторых водных объектов.

По условиям поступления речных вод в берега в береговом регулировании необходимо выделить два основных типа:

Подпорное береговое регулирование, развивающееся в хорошо выраженном русле, когда при высоких уровнях река «не выходит из берегов» и инфильтрация речных вод происходит в откос русла (рис. 8);

Инфильтрационно-подпорное береговое регулирование, происходящее в речных долинах с поймой, когда при высоких

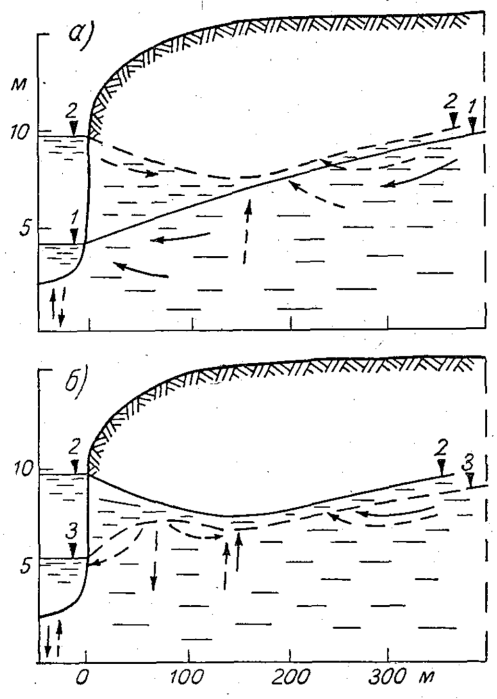


Рис. 8. Схема формирования берегового регулирования подпорного типа в фазу инфильтрации (*а*) и фазу стекания (*б*).

Стрелками указана линия тока в водоносном пласте при уровнях воды: *1* — до подъема, *2* — при наивысшем уровне, *3* — на спаде.

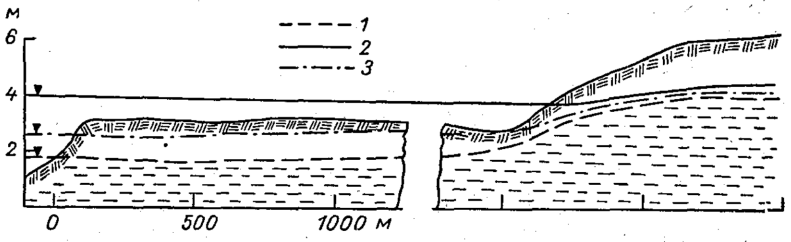


Рис. 9. Схема водообмена между рекой и водоносным пластом при инфильтрационно-подпорном береговом регулировании.

Уровни: *1* — до подъема, *2* — при наивысшем уровне, *3* — на спаде.

уровнях происходит инфильтрация речных вод по всей заливаемой поверхности поймы (рис. 9).

Фаза инфильтрации берегового регулирования подпорного типа наиболее полно может быть описана по аналогии со схемами развития подпора подземных вод, относительно полно рассмотренными в гидрогеологии в связи с расчетами подпора при подъеме уровня воды в реке после постройки плотины и наполнении водохранилища [8, 74, 85]. При этом наиболее широко разработана методика расчета стационарного (установившегося) подпора подземных вод со свободной поверхностью, а вопросы оценки неустановившегося подпора, в особенности с учетом влияния колебания уровня воды в реке (водохранилище) и в сложных гидрогеологических условиях до настоящего времени разработаны значительно меньше. Поэтому для полного гидродинамического описания всего процесса берегового регулирования, включая и фазу стекания, помимо использования уравнения Каменского в конечных разностях и применения моделирующих устройств, требуются дальнейшие теоретические разработки. Однако, существующее представление о развитии этого процесса позволяет дать его качественную характеристику.

Как ясно из схемы (рис. 8), интенсивный подъем речных вод приводит к инфильтрации их в берега и создает обратные уклоны, при которых подземное питание реки прекращается по всему смоченному периметру русла. На прибрежном участке возникает депрессия на поверхности подземного потока, заполнение которой происходит под влиянием дальнейшей инфильтрации речных вод и притока вод из области питания водоносного пласта. При продолжительном стоянии высоких уровней в реке депрессия заполняется и поверхность подземного потока получает общий уклон к реке. Подземное питание реки в этом случае возобновляется. Если депрессия не исчезает, а уровни воды в реке падают, то в прирусловой части образуется участок потока с уклоном к руслу и водоразделу (рис. 8, уровень 3). В этом случае происходит частичное возвращение инфильтрационных вод из берегов и возобновляется подземное питание реки по смоченному периметру русла. Инфильтрационные речные воды одновременно стекают в русло и в сторону депрессии, заполняя ее вместе с подземным стоком с водосбора. Восстановление общего уклона подземного потока к реке приводит к возобновлению ее полного подземного питания.

Характеристику возможных изменений расхода подземного потока во времени для зоны обратного уклона можно видеть на рис. 10. Основной особенностью закономерности изменения расхода подземного потока во времени в зоне обратного уклона является наличие положительных (подземное питание реки) и отрицательных (инфильтрация в берега) расходов.

В зоне обратных уклонов при наступлении наивысшего уровня (точка m на рис. 10 *а*) может наблюдаться расход подземного потока, равный нулю. Максимум расхода наблюдается в точке перегиба кривой изменения уровня в период спада.

В сечении подземного потока за зоной обратного уклона расходы имеют всегда положительное значение (подземное питание реки), а наименьшие расходы, включая равный нулю минимальный, отмечаются в момент наивысшего уровня (точка m на рис. 10 *б*). Максимальный расход имеет место, так же как и в первом случае, для точки перегиба кривой изменения уровня.

Колебания уровня подземных вод, обусловленные половодьями и паводками, распространяются от реки в прибрежной

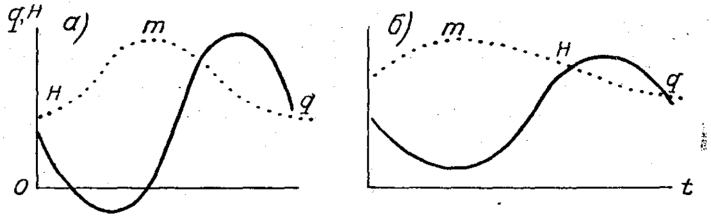


Рис. 10. Изменение во времени t расхода подземного потока q и уровня грунтовых вод H в зоне обратных уклонов (*а*) и вне ее (*б*) (по П. А. Киселеву).

зоне с некоторым запозданием. Величина этого запоздания определяется водными свойствами водовмещающих пород. Реакция подземных вод на подъем уровня в реке будет тем быстрее, чем выше водопроводимость и больше мощность водоносного пласта. При большой величине водоотдачи (недостатке насыщения) асинхронность колебания уровня подземных и речных вод будет бо́льшая.

При известной схематизации этого процесса может быть произведен расчет колебаний уровней подземных вод в прибрежной зоне.

При значительных и плавных колебаниях уровней воды в реке, гидравлически связанной с подземным потоком, в ряде случаев может быть принято допущение о том, что эти колебания происходят по уравнению синусоиды. В этом случае расчет подъема и спада уровня подземных вод z под влиянием подпора может быть произведен по уравнению Ф. Форхгеймера [74]

$$z = Hl^{-x\sqrt{\frac{\pi\mu}{2KhT}}} \sin\left(\frac{\pi t}{T} - x\sqrt{\frac{\pi\mu}{2khT}}\right), \qquad (7)$$

где H — максимальный подъем или спад горизонта воды в реке над ее средним уровнем; x — расстояние от реки до заданного сечения; h — средняя мощность подземного потока; T — продолжительность подъема уровня воды от среднего уровня до высоты H и спад его от высоты H до среднего уровня (полупериод колебания горизонта воды в реке); t — время от начала подъема горизонта воды в реке; μ и K — соответственно величина водоотдачи (недостаток насыщения) и коэффициент фильтрации водовмещающих пород.

Более общее решение предложено К. Г. Асатуром [7]. Им дано уравнение, выражающее распространение колебаний уровня подземных вод в прибрежной зоне, вызываемое периодическими изменениями уровня реки, при водоносном пласте с наклонной поверхностью водоупора с уклоном, не равным нулю.

Для оценки степени развития обратных уклонов и расчета возможности восстановления подземного питания реки при береговом регулировании эти уравнения могут быть использованы для определения ширины зоны влияния половодья и паводков на формирование уклонов подземных потоков к реке, определения скорости распространения волны подземных вод.

Основным условием образования обратных уклонов при береговом регулировании является скорость подъема уровня воды в реке, превышающая скорость подъема зеркала подземных вод в приречной части, который может происходить за счет подземного стока со стороны области питания и за счет инфильтрационного питания сверху. Не меньшее значение при этом имеет положение кривой депрессии подземного потока дренируемого водоносного пласта. При пологой кривой депрессии с небольшими уклонами создаются наиболее благоприятные условия развития обратных уклонов. В то же время при прочих равных условиях размеры и длительность существования обратных уклонов в подземных потоках в значительной степени зависят от высоты и продолжительности подъема уровня реки в половодье и паводки.

Береговое регулирование инфильтрационно-подпорного типа развивается в речных долинах с поймами. Этот тип отличается от подпорного берегового регулирования интенсивным поступлением речных вод к поверхности подземных вод в прирусловой зоне на всей площади затопления пойм. В начале затопления такая инфильтрация происходит с напорным градиентом, превышающим единицу, что определяет в фазу инфильтрации большие объемы береговой аккумуляции и существенно влияет на обратные уклоны на прирусловых участках. При инфильтрации сверху депрессии подземных вод у зоны обратных уклонов быстро заполняются речными водами и происходит восстанов-

ление общего уклона подземного потока к реке, а следовательно, и более быстрое возобновление полного подземного питания реки.

Инфильтрационно-подпорный тип особенно отличается от подпорного в фазе стекания. Интенсивное наполнение пойменных отложений речными водами сверху определяет бóльшую продолжительность фазы стекания, чем фазы инфильтрации, так как обратное стекание речных вод в русло происходит при меньших уклонах и бóльших путях фильтрации, определяемых шириной затопленных участков поймы.

В то же время на величину объемов воды, поступающих обратно в реку в фазу стекания, в рассматриваемом случае в значительной мере могут оказывать влияние потери на испарение с поверхности осушаемой поймы. Вопросы методики расчета неустановившегося подпора подземных вод с учетом инфильтрации и испарения рассмотрен в обобщающей работе В. М. Шестакова [85]. Однако необходимо учитывать, что строгое аналитическое решение вопроса оценки инфильтрационно-подпорного типа берегового регулирования для естественных условий получить весьма трудно из-за сложности схематизации явления в условиях неравномерно затопляемой поймы и получения для расчета необходимых гидрогеологических параметров. В этом отношении более перспективным для решения вопроса может явиться метод моделирования.

Размеры влияния берегового регулирования на речной сток в первую очередь определяются объемами и продолжительностью инфильтрации речных вод в берега. Величина объемов речных вод, аккумулирующихся в берега при береговом регулировании, и продолжительность этого процесса определяются напорными градиентами инфильтрации, зависящими от соотношения уровня речных и подзéмных вод у уреза реки, площадью поверхности, на которой происходит инфильтрация при подъеме уровня речных вод, и интенсивностью и продолжительностью этих подъемов.

Изучение процессов берегового регулирования речного стока представляет собой комплексную задачу, решение которой должно производиться с учетом особенностей геологических и гидрологических условий конкретных речных бассейнов, что нашло отражение в постановке исследований этого явления в Советском Союзе.

В основу исследований берегового регулирования в условиях гидравлической связи подземных и речных вод должен быть положен анализ результатов натурных наблюдений за режимом водообмена между рекой и подземными водами в период половодья и паводков. Эти наблюдения должны в первую очередь включать определения единичных расходов подземных потоков в береговых зонах по характерным створам, что дает

возможность оценить режим берегового регулирования по независимым гидрогеологическим данным. Для распространения этих данных на бассейн следует осуществлять систематические аэрофотосъемки разливов во всей гидрографической сети изучаемого объекта, в разные фазы половодий и паводков. Это позволит оценить площади, на которых может иметь место береговое регулирование.

Одновременно с этим необходимо составление водных балансов участков рек и отдельных бассейнов для оценки объемов воды, участвующих в береговом регулировании по всей гидрографической сети бассейна.

В качестве примеров натурных исследований, проведенных на реках, находящихся в различных физико-географических условиях, приводятся результаты оценки берегового регулирования для следующих рек:

1) участок р. Волги в нижнем течении ($F=1\,264\,000$ км^2) от Самарской луки до г. Камышина; подпорное береговое регулирование развивается в условиях подземного питания реки из водоносного горизонта мощностью не менее 150—170 м, приуроченного к пермским и каменноугольным трещиноватым известнякам и доломитам;

2) участок р. Оки в среднем течении ($F=188\,000$ км^2) между г. Касимовом и г. Муромом; инфильтрационно-подпорное береговое регулирование происходит в аллювиальных отложениях, представленных мелкозернистыми песками, супесями, разнозернистыми песками с линзами суглинков. В современном и древнем аллювии подземные воды образуют единый водоносный горизонт;

3) участок р. Оки в верхнем течении ($F=59\,400$ км^2); инфильтрационно-подпорное береговое регулирование происходит в аллювиальных отложениях и трещиноватых известняках и мергелях упинского яруса, в которых развит водоносный горизонт мощностью 12—14 м;

4) верховье бассейна р. Северского Донца выше замыкающего створа с. Огурцово ($F=5540$ км^2); береговое регулирование преимущественно инфильтрационно-подпорного типа, осуществляется в песчано-суглинистых аллювиальных отложениях и в мергелях сантона и мело-мергельных породах кампан-маастриха, в условиях развития сенон-туронского водоносного горизонта, принимающего основное участие в подземном питании рек бассейна; средняя мощность водоносного горизонта 60—140 м;

5) участок р. Казанки в нижнем течении ($F=2660$ км^2); береговое регулирование обусловлено инфильтрацией речных вод в песчано-суглинистые аллювиальные отложения и в песчанники, известняки и доломиты казанского яруса, в котором развит водоносный горизонт мощностью около 50 м.

Во всех случаях водоносные горизонты имеют ярко выраженную гидравлическую связь с рекой и их режим в прибрежной части отражает влияние подпора подземных вод при береговом регулировании.

Потери речного стока на инфильтрацию в берега в периоды весенних половодий для перечисленных объектов даны в табл. 8.

Таблица 8

Потери речного стока на инфильтрацию в берега рек во время весенних половодий

Река	Год	Потери на 1 км протяжения берега реки, м³		Продолжительность фазы инфильтрации, сутки
		за весь период половодья	в среднем за сутки	
Волга (Самарская лука — г. Камышин)	1939	836 160	15 485	54
	1938	2 630 000	87 700	30
Ока (у г. Мурома)	1940	5 900 000	197 000	30
	1950	2 000 000	66 700	30
	1954	463 000	31 000	15
	1955	8 700 000	193 000	45
Ока (верховье)	1936	900 000	21 000	43
	1937	420 000	22 100	19
	1938	330 000	30 000	11
Северский Донец	1961	3 370	560	7
	1963	33 400	4 770	6
Казанка	1939	560 000	18 700	30

Как видно из таблицы, размеры берегового регулирования сильно изменяются по годам. Наибольшие потери наблюдаются в многоводные годы и зависят от продолжительности фазы инфильтрации. Если принять объем потерь речного стока при береговом регулировании за единицу, то для р. Оки у г. Мурома отношение объемов берегового регулирования в маловодный (1954) и многоводный (1955) годы составит 1 : 19. Для р. Северского Донца у с. Огурцово это соотношение характеризуется как 1 : 10 (маловодный 1961 г. и многоводный 1963 г.).

На формирование инфильтрационных потерь на пойме может оказывать влияние водопроницаемость грунта, изменяющаяся в зависимости от степени его промерзания. При водонасыщенных промерзших грунтах потери уменьшаются, что можно видеть из сравнения объемов инфильтрации на р. Оке у г. Мурома за 1940 г. (талый грунт) и 1950 г. (промерзший грунт).

Анализ средних величин потерь на инфильтрацию за сутки показывает зависимости их от интенсивности прохождения

весеннего половодья. Интенсивные подъемы уровня в реке, вызванные поверхностным стоком, создают большие обратные гидравлические уклоны в прибрежной зоне, в связи с чем возрастают объемы инфильтрации в берега в единицу времени.

Это видно из сопоставления потерь средних за сутки и средних скоростей подъема уровня в реке. Например, для р. Оки (верховье) в половодье они составили в 1936 г. 21 000 м³/сутки при скоростях 23,8 см/сутки, в 1957 г. — 22 100 м³/сутки при скоростях 67,9 см/сутки и в 1938 г. — 30 000 м³/сутки при скоростях 74,9 см/сутки.

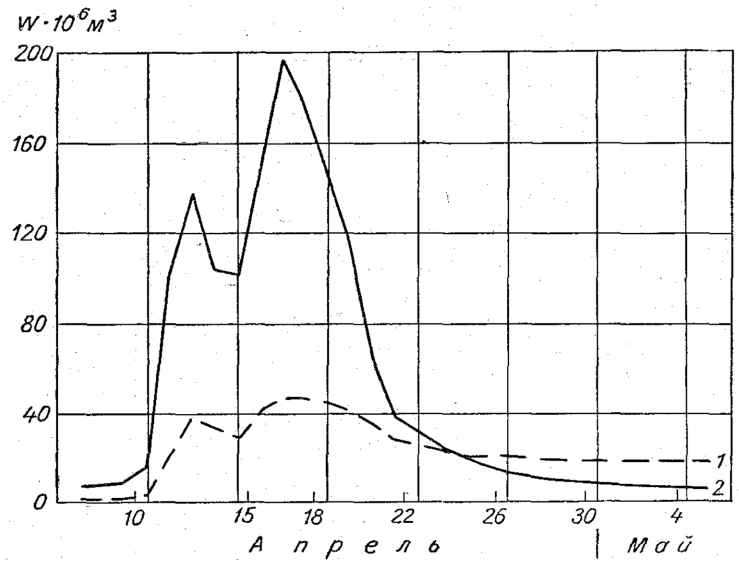


Рис. 11. Соотношение изменения объемов воды в русле (*2*) и в зоне берегового регулирования (*1*) для бассейна р. Северского Донца (створ у с. Огурцово) в половодье 1963 г.

Полученные величины объемов инфильтрации по своему влиянию на распределение стока внутри года в количественном отношении могут быть сопоставимы с объемами руслового регулирования. Соотношение изменений объемов берегового регулирования и русловых объемов показано на рис. 11 (р. Северский Донец — с. Огурцово, половодье 1963 г.).

Обычно считают, что основные потери при береговом регулировании происходят по главному стволу гидрографической сети. Однако при развитой гидрографической сети объемы потерь при береговом регулировании в притоках могут быть соизмеримы и даже больше потерь в главном стволе. В табл. 9 приведены данные об объемах берегового регулирования главного

Таблица 9

Изменение объемов воды в русловой системе бассейна р. Северского Донца за фазу инфильтрации в половодье 1963 г.

Дата	Объем воды в берегах, 10^6 м^3		Фаза половодья
	главный ствол	русловая сеть	
10/IV	0,45	3,05	Начало половодья
11/IV	4,42	16,3	
12/IV	18,6	18,9	Максимум первого половодья
13/IV	18,3	15,6	
14/IV	17,4	17,0	Начало второго подъема
15/IV	18,3	21,8	
16/IV	20,5	26,6	Максимум второго половодья
17/IV	20,1	25,9	Начало спада половодья
18/IV	19,6	25,3	
19/IV	18,8	22,3	

ствола р. Северского Донца и в остальной русловой сети. Длина главного ствола составила 80 км, а притоков 705 км.

Береговое регулирование может происходить не только в период половодья, когда величина потерь на инфильтрацию обычно бывает наибольшей, но и в периоды паводков и даже при кратковременных искусственных попусках на зарегулированных реках.

Специальные экспериментальные наблюдения на р. Тверце показали, что особый интерес должны представлять пойменные участки, на которых при затоплении происходит изъятие на инфильтрацию относительно больших объемов речных вод.

В определенных геологических условиях в результате инфильтрации в берега могут формироваться значительные безвозвратные потери речных вод. Это может иметь место в засушливых областях, при выходе горных рек на конуса выноса и т. п.

Исключительно важное значение имеет учет берегового регулирования при составлении детальных водных балансов отдельных участков крупных рек в засушливых областях, где в некоторых случаях величина потерь в берега может быть сопоставлена с общей величиной речного стока. Изучение водного баланса р. Аму-Дарьи на участке р. Керки — с. Таш-Сака протяженностью 626 км показывает, что при интенсивном подъеме уровня реки большое количество воды идет в виде подземного стока далеко за пределы долины реки. Этот поток принимает участие в формировании подземных вод Кара-Кумов. Размер этих потерь пропорционален высоте стояния уровня на р. Аму-

Дарье и в 1951 г. оценивался: в мае 250 м³/сек., в июне 350 м³/сек., а в среднем за год 50 м³/сек. Это равно расходу воды, отбираемому из реки на орошение и полив хлопка на всем изучаемом участке.

Одновременно с потерями на формирование подземного потока при береговом регулировании происходят потери на заполнение понижений рельефа на пойме с последующим просачиванием в грунт и испарение, что составляет общие потери в указанные месяцы до 445 и 630 м³/сек. соответственно.

Влияние берегового регулирования на формирование максимальных расходов половодья может быть показано на примере реконструкции гидрографа весеннего половодья 1963 г. для р. Северского Донца у с. Огурцово (рис. 12).

Сравнение фактического гидрографа (*1*) и восстановленного (*2*) с учетом изменения объемов речных вод (*3*), инфильтровавшихся в берега, показывает, что максимальный расход первого пика половодья за счет берегового регулирования снижен на 14%.

Исследования берегового регулирования показывают, что это явление может оказывать заметное влияние на формирование максимальных расходов в период половодья и паводков, а также на внутригодовой ход стока. В расчетах водного баланса водохранилищ учет берегового регулирования производится при оценке подпора подземных вод.

Проявление берегового регулирования в реальных бассейнах или на отдельных участках рек может быть резко индивидуальным и определяться комплексом факторов в зависимости от местных физико-географических условий.

Учет берегового регулирования в расчетах речного стока в некоторых случаях исключает существенные ошибки, выходящие за пределы допускаемых погрешностей, в связи с чем его количественная оценка для конкретных объектов имеет практическое значение.

На развитие берегового регулирования в определенной степени оказывает влияние интенсивность подземного стока, формирующего подземное питание данной реки. Подземные воды, поступая в прибрежную зону одновременно с инфильтрацией речных вод, заполняют прирусловые емкости, тем самым понижая водовместимость берегов для речных вод. Одновременно с этим уменьшается разность напора, при котором происходит инфильтрация последних. При прочих равных условиях, чем больше величина подземного питания реки, тем меньше должен проявляться эффект берегового регулирования.

Вопрос об оценке возможности образования зоны обратных уклонов, длительности ее существования при рассмотрении закономерности подземного питания рек из гидравлически связанных с ней водоносных пластов является решающим при изуче-

нии реальных бассейнов и должен лежать в основе изучения взаимосвязи речных и подземных вод.

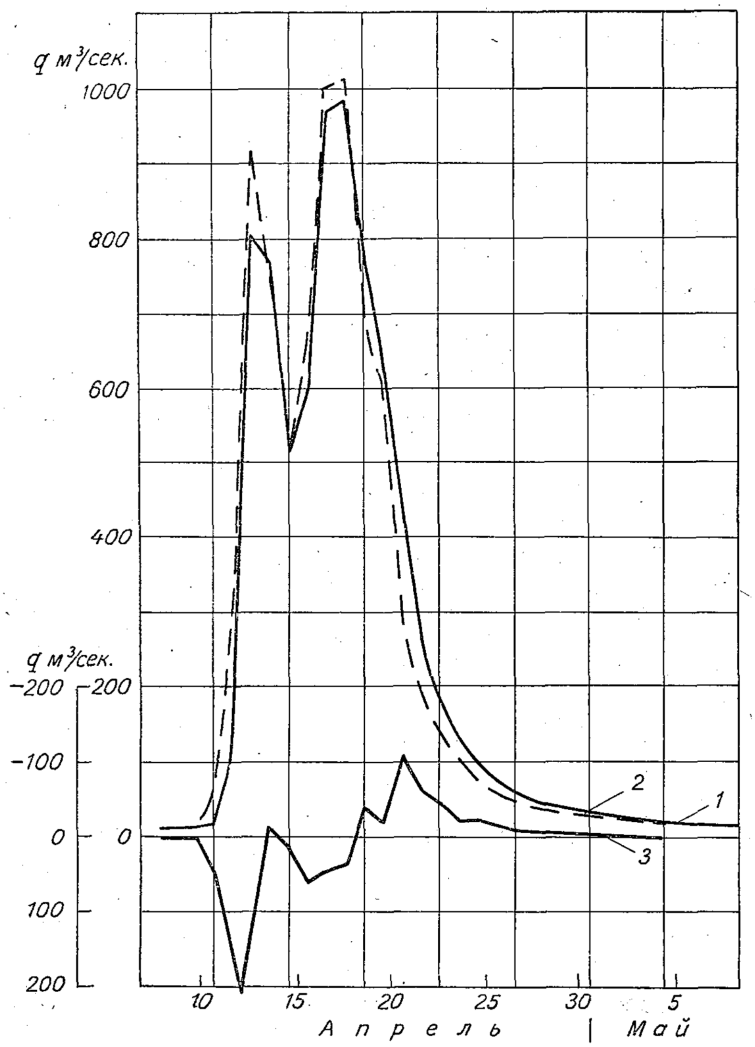


Рис. 12. Влияние берегового регулирования на формирование речного стока в бассейне р. Северского Донца (замыкающий створ у с. Огурцово) в половодье 1963 г.

1 — фактический гидрограф, *2* — гидрограф притока воды в бассейн с учетом берегового регулирования, *3* — изменение объемов берегового регулирования.

Выполненный при расчетах подземного стока на территории СССР анализ натурных данных по изучению взаимосвязи

речных и подземных вод и схем дренирования водоносных горизонтов реками, характеризующих основные гидрогеологические условия формирования речного стока, показывает, что процесс берегового регулирования может проявляться в следующих основных формах:

1) полное развитие берегового регулирования речного стока в период половодья (отдельного паводка) приводит к тому, что подземное питание реки из водоносных горизонтов, гидравлически связанных с ней, для отдельного створа реки при расчетах водного баланса за весь период подъема и спада уровня реки может быть принято «примерно равным нулю», что описывается известной формулой Б. И. Куделина [40]

$$-A+A'=0, \tag{8}$$

где A — величина инфильтрации речных вод на единицу длины берега в восходящей стадии половодья (отрицательное подземное питание); A' — величина стока грунтовых вод в реку на единицу длины берега в нисходящей стадии половодья (паводка);

2) развитие берегового регулирования обусловливает прекращение подземного питания реки в фазу инфильтрации только в период наличия обратных уклонов в подземных потоках прибрежной зоны.

Подземное питание реки возобновляется после окончания фазы инфильтрации, в условиях восстановления общего уклона подземного потока к реке за счет заполнения депрессий подземных вод в прибрежной зоне инфильтрационными речными водами и подземным стоком из областей питания водоносного пласта на водосборе;

3) в процессе берегового регулирования подземное питание реки возобновляется в фазу стекания до окончания возвращения всех объемов речных вод, проинфильтровавшихся в берега, в условиях, когда их стекание приводит к восстановлению уклона подземного потока лишь на участке, непосредственно прилежащем к руслу (рис. 8 *б* при уровне вод *3* — на спаде).

Таким образом, частичное возобновление подземного питания за счет подземных вод с водосбора происходит при наличии депрессии подземных вод в прибрежной зоне до окончания половодья и паводков;

4) при береговом регулировании происходит непродолжительное прекращение подземного питания только в самом начале фазы инфильтрации, при кратковременном образовании обратных уклонов непосредственно у русла. Интенсивная инфильтрация речных вод в берега и быстрое распространение подпора подземных вод в направлении к водоразделу приводят к перемещению участка высачивания подземного потока по склону долины к новому высокому урезу воды. Такое развитие

берегового регулирования может наиболее широко наблюдаться при инфильтрационно-подпорном регулировании в хорошо водопроницаемых аллювиальных отложениях.

Береговое регулирование ограничено в долинах горных рек с нешироким развитием крупного аллювия и делювия у тальвега водотока, что практически приводит к сохранению постоянного подземного стока в реку в условиях гидравлической связи ее вод с подземными водами даже при интенсивном подъеме уровня реки. В таком ходе процесса берегового регулирования в первую очередь имеют значение небольшие аккумулирующие емкости берегов, в которые может происходить инфильтрация речных вод.

В условиях гидравлической связи реки и водоносного пласта при синхронных и равнозначных изменениях уровня речных и подземных вод в прирусловой части (при критической скорости подъема уровня в реке — по Киселеву) в период половодья и паводков береговое регулирование не происходит.

Если подземное питание рек из безнапорных водоносных пластов в различных условиях гидравлической связи можно рассматривать как наиболее универсальный процесс, то подземный сток в реки из напорных водоносных пластов имеет меньшее распространение.

Процесс напорного питания рек менее изучен, но многочисленные гидрогеологические данные указывают на необходимость его учета при исследованиях подземного питания рек в отдельных районах.

При оценке подземного питания из напорных пластов должна учитываться закономерность движения напорных вод в толще водовмещающих пород. В соответствии со схемами М. А. Гатальского [16], А. Н. Мятиева [60], на водораздельных повышенных частях рельефа отмечается нисходящее движение подземных вод (напоры с глубиной уменьшаются) и происходит питание нижележащих пластов, а в депрессиях преобладает восходящая фильтрация (напоры с глубиной возрастают). Это определяет разгрузку напорных вод в долины современных рек.

Напорное (артезианское) подземное питание рек в зависимости от условий залегания и дренирования напорных водоносных пластов может осуществляться «открытым» и «закрытым» артезианским стоком. По характеру связи с реками М. П. Распопов [69] на примере Русской плиты выделяет:

1) открытые артезианские воды — устойчивые напорные воды, непосредственно дренируемые современными водотоками и водоемами;

2) закрытые артезианские воды — устойчивые напорные воды, разгружающиеся в поверхностные водотоки и водоемы через сопряженные с ними горизонты подземных вод или по тектоническим трещинам.

Непосредственное поступление открытых артезианских вод в реки, как правило, наблюдается в руслах, приуроченных к крупным региональным понижениям или глубоко врезанных в коренные породы, а также на участках рек в зонах тектонических трещин и разломов. Разгрузка напорных вод в русло может происходить через «литологические окна» — участки пластов, на которых водоупорная крыша сменяется проницаемыми породами.

Во многих случаях закрытые напорные водоносные пласты непосредственно перекрываются слабопроницаемыми породами, в которых содержатся подземные воды со свободной поверхностью, связанной непосредственно с атмосферой. В этом случае

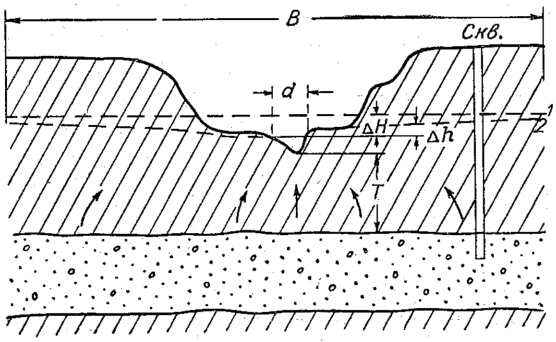


Рис. 13. Схема питания реки напорными водами (по С. Ф. Аверьянову).

1 — пьезометрическая поверхность напорного водоносного пласта; *2* — поверхность грунтовых вод.

напорные воды не поступают непосредственно в реку, а формируют глубинное питание безнапорного водоносного пласта и уже вместе с водами этого пласта поступают в реку. Выделить такое напорное питание отдельно от подземного стока в реку из безнапорного гидравлически связанного с ней водоносного пласта весьма сложно.

Напорная фильтрация в реки может осуществляться через кровлю слабопроницаемых пород, в которые врезано русло. Это подтверждается фактами существования постоянного летнего меженного стока рек, протекающих в берегах, сложенных, например, тяжелыми суглинками, где нет безнапорных грунтовых вод.

Решение задачи по оценке такого напорного питания в теоретическом плане предложено С. Ф. Аверьяновым [1] и понятно из простой схемы (рис. 13) и рассмотрения формулы

$$Q \simeq \frac{\pi K \Delta H}{\ln \frac{16 \cdot T}{\pi (d + \Delta h)}}, \qquad (9)$$

где Q — приток напорных подземных вод в реку-дрену; K — коэффициент фильтрации тяжелых суглинков, в которых заложено русло реки; T — мощность суглинков; d — ширина реки по урезу воды; ΔH — превышение пьезометрического напора водоносного пласта над уровнем воды в реке; Δh — превышение уровня грунтовых вод над уровнем воды в реке.

Приведенная формула выведена при условии, что расстояние между водотоками B значительно больше глубины залегания водоносного пласта, т. е. $\frac{B}{T} \geqslant 3$.

Недостаточная изученность напорных подземных вод в аспекте оценки их взаимосвязи с реками, многообразие форм этой взаимосвязи приводит к тому, что до самого последнего времени практическое решение задачи о напорном подземном питании рек не вышло из стадии постановки вопроса, а роль этого питания в формировании речного стока оценивается разными авторами противоречиво [36].

В реальных речных бассейнах выделенные типы подземного питания могут находиться в сложном и многообразном сочетании. Как указывалось выше, это многообразие в первую очередь определяется различным пространственным распространением и высотным положением отдельных водоносных горизонтов и целых комплексов и различными уровнями дренирования их водотоками, имеющими разную глубину эрозионного вреза.

Последнее обстоятельство часто приводит к изменению условий подземного питания по длине водотока. С увеличением глубины вреза последнего в определенных гидрогеологических условиях увеличивается количество дренируемых горизонтов. Поэтому во многих исследованиях мы находим указания о тесной связи величины подземного стока в реки с площадью водосбора, в которой отражается как степень вреза русла в данный водоносный пласт, так и количество дренируемых водоносных пластов. Связи степени дренированности, площади водосбора и величины подземного стока более подробно рассмотрены при характеристике основных закономерностей формирования подземного стока в главах 7, 8, 9.

Глава 4

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОДЗЕМНОГО ПИТАНИЯ РЕК

1. Основные факторы формирования подземного питания рек

Анализ и общая характеристика взаимосвязи речных и подземных вод показывают, что в изучении подземного питания рек решающее значение имеет определение закономерностей режима подземного стока в реку на основе учета гидрогеологических

особенностей речного бассейна, условий гидравлической связи речных и подземных вод и их режима.

В общей схеме формирования речного стока можно выделить два основных процесса — подземное стекание и питание рек подземным стоком, с одной стороны, поверхностное стекание и поступление поверхностного (склонового) стока в русло — с другой. Оба эти процесса взамосвязаны, и поэтому для правильного учета влияния различных природных факторов на формирование подземного питания рек необходима раздельная оценка воздействия этих факторов на указанные процессы.

Гидрогеологические особенности речного бассейна связаны в первую очередь с его геологическим строением, которое определяет распространение в бассейне водовмещающих пород на водоупорах, где в условиях поступления атмосферных вод через породы зоны аэрации могут формироваться подземные воды. Литологический состав и сложение горных пород определяют условия залегания подземных вод и их стока в водоносных пластах, а также оказывают влияние на общий режим подземных вод.

В то же время фактор геологии имеет значение в формировании поверхностного стока на водосборе, определяя возможность потерь стока на инфильтрацию.

Режим подземных вод, а следовательно, и подземного стекания и пространственные особенности формирования поверхностного стока на водосборе наряду с геологией в значительной мере определяются воздействием климатических факторов. Атмосферные осадки, температура воздуха (и связанная с ней температура почвы), величина суммарного испарения в значительной мере определяют питание и баланс подземных вод, водообразование на поверхности водосбора и потери поверхностного стока на инфильтрацию. К климатическим факторам следует отнести и явление многолетнемерзлых пород, оказывающих влияние на подземный сток в реки зоны многолетней мерзлоты.

В процессе трансформации атмосферных осадков в подземный и поверхностный сток решающее влияние оказывает почвенный покров. Гидрологическое значение почвы наиболее полно раскрыто в работах А. А. Роде [72] и М. И. Львовича [54] и может быть показано простейшими схемами (рис. 14).

На схемах показано, что изменение соотношений элементов водного баланса определяется изменением инфильтрационной и водоудерживающей способности почвы.[1] В предложенных схемах Львович элиминирует влияние на водный баланс почвенного

[1] Рассуждения по схемам должны быть полностью отнесены к оценке влияния пород зоны аэрации на питание подземных вод, а не только почвенного покрова.

слоя других факторов и принимает условия выпадения осадков и испаряемости однородными.

Рассматривая схемы в отношении подземного питания рек, можно видеть, что при прочих условиях в режиме подземного стока в реку будут наблюдаться следующие закономерности.

При увеличении инфильтрационной и водоудерживающей способности почвы в прямом соотношении, при малом и большом их значении, питание подземных вод, а следовательно, и подземный сток в реку будут незначительными: в первом случае из-за малой величины питания подземных вод (небольшое количество воды, поступившей в почву, в значительных объемах

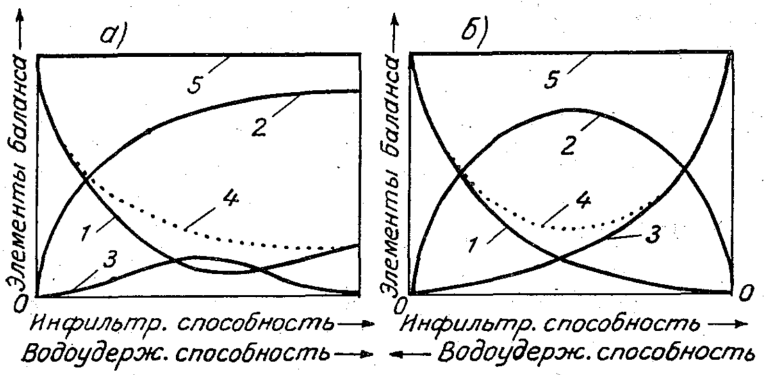


Рис. 14. Принципиальная схема зависимости поверхностного стока (*1*), испарения (*2*), подземного питания рек (*3*) и общего речного стока (*4*) от инфильтрационной и водоудерживающей способности почвенного покрова при совместном их действии (по М. И. Львовичу).

а — прямое соотношение, *б* — обратное соотношение инфильтрационной и водоудерживающей способностей; *5* — осадки.

удерживается в ней и испаряется); во втором случае — вследствие того, что атмосферная вода, интенсивно просачиваясь в почву, удерживается последней, и лишь незначительная ее часть может поступить на питание подземных вод (рис. 14 *а*).

При увеличении инфильтрационной способности и уменьшении водоудерживающей способности (рис. 14 *б*) питание подземных вод (подземное питание реки) растет до максимально возможной величины.

Одновременно с этим на схемах показано изменение поверхностного стока в зависимости от водных свойств почвы и значение ее в формировании поверхностного стекания.

Учет водного режима почвенного покрова для решающей оценки условий подземного питания рек, как указывалось во введении, имеет большое значение.

Влияние рельефа на условия подземного и поверхностного стекания весьма многообразно и в общих чертах может быть оценено следующим образом.

Расчлененность рельефа, глубина эрозионного вреза и густота гидрографической сети при прочих равных условиях в значительной мере определяют дренированность водоносных пластов, гидравлические уклоны, а следовательно, и расходы подземных потоков, а также длину путей фильтрации подземных вод в междуречных массивах. Особое значение для питания подземных вод имеют формы микрорельефа, создающие очаги питания в засушливых областях, где только и происходит инфильтрационное поступление атмосферных вод к подземным. Все это определяет режим подземных вод в целом и подземного стока в реку в особенности.

Влияние рельефа на поверхностный сток сказывается главным образом не непосредственно, а через климатические факторы, в первую очередь осадки и испарение. Особое значение при этом имеет вертикальная поясность, в равной мере отражающаяся на режиме подземного и речного стока.

Рельеф настолько связан с геологическим строением местности, что часто выделить влияние каждого из них на природные явления является практически неразрешимой задачей.

Влияние растительности на подземное питание реки должно рассматриваться в аспекте формирования расхода атмосферных вод на транспирацию и частично на задержание осадков кронами деревьев и поверхностью растительности. Уменьшение питания подземных вод и увеличение потерь поверхностного стока на инфильтрацию при этом происходят вследствие иссушения почвы. Особое значение имеет древесная растительность, корневая система которой повышает проницаемость зоны аэрации для инфлюкционного питания подземных вод. В то же время десукция подземных вод древесной растительностью в известной мере может уменьшать подземный сток к реке.

Выделив среди природных факторов водного режима речных бассейнов главные — климат, геологию, рельеф, почвы и растительность, значение их в формировании подземного питания реки можно показать общей схемой рис. 15.

Все выделенные факторы одновременно оказывают влияние на поверхностную и подземную составляющие речного стока. При этом и они сами между собой находятся в тесной взаимосвязи и взаимодействии.

Особенности формирования поверхностного (склонового) стока до поступления его в русло оказывают влияние на подземный сток, определяют дополнительное питание подземных вод за счет инфильтрационных потерь. Значительно большее влияние на непосредственное поступление подземного стока в русло (подземное питание реки) имеет сток поверхностных вод в рус-

лах. В условиях гидравлической связи реки с водоносным пластом режим уровня русловых вод в половодье и паводки за период берегового регулирования может определять как закономерность подземного стока в водоносном пласте (подпор подземных вод), так и поступления подземных вод в русло.

Выше было рассмотрено влияние на подземное питание рек естественных факторов. Наряду с этим с развитием народного хозяйства возрастает возможность нарушения режима подземных вод и речного стока под влиянием хозяйственной деятельности, что может вызывать искусственные нарушения режима

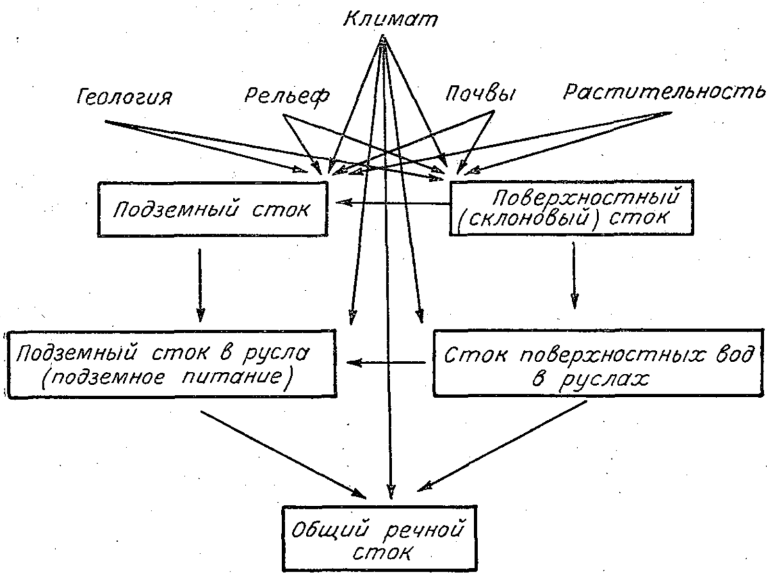


Рис. 15. Влияние природных факторов на подземное питание рек в общей схеме формирования речного стока.

подземного питания рек. Влияние искусственных нарушений многообразно, и их описание представляет собой особую задачу, которую автор здесь не ставит. Поэтому ниже даются лишь общие замечания по этой проблеме.

Подземное питание реки может быть нарушено изменением режима речного стока в условиях создания водохранилищ. Искусственное регулирование уровней речных вод в этом случае приводит к изменению подпора подземых вод. При высоких уровнях подземное питание реки может прекращаться и формируются подземные потери речного стока на питание подземных вод. Наоборот, понижение уровня реки, например в нижнем бьефе водохранилищ, может приводить к интенсификации подземного стока в реку.

В то же время на режиме подземного питания реки могут сказываться искусственные воздействия, связанные с уменьшением запасов подземных вод в связи с интенсивным водоотбором их для сельскохозяйственных целей (для водоснабжения, горный водоотлив при эксплуатации месторождений и т. п.). В отдельных случаях хозяйственные мероприятия на водосборе приводят к усилению подземного питания реки за счет увеличения запасов подземных вод при увеличении инфильтрации атмосферных вод на сельскохозяйственных полях, при орошении и обводнении и т. д.

Заканчивая краткий обзор факторов формирования подземного питания рек, нужно указать, что при изучении закономерностей этого сложного процесса в различных природных условиях первой задачей является установить основные из них, определяющие главные особенности водообмена реки и водоносных пластов.

Итак, величина подземного стока в реки является интегральным количественным показателем весьма сложного процесса взаимосвязи подземных и речных вод как одного из основных звеньев общего круговорота природных вод, и только комплексный гидролого-гидрогелогический подход к изучению подземного питания реки позволит раскрыть закономерности формирования его в зависимости от отдельных природных факторов.

2. Параметры подземного стока

В исследованиях подземного питания рек количественные характеристики подземного стока в одно и то же время должны отражать его особенности как элемента баланса подземного потока и составляющей речного стока водного баланса речного бассейна. Это определяет целесообразность использования в оценке подземного стока в реки следующих параметров.

Общая величина подземного стока оценивается *объемом* воды W, протекающей в подземном потоке и поступающей в водотоки (водоемы) за какой-либо промежуток времени. Объем стока обычно выражается в кубических метрах или кубических километрах за год.

В воднобалансовых расчетах величина подземного стока в речном бассейне выражается слоем h мм, рассчитывается по его объему за заданный период времени (как правило, год) и общей площади речного водосбора.

Расходом подземного стока (потока) Q называют объем воды, протекающей в единицу времени через полную площадь поперечного сечения всей породы, в которой движется поток.[1]

[1] Расход подземного стока является фиктивной характеристикой потока, так как движение воды происходит не через все сечение породы, а только через поры и трещины, свободные от связанной воды.

Расход для больших объемов выражается в $м^3$/сек., для малых (в особенности для родников) — в л/сек.

В гидрогеологии при оценке подземного стока из родника, скважины вместо термина «расход» широко применяется термин «дебит».

Величину подземного стока, наименьшую в году, характеризуют *минимальным модулем подземного стока.*

На большей части территории СССР за минимальный модуль подземного стока может быть принят минимальный тридцатидневный или среднемесячная величина минимального речного стока за календарный месяц, приводимая в Гидрологических ежегодниках.

Однако эти характеристики не всегда служат объективным критерием минимальных значений подземного стока, так как при их определении в величину речного стока могут включаться поверхностные воды от дождевых паводков или сток талых вод при оттепелях в зимний период. Поэтому при детальных исследованиях подземного стока определение его минимальных модулей необходимо производить при анализе гидрографов речного стока с учетом всех особенностей формирования подземного питания реки. В отдельные годы и для отдельных речных бассейнов при отсутствии продолжительной и устойчивой межени минимальный модуль целесообразно рассчитывать как среднюю величину речного стока за отдельные промежутки в период низкого стока, в которые на речной сток влияние дождевых паводков и оттепелей будет наименьшим. Использование для характеристики наименьшего подземного стока многолетних значений минимального модуля придает его оценке большую надежность.

Определение минимальных модулей подземного стока наиболее сложно для рек, где наблюдаются перемерзание и наледные явления (Восточная Сибирь, Забайкалье, Северо-Восток СССР).

Для карт подземного стока СССР [42] было принято минимальный модуль подземного стока рассчитывать по среднему расходу реки за период от начала перехода ее на подземное питание (от начала ледостава) до момента прекращения речного стока. Обоснованием такого решения служил тот факт, что гидрограф реки четко отражает в этот период переход на питание реки за счет подземного стекания, а явление наледообразования показывает существование подземного стока в речном бассейне в зимний период. Более объективной оценкой наименьшего подземного стока для таких объемов является расчет минимальных модулей по величине зимнего наледообразования в бассейне или по величине наледного стока в летний период. Однако отсутствие количественных характеристик

наледообразования и наледного стока в региональном аспекте не позволяет и в настоящее время получить желаемое решение.

Расчет обеспеченности величин минимальных модулей подземного стока в реки, имеющие многолетние ряды наблюдений, показывает, что для большей части территории СССР этот параметр характеризует подземный сток высокой обеспеченности, до 90—95%.

Для характеристики подземных потоков часто используют величину *единичного расхода* $q_{ед}$ — расход воды, приходящийся на единицу ширины потока. Этот параметр получается при расчетах расхода по данным наблюдений за уровнем подземных вод по створу скважин, направленному по течению подземного потока.

Для сравнительной оценки подземного стока в различных речных бассейнах служит параметр — *модуль подземного стока* q —среднее количество (расход) подземных вод, стекающее в единицу времени с единицы площади водосбора, выраженный в л/сек. км^2 или м^3/сек. км^2.

В расчетах модуля в большинстве случаев используют величину площади поверхностного водосбора, условно допуская равенство ее с площадью распространения водоносного пласта. Правильность такого допущения должна обосновываться гидрогеологическими данными, и в общем случае модуль подземного стока следует определять для площади изучаемого водоносного пласта — подземного водосбора речного бассейна.

В гидрогеологии при оценке естественных ресурсов подземных вод для характеристики подземного стока с учетом мощности водоносного пласта введено понятие «удельный модуль» подземного стока $q_{уд}$, который показывает расход водоносного пласта в единицу времени «на единицу его емкости». Физический смысл этого параметра ясен из формулы, предложенной для его расчета:

$$q_{уд} = \frac{Q \cdot 10^3}{365 \cdot 86\,400\,(F \cdot 0{,}001\bar{h})} = \frac{Q \cdot 10^3}{365 \cdot 86\,400 V} \text{ л/сек. км}^3, \quad (10)$$

где F — площадь водоносного пласта в км^2; $\bar{h}$ — его средняя мощность в м; V — его объем в км^3.

Величина подземного стока по отношению к атмосферным осадкам и общему речному стоку соответственно характеризуется коэффициентами подземного стока и подземного питания рек.

Коэффициент подземного стока $\alpha_п$ по аналогии с коэффициентом стока в гидрологии представляет собой отношение величины подземного стока к величине выпавших на площадь питания водоносного пласта осадков за тот же период и выражается в процентах или долях единицы. В гидрогеологии этот коэффи-

циент рассматривается как одна из самых важных воднобалансовых характеристик, показывающая, какой долей атмосферных осадков сформирован подземный сток. Для районов, где в питании подземных вод принимает участие конденсация, последняя учитывается при расчетах коэффициентов подземного стока дополнительно к осадкам. Коэффициент подземного стока является существенно важной характеристикой зоны аэрации и ее водного баланса и отражает особенности трансформации осадков в подземный сток.

Учитывая естественную зарегулированность подземного стока и возможность переходящих из года в год запасов подземных вод, правильнее расчеты коэффициентов подземного стока производить за многолетний период.

Если в формировании подземного стока, кроме атмосферных вод (осадки и конденсация), принимают участие, как, например, в Средней Азии, возвратные воды при орошении и транзитный подземный сток с соседних басейнов, а также глубинное питание напорных вод и т. п., то коэффициент подземного стока будет больше единицы. В этих случаях для характеристики соотношения величин подземного стока и полной величины питания водоносного пласта следует ввести понятие общего коэффициента подземного стока.

Общий коэффициент подземного стока $\Sigma\alpha_{п}$ — отношение величины подземного стока к величине полного питания водоносного пласта; выражается в процентах или долях единицы.

Коэффициент подземного питания реки $k_{ш}$ выражает соотношение подземного стока, поступающего в реку, и общей величины ее стока (в процентах или долях единицы). Это соотношение показывает степень участия подземных вод в формировании речного стока, а следовательно, является количественным показателем взаимосвязи речных и подземных вод. Коэффициент подземного питания должен служить объективным основанием для классификации рек по величине подземного питания.

Для характеристики многолетней изменчивости и определения обеспеченности подземного питания рек в оценке подземного стока необходимо использовать известные статистические параметры — *коэффициент вариации* C_v и *коэффициент асимметрии* C_s, которые определяются при статистической обработке рядов наблюдений за подземным стоком в реку, выполняемой по аналогии с обработкой данных о речном стоке.

3. Типы подземного питания рек

Основой правильного изучения и оценки подземного питания рек в различных физико-географических условиях является четкое представление о возможных путях поступления подземных вод в реки из различных источников, о закономерностях

Схема подразделения подземных вод по условиям подземного стока

Гидрогеологическая характеристика скоплений подземных вод		
зона подземного стока	пояс скоплений подземных вод	тип подземных вод
Зона активного стока	Пояс I—аэрации (почвенных вод и верховодки), или пояс неустойчивого насыщения (пояс инфильтрации)	Почвенные воды и верховодка
	Пояс II — грунтовых вод, или пояс устойчивого насыщения пород свободными или местными напорными водами (пояс фильтрации)	Грунтовые воды
Зона замедленного стока	Пояс III — артезианских вод, или пояс полного насыщения пустот пород устойчиво напорными водами	Артезианские (напорные воды)
Зона относительного застоя	Пояс IV — глубоких артезианских вод	То же
	Пояс V — глубинных вод	Жильные восходящие воды (по В. И. Вернадскому)

Таблица 10

в реки (подземные воды сферы дренирования), по М. П. Распопову

Гидрологическое подразделение подземных вод и подземного стока в реки		Вертикальная зона климатического воздействия
вид подземных вод или горизонтов сферы дренирования поверхностными водотоками и водоемами	вид подземного стока в поверхностные водотоки	
Горизонт почвенных вод или неустойчивого увлажнения Горизонт подпочвенный или постоянного недостаточного увлажнения Горизонт капиллярного увлажнения	Внутрипочвенный сток	Глубина внутригодового (интенсивного) воздействия
Верхние грунтовые воды — гравитационные воды на первом от поверхности водоупоре	Верхний грунтовый сток	
Глубокие грунтовые воды — свободные и с местными напорами воды, залегающие ниже первой водоупорной кровли, выше или на уровне местных базисов эрозии	Глубокий грунтовый сток	Глубина многолетнего (ослабленного) воздействия
Открытые артезианские воды — устойчиво напорные воды, непосредственно дренируемые поверхностными водотоками и водоемами	Открытый артезианский сток	
Закрытые артезианские воды — устойчиво напорные воды, разгружающиеся в поверхностные водотоки и водоемы через сопряженные с ними горизонты подземных вод или по тектоническим трещинам	Закрытый артезианский сток	Глубина векового (слабого) воздействия
Воды сильно ослабленного водообмена с земной поверхностью	Локальный, чрезвычайно редкий восходящий сток в реки и озера, преимущественно по тектоническим разломам	Глубина относительного отсутствия воздействия

(динамике) подземного стока в реки, обобщенных в виде классификации подземного питания рек.

Для выделения источников подземного питания рек может служить схема подразделения подземных вод по условиям подземного стока в реки (подземных вод сферы дренирования), предложенная М. П. Распоповым (табл. 10).

Отдельным типам подземных вод, рассмотренным более детально в начале главы 2, автор дает следующие общие характеристики.

Почвенные воды и верховодка. Воды данного типа характеризуются большой динамичностью, и количество воды, находящейся в зоне аэрации, подвержено резким изменениям (пополнение — просачивание и конденсация, расход — испарение и транспирация, а также просачивание в нижележащие горизонты). Почвенные воды только периодически могут быть гравитационными (в период полного насыщения почвы за счет интенсивного просачивания атмосферных осадков и талых вод).

На относительных водоупорах в зоне распространения вод этого типа может иметь место периодический подземный сток (почвенный или грунтовый). Область питания водоносных пластов почвенных вод и верховодки совпадает с областями его распространения.

Грунтовые воды. По условиям залегания и разгрузки в реки выделяются *верхние грунтовые воды* — постоянные подземные воды на первом от поверхности земли водоупоре, на уровне или выше местного эрозионного вреза. В пустынных областях, где гидрографическая сеть обычно редка и поверхностные потоки, как правило, отсутствуют, верхние грунтовые воды могут находиться и ниже современного вреза. Область питания верхних грунтовых вод совпадает с областью их распространения, и динамика режима этих вод, как правило, отражает сезонные изменения гидрометеорологических факторов. В засушливых районах сток их в реки часто носит сезонный характер вследствие опускания поверхности подземных вод ниже дренирующего эрозионного вреза.

Для верхних грунтовых вод следует выделить отдельно *аллювиальные грунтовые воды*, развитые в современных и древних аллювиальных отложениях речных долин. В питании рек эти воды имеют огромное значение, трансформируя в своем потоке воды основных водоносных горизонтов. Область распространения аллювиальных вод в большинстве случаев является зоной развития берегового регулирования.

Глубокие грунтовые воды. В отличие от верхних грунтовых вод, залегают на втором и более глубоком от поверхности водоупорах. Область питания этих вод обычно меньше площади распространения, и режим их отражает в большинстве случаев

многолетние циклы климатического воздействия. Особенности развития глубоких грунтовых вод часто связаны с характером и распространением геологических структур. Площадь распространения этих вод часто значительно больше поверхности водосборов малых рек, но границы их подземных водосборов совпадают с поверхностными водосборами крупных рек.

Артезианские (напорные) воды. Условия развития напоров в водоносных пластах и характер связи напорных вод с реками определяют особенности напорного подземного питания рек, рассмотренные ниже.

Наиболее современная классификация подземного питания рек предложена Б. И. Куделиным в 1965 г. [41]. Эта классификация не требует ревизии, но, с нашей точки зрения, может быть детализирована и несколько уточнена в отношении учета характера стока из отдельных источников и динамики подземного стока в реку. Ниже дается описание схемы классификации подземного питания рек с предложенными уточнениями.

Подземное питание рек принято разделять на два основных класса: I — грунтовое и II — артезианское.

При выделении двух основных классов не находит полного отражения участие в формировании речного стока почвенного стока. Однако, учитывая сезонный характер такого питания и всегда подчиненную его роль, представляется целесообразным оставить почвенный сток в разделе сезонного грунтового питания.

В классе грунтового питания выделяются два основных вида: сезонное и постояное.

Сезонное грунтовое питание осуществляется подземными водами типа верховодки, развивающейся в почве и в горных породах, залегающих на поверхности отдельных пластов, обладающих меньшей инфильтрационной способностью. В сезонное грунтовое питание включается поступление в реку вод периодически действующих карстовых и других родников, а также в областях вечной мерзлоты сток надмерзлотных вод деятельного слоя и наледей, образованных подземными водами, в теплое время года. В последнем случае явление наледообразования и наледного стока приводит к наледному регулированию подземного стока в реки.

Основным фактором, определяющим динамику сезонного грунтового стока в реки районов вечной мерзлоты, является сезонное распределение температур воздуха. Поэтому эту разновидность подземного питания Куделин предлагает называть «мерзлотным типом».

Для районов молодого вулканизма сезонное грунтовое питание может осуществляться водами рыхлоотложенных покровов вулканических сооружений в период интенсивного увлажнения, а также периодически изливающимися водами гейзеров. К этому

же виду грунтового питания необходимо отнести и периодическое поступление грунтовых вод постоянных водоносных горизонтов; питание рек из них прекращается при опускании поверхности грунтовых вод ниже эрозионного вреза русла (засушливые области).

Исследования влияния болот на речной сток показывают, что питание рек болотными водами верховых болот должно быть отнесено к сезонному грунтовому питанию.

В отношении поступления в реки вод с низинных болот вопрос не требует объяснения. В этом случае сами болотные воды формируются подземным стоком из водоносных пластов, развитых на суходолах, и в низинных болотах происходит только трансформация этого стока на пути к реке (главным образом потери на испарение). Постоянное подземное питание реки в бассейнах с низинными болотами формируется грунтовым стоком.

Сезонный характер поступления болотных вод с верховых болот в реку вытекает из анализа условий стекания воды в болотных массивах [42].

Стекание воды на болотах происходит в относительно небольшом по мощности деятельном горизонте торфяной залежи, в различных болотных ландшафтах изменяющемся от 10 до 60 см, с коэффициентом фильтрации $10—10^{-2}$ см/сек. Более нижний слой торфяной залежи представляет собой инертный горизонт с коэффициентом фильтрации $10^{-3}—10^{-5}$ см/ сек., в котором практически вся влага находится в связанном состоянии.

Поэтому из торфяной залежи в реку может поступать только свободная влага, аккумулированная в деятельном слое в периоды интенсивного поступления талых и дождевых вод. При переходе уровня болотных вод в пределы инертного горизонта сток с болот практически полностью прекращается. Сезонный характер питания рек болотными водами подтверждается отсутствием стока в летние (бездождные) и зимние периоды на болотных реках, дренирующая способность которых ограничивается толщей торфяной залежи.

Положение о том, что болота не служат регулятором стока, принятое при оценке естественных ресурсов подземных вод [42], приводит к необходимости отнести питание рек болотными водами к виду «сезонного».

Сезонное грунтовое питание рек связано с интенсивным увлажнением зоны аэрации обильными атмосферными осадками и талыми водами. Поэтому оно на основной части территории страны наблюдается в весенне-летние и осенне-зимние периоды и часто совпадает по времени с формированием поверхностного (склонового) стока.

Режим такого непостоянного грунтового питания определяется в общем случае климатическими факторами и по фазам

обычно совпадает с фазами образования продолжительного поверхностного стока на поверхности водосбора. Наблюдается некоторое отставание во времени пика сезонного грунтового питания от пика поверхностного стока в реку. Степень этого запаздывания определяется водопроницаемостью среды, в которой осуществляется подземный сток (почва, торфяная залежь, горные породы). В горных породах с большим коэффициентом фильтрации, особенно в горных условиях, скорости движения воды незначительно отличаются от скоростей поверхностного стекания, и выделить в этом случае поверхностный и подземный сток по степени зарегулированности практически весьма сложно.

Сезонное грунтовое питание рек, как правило, осуществляется преимущественно нисходящими подземными потоками в условиях отсутствия или неполной гидравлической связи с водотоками.

Сезонное грунтовое питание рек с большими площадями водосборов и значительными врезами имеет по сравнению с другими видами питания подчиненное значение.

Для рек с большой площадью бассейна и неглубоким врезом в различных физико-географических условиях роль сезонного грунтового питания может значительно повышаться и иногда иметь относительно большее значение.

Постоянное грунтовое питание происходит за счет стока подземных вод основных горизонтов грунтовых вод, дренируемых речной долиной, и вод нисходящих родников постоянного действия (родниковый сток). Питание грунтовыми водами обычно осуществляется подземными потоками со свободной безнапорной поверхностью или с местным напором.

Постоянное грунтовое питание может осуществляться за счет верхних грунтовых вод — вод первого от поверхности водоносного горизонта (грунтовые воды, по определению Никитина), а также и глубокими грунтовыми водами, межпластовыми, залегающими на втором или более глубоком от поверхности водоупоре. Отмеченное выше в схеме М. П. Распопова различие между верхними и глубокими грунтовыми водами обусловливает целесообразность выделять в рассматриваемой классификации разновидности постоянного грунтового питания этими водами раздельно. При этом учитывается бóльшая подчиненность климатическим воздействиям режима верхних грунтовых вод, имеющих непосредственную связь с атмосферой через зону аэрации. Для глубоких грунтовых вод должно учитываться известное несовпадение поверхностных и подземных водоразделов (водообмен подземным стоком между бассейнами), а также меньшее воздействие на режим этих вод климатических факторов.

Общие особенности режима постоянного грунтового питания

определяются характером гидравлической связи речных и подземных вод. В соответствии с рассмотренными выше закономерностями подземного питания рек в условиях их различной гидравлической связи с водоносными пластами при постоянном грунтовом питании рек может быть выделено два основных случая — питание верхними и глубокими грунтовыми водами, гидравлически не связанными с рекой и имеющими постоянную гидравлическую связь с рекой.

Выделенная в схеме Куделина разновидность постоянного грунтового питания в условиях периодической гидравлической связи речных и подземных вод хотя в теоретическом плане достаточно обоснована, но для реальных бассейнов в подавляющем большинстве случаев может наблюдаться как исключение. Она обычно для небольших элементарных бассейнов или отдельных участков реки. Практически периодическая гидравлическая связь достаточно полно описывается в явлениях берегового регулирования в условиях постоянной гидравлической связи. Поэтому выделение этого случая в отдельную разновидность не вполне оправдано.

Режим постоянного грунтового питания в различных условиях гидравлической связи определяется в первую очередь климатическими факторами, за исключением периодов берегового регулирования для гидравлически связанных речных и подземных вод. Правда, и в этом случае влияние гидрологического фактора — уровня реки — в свою очередь определяется в конкретных гидрогеологических условиях фактором климата.

Доминирующее влияние климата определяет сезонную динамику постоянного грунтового питания, учет которой лежит в основе генетически правильного изучения подземного питания рек.

Особого рассмотрения требует вопрос о формировании постоянного грунтового питания рек в условиях вечной мерзлоты. В районе многолетнемерзлых пород в формировании грунтового стока в реки принимают участие частично промерзающие и непромерзающие надмерзлотные воды, а также межмерзлотные воды и родники постоянного действия. Все особенности различных видов подземного питания рек в области вечной мерзлоты, включая и сезонную динамику всех форм подземного стока в реку, определяются явлением многолетней мерзлоты. Поэтому термин «мерзлотный тип» подземного питания и может быть отнесен к процессу формирования его в районах многолетнемерзлых пород в целом.

Рассматривая разновидности постоянного грунтового питания рек в зависимости от гидравлической связи их с подземными водами, можно видеть, что в схеме Б. И. Куделина не находит отражения различие типов подземного питания в условиях гидравлической связи в зависимости от степени развития берегового регулирования. Поэтому представляется необходимым

отражение в классификации подземного питания рек нисходящего подземного питания при наличии подпора и подпорного питания при береговом регулировании.

Грунтовые воды, составляя основную часть зоны интенсивного (свободного или активного) водообмена, принимают наибольшее участие в формировании подземного питания рек и вместе с артезианскими водами формируют их летние и зимние меженные расходы. Развитие грунтового питания из постоянных водоносных пластов в подавляющем большинстве случаев формирует постоянный сток рек.

Напорное (артезианское) питание обусловлено поступлением в реку вод из напорных пластов и восходящих родников. Это питание приурочено к областям или локальным участкам разгрузки напорных вод восходящим стоком. Динамика стока напорных вод в реки определяется также климатическими факторами, проявляющими свое воздействие через изменение напорного градиента, обусловленного разностью отметок пьезометрического уровня артезианских водоносных пластов и уровня речных вод и влияющими на режим восходящих родников.

Как отмечает Куделин, артезианские воды в областях разгрузки могут служить примером односторонней связи подземных вод с рекой, так как инфильтрация речных вод в напорные водоносные горизонты наблюдаются здесь значительно реже, чем в грунтовые воды. В условиях гидравлической связи реки с напорными водами изменения уровня реки влияют на пьезометрические напоры в областях разгрузки, тем самым определяя сезонную динамику напорного подземного питания рек.

В соответствии с предложением М. П. Распопова в схеме Б. И. Куделина выделены два основных вида артезианского питания: А — открытый артезианский сток; Б — закрытый артезианский сток. Следуя определению «открытого» подземного стока, в разновидностях подземного питания этого вида могут быть выделены не три случая гидравлической связи с рекой (гидравлически не связанные, периодическая и постоянная гидравлическая связь), а лишь последний — подземное питание открытым артезианским стоком в условиях постоянной гидравлической связи речных и подземных вод.

При закрытом артезианском стоке, когда разгрузка напорных вод осуществляется через верхние водоносные пласты, на особенностях подземного питания сказывается режим уровней в вышележащих горизонтах и характер гидравлической связи их с рекой. Поэтому при классификации подземного питания рек в разновидностях постоянного грунтового питания целесообразно выделить случаи, когда источником дополнительного питания безнапорного пласта грунтовых вод являются подземные воды нижележащего напорного водоносного горизонта.

Таблица 11

Классификация подземного питания рек

Класс	Вид	Разновидность	В области развития многолетней мерзлоты	В районах молодого вулканизма
I. Грунтовое	А. Сезонное грунтовое	Водами верховодки, развивающейся: а) в почвах, б) в горных породах Периодически действующими родниками (карстовыми и др.)	Надмерзлотными водами деятельного слоя Водами наледей Родниками периодического действия	Водами рыхлоотложенных покровов вулканических сооружений в периоды интенсивного увлажнения
	Б. Постоянное грунтовое	Болотными водами Грунтовыми водами: а) гидравлически не связанными с рекой, б) имеющими периодическую гидравлическую связь с рекой, в) имеющими постоянную гидравлическую связь с рекой Нисходящими родниками постоянного действия	Надмерзлотными водами: а) частично промерзающими, б) непромерзающими (многолетние талики) Межмерзлотными водами Родниками постоянного действия	Периодически изливающимися водами гейзеров
II. Артезианское	А. Открытый артезианский сток	Артезианскими водами: а) гидравлически не связанными с рекой, б) имеющими периодическую гидравлическую связь с рекой, в) имеющими постоянную гидравлическую связь с рекой	Напорными подмерзлотными водами	Газирующими термоминеральными водами, восходящими по тектоническим разрывам и контактам различных свит
	Б. Закрытый артезианский сток (разгрузка напорных вод через верхние водоносные горизонты)	Восходящими родниками	Восходящими родниками	

III. Потери речного стока на питание подземных вод (отрицательное подземное питание)	А. Сезонные (временные) потери	Инфильтрация речных вод в берега в восходящую стадию половодья и паводков на реках. При спаде уровня воды в реке эти воды, за исключением некоторых потерь, возвращаются в реки	1. При промерзании вод деятельного слоя 2. При образовании наледей
	Б. Постоянные потери	1. В области питания артезианских бассейнов 2. При залегании грунтовых вод в речной долине ниже уровня реки. Обычное явление в странах с засушливым климатом, для некоторых горных рек, для рек карстовых районов и др. 3. При особом геологическом строении речной долины, когда русло реки прорезает наклонные водоносные слои по простиранию; в таком случае могут создаваться условия, при которых один берег будет служить фактором положительного, а другой — отрицательного подземного питания реки. Аналогичный случай может быть при близком параллельном течении двух рек, расположенных на разных уровнях, когда междуречный массив сложен водопроницаемыми породами	В областях питания подмерзлотных вод

рекой, когда у одного из берегов за счет создания постоянных потерь речного стока на питание подземных вод формируются постоянные, обратные по отношению к реке уклоны поверхности подземного потока.

Второй разновидностью постоянных потерь можно считать потери речного стока в областях питания артезианских бассейнов, в частности в областях питания напорных подмерзлотных вод.

При широком многообразии форм взаимосвязи речных и подземных вод, наблюдающихся в природных условиях, любая классификационная схема этого сложного процесса не сможет в деталях отобразить особенности водообмена реки и водоносных пластов. Однако в приводимой «схеме классификации подземного питания» по Б. И. Куделину (табл. 11) в дальнейшем имеется возможность отразить особенности этого процесса с учетом обширного фактического материала по закономерностям формирования подземного питания рек на территории СССР, который был получен в многолетних исследованиях подземного питания рек для составления карт подземного стока СССР.

ЧАСТЬ II

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО ПИТАНИЯ РЕК

Глава 5

ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДЗЕМНОГО СТОКА В РЕКИ

Полевые исследования подземного питания рек имеют своей главной целью установить основные особенности взаимосвязи реки и подземных вод в речном бассейне, режим этой взаимосвязи и дать количественную оценку подземного стока как элемента баланса водоносного пласта, питающего реку, и подземной составляющей ее стока.

Для решения этих задач исследования должны включать гидрогеологические и гидрологические наблюдения за формированием подземного питания реки.

Гидрогеологические наблюдения за подземным стоком должны освещать его как элемент баланса подземных вод. Количественная оценка его величин на отдельных участках водоносного пласта должна дать характеристику условий формирования подземного стока в пределах подземного водосбора реки для того, чтобы наиболее полно оценить особенности поступления его к реке и условия дренирования водоносного пласта.

Гидрологические наблюдения в комплексе полевых работ по изучению подземного питания рек должны обеспечивать характеристику водного режима водотока в аспекте влияния его на условия дренирования и режим водоносного пласта, а также давать возможность прямого определения гидрометрическим методом величин подземного стока в реку.

Основной целью гидрогеологических наблюдений должно быть построение единичного гидрографа подземного стока в реку

на наиболее характерных в отношении типа взаимосвязи речных и подземных вод участках.

При проведении обоих видов наблюдений должен быть соблюден основной принцип комплексного гидролого-гидрогеологического метода оценки подземного стока: гидрогеологическая качественная характеристика закономерностей подземного стока в реку в сочетании с его количественным расчетом по гидрологическим данным. Это обеспечивает региональную оценку подземного стока как в пределах небольших водосборов, но со сложными гидрогеологическими условиями, так и для больших территорий.

Полевые работы по изучению подземного стока в реки, как правило, являются составной частью исследований гидрометеорологического режима и элементов водного баланса речных бассейнов и факторов, их определяющих. Наиболее полные результаты изучения подземного питания реки могут быть получены при проведении комплексных воднобалансовых наблюдений, охватывающих всю площадь водосбора изучаемого объекта. Однако при правильном районировании территории положительные результаты могут быть получены при изучении ключевых, типичных участков бассейна с последующей географической экстраполяцией полученных данных на всю площадь бассейна по отдельным районам.

Одним из наиболее принципиальных вопросов организации исследований подземного питания рек является выбор объектов. В первую очередь организация таких наблюдений необходима в речных бассейнах, где решение практических водохозяйственных задач требует получения объективных количественных характеристик взаимосвязи рек и подземных вод. Такими объектами могут быть районы с напряженным водным балансом, где проектирование комплексного использования и охраны водных ресурсов должно опираться на точный количественный расчет их величин и учет роли подземных вод в водном балансе бассейна. Это же относится и к районам крупных нарушений режима подземных вод, связанных с рекой, приводящих к изменениям режима речного стока (КМА, Донбасс и т. п.).

Одновременно с этим возникает необходимость полевых исследований подземного стока для региональной оценки подземного питания рек при плановом изучении водных ресурсов (включая и естественные ресурсы пресных подземных вод) и водного баланса по территории всей страны. Региональная оценка подземного стока в масштабе всей страны практически может быть выполнена только комплексным методом генетического расчленения гидрографа рек. Однако дальнейшее развитие этого метода в аспекте применения его при более крупномасштабном картировании подземного стока должно опираться на более детальные и точные сведения о закономерностях

взаимосвязи речных и подземных вод. Отсюда возникает задача полевого изучения подземного стока применительно к типовым речным бассейнам на отдельных участках территории страны.

Если для решения конкретного практического вопроса, связанного с решением водохозяйственной задачи, объект назначается из соображения хозяйственного использования, то основанием для выбора речного бассейна с целью организации регионального изучения подземного питания рек должно служить районирование территории по условиям формирования подземного стока.

В отношении всей страны такой схемой должно служить структурно-гидролого-гидрогеологическое районирование, принятое при составлении карт подземного стока СССР (см. главу 5). В пределах выделенных регионов или районов выбор бассейна должен производиться с учетом классификации взаимосвязи речных и подземных вод, включая основные случаи гидравлической связи, и закономерности подземного стока в реки: нисходящего, подпорного и т. п.

Одновременно с этим необходимо, чтобы в выбранном бассейне или на его отдельном участке можно было организовать изучение подземного стока в реку в таких условиях, которые являются типичными для изучаемого района, определяются гидрогеологическими особенностями водосбора в границах изучаемого бассейна и в минимальной степени отражают влияние окружающей территории, на которой не производятся наблюдения.

При выборе объекта должна учитываться общая изученность природных условий бассейна. Предпочтение необходимо отдавать тем районам, для которых уже имеются многолетние наблюдения за гидрометеорологическим режимом, а гидрогеологические данные позволяют установить для него общую схему взаимосвязи речных и подземных вод, а также достаточно полно осветить режим последних.[1]

Рассмотрим основные положения о полевых исследованиях подземного стока в реки по гидрогеологическим и гидрологическим их видам отдельно.

Для наиболее полного изучения подземного питания реки с учетом особенностей формирования подземного стока в границах всего бассейна размещение пунктов наблюдений должно обеспечивать составление карт гидроизогипс бассейна с учетом сезонных изменений положения поверхности подземных вод. В этих условиях будет получена возможность расчета подзем-

[1] Эти положения в настоящее время находят отражение в организации и проведении комплексных гидролого-гидрогеологических исследований на репрезентативных бассейнах Международного гидрологического десятилетия и при организации опорной гидрогеологической сети наблюдений за режимом подземных вод в СССР.

ного потока для любого участка бассейна. Учитывая сложность оборудования такой сети наблюдательных точек при проведении наблюдений за режимом подземных вод с целью оценки их стока в реки, можно ограничиться наблюдениями только на отдельных типичных участках речного бассейна в местах, где установлено либо предполагается наличие водообмена между водоносными пластами и изучаемым водотоком.

Методика полевого изучения подземного стока в реки должна обеспечивать получение оптимальных данных о величине питания и об изменении его режима на различных участках изучаемого водотока при минимальном количестве наблюдательных точек, которыми являются специально оборудованные скважины и родники. Поэтому в организации наблюдений решающим должно быть обоснование мест расположения и количество наблюдательных точек в изучаемом речном бассейне. Рациональное размещение наблюдательных точек может быть во всех случаях установлено в зависимости от общих особенностей формирования подземного стока в реку.

Точные данные о режиме подземного стока в бассейне и величине расходов подземных потоков, поступающих в реку, можно получить путем гидродинамического анализа наблюдаемых колебаний уровня подземных вод на основе метода конечных разностей. Для обеспечения таких расчетов наблюдательные точки должны размещаться по створам, направленным по течению подземного потока; желательно иметь не менее трех точек на расчетном участке, хотя положительные результаты могут быть получены в простейших условиях, при расчете по двум сечениям потока.

Расход подземного потока в этом случае может быть вычислен по формуле

$$Q_{\text{подз}} = \frac{K_1\omega_1 + K_2\omega_2}{2} J, \qquad (11)$$

где K_1 и K_2 — средние коэффициенты фильтрации водоносного пласта в первом и втором сечениях потока, расположенных перпендикулярно направлению движения воды, т. е. по линии равных напоров; ω_1 и ω_2 — площади сечения подземного потока, определяемые по гидрогеологическим данным; J — напорный градиент потока между первым и вторым сечениями, рассчитываемый по данным наблюдений за уровнем грунтовых вод.

Если указанные параметры водоносного пласта по его протяжению изменяются, то расчет расхода производится по отдельным участкам, для которых параметры имеют более или менее близкие значения.

Данные о подземном стоке в бассейне могут быть получены на основе применения современных методов аналитического решения задач плановой фильтрации с применением

дифференциального уравнения фильтрации, если эти решения обеспечиваются массовыми материалами наблюдений за режимом уровней подземных вод в достаточно большом количестве наблюдательных точек (не менее трех на расчетный створ) и достаточно точными данными о водно-физических свойствах и условиях залегания водоносных пород.

Для применения этих методов в изучаемом бассейне требуется известная схематизация природных условий, определение естественных границ изучаемых потоков подземных вод, установление исходных расчетных гидрогеологических параметров — коэффициента фильтрации водоносных пород, мощности, направления и уклона потока и т. д.

Одновременно с расчетом расходов отдельных подземных потоков в условиях хорошо развитой сети наблюдений за уровнями подземных вод в бассейне могут быть поставлены работы по расчету баланса подземных вод методами гидродинамики. В основе этого метода лежит использование обобщенного уравнения баланса подземных вод для определенного участка подземного водосбора или элемента потока ,

$$\mu \Delta H = \frac{Q_1 - Q_2}{\omega} \Delta t + W \Delta t, \tag{12}$$

где μ — водоотдача грунтов при понижении уровня грунтовых вод или недостаток их насыщения над капиллярной каймой при повышении уровня; ΔH — изменение уровня грунтовых вод в элементе потока за промежуток времени Δt; Q_1 и Q_2 — средние за тот же промежуток времени расходы грунтового потока, поступающие и вытекающие из его элемента; ω — площадь горизонтальной проекции участка водосбора или элемента потока; W — величина питания грунтового потока сверху или расход грунтовых вод на суммарное испарение.

При рассмотрении плоского потока грунтовых вод вместо величин расходов Q_1 и Q_2 следует принимать значения единичных расходов q_1 и q_2, отнесенных к единице ширины потока, а вместо ω достаточно учесть протяженность выделенного элемента потока грунтовых вод Δx (рис. 16).

Приток q_1 и отток q_2 на данном участке речного бассейна, отнесенные к среднему сечению потока на наблюдательном створе, в соответствии с «методом конечных разностей» определяются по следующим формулам:

$$q_1 = K \frac{h_{n-1,\, s+1} + h_{n,\, s+1}}{2} \frac{H_{n-1,\, s+1} H_{n,\, s+1}}{\Delta x}, \tag{13}$$

$$q_2 = K \frac{h_{n,\, s+1} + h_{n+1,\, s+1}}{2} \frac{H_{n,\, s+1} - H_{n+1,\, s+1}}{\Delta x}. \tag{14}$$

Определив разность между притоком и оттоком грунтовых вод в пределах каждого изучаемого участка, т. е. величины

$\Sigma \frac{q_1 - q_2}{\Delta x} \Delta t = \Sigma \frac{\Delta q}{\Delta x} \Delta t$, можно при распространении значения этой разности на аналогичные по гидрогеологическим условиям территории подсчитать средневзвешенное значение этой разности, характеризующей условия формирования подземного стока для целого речного бассейна.

При отсутствии поступления вод подземным стоком в данный подземный водосбор (нет подземного водообмена) величина $\Sigma \frac{\Delta q}{\Delta x} \Delta t$, умноженная на площадь бассейна, дает подземный сток этого водосбора. В условиях полного дренирования

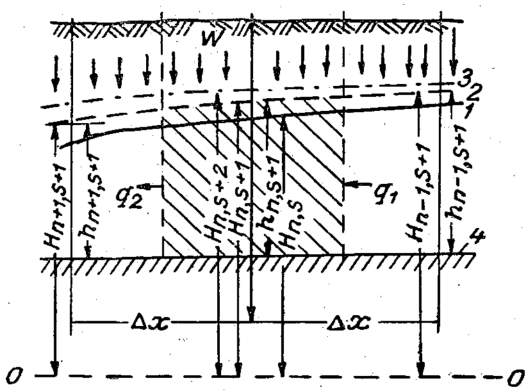


Рис. 16. Схема расчета баланса элемента подземного потока по данным об уровнях в трех его сечениях.

W — питание потока сверху, q_1 — приток, q_2 — отток подземных вод из элемента потока (элемент заштрихован).

грунтовых вод реками эта величина соответствует объему ее подземного питания за интервал времени Δt. Легко видеть, что величина $\Sigma \frac{\Delta q}{\Delta x} \Delta t$, выраженная в л/сек. с 1 км^2, есть модуль подземного стока.

Метод позволяет на основе детальных гидрогеологических стационарных наблюдений изучать условия формирования стока не только в местах разгрузки подземных вод в реки, но и на характерных участках их водосборов. Относительная сложность организации стационарной наблюдательной сети скважин и трудоемкость детальных гидрогеологических исследований ограничивают возможность применения этого метода для отдельных бассейнов при многолетних исследованиях. Методика такого изучения режима подземных вод описана в специальной литературе [8, 34, 39, 46].

Выполнение указанных гидрогеологических расчетов относится к области специальных гидрогеологических исследований и может быть рекомендовано при хорошей изученности природных условий бассейнов для расчетов водного баланса большой точности, обеспеченной соответствующей точностью измерения всех основных его элементов.

Наблюдательные створы по берегу реки или водоема размещаются с частотой, определяемой гидрогеологическими условиями водосбора. Учитывая пестроту гидрогеологического строения в пределах даже небольших речных бассейнов, для правильного обоснования и выбора мест необходимо прибегать к известной схематизации этих условий и выбору типичных участков с наиболее репрезентативными условиями взаимосвязи реки и водоносного пласта. Только при таких условиях и правильном районировании даже в экспериментальных бассейнах может быть получена возможность применения гидродинамических расчетов расхода подземных потоков. На каждом участке берега, который является типичным в отношении водообмена между рекой и водоносным пластом, дренируемым ею, должен быть заложен створ. Если по условиям взаимосвязи речных и подземных вод оба берега долины аналогичные, то створ скважин может быть оборудован только на одном из них.

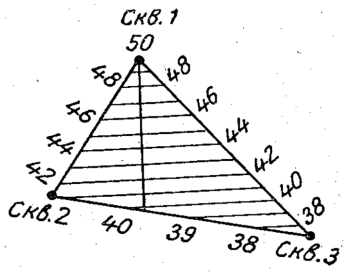


Рис. 17. План расположения скважин с нанесенными гидроизогипсами для определения направления подземного потока по трем точкам.

Для обеспечения возможности гидрогеологических расчетов створы скважин должны располагаться в направлении движения подземных потоков на выбранном участке.

Определение направления подземного потока целесообразно проводить по трем точкам — скважинам. Для этого в месте, где требуется определить направление подземного потока, закладывают три скважины (колодца), образующие равносторонний треугольник. Если определение производится на склоне, то одна скважина располагается в вершине треугольника, лежащей выше по склону, две другие — ниже, примерно на одной предполагаемой гидроизогипсе подземного потока. Расстояние между скважинами треугольника определяется фильтрационными свойствами водоносного пласта; оно должно обеспечивать, за вычетом всех погрешностей измерений, определение разницы в отметках уровнях воды в скважинах с точностью применяемых приборов. В большинстве случаев расстояние между скважинами равно 200—300 м.

Произведя нивелировку устья скважин и замер уровня воды

в скважинах, пересчитывают последние на относительные высотные отметки, принимая за условный нуль отметку самого низкого уровня в одной из скважин.

Произведя угломерным инструментом определение азимутов направления между скважинами и определив расстояние между ними, составляют план расположения скважин (рис. 17).

Стороны треугольника *1*, *2*, *3*, образованного скважинами, делят на пропорциональные отрезки в соответствии с отметками уровней и через точки с одинаковыми отметками проводят гидроизогипсы. Линия, перпендикулярная к гидроизогипсам, проведенная в направлении их падения, определяет направление движения подземного потока. Полученный план гидроизогипс позволяет определить и уклон подземного потока.

Если для выбранного участка не имеется точных данных о направлении подземного потока, то скважины размещаются

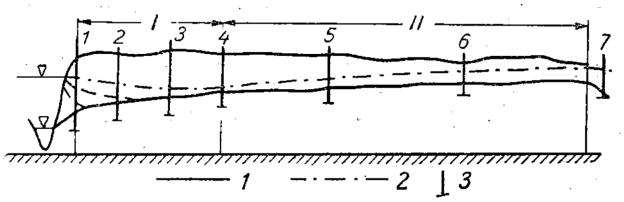


Рис. 18. Влияние подпора реки на уровень грунтовых вод.

I — зона приречного режима, *II* — зона водораздельного режима грунтовых вод; *1* — уровень грунтовых вод до подпора, *2* — то же после подпора, *3* — наблюдательные скважины.

по створам-поперечникам, перпендикулярным к общему направлению течения поверхностного водотока. Для равнинной местности с небольшими уклонами в этом случае направление створов будет совпадать с направлением течения подземных вод.

Учитывая, что основной задачей гидрогеологических наблюдений является количественная оценка водообмена реки и водоносного пласта, наблюдательные точки на створах в приречной части последнего располагают с учетом предполагаемой кривой депрессии подземных вод. Ближайшая к реке скважина должна быть расположена так, чтобы по ней можно было производить наблюдения на небольшом расстоянии от уреза воды в реке как при низком, так и при высоком уровне речных вод.

Особую ценность при размещении скважин на створе у реки имеют сведения о ширине зоны влияния реки на уровень подземных вод, в которой образуются обратные уклоны (рис. 18). Размещение скважин должно обеспечить возможность наблюдения всего процесса динамики уровней в приречной части при

береговом регулировании. Сложность с оборудованием таких скважин возникает, если они размещаются на заливаемой пойме. В этом случае нужны особые меры по предохранению от проникновения затрубных речных вод при затоплении района скважины. Глиняные замки у устья скважины могут надежно предохранить скважины от затока.

Расстояние между наблюдательными точками на участке крутой части кривой депрессии (как правило, у берегов водотока или водоема) может быть порядка 25—100 м, а для пологой части 100—200 м. В направлении водораздела наблюдательные точки с такой частотой должны быть установлены до места, где на уровень подземных вод не оказывает влияния подпор поверхностными водами. Далее до водораздела целесообразно располагать наблюдательные точки с таким расчетом, чтобы вне зоны подпора имелось не менее трех наблюдательных точек, позволяющие количественно оценить подземный поток, подходящий со стороны водораздела к зоне подпора.

Более конкретные рекомендации по определению расстояния между наблюдательными скважинами на расчетном створе в приречной части водоносного пласта могут быть даны в зависимости от метода расчета и естественных уклонов подземных потоков.

При использовании метода конечных разностей расстояние между скважинами должно определять превышение статических уровней воды по смежным пунктам наблюдений не менее 0,20 м. Чтобы обеспечить погрешность расчета расхода потока в этом случае менее 10%, расстояние x между скважинами целесообразно определять по формуле

$$x = 1{,}12\sqrt{at}\,, \qquad (15)$$

где a — коэффициент уровнепроводности, применяемый вначале приближенно, в соответствии с механическим составом водовмещающих пород; t — время, в течение которого могут происходить наиболее значительные по величине изменения уровня рек в границе потока (уровня речных вод).

При выполнении расчета с применением аналитического решения дифференциальных уравнений для небольших отрезков времени расстояние между скважинами целесообразно увеличить по сравнению с рассчитанными по формуле (15) в 2,5—3 раза.

Для более полного изучения подземного питания водотоков и водоемов необходимо стремиться к доведению створов наблюдательных точек до подземного водораздела изучаемого водосбора. Так как в большинстве случаев на водосборах взаиморасположение поверхностного и подземного водоразделов не

установлено, то для определения границ подземного водосбора при оборудовании наблюдательных створов рекомендуется заложить 1—2 временные разведывательные скважины на продолжении створа, но в соседнем поверхностном водосборе — на расстоянии 200—800 м от поверхностного водораздела.

Отдельные наблюдательные точки или их группы на створах, идущих к водоразделам, должны отражать основные особенности природных условий водосбора, влияющие на питание подземных вод (поверхностный сток, просачивание и испарение, осадки).

Выбор расстояния между наблюдательными точками по створам-поперечникам на водотоках в основном определяется шириной долины, ее поперечным профилем, наличием террас и выходов коренных пород. В широких долинах расстояние между наблюдательными точками можно по сравнению с рекомендованными выше увеличить, а в особо узких долинах сократить. Выходы коренных пород, как правило, значительно усложняют оборудование наблюдательных точек.

В речных долинах, в местах причленения террас, необходимо учитывать возможный перелом кривой депрессии подземных вод и располагать наблюдательные точки на двух соседних террасах на небольшом расстоянии.

При проектировании наблюдательных створов-поперечников на водотоках, когда природные условия еще недостаточно изучены, размещение наблюдательных точек на створах можно принять следующим: на отметках межени и на отметках самого высокого стояния паводковых вод; далее расстояние между соседними наблюдательными точками увеличивается по мере удаления от водотока примерно в такой последовательности: 25, 50, 100, 200, 300 м и т. д. до водораздела.

Для определения направления подземного потока и его уклона и для дальнейших систематических наблюдений в долине водотока около наблюдательных створов-поперечников целесообразно оборудовать одну наблюдательную точку выше или ниже створа. Такая «уклонная» наблюдательная точка обычно располагается в 150—200 м выше или ниже поперечника, причем ее проекция на последний должна лежать на половине расстояния между первой и второй (от уреза воды в водотоке) наблюдательными точками.

Для изучения подрусловых вод и подземных потоков в аллювиальных отложениях долин на отдельных участках водотоков могут быть заложены дополнительные отдельные створы вдоль водотока, на его левом и правом берегах. Заложение таких створов целесообразно при необходимости изучения подземного питания данного водотока или реки, в которую он впадает, за счет подземного стока водоносного пласта, вмещающего подрусловые и аллювиальные воды.

Количественный расчет подруслового подземного стока как элемента водного баланса речного бассейна и учет суммарного подземного питания выше замыкающего гидрометрического створа могут быть проведены при условии оборудования специального расчетного поперечника скважин у гидрометрического створа, в котором одновременно с определением сечения подруслового потока производятся опытные работы для получения данных о коэффициенте фильтрации пород, вмещающих этот поток. Расчет расхода определяется по элементарной формуле ([8] и др.).

Для количественной оценки подземного питания на участках дренирования подземных вод поверхностным водотоком и

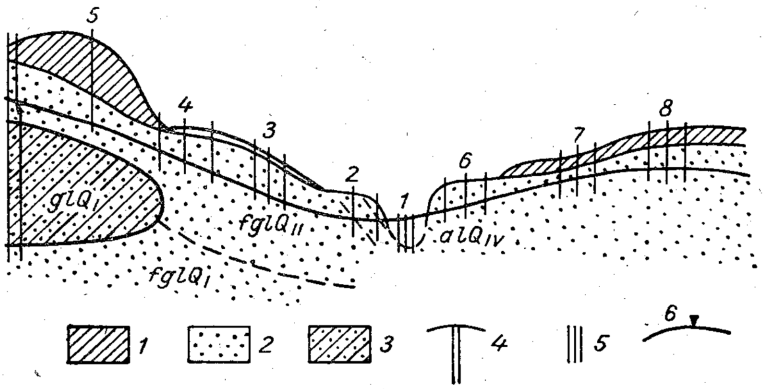


Рис. 19. Створ наблюдательных скважин по поперечнику к реке.
1 — суглинки, *2* — пески, *3* — линза суглинков с гравием, *4* — скважина в зоне местного напора, *5* — тройник скважин для расчета элементарных расходов подземного потока, *6* — уровень грунтовых вод.

водоемом необходимо обеспечить такое размещение наблюдательных точек на водосборе, при котором имелась бы возможность по данным наблюдений за уровнем подземных вод определить расход всего подземного потока, выклинивающегося в русло водотока или ложе водоема.

Для участков подземных потерь данные наблюдений за уровнем подземных вод должны обеспечивать определение количества поверхностных вод, поступающих на питание водоносного пласта в данном месте.

Если подземное питание реки происходит за счет подземного стока нескольких водоносных пластов, то створы скважин должны оборудоваться по тому же принципу и для расчета расходов подземного потока из межпластовых подземных вод.

Особую сложность представляет оценка дренирования рекой напорных вод. Для расчета восходящего потока напорных вод необходима закладка нескольких скважин с короткими фильтрами на различной глубине.

При оборудовании пунктов наблюдений за стоком из нескольких водоносных пластов наблюдательные скважины, вскрывающие более глубокие водоносные пласты, закладываются на более редкой сетке. Для сопоставления режимов отдельных водоносных пластов наблюдательные точки на разных пластах закладываются на небольшом расстоянии одна от другой.

Принципиальная схема размещения наблюдательных скважин в различных условиях приведена на рис. 19—21.

Для правильной интерпретации полученных результатов наблюдений и производства гидрогеологических расчетов необходимо определение основных водно-физических свойств горных

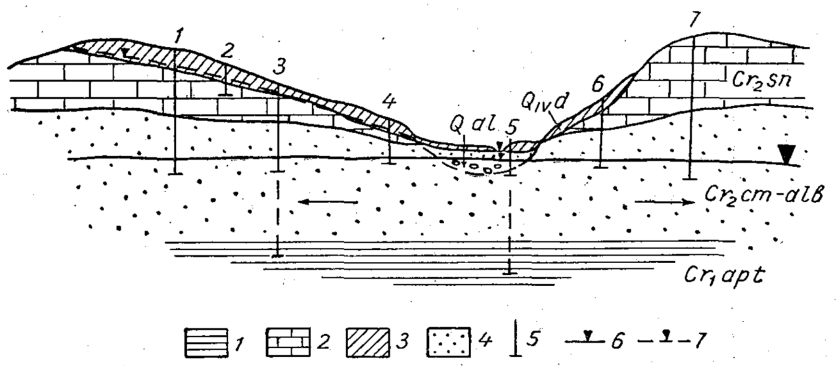


Рис. 20. Створ наблюдательных скважин для изучения подземных потерь реки и питания ее верховодкой.

1 — водоупор, *2* — известняки, *3* — суглинки, *4* — песок, *5* — скважины, *6* — уровень постоянного подземного потока, *7* — уровень верховодки.

пород (грунтов), слагающих водоносные пласты. В основные расчетные формулы по режиму, балансу и определению запасов подземных вод входят коэффициент фильтрации и параметры, характеризующие изменение количества воды в порах при колебаниях свободной поверхности подземного потока: при опускании ее входит коэффициент водоотдачи, при повышении — коэффициент недостатка насыщения.

Поэтому получение данных об основных водно-физических свойствах водоносного пласта является обязательным. Эти данные могут быть получены при специальных опытных работах в изучаемом бассейне. В зависимости от практической необходимости обеспечения расчетов расходов подземных потоков на наблюдательных участках, кроме определения коэффициентов фильтрации и параметра μ, в состав опытных работ могут быть включены определения коэффициента уровнепроводности и скоростей фильтрации. Определение последних имеет большое значение при оценке расхода подруслового стока.

Сложность и трудоемкость опытных работ по определению гидрогеологических параметров делает целесообразным сбор данных о них в различных материалах для всей территории, на которой расположен изучаемый бассейн, и использование их на

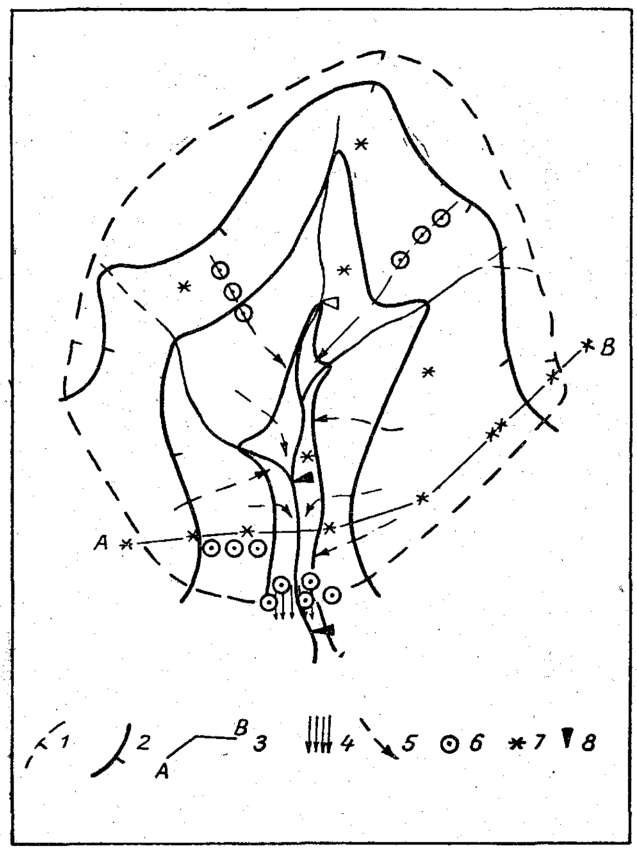


Рис. 21. Схема расположения наблюдательных скважин для изучения водного баланса речного бассейна.

1 — водораздел, *2* — гидроизогипсы, *3* — линия гидрогеологических разрезов, *4* — направление подруслового стока у замыкающего створа бассейна, *5* — линии тока подземных потоков в бассейне, *6* — наблюдательные скважины для определения расходов потоков, *7* — то же для определения изменений запасов подземных вод в бассейне, *8* — гидрометрический створ.

основе анализа возможных аналогий гидрогеологических условий бассейнов.

Коэффициент фильтрации водоносного пласта наиболее целесообразно и правильно определять полевым методом, путем наблюдений за изменением уровня воды в скважинах, при производстве опытных откачек. Полевой метод является наиболее

надежным способом определения коэффициента фильтрации, так как при этом водопроницаемость горных пород определяется в естественных условиях залегания. Общие рекомендации по проведению таких определений даются в инструктивном указании для опорных гидрогеологических станций, более детальные указания — в специальных работах [8, 74, 85 и др.].

Скорость подземного потока так же, как и коэффициент фильтрации, является существенной характеристикой водопроницаемости горных пород. Значение скорости подземного потока u используется для вычисления скорости фильтрации v, необходимой для расчета расхода подземного потока. Скорость фильтрации определяется по формуле

$$v = un, \qquad (16)$$

где n — пористость горных пород водоносного пласта, определенная лабораторным путем по образцам, взятым из выработок.

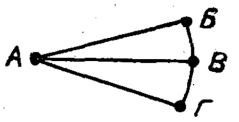


Рис. 22. Схема расположения скважин для определения скорости подземного потока с помощью индикаторов.

А — центральная скважина для запуска индикатора; *Б*, *В*, *Г* — наблюдательные скважины.

Определение скорости подземного потока целесообразно проводить с помощью запуска в подземный поток индикаторов, которыми могут служить красящие вещества и соли [8, 74].

Для проведения опыта в этом случае около разведочной (центральной) выработки закладывают 2—3 наблюдательные выработки, располагая их ниже центральной, по предполагаемому направлению подземного потока. Выработки целесообразно располагать по радиусу от центральной, в которую производят запуск индикатора (рис. 22).

Расстояние от центральной выработки *А* до наблюдательных точек *Б*, *В*, *Г* обусловливается степенью водопроницаемости пород: 1) для легко водопроницаемых пород (пески, гравий, галечник) — 3—7 м; 2) для слабо водопроницаемых пород (мелкозернистый песок, супеси, суглинки, лёсс) — 0,5—1,5 м.

Расстояние между наблюдательными точками *Б*, *В*, *Г* удобно брать равным 1—1,5 м.

При производстве опыта в центральную выработку вводят раствор индикатора и отмечают время запуска, после чего через определенные промежутки времени из наблюдательных выработок берут пробы воды. Ориентировочные скорости движения подземных вод при уклонах 0,001—0,005 выражаются следующими цифрами:

в грубозернистых песках	1,5—2,0 м/сутки,
в мелкозернистых песках и супесях	0,5—1,0 »
в суглинках и лёсах	0,1—0,3 »

В отобранных из наблюдательных выработок пробах воды определяют концентрацию индикатора. На основе полученных данных составляется график изменения концентрации индикатора в пробе из наблюдательных выработок.

По моменту прохождения раствора с максимальной концентрацией устанавливают действительную скорость движения воды

$$u = \frac{L}{T}, \tag{17}$$

где L — расстояние между центральной и наблюдательными скважинами, T — время прохождения раствора с максимумом концентрации.

Определение скорости подземного потока рекомендуется проводить в различное время сезона в зависимости от характерного положения уровня и уклона потока, а также с учетом режима уровня в поверхностном водотоке или водоеме, связанном с изучаемым водоносным пластом.

Недостаток насыщения пород водой может быть рассчитан по разности величин пористости и естественной объемной влажности породы в зоне колебания уровней. Водоотдача для супесчаных и суглинистых пород определяется по разности между пористостью и наименьшей влагоемкостью; для песчаных пород последняя может быть заменена максимальной молекулярной влагоемкостью. В обоих случаях требуются данные опытных определений указанных величин.

По рекомендации А. В. Лебедева, μ может быть определена при изучении баланса грунтовых вод путем сравнения «эпюр влажности почво-грунтов до и после существенного изменения уровня воды» [46].

Суммарные значения μ для расчетных бассейнов могут быть получены и гидрологическим путем. При выполнении комплексных гидрологических исследований, включающих наблюдения за уровнями грунтовых вод на водосборе и измерения расходов воды в замыкающем створе для периода преимущественно подземного питания водотока, имеется практическая возможность построения кривых связи расхода воды $W_{\text{подз}}$ со средним изменением уровня грунтовых вод $\Delta H_{\text{ср}}$. В этом случае средняя величина μ для бассейна выше замыкающего створа может быть рассчитана:

$$\mu = \frac{W_{\text{подз}}}{\Delta H_{\text{ср}}}. \tag{18}$$

Практически расчеты, выполненные в ВНИГЛ, показывают вполне удовлетворительные результаты [43].

Выбирая значения $\Delta H_{\text{ср}}$ для различных уровней стояния поверхности грунтовых вод в бассейне, можно дифференцированно оценить μ для различных слоев почво-грунтов.

Аналогичным путем можно определить μ в случае расчета подземного стока в малых водотоках по гидрометеорологическим данным при отсутствии наблюдений над уровнем грунтовых вод на водосборе, рассмотренном И. Б. Вольфцуном [13].

Применение метода гидродинамического анализа и баланса подземных вод на основе решения фильтрационных уравнений или с применением моделирования требует для получения гидродинамических параметров подземного потока таких же коэффициентов уровнепроводности, перетекания и других, определяемых при опытных работах, по результатам специальных режимных наблюдений. Указанные работы представляют область специальных исследований [8, 74, 85 и др.].

Гидрологические наблюдения [1]. Решение задач, поставленных перед гидрологической частью полевых исследований подземного питания рек, обеспечивается производством постоянных стационарных и эпизодических экспедиционных гидрологических работ в изучаемом бассейне и непосредственно на наблюдательных участках, где выполняются гидрогеологические наблюдения по створам скважин.

Стационарные гидрологические наблюдения основной целью имеют изучение речного стока в отношении режима уровней и расходов водотоков для оценки влияния этих факторов на режим подземных вод и закономерностей их стока в реки. Выполняются эти наблюдения в замыкающих створах изучаемого бассейна и на отдельных его участках внутри общих границ водосбора, выделяемых по особенности взаимосвязи речных и подземных вод. Для оценки общих условий формирования речного стока и учета добегания русловых вод от верховий до расчетных гидрологических постов наряду с замыкающими створами целесообразно производить наблюдения за стоком на притоках и в нескольких пунктах по длине главного водотока.

В состав сети стационарных пунктов гидрологических наблюдений входят уровенные и расходные посты на реках, обязательно организуемые также у каждого гидрогеологического расчетного створа на поперечниках реки. Только совмещенные наблюдения за уровнями подземных и речных вод в изучаемых створах могут обеспечить правильную количественную оценку взаимосвязи этих вод. Перенос и интерполяция данных об уровнях речных вод к гидрогеологическим створам с сосед-

[1] Изложено содержание элементарных гидрологических наблюдений, направленных непосредственно на характеристику речного стока для оценки подземного питания реки. Как правило, эти работы являются лишь небольшой частью гидрологических наблюдений, выполняемых для изучения гидрологического режима речных бассейнов на сети Гидрометслужбы.

них гидрологических постов могут быть допущены в простейших условиях, на бесприточных участках.

В состав стационарных гидрологических наблюдений включаются также измерения расходов (дебита) родников для оценки родникового стока и изучения режима репрезентативных родников с целью общей оценки сезонной динамичности подземного стока из водоносных пластов, гидравлически не связанных с реками.

Выполнение гидрометрических работ при оценке подземного питания рек имеет большое значение, так как в большинстве случаев позволяет относительно просто оценить «гидрометрическим методом» суммарный подземный сток с водосбора, поступающий в речную сеть выше замыкающего створа и на отдельных участках реки.

Принцип гидрометрической оценки подземного стока в реки вытекает из положения о том, что в известных гидрогеологических условиях изменение расхода ΔQ между двумя створами, определенное по расходам $Q_в$ для входного створа и $Q_н$ для выходного створа, может быть принято за величину подземного питания (или подземных потерь речного стока), если учесть баланс речных вод между этими створами (суммарный расход боковой приточности речного стока, поверхностный склоновый сток, поступающий непосредственно в русло с водосбора на участки между створами, испарение с водной поверхности реки, атмосферные осадки на эту поверхность и т. п.).

Получение положительных результатов в расчетах подземного стока в реку гидрометрическим методом определяется возможной точностью гидрометрических работ и учетом основных составляющих баланса на изучаемом участке. В первую очередь это относится к выделению в измеренном изменении расхода поверхностной и подземной составляющих речного стока. Практически для упрощения задачи и прямого определения величины подземного стока, поступающего в реку на расчетном участке, гидрометрические измеренения производятся в период межени, когда речной сток в преобладающей части сформирован за счет подземного стока. В этих условиях положительные результаты расчетов определяются соотношением возможных изменений расходов между двумя створами и точностью гидрометрических измерений в указанных створах.

В отношении применения и точности метода разности для гидрометрической оценки речного стока в гидрологии существуют строгие критерии.

Б. Д. Зайков и С. Ю. Беленков в качестве критерия для определения погрешности методом разности предложили использовать соотношение площадей водосборов верхнего и нижнего створов [22].

Для определения погрешностей σ для случая постоянного

модуля стока на всей изучаемой территории бассейна этими авторами дается следующая формула:

$$\sigma = \pm \delta \frac{1+K}{1-K}, \tag{19}$$

где δ — погрешность определения расхода в каждом из створов в %, K — отношение площади до первого створа к площади до второго створа.

Принимая для массовых определений расходов в гидрометрических створах относительную погрешность $\delta = \pm 5\%$, получаем возможные ошибки для разности расходов в двух смежных створах (табл. 12).

Таблица 12

k	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
δ %	±15	±20	±28	±45	±95

А. Г. Булавко для определения погрешности метода разности в случае двух створов предлагает соотношение расходов в нижнем и верхнем створах

$$\alpha = \frac{Q_н}{Q_в}. \tag{20}$$

Предельная относительная погрешность притока $\delta_п$% в этом случае определяется

$$\delta_п = \frac{\alpha+1}{\alpha-1}\delta_н, \tag{21}$$

где $\delta_н$ — предельная относительная погрешность измерения расхода в нижнем створе, приближенно равная той же величине для верхнего створа.

Для расчета погрешностей предлагается табл. 13, содержащая величины $\beta = \frac{\delta_п}{\delta_н}$ в зависимости от соотношения расходов.

Таблица 13

α	β	α	β	α	β
1,05	41,0	1,50	5,00	4,00	1,67
1,10	21,0	1,75	3,6	5,00	1,50
1,15	14,3	2,00	3,00	10,00	1,22
1,20	11,0	2,50	2,33	20,00	1,11
1,25	9,0	3,00	2,00	50,00	1,04

Величина β показывает, во сколько раз предельная относительная погрешность разности превышает такую же погрешность исходных данных.

Возможные ошибки подсчета методом разности для различных соотношений между расходами и предельной относительной погрешностью исходных данных даются в табл. 14.

Таблица 14

Нарастание расходов	Предельная относительная погрешность исходных гидрометрических данных			
	5	10	15	20
1,10	105	210	—	—
1,20	55	110	165	220
1,50	25	50	75	100
2,0	15	30	45	60
3,0	10	20	30	40
5,0	7,5	15	22,5	30
.				
.				
.				
50	5,2	10,4	15,6	20,8

Приведенная оценка точности относится к методу разности при двух створах.

В случае большого числа измерений расходов воды по длине реки в условиях постоянного модуля подземного стока по всей территории изучаемого бассейна при определении величин подземного питания по осредненному графику с учетом различной обеспеченности в измерениях отдельных расходов могут быть допущены бóльшие погрешности.

Для случая монотонного изменения расходов подземных потоков в реку по ее длине статистический анализ применения метода разностей при однократных измерениях в двух створах с большой частотой створов по длине реки, а также при многократных повторностях измерений в одних и тех же створах показал, что при точности гидрометрических работ 5%-ное соотношение расходов α будет равно 1,11, а не 2 [19].

Одной из основных задач гидрометрической оценки подземного стока в реку при детальных исследованиях их подземного питания является уточнение распределения величин подземного стока для отдельных участков водосбора.

Проведение гидрометрических измерений по длине рек позволяет установить особенности взаимосвязи подземных и речных вод на отдельных участках, определить места интенсивной разгрузки подземных вод и подземных потерь речного стока, идущих на питание подземных вод (отрицательный подземный сток). Одновременно с этим такие работы дают возможность оценить изменение степени дренированности водоносных пла-

стов по длине рек. Это позволяет рассчитать величину подземного стока в реку на отдельных ее участках, а следовательно, дать оценку его величины при крупномасштабном картировании практически на любом участке бассейна, для которого получена расчетная величина подземного стока в реку по замыкающему створу.

При смешанном типе подземного питания в бассейне выше расчетного створа гидрометрические работы на этой территории позволяют определить разнофазные компоненты этого питания и районировать такие бассейны с учетом средневзвешенных площадей участков с различными типами режима подземного стока.

Большое значение имеют гидрометрические работы в изучении локальных условий водообмена, связанных с явлением карста, зонами тектонических нарушений с явлением наледного регулирования. В озерных районах измерение расходов на отдельных участках озерных рек обеспечивает возможность оценить озерное регулирование и выделить чистое подземное питание, а следовательно, рассчитать подземное питание рек в сложных условиях озерного регулирования.

Особое место занимает измерение речного стока при оценке взаимосвязи водоносных горизонтов и рек в областях конусов выноса и предгорий. Измерение потерь речного стока в крупнообломочных отложениях конусов выноса и подземных вод, выклинивающихся в реки ниже этих конусов по контактам с отложениями предгорий, позволяет разработать системы искусственного пополнения подземных вод — проектирования подземных водохранилищ.

Такое же большое значение имеет гидрометрическая оценка подземного стока в реку или поступление речного стока в водоносные пласты для расчета водоотлива в районах месторождений и рудниках, для расчета водопонизительных мероприятий в случае осушения тела полезных ископаемых при эксплуатации месторождений, при осушительных мероприятиях и т. п.

Совмещение измерений речного стока с наблюдениями за режимом педземных вод и их стоком открывает широкие возможности для изучения водного режима территории с учетом взаимосвязи поверхностных и подземных вод.

Это имеет большое значение в особенности для изучения водного баланса речных бассейнов, где сток подземных вод зоны интенсивного водообмена соизмерим с общим стоком реки и оказывает заметное влияние на формирование водного режима этих бассейнов.

Приуроченность гидрометрических работ по прямой оценке подземного стока в реки к меженным периодам и сложность их проведения по большому количеству створов с соблюдением синхронности для исключения влияния на величину расхода

переменных погодных условий позволяют отнести этот вид гидрологических наблюдений к эпизодическим работам экспедиционного характера. Широкое их проведение в изучаемом бассейне нужно рассматривать как гидрологическое рекогносцировочное обследование, которое должно обеспечить наряду с общим гидрогеологическим изучением особенностей формирования подземного питания рек выбор опорных пунктов стационарных наблюдений, в которых для оценки многолетней изменчивости подземного стока в реку небоходимо производить наблюдения более продолжительные периоды и систематически.

Эпизодические измерения расходов воды в речном бассейне для определения величин подземного стока в реку, проводимые по строгой системе в большом числе створов, называются гидрометрической съемкой.

Теоретическое рассмотрение вопроса и опыт выполнения гидрометрических съемок позволяют предложить для их организации следующие основные положения.

1. Гидрометрические съемки при исследовании подземного питания рек производятся для прямого измерения подземного стока в реку и поэтому должны выполняться в период межени, когда речной сток в преобладающей части сформирован за счет подземного питания.

Различают зимнюю и летнюю (летне-осеннюю) межень, для выделения которых в качестве критерия условно принимают тот период внутригодового цикла, в течение которого объем стока паводков (каждого в отдельности) не превышает 10—15% общего объема стока за рассматриваемый период. Целесообразно производить гидрометрические съемки в оба меженных периода года, тем самым оценивая величину подземного стока в зависимости от режима подземных вод в различные периоды года.

2. Район проведения гидрометрических съемок определяется целевым назначением работ и возможностью измерения расходов в короткий промежуток межени во всех точках при одинаковых погодных условиях. Границы района по возможности назначаются так, чтобы они включали как области питания подземных вод, так и области их разгрузки, а также учитывали бы основные особенности условий формирования подземного стока одного или группы бассейнов.

Для обеспечения приводки эпизодических замеров к ряду наблюдений за год и к среднемноголетним значениям весьма желательно в границы съемки включать участки рек, на которых находятся постоянные гидрометрические створы Гидрометслужбы с многолетними рядами наблюдений.

3. Для возможности лучшего сравнения единичных измерений расходов необходимо обеспечить максимально возможное исключение влияния на сток переменных погодных условий.

Это может быть достигнуто одновременными гидрометрическими измерениями во многих створах речного бассейна или ограничением всех измерений коротким периодом межени с постоянными метеорологическими условиями.

4. В основу схемы размещения гидрометрических створов для съемки в расчетных бассейнах должен быть положен учет гидрогеологических особенностей формирования подземного питания и смены их по длине реки. Одновременно с этим необходимо оценить возможную точность измерений, которая в большинстве случаев и определит в зависимости от поставленных задач взаимное расположение створов по длине реки (рис. 23).

Необходимая точность измерений при гидрометрической съемке может быть достигнута следующими путями:

а) размещением двух гидрометрических створов на участке, для которого требуется определить подземную приточность, с соблюдением основных условий для получения заданной погрешности разности по указанным ранее критериям соотношения площадей водосбора и расходов в расчетных створах;

б) наиболее частым размещением гидрометрических створов по длине реки, что в условиях постоянной интенсивности подземного питания на значительных участках реки при графическом осреднении значений измеренных расходов может дать сравнительно точную характеристику изменчивости расходов воды в бассейне;

в) неуклонным соблюдением всех правил гидрометрии с увеличением повторности измерений в каждом из створов в одинаковых условиях.

При организации гидрометрических съемок нужно ориентироваться на существующие способы измерений и приборы, при выборе и использовании которых необходимо строго соблюдать правила гидрометрических наблюдений в различных природных условиях и обеспечивать точность измерений расходов необходимой повторностью.

Успех гидрометрической съемки, ее количественные результаты должны быть обеспечены систематическим анализом условий измерения расходов и непрерывным контролем их точности.

Анализ расхождений измеренных расходов показывает, что эти расхождения могут в различных случаях обусловливаться самыми разнообразными причинами. Они могут быть вызваны ошибками измерений; могут обусловливаться несинхронностью измерений, из-за чего будет не учтено изменение подземного питания под влиянием различий в метеорологических условиях в различных частях водосбора.

Величины подземного стока, получаемые при разовых гидрометрических съемках в межень, как правило, близки к минимальному модулю и поэтому должны быть приведены

к годовым величинам с учетом внутригодовой изменчивости (динамичности) подземного стока.

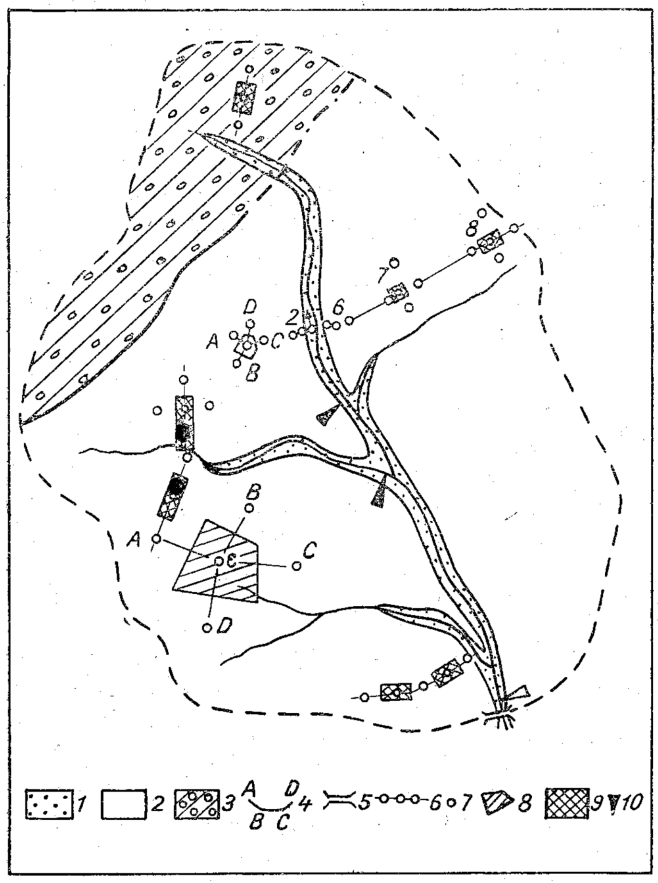


Рис. 23. Расположение гидрометрических створов при изучении подземного питания рек в межень.

1 — современные аллювиальные отложения, *2* — песчано-суглинистые отложения, *3* — песчано-глинистые отложения с валунами и гравием, *4* — створы скважин (конверт) на воднобалансовом участке, *5* — замыкающий гидрометрический створ бассейна, *6* — расчетные створы скважин по направлению подземных потоков, *7* — наблюдательные скважины, *8* — площадь воднобалансового участка, *9* — опытные участки для определения параметров, *10* — створы эпизодических гидрометрических наблюдений.

Большое значение при выборе аналога, необходимого для такой приводки, имеют материалы, характеризующие особенности формирования подземного стока по территории, полученные в работах к карте подземного стока СССР.

Для приведения данных гидрометрической съемки к годовым и многолетним значениям используются переходные коэффициенты, характеризующие соотношение подземного стока периода выполнения съемок с общей величиной годового стока. Эти коэффициенты определяются в результате анализа полученных данных и материалов по расчленению гидрографов для стационарных гидрометрических створов района и других аналогов, построеннных для большого числа лет.

В качестве контрольного метода проверки результатов съемок служит последовательный расчет величин подземного стока в замыкающем створе, бассейн которого разбит гидрометрическими створами на отдельные участки. Сходимость результатов расчета по замыкающему створу с расчетом средневзвешенных величин подземного стока, полученных по отдельным створам, служит критерием точности выполненных работ.

Проведение гидрометрических съемок обеспечивает картирование расходов подземного стока в малые реки и позволяет производить расчет подземного питания рек применительно к отдельным небольшим участкам территории

Обобщение таких гидрометрических съемок на основе графика изменения расходов по длине рек позволяет оценивать расход подземного стока в реку (минимальный сток) практически в любом ее створе.

Результаты съемок позволяют выявить особенности подземного питания рек в зависимости от местных условий, учитывать данные о подземной составляющей речного стока и тем самым обеспечивать более детальную характеристику всех составляющих водного баланса для практических водохозяйственных расчетов.

Идея непосредственного определения величин подземного стока в реки с целью изучения ее подземного питания и расчета естественных ресурсов имеет большую ценность.

Однако необходимо учитывать, что мгновенная гидрологическая фотография речного бассейна не может дать ответа о генезисе подземных вод, поступающих в реку на том или ином участке, и также не позволяет установить сезонное изменение подземных и речных вод.

Если первый вопрос может быть разрешен изучением и анализом материалов по гидрогеологии бассейна, получаемых в результате комплексных геологических и гидрогеологических съемок, то решение второго вопроса — о сезонном изменении типа питания реки, характера взаимосвязи подземных и речных вод — требует постановки продолжительных наблюдений за режимом подземных и речных вод.

Таким образом, гидрометрические съемки нельзя рассматривать как самостоятельный вид исследования. Они являются

элементом комплексных гидролого-гидрогеологических исследований природных вод, осуществляемых на воднобалансовом принципе.

Глава 6

АНАЛИЗ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОДЗЕМНОГО ПИТАНИЯ РЕК

1. Основные положения

Для решения сложной комплексной гидролого-гидрогеологической задачи изучения и оценки подземного стока в зависимости от целей и направления исследований, различной степени изученности режима подземных вод и общих природных условий формирования подземного стока существует и применяется целый ряд методов и многочисленных приемов, которые условно можно подразделить на следующие основные группы:

1) гидрогеологические (гидродинамические) методы, основанные на изучении баланса грунтовых вод и прямых измерениях и расчетах величин подземного стока на отдельных участках и целых водосборах;

2) методы, использующие для оценки подземного стока результат изучения водного баланса речных водосборов или его отдельных участков;

3) гидрометрические методы прямого измерения величин подземного стока по величине подземного питания реки;

4) методы, основанные на определении связи речного стока с атмосферными осадками;

5) методы определения величин подземного стока по анализу зависимостей речного стока от запасов грунтовых вод на водосборе;

6) гидрохимические методы, использующие для определения величин подземного стока в реки результаты анализа гидрохимического режима речных и подземных вод;

7) геофизические методы, в которых характеристика подземного стока дается в результате изучения естественных физических свойств подземных и речных вод (температура воды, электропроводимость, тепловой баланс и др.);

8) метод генетического расчленения гидрографов общего речного стока.

Не останавливаясь на описании отдельных методов и премов изучения подземного стока, достаточно подробно изложенных в литературе [39, 40, 66], можно дать следующую характеристику состояния этого вопроса.

Наиболее полную характеристику подземного стока возможно

получить при одновременном комплексном изучении процесса формирования подземного стока в двух аспектах: гидрогеологическом (учет режима подземных вод и гидрогеологических условий взаимосвязи поверхностных и подземных вод) и гидрологическом (гидрометеорологические условия, водный режим территории и режим рек).

Любой метод изучения и расчета подземного стока может дать положительные результаты лишь при непременном условии учета и анализа геоструктурных, геологических и гидрогеологических условий конкретных речных бассейнов.

Предпочтение во всех случаях необходимо отдавать тем методам, которые позволяют использовать и основаны на прямых измерениях объемов или единичных расходов подземных и речных вод, принимающих участие в процессах формирования подземного стока.

Многообразие и различная изученность природных условий нашей страны, которые невозможно осветить и учесть с одинаковой степенью детальности, в сочетании с необходимостью удовлетворения запросов практики для решения неотложных народнохозяйственных задач вынуждают применять приближенные приемы определения подземного стока, не ожидая полного решения вопроса о всех сторонах и особенностях его формирования.

Особое место при выборе метода изучения и оценки подземного стока занимает вопрос о региональной оценке и площадном картировании подземного стока при характеристике естественных ресурсов подземных вод на территории СССР.

Практическая постановка задачи площадного картирования естественных ресурсов подземных вод на территории всей страны потребовала в своем решении принципиально нового подхода. Решение этой задачи было осуществлено применением высоко экономичного и достаточно точного метода генетического расчленения гидрографа общего речного стока [40, 42].

На всей территории Советского Союза, где существует постоянно действующая гидрографическая сеть (более 80% всей площади суши страны), подземный сток этой зоны формируется под дренирующим воздействием речных систем. Это определило возможность оценки подземного стока зоны интенсивного водообмена по величине подземного стока в реки путем выделения на гидрографе общего речного стока той его части, которая формируется за счет дренирования водоносных горизонтов.

Теоретическим обоснованием возможности применения метода генетического расчленения гидрографа реки для региональной оценки естественных ресурсов или величины питания подземных вод является тот факт, что в среднем многолетнем величина питания подземных вод эквивалентна подземному стоку зоны интенсивного водообмена.

Практическим обоснованием целесообразности применения метода генетического расчленения гидрографа для региональной оценки подземного стока на территории СССР является возможность использовать для расчетов огромный фактический материал многолетних наблюдений за речным стоком на сети станций и постов ГУГМС и других ведомств.

Для аридной засушливой зоны СССР, где речная сеть отсутствует или слабо развита и подземный сток не принимает участия в формировании местного речного стока, а также для оценки глубокого подземного стока в гумидных районах величина подземного стока может быть определена гидрогеологическим (гидродинамическим) методом — расчетом расхода подземных потоков или методом водного баланса. При неглубоком залегании подземных вод грунтовый сток может быть оценен по величине их питания, определенной по материалам натурных исследований (по лизиметрам).

Практически в исследованиях подземного питания рек, как указывалось выше, следует применять методику оценки подземного стока в реку, предусматривающую правильное сочетание двух основных методов — гидрогеологического и метода генетического расчленения гидрографа реки с выделением подземной составляющей речного стока. Все остальные методы могут рассматриваться как дополнительные и в отдельных случаях могут в большей мере использоваться для анализа и обобщения имеющихся материалов, чем для постановки специальных исследований. При этом необходимо учитывать, что в процессе полевого изучения особенностей формирования подземного стока в реки в состав наблюдений в очень многих случаях целесообразно включать и такого вида наблюдения, данные которых обеспечивали бы получение сведений, позволяющих использовать в оценке подземного питания несколько методов. В первую очередь это можно отнести к гидрохимическому методу. В условиях правильной постановки наблюдений за химическим составом и режимом подземных и речных вод могут быть получены данные, обеспечивающие возможность получения количественной оценки подземного стока методами гидрохимии.

Применение в исследованиях подземного питания речного бассейна гидрогеологического (гидродинамического) метода должно обеспечивать возможность количественных расчетов величин подземного стока в реку для характеристики закономерности его режима в элементарных условиях гидрогеологических створов. Эти створы должны быть репрезентативными для данного объекта в отношении типичности условий формирования подземного питания реки. Основные положения по организации полевого изучения подземного стока в реки гидрогеологическим методом рассмотрены в главе 5. Поэтому ниже рассмотрены

лишь основные положения по оценке подземной составляющей речного стока методом расчленения гидрографа реки.

Метод расчленения гидрографа позволяет получить суммарные или средние (на единицу площади) величины подземного стока, формирующегося во всем речном бассейне выше замыкающего створа, в котором производится измерение речного стока и построение расчетного гидрографа. В этом случае оценка подземного стока может быть произведена, не прибегая к трудоемким разведочным и опытным гидрогеологическим работам, на основе обработки данных о речном стоке и характеристик общих гидрогеологических условий в бассейне.

Методика расчленения гидрографа реки основывается на следующих положениях.

1. Динамика подземного стока отдельных водоносных пластов определяется степенью гидравлической связи этих пластов с рекой.

При изучении подземного стока в реки следует различать:

1) подземные воды, гидравлически связанные с рекой;

2) подземные воды, гидравлически не связанные с рекой;

2. Расчленение гидрографа реки заключается в выделении на нем подземной составляющей с учетом закономерности динамики подземного стока в реку в зависимости от гидравлической связи водоносных пластов с рекой.

В различных природных условиях могут быть выделены следующие основные типы режима подземного стока и реки.

Преимущественно подпорный тип характеризует режим подземного стока из водоносных горизонтов, гидравлически связанных с рекой. Динамика подземного стока в период половодья и паводков определяется развитием подпора подземных вод речными. При повышении уровня воды в реке происходит уменьшение гидравлических уклонов и расходов подземного потока в реку. При этом в прибрежной зоне могут образоваться обратные гидравлические уклоны подземных вод и происходит инфильтрация речных вод в берега. В период спада уровня воды в реке происходит возвращение речных вод в русло. Процесс такого водообмена берегов с руслом при половодье и паводках называется береговым регулированием речного стока.

Помимо перераспределения речного стока, береговое регулирование приводит к изменению режима подземного стока из водоносных пластов, гидравлически связанных с рекой. Аккумуляция подземных вод в бассейне в период берегового регулирования обеспечивает более высокий подземный сток после окончания этого процесса и в последующий период межени.

В подпорном типе можно выделить случай, когда процесс берегового регулирования кратковременный и не приводит к полному прекращению подземного стока в период высоких уровней воды в реке. При этом подпор только препятствует

свободному выходу подземных вод в речную систему, тем самым уменьшая величину подземного стока в реку по сравнению с возможной в условиях отсутствия подпора.

Расчленение гидрографа при подпорном типе режима производится с учетом времени добегания речных вод из верховья к расчетному гидрометрическому створу.

Преимущественно нисходящий тип режима подземного стока в реку характерен при водоносных пластах, гидравлически не связанных с рекой, когда происходит свободный подземный сток в русло. Режим подземного стока в этом случае определяется только водным балансом пласта и на нем не сказывается режим уровня воды в реке.

В этом случае расчленение гидрографа производится с учетом динамики подземного стока в реку из гидравлически не связанных водоносных горизонтов, определяемой по репрезентативным родникам и режиму родникового стока. При отсутствии необходимых сведений о режиме родников возможно применение менее точного, но достаточно объективного приема схематизированного расчленения с учетом общей возможной динамичности подземного стока по описательным данным.

3. Основным источником подземного питания реки являются неглубоко залегающие безнапорные (или с местным напором) подземные воды, дренируемые реками и другой эрозионной сетью. В отдельных случаях в питании принимают участие напорные (артезианские) воды.

4. Ярусное залегание водоносных пластов, дренируемых реками, приводит к смешанному подземному питанию из различных водоносных пластов.

5. Площадь гидрографа, характеризующая расходы реки, сформированные подземным стоком, равна величине суммарного подземного стока, соответствующего изменению запасов подземных вод в бассейне, происходящему за счет подземного стока в реку.

В основе расчленения гидрографа должно лежать определение для расчетного створа типа режима подземного питания реки в соответствии с установленными закономерностями подземного стока в реку. В соответствии с типом режима подземного стока и выбирается схема расчленения гидрографа.

Принципы расчленения гидрографа реки в зависимости от различных условий питания иллюстрируются типовыми схемами, помещенными на рис. 24.

Наиболее просто на гидрографе выделяется период, когда река питается только подземными водами (периоды устойчивой зимней и летней межени). Включение в анализ условий формирования подземного стока при расчленении гидрографов, рассмотрение комплексных графиков элементов гидрологического режима объективно позволяют определить поверхностные воды,

поступающие в реку от дождей и оттепелей в этот период. Наиболее сложным является выделение подземного стока в реку для периодов половодья и больших паводков от продолжительных дождей. При этом должны быть рассмотрены следующие основные случаи.

Для преимущественно подпорного типа режима подземного стока в реку (рис. 25), когда при подъеме уровня воды в реке

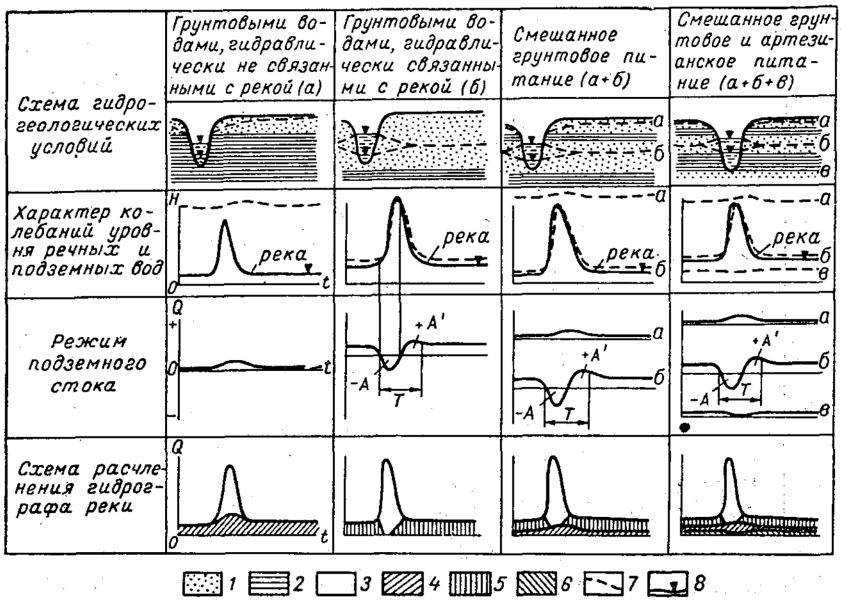


Рис. 24. Типовые схемы расчленения гидрографа реки в зависимости от гидрогеологических условий и режима подземного стока в реку (по Б. И. Куделину).

t — время, *Q* — расход, *T* — время берегового регулирования, *—A* и *+A* — объемы подземного стока, принимающие участие в береговом регулировании. *1* — водоносные породы, *2* — водоупорные породы, *3* — поверхностный сток в реку, *4* — подземный сток в реку при условии *а*, *5* — то же при условии *б*, *6* — подземный сток в реку из артезианских (напорных) пластов, *7* — уровень подземных вод, *8* — уровень речных вод.

подземный сток прекращается и наступает отрицательная фаза подземного стока, линия *AB* характеризует прекращение подземного питания реки. Однако при достаточно большом бассейне в замыкающем створе после этого могут проходить подземные воды, поступившие в русло в верхней части бассейна.

Время прекращения стока этих вод в замыкающем створе (точка *F*) легко рассчитать, если имеются данные о начале и конце половодья (паводка) в верховьях бассейна и о скорости добегания русловых вод.

Скорость добегания по главному водотоку может быть рассчитана по формуле (22) или при анализе гидрографов для двух гидрометрических створов на одной и той же реке по скорости прохождения пика половодья (для максимальных скоростей) или соответствующих характерных уровней.

Максимальное значение средней скорости добегания по длине реки V определяется в зависимости от характерного максимального расхода воды Q для расчетного периода и уклона

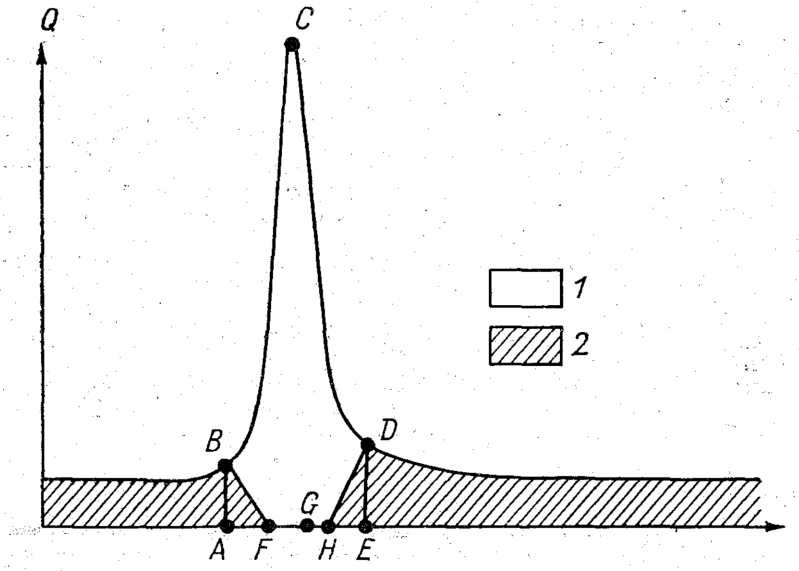


Рис. 25. Схема выделения подземного стока на гидрографе реки при береговом регулировании (по Б. И. Куделину).

1 — поверхностный сток, *2* — подземный сток из водоносных горизонтов, гидравлически связанных с рекой (подпорный тип питания с береговым регулированием).

выравненного продольного профиля реки $I‰$ по формуле

$$V = aI^{1/3}Q^{1/4} \text{ м/сек.} = a'I^{1/3}Q^{1/4} \text{ км/сутки.} \qquad (22)$$

Параметр $a=0{,}15$ м/сек., или $a'=86{,}4a+13$ км/сутки, зависит от среднего по всей длине реки коэффициента шероховатости русла и пойм ($n \simeq 0{,}04 \div 0{,}06$) и определен по формуле $a = 0{,}15(20\,n)^{-3/4}$ м/сек. $= 13(20\,n)^{-3/4}$ км/сутки с помощью специальных вспомогательных таблиц, которые уточняются гидрологами по фактическим материалам наблюдений.

Поступление подземных вод в речную сеть возобновляется в верховье с окончанием половодья (точка G). Достигают эти воды замыкающего створа в зависимости от скорости добегания, по которой и определяется положение точки H. Нарастание подземного стока происходит по прямой HD. Линия DE отчле-

няет на гидрографе подземный сток после окончания берегового регулирования, и точка D соответствует началу межени.

Аналогично может быть рассчитан подземный сток на гидрографе в период паводков от дождей или оттепелей, если они отмечены на всем протяжении реки.

Для преимущественно нисходящего типа режима подземного стока положение линии, расчленяющей гидрограф на подземную и поверхностную составляющие, определяется на основе анализа данных по режиму подземного стока из водоносного горизонта, воды которого принимают участие в питании реки.

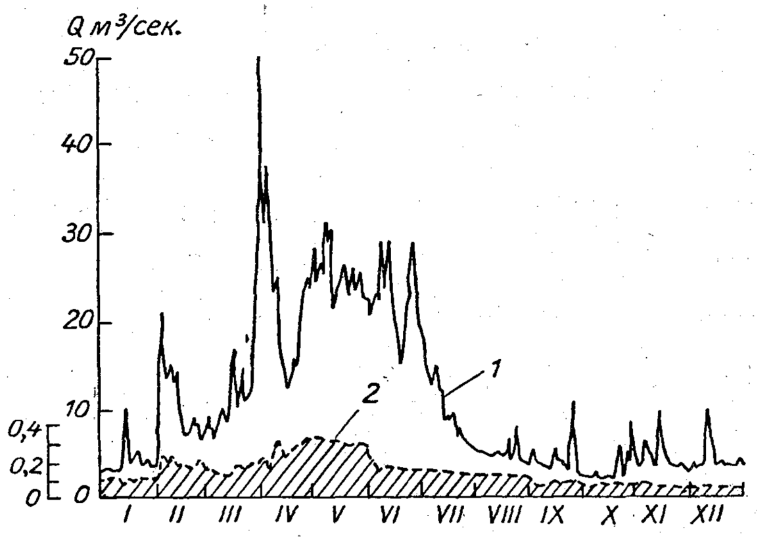


Рис. 26. Совмещенные графики речного стока (*1*) р. Ладжанури у с. Алпанау и расходов родника Циви-Цкара (*2*), 1952 г.

Наиболее точные результаты могут быть получены при этом, если использовать предложенный Ф. А. Макаренко аналитический метод определения величины подземного стока по данным о меженном стоке реки и режиме родникового стока. Последний характеризуется суммарным дебитом «опорных» родников или типовыми репрезентативными отдельными родниками и, как показывает анализ гидрогеологических материалов, объективно отражает динамику подземного стока в реку из гидравлически несвязанных водоносных горизонтов (рис. 26).

Расчет подземного стока производится по формуле

$$Q_{\text{подз}} = qk_1 + \ldots + qk_n, \qquad (23)$$

где $Q_{\text{подз}}$ — сток подземных вод за данный отрезок времени, q — единичный меженный расход, принимаемый за меру подземного

питания реки, $k_1, \ldots, k_n$ — коэффициенты (месячные, декадные, суточные) изменения подземного стока в реку, определяемые по режиму родников; k_1 приравнивается единице и отвечает периоду межени.

В качестве примера использования данных о режиме родников для оценки подземного стока при нисходящем режиме может быть приведен расчет его для карстовых районов Горного Крыма по методике И. Г. Глухова [40, 42].

Однако отсутствие для многих районов данных режимных наблюдений за родниками ограничивает возможность расчета подземного стока по Ф. А. Макаренко.

Как показывает опыт исследования подземного питания рек, выделение объемов русловых вод различного генетического происхождения при расчленении гидрографа может быть произведено на основе анализа всех особенностей формирования речных вод с учетом дат начала и конца снеготаяния, максимальной интенсивности снеготаяния, даты пика половодья и его конца, скоростей добегания русловых вод и режима подземных вод на водосборе, а также закономерностей взаимосвязи их с речными. При достаточно полном количестве данных о формировании речного и подземного стока метод генетического расчленения гидрографа может и должен носить объективный и строго расчетный характер. При отсутствии необходимых детальных сведений вынужденно применяют схематизированные приемы расчленения гидрографа и расчленение по аналогии.

В первую очередь это относится к случаям нисходящего типа режима подземного стока в реки для горных районов, когда отсутствуют сведения о режиме родникового стока.

Сравнительно хорошая гидрогеологическая изученность и наличие данных о режиме родникового стока в отдельных речных бассейнах горных районов Советского Союза (Кавказ, Урал, Карпаты) позволяют определить для этих районов коэффициент динамичности подземного стока. Этот коэффициент показывает, во сколько раз увеличивается сток в реку после периодов интенсивного питания по сравнению с его наименьшей величиной в период межени. Используя его, можно расчленить гидрограф горной реки.

Прием схематизированного расчленения гидрографа при нисходящем типе подземного стока основывается на следующих положениях.

Совпадение областей питания и распространения подземных вод, сильная расчлененность рельефа гидрографической сетью в условиях хорошей проницаемости пород (трещиноватых, обломочных, нарушенных тектоническими разломами и разрывами) обеспечивают хороший быстрый сток подземных вод, что обусловливает схожесть режимов подземного и поверхностного стока

и синхронность их с режимом атмосферного питания. При нисходящем типе это приводит к тому, что максимумы поверхностного и подземного стока в реку почти совпадают, а если и может наблюдаться запаздывание, то оно незначительно (в пределах нескольких дней). Все это дает возможность применения следующей схемы расчленения гидрографа.

В период зимней межени подземный сток характеризуется на гидрографе относительно плавной кривой «истощения» речного стока, осредняющей незначительные колебания зимнего стока, как правило, в пределах точности его подсчета; кратковременные подъемы, вызванные оттепелями, срезаются. Предполагаемая относительная синхронность режима подземного и общего речного стока позволяет считать время подъема и спада уровня воды в реке и время увеличения и уменьшения расходов подземных вод в реку совпадающими. Поэтому период половодья и часто смыкающийся с ним период летних паводков совпадают со временем увеличения подземного питания реки. Для определения максимума подземного стока минимальный среднемесячный расход, предшествующий зимней межени, увеличивается (умножается на коэффициент динамичности) и относится к центру половодья. Точки начала подъема уровня воды в реке, максимума и конца спада на гидрографе соединяются плавными линиями, расчленяющими его на подземную и поверхностную составляющие. Принятая схема расчленения отражает в общих чертах динамику подземного стока в реку в течение года и при достаточно объективном выборе коэффициента динамичности позволяет точно определить величину подземного стока (рис. 27).

Отсутствие возможности определения коэффициента динамичности при относительно слабой гидрогеологической изученности горных районов Средней Азии, Алтая, Саян, Камчатки не позволяет применить здесь описанный выше прием расчленения гидрографа.

Поэтому на этих территориях может быть применена схема расчленения по К. П. Воскресенскому, учитывающая общее повышение подземного стока к концу половодья. Схема конкретизировалась для отдельных физико-географических районов страны в отношении дат начала и конца половодья. Для большинства случаев эти даты устанавливались в соответствии с комплексом признаков, установленных З. Джорджио [83], учитывающих прекращение суточного хода расходов воды (при установившейся межени расходы реки перестают реагировать на изменение температуры воздуха и выпадение осадков), наступление устойчивых отрицательных температур воздуха, ледовых явлений на реках для высокогорных бассейнов и др. Для расчленения гидрографа в период половодья даты его начала и конца условно соединяются прямой.

Пополнение запасов подземных вод в период половодья обусловливает превышение меженного расхода после половодья над меженью в предполоводный период и при принятой схеме расчленения отражает общее увеличение подземного стока в реку к концу половодья (рис. 28). Общая динамичность подземного стока при таком расчленении в среднем характеризуется коэффициентом 1,5—3,0.

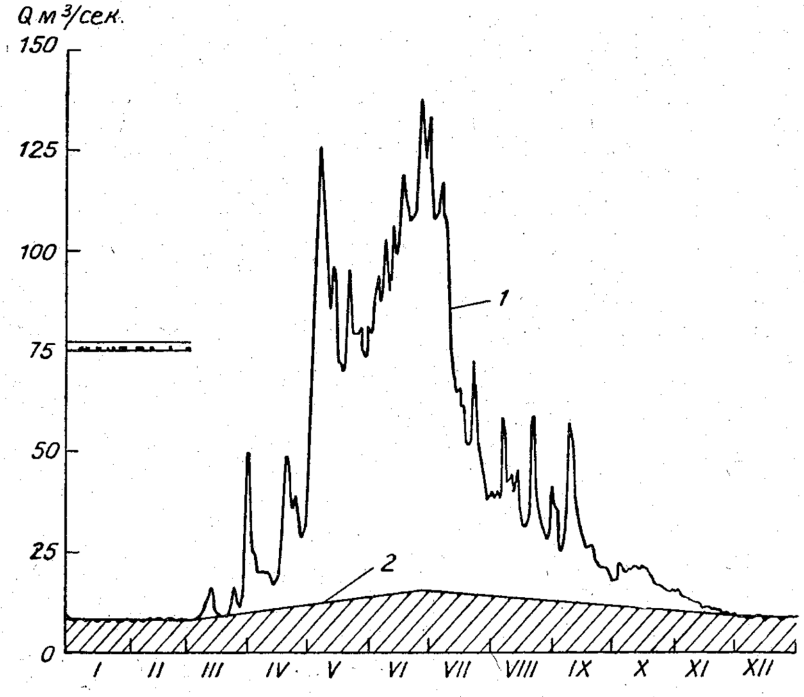


Рис. 27. Схема расчленения гидрографа горной реки с учетом коэффициентов динамичности подземного стока (р. Малая Лаба — с. Бурное, Кавказ).

1 — поверхностный сток, *2* — подземный сток.

Сравнение величин подземного стока, рассчитанных по схемам простой срезки по меженным расходам с введением коэффициентов динамичности и рассчитанных по методу Макаренко для отдельных рек, в бассейнах которых имеются режимные наблюдения за родниками, показывает, что расхождение между ними, как правило, незначительно и величины модулей могут различаться на 10—15% (рис. 29).

В природных условиях для реальных речных бассейнов в формировании подземного питания рек могут участвовать водоносные горизонты, которые благодаря различным условиям

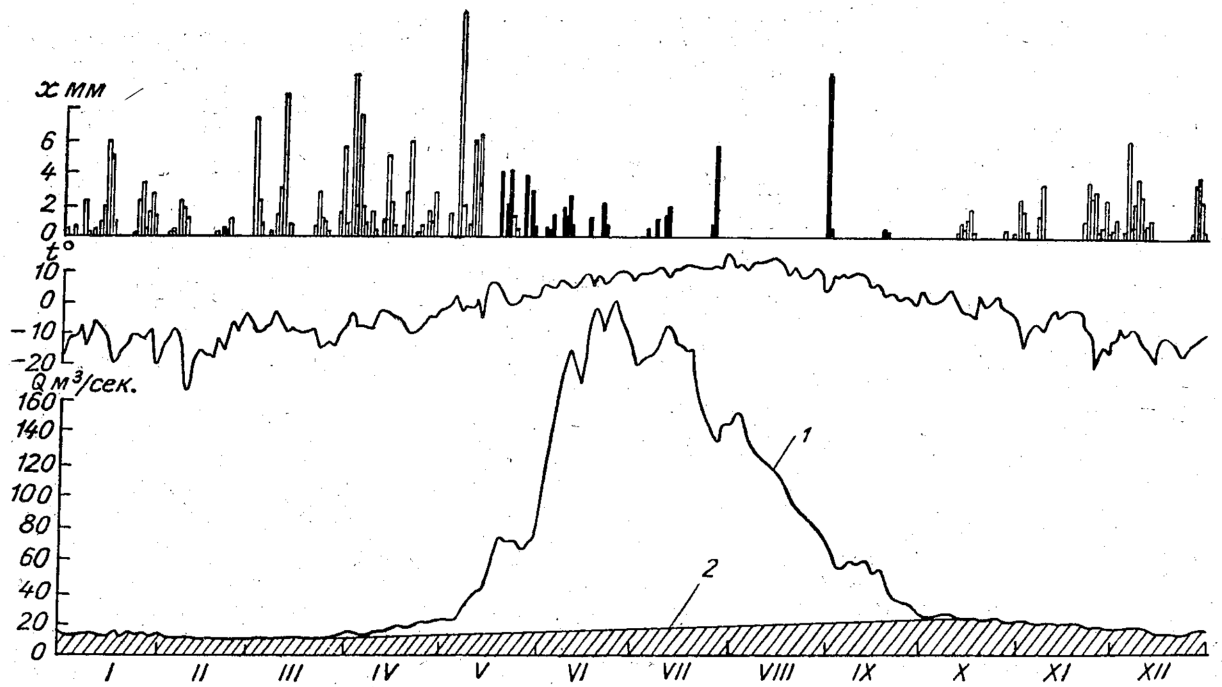


Рис. 28. Схема расчленения гидрографа реки по К. П. Воскресенскому.
1 — гидрограф общего стока, *2* — подземный сток в реку.

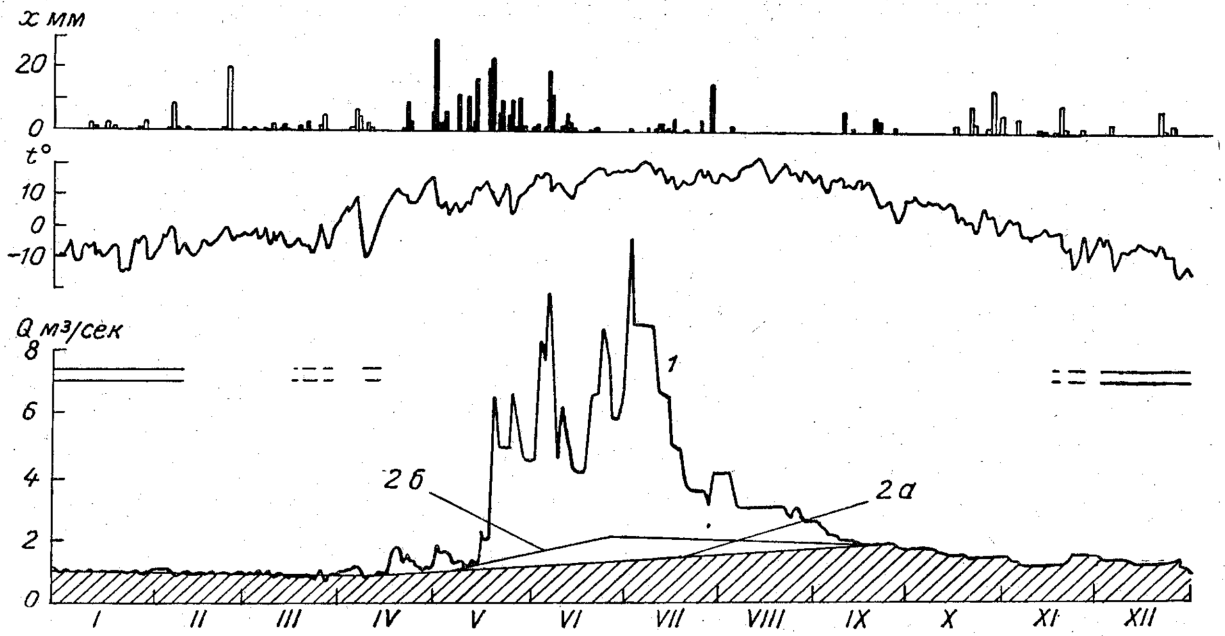


Рис. 29. Совмещенные схемы расчленения гидрографа горной реки Шамси (Лесной кордон), $F=457$ км^2.
1 — по схеме равномерного повышения подземного стока к концу теплого периода, *2* — по схеме коэффициентов динамичности. Расхождение в результатах 12%.

гидравлической связи и особенностям режима подземных вод могут иметь различные типы режима подземного стока.

Степень участия отдельных водоносных горизонтов с различными типами режима, рассмотренными выше, будет определять форму гидрографа подземного стока в реку, а следовательно, и схему расчленения гидрографа. Одновременно с этим необходимо учитывать и возможную асинхронность развития гидрологических процессов в бассейне.

Поэтому при расчленении гидрографа необходимо оценивать возможную асинхронность развития половодья и паводков и расчетные бассейны ограничивать размерами площадей, при которых (судя по гидрографам) не происходит распластывания паводков в период межени. Верхний предел расчетной площади целесообразно ограничивать для равнинной территории страны 50 000 км², уточняя этот предел в зависимости от природных условий.

При оценке возможности применения детального расчленения гидрографа в массовых расчетах необходимо учитывать их внешний вид. Детальное расчленение многопиковых гидрографов, учитывая точность гидрометрических измерений при стандартных замерах расхода воды на реках и сложность построения гидрографов подземного стока в реку для отдельных паводков при ограниченной гидрогеологической изученности некоторых речных бассейнов, может быть практически нецелесообразным. Анализ более двух тысяч гидрографов рек ЕТС с подпорным типом питания показал, что при всем многообразии гидрографов можно выделить пять групп наиболее характерных форм:

1) однопиковые простые гидрографы с небольшой продолжительностью половодья,

2) гидрограф с половодьем, имеющим два или несколько пиков,

3) гидрограф с большим пологим одновершинным половодьем большой продолжительности,

4) гидрографы многопиковые при половодье, сомкнутом с паводками,

5) гидрографы многопиковые в течение всего года, когда выделить половодье практически невозможно.

Результаты анализа по группам приведены в табл. 15.

Из таблицы видно, что подавляющее число гидрографов для ЕТС (более 80%) допускает детальное расчленение. Наиболее сложными и практически нецелесообразными для детального расчленения являются гидрографы 4 и 5-й групп, составляющих менее 15% общего числа гидрографов. На Азиатской территории СССР удельный вес этих групп значительно увеличится.

Тип подземного питания реки по конкретным схемам дренирования наиболее точно и просто устанавливается для отдельных

Таблица 15

Процентное соотношение различных групп гидрографов для ЕТС

Группа гидрографов	Количество рассмотренных гидрографов	Отношение каждой группы к общему количеству, %
Однопиковые	1012	40,8
Двухпиковые и более	1027	41,6
Пологие одновершинные	83	3,4
С многопиковым паводочным периодом	246	10,0
Многопиковые в течение всего года	104	4,2
Итого	2472	100

участков реки. Поэтому более точные результаты оценки подземного стока в реку могут быть получены при анализе притока в реку между двумя расчетными створами в том случае, когда гидрометрическая точность измерения расходов позволяет оценить этот приток. При расчленении гидрографа «замыкающего створа» схема выделения подземной составляющей требует учета схем дренирования как на протяжении основной реки, так и на ее притоках. Если учитывать подземное питание реки из основного водоносного пласта, имеющего, как правило, сплошное выдержанное распространение на больших площадях, построение типовых схем дренирования для всего расчетного речного бассейна не сложно. При этом необходимо учитывать, что на водосборах с небольшой площадью может наблюдаться неполное дренирование подземного стока в реку. Это подтверждается установлением факта увеличения подземного стока с увеличением площади водосбора, происходящим до некоторой определенной величины, характерной для данных гидрогеологических условий (рис. 30).

Построение таких кривых для отдельных гидрогеологических районов позволяет объективно установить для них наименьшую предельную площадь водосбора, для которой можно производить расчет полного подземного стока. Одновременно с этим необходимо учитывать, что в определенных гидрогеологических условиях может наблюдаться уменьшение модуля подземного стока в реку с увеличением площади водосбора (рис. 31).

Проведенный анализ показывает, что для характеристики устойчивого подземного стока в реку из основных водоносных пластов на Русской платформе могут быть приняты речные бассейны с площадями от 1000 до 50 000 км^2.

Необходимость установления степени развития подпора подземных вод, процесса берегового регулирования, определяемого

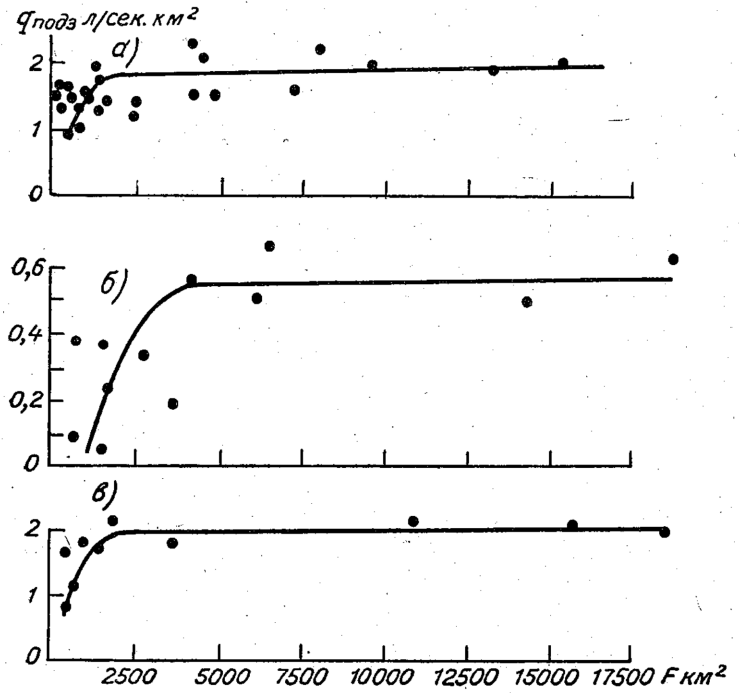


Рис. 30. Связь модуля подземного стока $q_{подз}$ (л/сек. км²) и площади водосбора F (км²) для различных гидрогеологических районов.

а — бассейн Северной Двины, *б* — бассейн левобережья Среднего Днепра, *в* — бассейн р. Унжи.

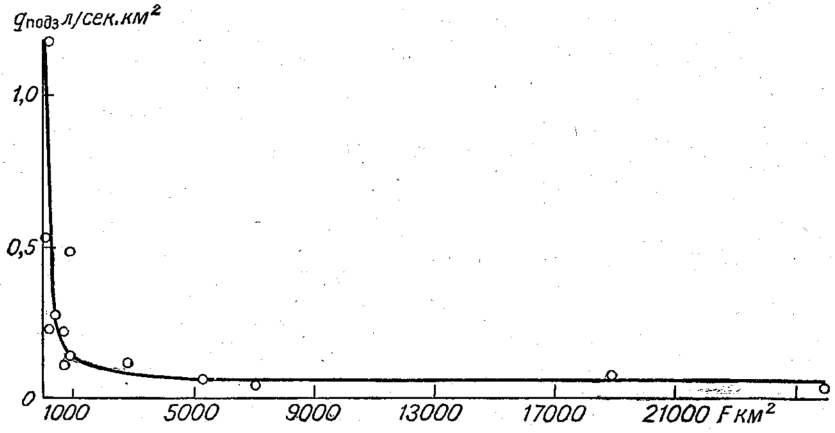


Рис. 31. Уменьшение модуля подземного стока $q_{подз}$ (л/сек. км²) при увеличении площади водосбора F (км²) в районе Урало-Эмбинского плато.

положением уровней речных и подземных вод, приводит к включению в анализ при расчленении гидрографов данных об этих уровнях. Если отсутствует возможность определения соотношений уровней в течение всего гидрологического года, то положительные результаты могут быть получены и при сравнении амплитуд колебаний уровней за характерные периоды года, в особенности для периода половодья и в паводки.

При нисходящем типе питания рек для обоснования схемы выделения подземной составляющей существенно важно по гидрогеологическим материалам установить для расчетного бассейна такты питания подземных вод, т. е. чередование периодов пополнения запасов подземных вод, после которых может наблюдаться увеличение подземного стока. Особенно важно это при анализе многопиковых гидрографов. Установление тактов питания может позволить схематизированно построить осредненный гидрограф подземного стока с учетом коэффициентов динамичности, которые показывают, во сколько раз увеличивается подземный сток в реку по сравнению со своим наименьшим значением.

Расчет величины подземного стока методом генетического расчленения гидрографа в речных бассейнах с озерами осложнен явлением озерного регулирования речного стока за счет аккумуляции его в чаше озера. Озерное регулирование приводит к снижению максимумов расходов в половодье и паводки и увеличению продолжительности их. При этом за счет преимущественного поступления в речную сеть подземных вод уменьшаются периоды формирования речного стока. В некоторых случаях формирование речного стока происходит при постоянном и значительном участии поверхностного стока в течение всего года (многолетнее регулирование).

Степень озерного регулирования определяется величиной озер и их расположением на речном водосборе, а также общей величиной озерности бассейна.

В условиях подпорного типа режима подземного стока в реку, в случае озерного регулирования, возникают трудности в нанесении на гидрограф общего стока линии, характеризующей гидрограф подземного стока. Строгое решение этого вопроса может быть обеспечено построением гидрографа реки с исключением влияния озерного регулирования. Расчет регулирующего влияния озер может быть получен путем решения уравнения водного баланса для бассейна с учетом изменения объема воды в озере за расчетный период. Последующее построение и расчленение «незарегулированного гидрографа» по типовым схемам, рассмотренным выше, позволяет рассчитать величину подземного стока. Однако проведение таких расчетов для большинства озерных рек не обеспечено натурными данными, в первую очередь сведениями о режиме уровня воды на озерах.

При расчетах подземного стока для карт масштаба 1 : 5 000 000 величина подземного стока в озерные реки приближенно оценивалась по существующим формулам для расчета минимального стока с введением в результат расчета поправок на коэффициент озерности бассейна $\alpha_{оз}$, показывающий величину площади, занятую озером, в процентах от общей площади бассейна.

При картировании подземного стока в масштабе 1 : 2 500 000 дополнительно для оценки подземного стока в озерные реки Карелии и Кольского полуострова были выполнены следующие работы.

Путем анализа многочисленных гидрографов озерных рек указанных районов были выявлены гидрографы, на которых

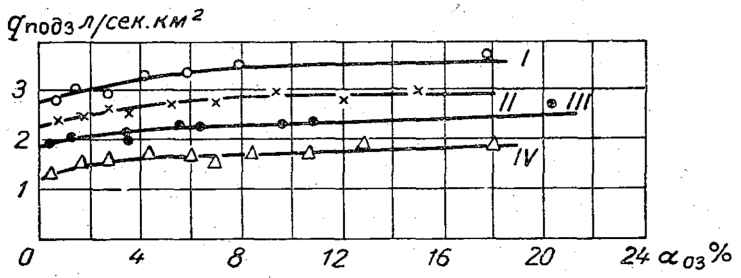


Рис. 32. Связь среднегодовых модулей подземного стока в реку $q_{подз}$ и коэффициентов озерности бассейнов $\alpha_{оз}$.
I, II — горные районы Кольского полуострова, *III* — равнинная (восточная) часть Кольского полуострова, *IV* — Карелия.

наблюдается устойчивая межень различной продолжительности. Сопоставлением количества и времени выпадения атмосферных осадков, времени наступления отрицательных температур воздуха было установлено, что этот период устойчивой межени, наблюдаемый с января по апрель, соответствует периоду сработки речных вод, аккумулированных в озерных котловинах. Всего на территории района было установлено 46 таких пунктов с различной озерностью. Для этих пунктов величина подземного стока условно принята по срезке, ориентированной на период устойчивой зимней межени (модуль подземного стока в реку $q_{подз}$).

Для выявления влияния озерности на принятую величину подземного стока были построены графики связи этих величин и коэффициентов озерности бассейнов (рис. 32). Анализ показывает наличие зависимости величин подземного питания рек при однородных гидрогеологических условиях от величин озерности бассейнов. Связь эта носит для отдельных районов локальный характер и наблюдается при коэффициенте озерности

меньше 15%. При более высоких значениях $\alpha_{оз}$ осуществляется многолетнее регулирование речного стока.

Установленная закономерность для расчетов может быть выражена аналитической зависимостью модулей подземного стока в реку

$$q_{подз}' = q_{подз} + 0{,}005\alpha_{оз}, \qquad (24)$$

где $q_{подз}$ — модуль подземного стока в реку при $\alpha_{оз}=0$.

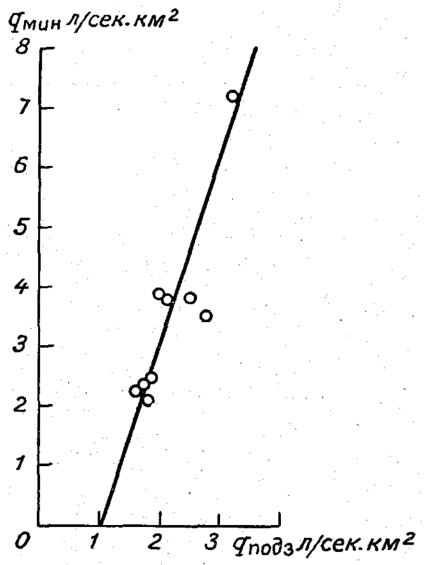


Рис. 33. График связи минимальных месячных модулей $q_{мин}$ речного стока и среднегодовых модулей подземного питания рек $q_{подз}$ в условиях многолетнего озерного регулирования.

Для оценки подземного питания озерных рек с многолетним регулированием были использованы связи величин подземного питания рек $q_{подз}$ с величиной минимального месячного (зимнего) стока $q_{мин}$ для рек, на которых наблюдается меженный период (рис. 33).

Анализ полученных графиков показывает, что линия связи для различных гидрогеологических условий формирования подземного стока в реки и озерности бассейнов отличается наклоном, характерным для отдельных речных бассейнов. Это позволяет выделить по типу связи на территории Кольского полуострова и Карелии пять районов и установить для каждого района однотипную связь $q_{подз}' = f(q_{мин})$, аналитически выраженную уравнением прямой

$$q_{подз}' = a + bq_{мин}, \qquad (25)$$

где a, b — параметры, изменяющиеся для различных районов от 0,40 до 1,24 и от 0,25 до 1,49 соответственно.

Указанные связи и зависимости были использованы для расчета подземного стока в озерные реки (Н. П. Небожева [42, 84]).

Применение метода генетического расчленения гидрографа реки для оценки подземного стока областей распространения многолетнемерзлых пород осложняется влиянием на речной сток так называемого наледного регулирования подземного стока в реки и явлением их промерзания.

Процесс наледного регулирования сводится к тому, что подземный сток на водосборе аккумулируется в зимний период в наледях, а весной и летом, когда происходит их таяние, уча-

ствует в формировании речного стока, т. е. происходит перераспределение подземного стока в реку в течение года.

В условиях наледного регулирования величина речного стока в зимний меженный период не характеризует полный подземный сток в речном бассейне, а меньше его на величину подземных вод, аккумулированных в наледях. В теплый период года при формировании подземного питания реки, помимо подземного стока из дренируемых водоносных горизонтов, в нее дополнительно поступают талые воды наледей — наледный сток.

Величина наледного регулирования может быть выражена модулем наледообразования — отношением суммарного дебита родников, формирующих наледи, к площади речного бассейна или модулем наледного стока в реку — отношением объема талых вод наледи, поступивших в реку, к площади ее водосбора.

Образование наледей может приводить к полному прекращению подземного стока в реки. В этом случае прекращение речного стока в зимнее время не служит показателем отсутствия подземного стока, и гидрографы таких рек должны включаться в расчет величины подземного стока. Схемы расчленения гидрографов реки с учетом наледного регулирования для различных типов режима постоянного подземного стока представлены в работах [42, 82, 83, 84].

Положение линий, расчленяющих гидрограф в теплый период года, зависящее от величины и режима подземного стока в реку и наледного стока за расчетный период, корректируется расчетными величинами модулей наледного стока или наледообразования.

Проведение полевых и опытных работ по изучению процессов формирования наледей, определению их площадей, мощности и времени формирования, по измерению объемов наледного стока гидрометрическим методом обеспечивает правильное применение метода генетического расчленения гидрографа общего речного стока в условиях наледного регулирования (рис. 34).

Решение вопроса о возможности оценки подземного стока методом генетического расчленения гидрографа общего стока при речных бассейнах с болотами связано с рассмотрением вопроса о регулирующем влиянии болот на речной сток, в особенности в период межени. В настоящее время большинство гидрологов считает, что болота не являются существенными регуляторами стока [42].

Если в период половодья и больших паводков и происходит некоторый сдвиг максимумов и распластывание волн повышенных расходов, то эта трансформация гидрографа объясняется не аккумулирующим влиянием болот, а малыми уклонами местности.

Рассматривая возможности аккумуляции поверхностных вод на болотах, необходимо отметить, что в торфяной залежи

отсутствуют большие свободные емкости. Несмотря на высокое содержание влаги в торфяной залежи (от 89 до 94%), основная часть воды в торфе находится в связном состоянии, и деятельный

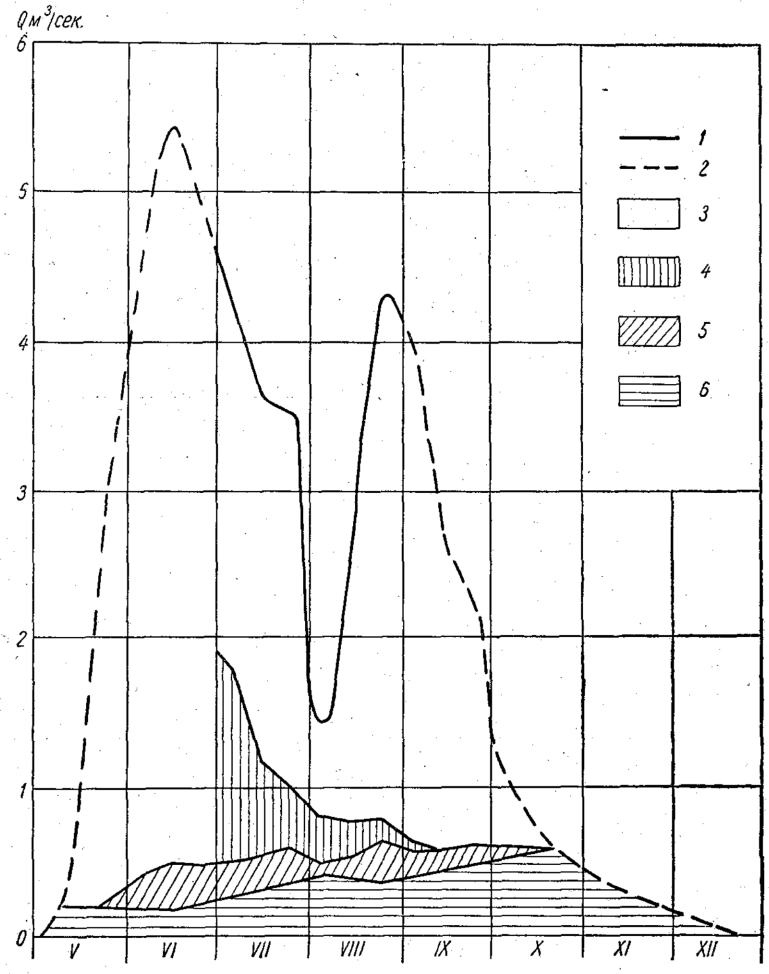


Рис. 34. Расчленение гидрографа р. Самокит, по Б. Л. Соколову [84].
1 — фактически измеренный сток, *2* — восстановленный (рассчитанный) сток, *3* — поверхностный сток, *4* — наледный сток, *5* — надмерзлотный сток, *6* — подмерзлотный сток.

слой залежи, в котором может происходить стекание поверхностных вод с болот, имеет незначительную мощность (10—15 см для низинных болот, 40—60 см для верховых). При этом толща деятельного слоя характеризуется значительными

коэффициентами фильтрации и высокой водопроницаемостью. Ниже расположен инертный слой торфяной залежи с резко снижающимся коэффициентом фильтрации и слабой водопроводимостью.

Во время высокого стояния уровня болотных вод происходит интенсивное стекание воды в деятельном слое. При снижении уровня болотных вод до нижней границы деятельного слоя и переходе его в пределы инертного горизонта сток с болот практически полностью прекращается или уменьшается до весьма незначительной величины. Прекращение на верховых болотах

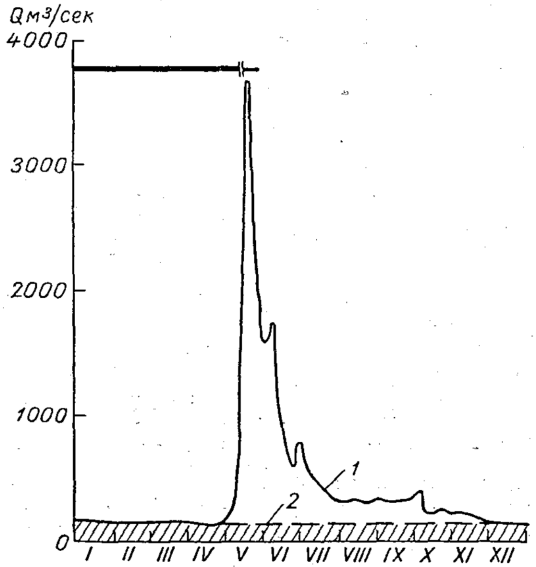


Рис. 35. Схема расчленения гидрографа болотной реки по устойчивой межени.
1 — поверхностный сток, *2* — подземный сток.

поверхностного стока и стока болотных вод, а в связи с этим переход рек на подземное питание имеет место в летний период при длительном отсутствии атмосферных осадков, при высоком испарении с поверхности болот, в зимний период при промерзании деятельного горизонта.

Сток с низинных болот в период межени целиком формируется за счет подземного стока в подстилающих минеральных грунтах. В летний период величина подземного стока с заболоченного водосбора несколько больше меженных расходов реки вследствие высокого испарения с болот. Учесть эту поправку к речному стоку в настоящее время сложно в связи с недостаточной изученностью режима низинных болот в разных районах СССР.

Учитывая малую динамичность подземного стока на территории распространения болот (преимущественно в зоне избыточного увлажнения) вследствие плохих условий инфильтрации атмосферных осадков и слабой дренированности территории при слабо развитой речной сети с малой глубиной эрозионного вреза, оценку подземного стока в речных бассейнах с болотами можно производить путем расчленения гидрографа стока по устойчивой межени (рис. 35).

В гидрогеологии были сделаны попытки теоретической разработки расчетных схем расчленения с применением методов гидродинамики. Интерес в этом отношении представляют работы С. Ф. Аверьянова [1] и Н. Н. Веригина [11].

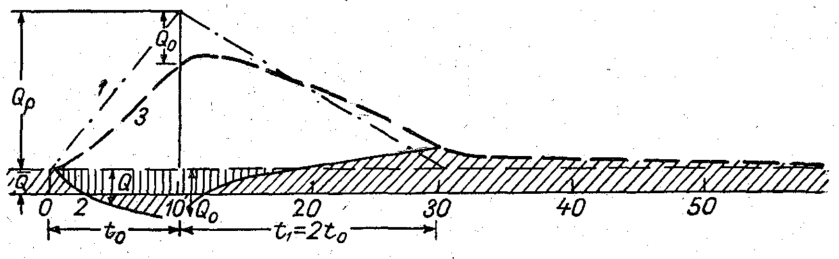


Рис. 36. График поступления воды в берега реки и обратно при прохождении паводка (по С. Ф. Аверьянову). Приняты условия: $Q_0=2Q$; $Q_p=6Q$.

t_0 — время подъема паводка, t — время в долях t_0, $\overline{Q}$ — «бытовой» приток грунтовых вод в реку, Q_p — максимальный расход притока поверхностных вод, Q — расход потока грунтовых вод, поступающих в берега реки (минус) и обратно в реку (плюс). Гидрографы: *1* — поверхностных вод, *2* — грунтовых вод, *3* — результирующий.

Для схематизированного треугольного гидрографа поверхностного (склонового) стока с отношением времени подъема к времени спада 1 : 2 С. Ф. Аверьянов, решая уравнение Буссинеско, получил кривую изменения грунтового стока во времени, дающую возможность трансформировать принятый гидрограф в естественный гидрограф, наблюдаемый на реках, с учетом взаимодействия речных и подземных вод в период прохождения паводка (рис. 36). Анализ теоретического примера приводит автора к следующим выводам:

1) отдача речных вод в водоносные пласты при прохождении паводка начинается с его подъема, достигает наибольшей величины при прохождении пика паводка, затем убывает, оставаясь направленной в сторону берега и на спаде паводка, в течение промежутка времени, равного 1,8 времени подъема t_0;

2) после этого начинает происходить отдача воды из берегов, которая достигает наибольшего значения в конце паводка;

отдача плавно уменьшается, растягиваясь во времени на весьма значительные сроки;

3) суммарный объем паводковых вод W, поступающий в прибрежные участки водоносного пласта за время от $t=0$ до $t=1{,}8t_0$, равен

$$W = 0{,}894 Q_0 t_0. \tag{26}$$

Автор считает, что такое же количество воды поступает в реку обратно, но в течение весьма продолжительного времени, до конца паводка, в русло обратно поступает только $0{,}256 Q_0 t_0$, что составляет 30% объема воды, поступившей в берег; остальное количество ($\sim 70\%$) возвращается в реку весьма медленно.

Не оспаривая в теоретическом плане результаты, полученные С. Ф. Аверьяновым, следует отметить, что эти выводы часто могут не подтверждаться натурными данными, как это имеет место в отношении описания процесса берегового регулирования по Б. И. Куделину, сделанного при анализе большого фактического материала. Это показывает, что сложные условия формирования подземного стока в реки в отдельных случаях могут не поддаваться строгому гидродинамическому выражению.

Более детальный гидродинамический анализ процесса грунтового стока в реки и взаимосвязь речных и подземных вод дается Н. Н. Веригиным [11]. Он предлагает гидродинамический метод оценки грунтового стока в реки по гидрографу их общего стока. Решение задачи дается при следующих допущениях: при оценке грунтового стока в реку не учитывается влияние предшествующего паводка и каждый паводок рассматривается индивидуально; суммарный грунтовый сток в реку в расчетном створе и расход грунтового потока в этом же створе на единицу длины реки (единичный расход) пропорциональны друг другу.

Для случая неустановившегося движения грунтовых вод вблизи реки при неограниченной длине грунтового потока и ритмических колебаниях уровня воды в реке автор дает следующие уравнения для определения расхода грунтового потока на единицу длины берега для любого момента времени t ($t_п$, t_s — длительность периодов подъема и паводка):

период подъема воды в реке ($0 \leqslant t \leqslant t_п$)

$$\bar{q}_1 = \bar{q}_н - \bar{q}_0 \sqrt{\frac{t}{t_п}}; \tag{27}$$

период спада воды в реке ($t_п \leqslant t \leqslant t_s$)

$$\bar{q}_2 = \bar{q}_н - \bar{q}_0 \left[-\left(1 + \frac{\xi}{\eta - 1}\right) \sqrt{\frac{t}{t_п} - 1} + \sqrt{\frac{t}{t_п}} \right]; \tag{28}$$

после паводка ($t \geqslant t_s$)

$$\bar{q}_з = \bar{q}_н - \bar{q}_о\left[-\left(1+\frac{\xi}{\eta-1}\right)\sqrt{\frac{t}{t_п}-1}+\sqrt{\frac{t}{t_п}}+\frac{\xi}{\eta-1}\sqrt{\frac{t}{t_п}\eta}\right], \tag{29}$$

где $\bar{q}_н$ — приток грунтовых вод на единицу длины реки перед началом паводка, а также

$$\xi = \frac{h_m^2 - h_к^2}{h_m^2 - h_н^2} \quad (\xi \leqslant 1), \tag{30}$$

$$\eta = \frac{t_s}{t_п} \quad (\eta > 1), \tag{31}$$

$$\bar{q}_о = \frac{K\left(h_m^2 - h_н^2\right)}{\sqrt{\pi a t_п}}, \tag{32}$$

где K — коэффициент фильтрации, a — коэффициент уровнепроводности грунтов водоносного пласта.

Величина $\bar{q}_о$ равна фильтрационному расходу, который поступил бы из реки в оба ее берега в случае мгновенного повышения напора в реке от величины $h_н$ до величины h_m в момент времени $t_п$ после подпора. Процесс происходит при глубинах грунтового потока $h_н$, $h_к$, h_m (рис. 39).

Отмечая большое разнообразие, сложность и недостаточную точность определения гидродинамических характеристик водоносных пластов, через которые выражаются единичные расходы грунтовых потоков, Веригин, преобразуя уравнения (27)—(29), выражает эти расходы через характеристики гидрографа реки. Используя допущения о том, что суммарный грунтовой сток в данном створе q пропорционален $\bar{q}$, можно для любого времени t получить:

$$q_1 = q_н - q_о\sqrt{\frac{t}{t_п}} \quad (0 \leqslant t \leqslant t_п), \tag{33}$$

$$q_2 = q_н - q_о\left(\sqrt{\frac{t}{t_н}} - \beta\sqrt{\frac{t}{t_п}-1}\right) \quad (t_п \leqslant t \leqslant t_s), \tag{34}$$

$$q_з = q_н - q_о\left[\sqrt{\frac{t}{t_п}} - \beta\sqrt{\frac{t}{t_п}-1} + (\beta-1)\sqrt{\frac{t}{t_п}-\eta}\right] \quad (t \geqslant t_s), \tag{35}$$

где

$$\beta = \frac{\xi}{\eta-1} + 1. \tag{36}$$

Расход $q_о$ за весь период паводка можно получить из уравнения (34) для $t = t_s$, $q_2 = q_к$:

$$q_о = (q_к - q_н)\,M(\xi, \eta), \tag{37}$$

$$M(\xi, \eta) = \frac{1}{\beta\sqrt{\eta-1} - \sqrt{\eta}}. \tag{38}$$

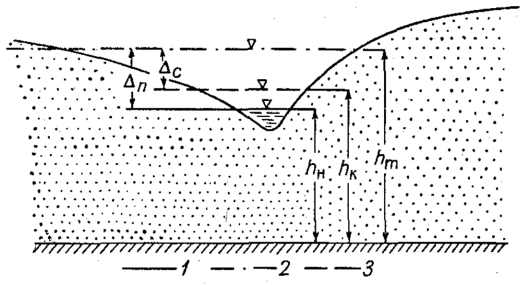


Рис. 37. Колебания горизонтов реки и глубин грунтовых вод во время паводка.

Горизонты воды: *1* — перед паводком, *2* — в пик паводка, *3* — после паводка.

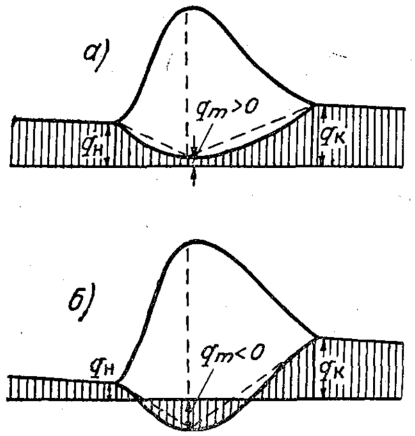


Рис. 38. Гидрографы подземного стока в реки (по Н. Н. Веригину).

а — I тип, инфильтрации в берега не происходит, *б* — II тип, при береговом регулировании.

Таким образом, расход $q_о$, определяемый через характеристики самого гидрографа реки ($q_н$, $q_к$, t_s, $t_п$, $\Delta_п$, $\Delta_с$), также зависит от мощности водоносного пласта $h_н$ [величины h_m и $h_к$, входящие в выражение ξ по формулам $h_m = h_н + \Delta_п$, $h_к = h_н + \Delta_п = \Delta_с$, зависят от $h_н$, $\Delta_п$ и $\Delta_с$ (см. рис. 37)].

При $h_m \gg h_к$ или $h_к \approx h_н$ в приведенном выше уравнении можно принять $\xi = 1$. Для этого случая грунтовый сток определяется только как функция гидрологических характеристик $q_н$, $q_к$, t_s и $t_п$, в которых в обобщенном виде отражается влияние гидродинамических параметров (K, μ, a). Анализ уравнений (33)—(35) приводит автора к известному положению об асинхронности поверхностного стока в реку и ее грунтового питания в условиях гидравлической связи [39]: максимуму общего стока соответствует минимум грунтового стока.

Максимум грунтового стока q_m определяется из уравнения (33) при $t = t_п$:

$$q_m = q_н - q_о = (q_к - q_н) M(\xi, \eta). \qquad (39)$$

Существенно важным в рассматриваемой работе Н. Н. Веригина является выделение для условия гидравлической связи речных и подземных вод двух основных типов гидрографов грунтового стока: I тип — в период паводка грунтовый сток в реку от подпора уменьшается, но фильтрация из реки в берега отсутствует (рис. 38 *а*); II тип — в период паводка подпор приводит к фильтрации воды из реки в берега, происходит береговое регулирование (рис. 38 *б*).

Последовательным определением объемов воды, принимающих участие в водообмене реки и водоносного пласта, по приведенным выше уравнениям Веригин дает систему формул и значений, введенных в решение формул, придающих построению гидрографов грунтового стока обоих типов строго расчетный характер при принятых допущениях. В результате выполненных исследований даются следующие основные выводы.

1. При расчете годовой величины подземного питания реки, у которой зимняя межень ниже летней, срезку гидрографа следует производить по наклонной прямой, соединяющей расход «предпаводочной межени» ($q_п$) с расходом послепаводочной межени ($q_к$). Рассчитанный при таком расчленении объем воды должен быть уменьшен на величину уменьшения грунтового стока при подпоре

$$\Delta V = 0{,}5 (q_к - q_п) t_s F(\eta, \xi), \qquad (40)$$

где $\eta = \frac{t_s}{t_п}$; t_s — продолжительность паводка, $t_п$ — продолжительность его подъема;

$$\xi = \frac{\alpha_1 (2 - \alpha_1)}{1 - \alpha_2^2}; \quad \alpha_1 = \frac{\Delta_с}{h_п + \Delta_с}; \quad \alpha_2 = \frac{h_н}{h_н + \Delta_п}. \qquad (41)$$

2. При оценке внутригодового распределения подземного питания реки определяются характерные периоды начала фильтрации из реки t_1, окончания t_2 и компенсации ее обратным стоком t_3 и рассчитывается объем стока за периоды t_1 (V_1), t_s—t_2 (V_4), t_3—t_2 (V_5) и фильтрация за периоды $t_п$—t_1 (V_1) и t_2—$t_п$ (V_3) по предложенным в работе формулам.

3. Приближенно внутригодовое распределение грунтового стока можно оценить, определяя его величину (или фильтрацию) на момент пика паводка:

$$q_m = q_н - (q_к - q_н) M(\xi, \eta). \qquad (42)$$

Если $q_m > 0$, то во время паводка не происходит берегового регулирования речного стока и схематизированное расчленение гидрографа можно производить по схеме на рис. 38 *а*.

Если $q_m < 0$, т. е. при береговом регулировании, схематизированное расчленение гидрографа можно производить по схеме на рис. 38 *б*.

Время t определяется из расчета равенства объемов речных вод, поступивших в берега, и объема стока из берегов за последующие периоды.

Рассмотренные результаты исследований, выполненных Н. Н. Веригиным, являются наиболее полным из известных нам описаний гидродинамической схемы подземного питания реки в условиях гидравлической связи ее с водоносными пластами, с практическим предложением по расчету. Однако принятая автором и необходимая для решения известная схематизация процесса и допущения делают практическое применение этих расчетов к реальным гидрографам рек весьма сложным. В первую очередь это относится к вопросу о пропорциональности суммарного и единичного расходов грунтового стока в реку. Известная асинхронность формирования всего водного режима в естественных речных бассейнах, различие типов гидравлической связи речных и подземных вод по отдельным участкам водотоков не позволяют в большинстве случаев принять в расчетах указанные допущения.

Значительного развития требует схема расчета в отношении динамичности подземного стока на водосборе (приняты постоянные расходы грунтового стока к реке). Весьма сложно, как отмечает и сам автор, обстоит задача учета в рассмотренной схеме широко наблюдаемого в природе явления выхода речных вод на пойму и осуществление берегового регулирования в условиях интенсивной инфильтрации воды в грунты пойм.

Поэтому и к выполненным исследованиям можно с основанием применить высказывания Н. Н. Веригина в отношении многих способов оценки грунтового стока в реки, которые «хотя

в какой-то мере позволят приблизиться к действительной картине его распределения, но также могут приводить как к преувеличению, так и к преуменьшению величины этого стока» [11, стр. 180].

К работе Н. Н. Веригина близки по своей гидродинамической сущности исследования берегового регулирования, выполненные П. А. Киселевым [34, 35]. Особый интерес представляет анализ условий образования зоны обратного уклона грунтовых вод при подпоре их рекой в период половодья, выполненный автором на обширном фактическом материале для бассейна р. Припяти.

Связывая образование зоны обратного уклона зеркала грунтовых вод вблизи реки со скоростью подъема ее уровня, Киселев вводит понятие критической скорости подъема уровня воды в реке, при котором грунтовые воды не питают реку, а она не питает грунтовые воды. Если скорость подъема воды в реке не превышает критической, то этот подъем может компенсироваться соответствующим подъемом зеркала грунтовых вод, происходящим за счет притока грунтовых вод со стороны водораздельного пространства и за счет их инфильтрационного питания сверху. В этом случае обратные уклоны грунтовых вод не развиваются.

При скорости подъема воды в реке больше критической создаются обратные уклоны, степень развития которых определяется комплексом гидрогеологических и гидрологических условий, включая в первую очередь условия питания грунтовых вод на водосборе и их стока в реки, скорость и длительность подъема уровня в реке.

Скорость подъема уровня грунтовых вод в любом сечении для линеаризированного уравнения неустановившегося движения определяется

$$U = \frac{Kh_{ср}}{\mu} V + \frac{\omega}{\mu}, \qquad (43)$$

где K — средний коэффициент фильтрации водоносного пласта, $h_{ср}$ — средняя его мощность, V — скорость изменения напорного градиента, μ — коэффициент недостатка насыщения, ω — величина инфильтрационного питания грунтовых вод.

Для песчаных отложений Полесья, при $K = 1{,}58$ м/сутки, $h_{ср} = 7{,}24$ м, $\mu = 0{,}05$, $\frac{\omega}{\mu} = 19$ мм и $V = -0{,}0016$ м$^{-1}$, Киселев дает значение критической скорости, равное 0,03 м/сутки.

Анализ динамики расхода грунтовых потоков в зоне образования обратных уклонов в изученном районе Полесья позволил исследователю установить изменяющиеся условия их подземного питания при подъеме уровня реки. «Припять и ее притоки при подъеме уровня питают грунтовые воды определен-

ное время. В некоторые годы питание становится в той или иной мере ограниченным или практически отсутствует» [34, стр. 42].

Применительно к особенностям приемов оценки подземного стока в реки методом генетического расчленения гидрографа рек в различных природных условиях в следующих разделах главы даются рекомендации по анализу гидрогеологического материала для региональной оценки подземного питания рек.

2. Принципы анализа материала

Положительный результат оценки подземного питания рек при применении самых различных методов, как это видно из общих описаний процесса формирования подземного стока в реки, может быть получен при учете всех особенностей формирования подземного стока, в первую очередь на основе анализа геоструктурных, геологических и гидрогеологических условий конкретных участков территории, для которых производится эта оценка. Поэтому выбор и обоснование метода расчета должны основываться на изучении гидрогеологических условий формирования подземного стока.

В связи с этим первой задачей, которая возникает при региональной оценке подземного стока, является гидрогеологическое районирование территории по основным особенностям формирования подземного стока. С этой целью составляется гидрогеологическая карта дренирования, на которой показаны возраст и состав отложений водоносных горизонтов (комплексов), воды которых формируют подземный сток зоны интенсивного водообмена. По выделенным гидрогеологическим районам составляются описания основных особенностей формирования подземного стока.

Особое значение при применении метода генетического расчленения гидрографа общего речного стока имеет выявление для выделенных районов типа режима подземного стока в реку, в зависимости от которого выбирается та или иная схема расчленения. Для этого по каждому гидрогеологическому району составляются типовые схемы дренирования, на которых показано взаимное расположение водоносных горизонтов, характер их взаимосвязи с рекой, мощность, состав и возраст водоносных пластов, минерализация воды, а также степень участия подземных вод отдельных пластов в подземном питании рек и преобладающий тип режима подземного стока в реки.

Типовые схемы дренирования, являющиеся обобщенными для района гидрогеологическими разрезами речных долин, составляются путем анализа всего фактического геологического и гидрогеологического материала по характеристике отдельных

речных бассейнов и учитывают общее геологическое строение и гидрогеологические условия района (рис. 39, 40).

Глубина зоны дренирования определяется: а) по картам гидроизогипс и гидроизопьез; б) путем сопоставления глубин эрозионного вреза с высотным положением водоносных пластов; в) по положению региональных водоупоров; г) по гидрохимическим данным о подземных водах, используя идею о связи гидродинамических и гидрохимических вертикальных зон подземных вод, согласно которой к зоне интенсивного водообмена приурочены большей частью пресные воды; д) путем моделирования процессов дренирования на аналоговых приборах (ЭГДА, щелевой лоток и др.).

Мелкие притоки и главные реки в своих верховьях непосредственно могут и не вскрывать более глубокие водоносные горизонты. Однако подземный сток формируется со всей площади бассейна и перехватывается руслами главных рек. Поэтому при оценке естественных ресурсов подземных вод зоны интенсивного водообмена карты и типовые схемы дренирования составляются для эрозионного вреза главных рек, по которым и производится расчет подземного стока.

На основании карт и типовых схем дренирования с учетом установленного типа режима подземного стока в реки и физико-географических особенностей расчетных речных бассейнов (водного режима реки, закономерностей формирования поверхностного стока и т. п.) выбираются схемы расчленения гидрографов.

Выбор схемы и расчетных показателей для применения в горноскладчатых областях комплексного гидролого-гидрогеологического метода расчленения гидрографа общего речного стока возможен лишь на основе исследования режима подземных вод. Последнее требует прежде всего сбора, систематизации и соответствующей обработки данных по отдельным пунктам, расположенным в чрезвычайно многообразных природных условиях и значительно удаленных друг от друга.

Второй этап работ составляет переход от данных конкретных наблюдений к характеристике режима подземного стока на той или иной территории, что приводит к необходимости соответствующего районирования.

При отсутствии широкой сети наблюдений за режимом подземных вод наиболее целесообразным представляется районирование, основанное на выделении участков, однородных по всему комплексу природных условий, определяющих динамику подземного стока в годовом периоде.

Этот принцип, предусматривающий последовательное районирование территории по основным режимообразующим факторам, нашел свое отражение в классификационной схеме режимов

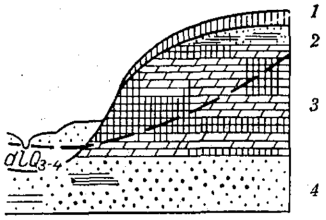


Рис. 39. Типовая схема дренирования водоносных горизонтов бассейна р. Днепра. Подпорный тип режима подземного стока при береговом регулировании.

Состав пород	Возраст	Водоносный горизонт (комплекс)	Преобладающая минерализация подземных вод, г/л	Участие в подземном питании рек	Преобладающий тип режима подземного стока
1. Суглинок	Q	Верховодка	До 0,5	Основное	Подпорный
2. Пески, глины	Pg				
3. Мел, мергель	Cr	Меловой			
4. Пески					

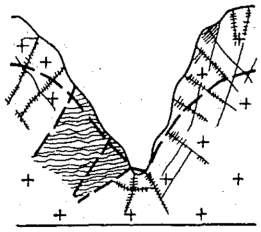


Рис. 40. Типовая схема дренирования водоносного горизонта в горных районах (Большой Кавказ).

Состав пород	Возраст	Водоносный горизонт (комплекс)	Преобладающая минерализация подземных вод, г/л	Участие в подземном питании рек	Преобладающий тип режима подземного стока
Метаморфические и интрузивные	$Pt + Pz_1$ γP_2	Трещинно-грунтовые и трещинно-жильные воды	До 1	Основное	Нисходящий

грунтовых вод на территории СССР, предложенной А. А. Коноплянцевым, В. С. Ковалевским, С. М. Семеновым [37, 38].

Используя этот принцип, можно подойти к выделению участков, однородных по условиям формирования режима подземного стока, и затем распространить данные о динамике стока в отдельных пунктах на всю территорию выделенного участка, а также широко применить метод аналогий.

Особое внимание необходимо обратить на те главные особенности формирования режима подземных вод и условия взаимосвязи их с реками, которые определяют общие закономерности подземного стока в реку и обусловливают выбор схемы генетического расчленения гидрографа.

В первую очередь это относится к определению степени дренированности водоносного горизонта (комплекса) в отношении густоты гидрографической сети и глубины эрозионного вреза, а также к определению степени гидравлической связи подземных и речных вод в бассейне.

Анализ региональных закономерностей режима грунтовых вод и корреляция их с факторами, которые определяют дренированность территории, позволяют выделить три типа территорий, или гидрогеологических областей, с различной степенью дренированности грунтовых вод:

1) гидрогеологические области со слабой дренированностью грунтовых вод. Они объединяют территории, характеризующиеся абсолютными отметками менее 200—220 м и глубинами расчленения рельефа не более 60 м. Сюда попадают большинство равнин ЕТС. В их пределах скорости движения грунтовых вод незначительны, т. е. отток вод в сторону дрен невелик. Слабая расчлененность рельефа обусловливает относительно малый поверхностный сток атмосферных осадков и, следовательно, повышенную их инфильтрацию. Глубины залегания грунтовых вод на равнинах вследствие слабой расчлененности рельефа небольшие, что определяет значительную роль испарения в расходной части баланса грунтовых вод и относительно повышенную общую минерализацию их по сравнению с соседними возвышенностями;

2) гидрогеологические области со средней дренированностью грунтовых вод. Они объединяют районы, характеризующиеся абсолютными отметками поверхности от 220 до 500 м и глубиной эрозионного расчленения не менее 90—150 м. Такие количественные показатели свойственны возвышенностям, плато, кряжам и другим положительным элементам рельефа. В их пределах расчлененность рельефа значительно больше, эрозионная сеть врезана более глубоко и более развита по площади, чем в предыдущем случае. Дренированность подземных вод и скорость их фильтрации, следовательно, также более значительны. Поэтому здесь колебания уровня грунтовых вод, связанные

с различными факторами (снеготаяние, дождь и др.), более кратковременны, но амплитуды колебания уровня грунтовых вод могут быть и более значительными.

Кроме того, вследствие большой расчлененности рельефа в гидрогеологических областях со средней дренированностью грунтовых вод чаще всего наблюдается глубокое залегание грунтовых вод. Учитывая также, что при этом возрастает поверхностный сток, инфильтрация осадков при всех прочих равных условиях здесь оказывается значительно меньше, чем в предыдущем случае;

3) гидрогеологические области с сильной дренированностью грунтовых вод. Они объединяют районы, характеризующиеся абсолютными отметками водоразделов более 500 м и глубиной эрозионного расчленения более 150 м.

Эти области в основном приурочиваются к горным районам, где расчлененность рельефа настолько велика, что инфильтрация атмосферных осадков в результате интенсивного поверхностного стока сравнительно мала.

Однако в горных районах обычно встречаются трещиноватые породы, поэтому здесь наряду с инфильтрацией можно наблюдать и инфлюацию.

Таким образом, чтобы осветить особенности режима грунтовых вод той или иной территории, следует обязательно предусмотреть выделение упомянутых выше гидрогеологических областей. Это выделение легко осуществить по гипсометрическим картам, опираясь на количественные показатели высоты местности и глубины эрозионного расчленения.

Орографический принцип гидрогеологического районирования на данной стадии хорошо согласуется с геолого-тектоническим районированием. Так, все слабодренированные гидрогеологические области являются впадинами, седловинами, прогибами и другими синклинальными структурами. Дренированные же области чаще всего совпадают с приподнятыми участками щитов, антиклинальных структур, или поднятий, а сильно дренированные — с горноскладчатыми областями.

Решающим в определении закономерности подземного питания реки в зависимости от гидравлической связи будет не сам факт гидравлической связи, а возможность развития обратных уклонов и всего процесса берегового регулирования. Поэтому наряду с определением высотного положения водоносных пластов на водосборе и дренирующих их понижений и уровней поверхностных вод в них анализ гидрогеологических материалов должен быть направлен на характеристику положения депрессионной кривой подземных вод в приречной зоне, водопроводимость пород на прирусловых участках водоносных пластов. Одновременно с этим оценивается возможность поступления к поверхности подземных вод на участке кривой депрессии

инфильтрационных речных вод при подъеме уровня. В одном случае это может быть только ограниченной инфильтрацией в берега в откос русла, в другом случае — подпор с повышенным инфильтрационным подпитыванием подземных вод на участке кривой депрессии при выходе речных вод на пойму. В последнем случае большое значение имеет учет сложения пойменных отложений и возможность инфильтрации через верхнюю часть пойменных отложений, всегда отличающихся от нижележащего аллювия меньшей водопроницаемостью.

Водопроницаемость, водоотдача и уровнепроводность пород на прирусловых участках в значительной мере определяют скорость возвращения речных вод в русло в фазе стекания берегового регулирования. Поэтому при анализе гидрогеологических материалов должно быть обращено особое внимание на выявление условий развития берегового регулирования.

При анализе условий формирования нисходящего подземного питания рек гидрогеологические данные имеют еще большее значение и, по сути дела, только они и могут обеспечить правильную оценку режима подземного стока в реку в период, когда в формировании речного стока большое значение имеет поверхностный склоновый сток. Если в период межени гидрометрическая оценка речного стока обеспечивает точную количественную оценку суммарного подземного стока в речном бассейне, то при определении годовых его величин только гидрогеологические данные о режиме водоносных пластов и о сезонном изменении подземного стока могут обеспечить правильную трансформацию меженных величин подземного стока в реку в его годовые величины. В этом случае большое значение имеют данные по расчетным гидрогеологическим створам, расположенным на различных участках водосбора и организуемым для характеристики общего режима подземных вод в границах бассейна при воднобалансовых гидрологических и гидрогеологических исследованиях. Результаты наблюдений позволяют построить единичный гидрограф подземного стока. Последний обеспечивает оценку подземного стока методом Ф. А. Макаренко, с той лишь разницей, что динамичность подземного стока устанавливается не по данным о дебитах родников, а определяется независимым способом.

Для горных районов в условиях формирования трещинно-жильных подземных вод, однако, нужно считать такое расчленение гидрографа менее объективной характеристикой динамики подземного стока в бассейне. В этом случае выбор репрезентативных родников, по которым имеются данные о сезонных изменениях дебитов родникового стока, имеет решающее значение в оценке динамики подземного стока в реки при нисходящем питании и при отсутствии гидравлической связи подземных и речных вод.

Во всех случаях изучения подземного стока в реки независимое определение динамики подземного стока на водосборе имеет большое значение в комплексной гидролого-гидрогеологической оценке этого процесса.

3. Оценка минимального стока рек[1]

Произведенные работы по сбору, анализу и обобщению материалов по гидрогеологии и гидрологии, закончившиеся составлением карт подземного стока СССР, имеют научное и практическое значение не только для изучения и расчета подземного стока, но и для такого гидрологического параметра, как минимальный сток. На большей части территории СССР минимальный сток на реках наблюдается в период, когда питание рек осуществляется в основном за счет подземных вод. Следовательно, его величина определяется интенсивностью подземного стока в реки, количеством водоносных горизонтов, участвующих в питании рек данного района, или их водообильностью и другими гидрогеологическими факторами. Поэтому без достаточно полного изучения гидрогеологических условий данной территории невозможно разработать методы расчета минимального стока на неизученных реках. Именно отсутствие сведений о гидрогеологическом строении всей территории СССР и величине подземного стока в реки, равно как и недостаточный учет многими авторами значения гидрогеологических условий для минимального стока, не позволяло до середины 50-х годов производить обобщения минимального стока в достаточно надежных формах. Только в работах А. М. Норватова, Н. П. Чеботарева, А. Г. Курдова сделана первая попытка применения гидрогеологических данных к гидрологическим расчетам.

С завершением работ по созданию карт подземного стока СССР, в результате которых был собран и систематизирован огромный гидрогеологический и гидрологический материал по оценке подземного питания рек, открылся новый этап в изучении стока рек, и особенно минимального. Стала ясна необходимость применения комплексного гидролого-гидрогеологического метода в изучении минимального стока. Поэтому при исследовании режима минимального стока рек и разработке методов его расчета в основу работ был положен анализ не только таких гидрометеорологических элементов, как величина осадков, испарения, температура воздуха, годовой сток рек, но и гидрогеологические условия формирования подземного стока, принимающего непосредственное участие в питании рек в период минимального стока. Для этого использовались карта дренирования водоносных пород реками, гидрогеологическое описание условий формирования подземного стока регионов,

[1] Раздел составлен А. М. Владимировым.

карта подземного стока зоны интенсивного водообмена, карта коэффициентов подземного стока в процентах от осадков и карта подземного стока в процентах от общего речного стока.

Наличие такой основательной гидролого-гидрогеологической базы позволило разработать относительно простой, но достаточно надежный метод расчета минимального стока малых рек, который рекомендуется для применения в «Указаниях по определению расчетных минимальных расходов воды рек при строительном проектировании» (Гидрометеоиздат, Л., 1966).

Если минимальный сток крупных и средних рек на большей части территории СССР в значительной степени зависит как от гидрогеологических, так и от климатических факторов, то минимальный сток малых рек находится в непосредственной зависимости от гидрогеологических условий, являющихся основным стокообразующим фактором для всех малых рек, кроме районов с муссонным климатом или ледниковым питанием в теплый сезон.

Поэтому методы расчета минимального стока малых рек должны базироваться на учете водности подземного бассейна и характера дренирующей способности реки. Для получения достоверных данных о водности подземного бассейна необходимо иметь сведения о числе и мощности водоносных горизонтов, питающих реку, площади их простирания, о гидравлической связи между водоносными горизонтами, о поступлении напорных вод из глубоких водоносных пластов. Таким образом, требуется целый комплекс гидрогеологических данных, которые могут быть получены только при производстве обширных гидрогеологических работ, поскольку в настоящее время еще не имеется таких данных для любого района СССР. Это связано с большими материальными затратами и длительным временем исследований, что практически часто бывает невозможно сделать. Дренирующую способность реки можно выразить через глубину эрозионного вреза русла реки, определение которой также связано со значительными трудностями, главным образом методического характера. Поэтому при разработке методов расчета минимального стока целесообразно заменить вышеуказанные характеристики другими показателями, находящимися в непосредственной связи с ними.

Существует определенная связь между объемом подземного бассейна, глубиной эрозионного вреза речных русел, положением водораздельных границ и размерами поверхностного водосбора реки. Действительно, чем больше глубина эрозионного вреза, тем большее количество водоносных горизонтов перехватывается рекой, тем больше объем подземного бассейна, при условии отсутствия гидравлической связи с глубоколежащими водоносными горизонтами, непосредственно не затрагиваемыми рекой. Вместе с тем, увеличение глубины эрозионного вреза

связано с увеличением размера реки, что определяется увеличением площади водосбора реки.

Подземный бассейн к тому же по простиранию, как правило, совпадает с поверхностным водосбором вследствие соответствия форм рельефа простиранию пород, кроме территорий с современными формами рельефа, где эта закономерность может нарушаться. Поэтому объем подземного бассейна и глубина эрозионного вреза могут быть заменены площадью бассейна реки, понимая под последней не только количественную величину, но и рассматривая ее как качественную характеристику, являющуюся интегратором морфологических и гидрологических условий формирования минимального стока.

Вследствие этого в основу метода расчета минимального стока на малых неизученных реках положена его зависимость от площади бассейна реки, наличие которой, кстати, признается большинством авторов. При этом за основную характеристику минимального стока принимается его средняя величина за 30-дневный период, с наименьшим стоком в зимний и летне-осенний сезоны, которая довольно часто не совпадает с календарным месяцем, особенно в районах с частыми паводками на реках за счет выпадения дождей в теплый сезон или оттепелей в зимний.

В формировании минимального стока средних рек, как уже указывалось, наряду с гидрогеологическими условиями существенную роль играют и климатические, поэтому в своем распределении по территории он подчиняется закону географической зональности и может быть представлен в качестве карт изолиний минимального стока.

Прежде чем производить обобщение данных по минимальному стоку малых рек, необходимо установить само понятие «малая река», и не только в качественном, но и в количественном выражении.

За количественную характеристику может быть принята величина, показывающая степень дренирования рекой водоносных горизонтов, участвующих в ее питании, т. е. глубина эрозионного вреза русла реки (исключая, конечно, аномальные случаи), которая может быть заменена, как уже было сказано, площадью бассейна реки. Таким образом, в качестве количественной характеристики для определения понятия «малая река» может быть принята наибольшая площадь бассейна, при которой наступает полное дренирование участвующих в питании реки водоносных горизонтов и с увеличением которой уже не наблюдается изменения модуля минимального стока на реках данного района, имеющих общий базис эрозии. При этом в одном случае интенсивность подземного питания рек увеличивается с увеличением площади бассейна (что происходит на большинстве рек), а в другом уменьшается, но все это происходит

до определенного предела. Ниже об этом будет сказано подробнее. Все реки, имеющие площадь бассейна меньше этой предельной, относятся к категории малых. Очевидно, что предел площади бассейна, характеризующей малые реки, будет различным в разных районах.

Наибольшее значение площади бассейна устанавливалось по графикам связи модуля минимального 30-дневного стока с площадью бассейна реки для сходных по морфологическому и гидрогеологическому строению районов СССР. Сходство гидрогеологических условий устанавливалось по карте дренирования, положенной в основу карт подземного стока СССР масштаба 1 : 5 000 000, а также по гидрогеологическим описаниям условий формирования подземного стока на территории страны [42].

Для большей части территории СССР зависимость между модулем минимального стока и площадью бассейна реки изменяется по закону параболы и имеет вид

$$M = kF^m \text{ при } m < 1, \tag{44}$$

где M — модуль минимального 30-дневного стока в л/сек. км^2, F — площадь бассейна в км^2, k, m — параметры, характеризующие физико-географические условия формирования минимального стока.

При таком виде кривой с увеличением площади бассейна растет и величина модуля стока. Такая закономерность наблюдается до определенного предела, который наступает при полном дренировании водоносных горизонтов, участвующих в питании реки. На графике этому пределу соответствует область перехода кривой в прямую, близкую к горизонтальной (рис. 41) [83]. Это свидетельствует об увеличении интенсивности питания рек за счет увеличивающихся мощности и количества водоносных пластов при относительно параллельном их залегании, вследствие чего с увеличением глубины эрозионного вреза последовательно включаются в питание и нижерасположенные пласты.

Характер изменения интенсивности питания рек по их длине определяется гидрогеологическим строением бассейна. Так, даже при значительном увеличении площади бассейна может наблюдаться уменьшение величины подземного питания, если водоносные горизонты, питающие реки в верховьях, залегают наклонно и быстро уходят под покровные породы с малой водоносностью. Например, песчаные породы сеноман-альбского водоносного горизонта в верховьях бассейнов рек Оскола и Северского Донца к югу погружаются ниже уровня вреза рек и уходят под карбонатные отложения туронского яруса, обладающего меньшей водоносностью, что вызывает уменьшение модуля стока по длине рек. Аналогичная картина наблюдается и при наличии значительных потерь стока по длине реки, пре-

вышающих величину питания (поглощающий карст, заболоченность поймы, сильные потери стока вследствие испарения в засушливых районах, интенсивные водозаборы и т. п.). В этом случае зависимость модуля минимального стока от площади бассейна приобретает вид гиперболы, но также до определенного предела (рис. 42) [84].

Следует иметь в виду, что площадь бассейна, отражая степень влияния гидрогеологических условий в бассейне реки, одновременно характеризует влияние на величину минимального

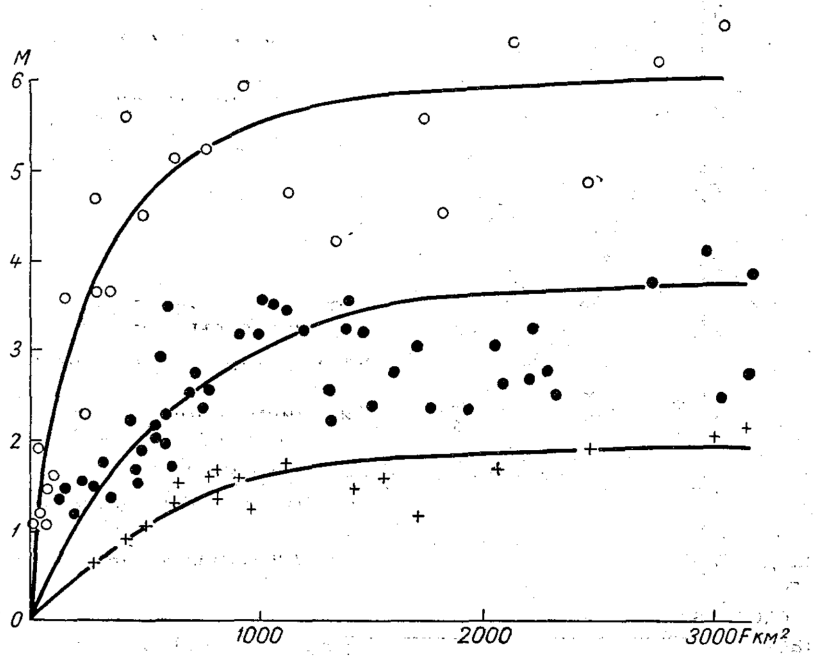


Рис. 41. Зависимость модуля минимального 30-дневного летнего стока от площади бассейна при равномерном возрастании интенсивности питания по длине реки.

стока и некоторых физико-географических факторов, изменяющихся по сезонам, а также различие в условиях питания рек в зимний и летне-осенний сезоны. В зависимости от сезона в питании рек могут участвовать различные водоносные горизонты с различной интенсивностью, поскольку степень водообильности и доля участия их в питании рек изменяются по сезонам в зависимости от водности сезона и увлажненности предшествующего периода. Чем больше увлажненность территории в данном сезоне, тем большее влияние на степень изменения минимального стока с изменением площади бассейна оказывают

почво-грунты бассейна, заключающие в себе воды со значительной динамичностью во времени.

Этим и объясняется различие в характере зависимости модуля минимального стока от площади бассейна по сезонам и величин наибольшей площади бассейна малой реки для одного и того же района в различный сезон.

Зависимость модуля минимального стока от площади бассейна по району может нарушаться или даже отсутствовать для

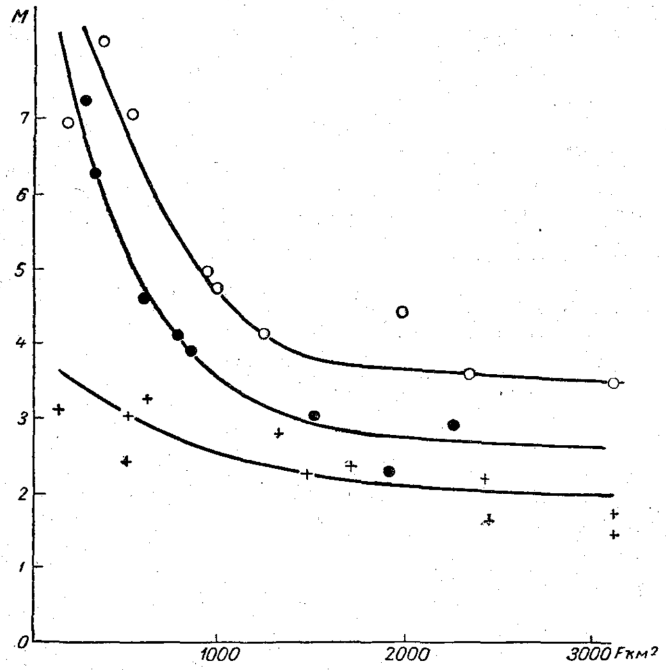


Рис. 42. Зависимость модуля минимального 30-дневного стока от площади бассейна за летне-осенний сезон при преобладающей интенсивности питания в верховьях рек.

очень малых рек, с площадью бассейна до 50—100 км². Для этих рек значительно увеличивается влияние разного рода местных факторов: возрастающей роли в формировании их минимального стока почвенных и почвенно-грунтовых вод, имеющих довольно пестрое распределение по территории, несовпадения границ подземного и поверхностного водосборов, усиливающейся роли озер, болот и хозяйственной деятельности в бассейне реки и т. п.

Характерно, что в равнинных районах зоны избыточного увлажнения величина наибольшей площади бассейна, до которой

река считается малой, колеблется около 1000—1500 км² в летний и зимний сезоны. В южных районах в зоне недостаточного увлажнения она увеличивается до 2000—2500 км² вследствие более глубокого залегания основных питающих горизонтов при более низком базисе эрозии рек. На территории с наличием систематически пересыхающих или перемерзающих рек к малым относятся реки с площадью бассейна до 5000—10 000 км².

На возвышенной и горной территориях величина наибольшей площади бассейна малой реки незначительно отличается от величины на равнинной территории, так как базис эрозии рек у них обычно общий и водоносные горизонты залегают неглубоко. Эрозионная деятельность горных рек протекает значительно интенсивнее, чем равнинных, вследствие наличия больших уклонов. Поэтому в отдельных районах реки достигают местного базиса эрозии даже при меньшей величине площади бассейна, чем у равнинных.

Использование модуля минимального стока для количественной характеристики условий питания и определения влияния площади бассейна путем построения графиков связи этих величин возможно только для тех замыкающих створов, площадь бассейна которых состоит на 70% и более из площади одного (главного) ствола реки. Если же площадь бассейна образована за счет слияния приблизительно равных по величине рек, то модуль минимального стока не будет отражать влияние площади бассейна. Это объясняется тем, что при одинаковых условиях формирования минимального стока на двух соседних реках после их слияния останется тот же модуль стока, а площадь увеличится вдвое, что вызовет нарушение связи. Поэтому, чем меньше разница в величине площади бассейна между сливающимися реками, тем дальше от кривой связи будет лежать соответствующая точка.

При недостаточной освещенности территории гидрологическими наблюдениями это приводит к получению ложной зависимости, что наглядно демонстрируется на рис. 43. Для расчетных целей наиболее надежной может быть зависимость $M=f(F)$ по частным водосборам, но для этого требуется иметь большое число данных наблюдений, что далеко не всегда возможно получить. Таким образом, при построении зависимости модуля минимального стока от площади бассейна необходимо производить анализ соотношения площадей главной реки и наибольших притоков. В случае их близких величин следует либо вычитать площадь бассейна и сток притока, т. е. привести к частному водосбору, либо не учитывать данный пункт, чтобы не получить механического рассеяния точек. В противном случае можно получить ряд ложных зависимостей или сильный разброс точек. Причем чем слабее будет освещен пунктами

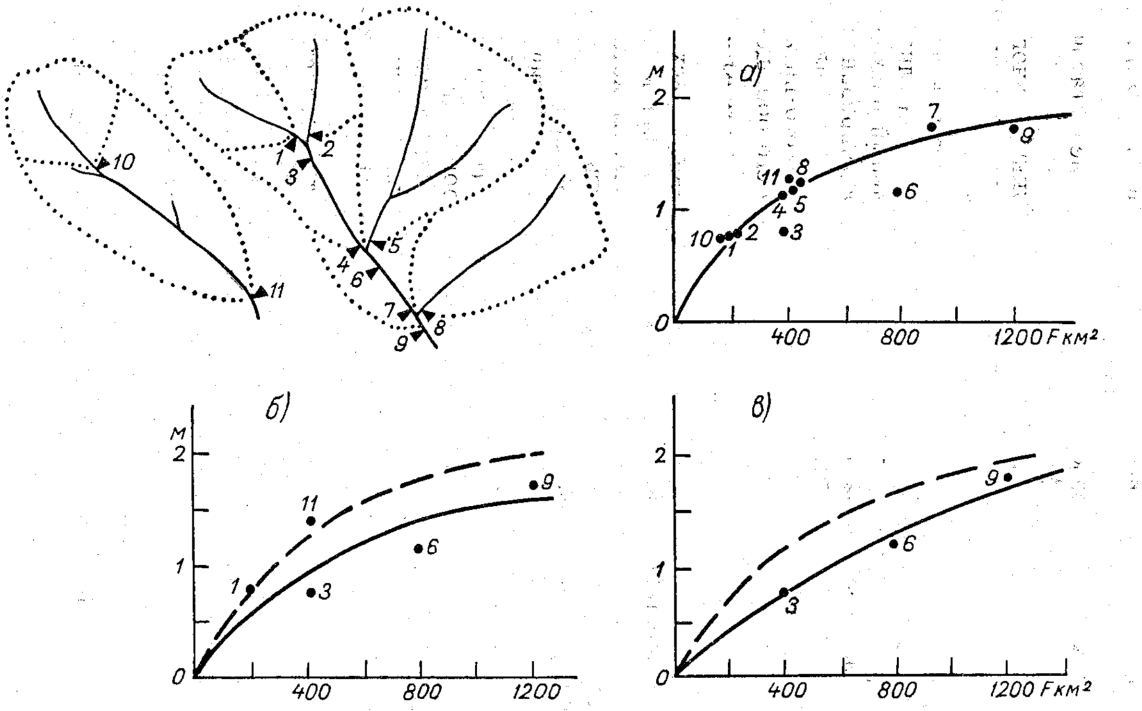


Рис. 43. Схема бассейнов рек и графики зависимости модуля минимального стока от площади бассейна при различной степени освещенности бассейна реки пунктами наблюдений: *а* — при полной освещенности бассейна реки пунктами наблюдений; *б* — при частичном освещении бассейна реки пунктами наблюдений; *в* — при малом количестве пунктов и расположении их только на главной реке.

$F \approx F_2$, $F_3 = F_1 + F_2$, $F_4 \approx F_5$, $F_6 = F_4 + F_5$, $F_7 \approx 3F_8$, $F_9 = F_7 + F_8$, $F_{10} \approx F_1$, $F_{11} \approx F_4$; $Q_1 \approx Q_2$, $Q_3 = Q_1 + Q_2$, $Q_4 \approx Q_5$, $Q_6 = Q_4 + Q_5$, $Q_7 \approx 4{,}5Q_8$, $Q_9 = Q_7 + Q_8$; $M_1 \approx M_2 \approx M_3$, $M_4 \approx M_5 \approx M_6$, $M_7 \approx 1{,}5M_8$, $M_9 \approx M_7$, $M_{10} \approx M_1$, $M_{11} \approx M_4$.

наблюдений бассейн реки, тем больше вероятность получить искаженную зависимость, а в отдельных случаях и ее кажущееся отсутствие. Следовательно, исследование зависимости модуля минимального стока от площади бассейна связано со значительными трудностями. Не исключено, что именно недостаточное исследование характера этой взаимосвязи наряду с недостаточным анализом условий формирования минимального стока не позволило некоторым авторам обнаружить наличие такой зависимости в исследуемых ими районах.

Указанная особенность не относится к зависимостям, в которых используются данные о расходах воды, так как при слиянии рек расход суммируется. Вместе с тем минимальный расход воды в такой же мере характеризует условия формирования минимального стока, что и модуль. На реках с одинаковой площадью бассейна, но с разной интенсивностью подземного питания, конечно, будет и разный расход воды. Поэтому его обобщение по территории не менее правомерно, чем обобщение модуля минимального стока.

Исследование зависимости минимальных 30-дневных расходов воды от площади бассейна реки осуществляется для каждого гидрогеологического района, водоносные горизонты которого имеют одинаковую по территории водообильность.

При построении расчетных зависимостей производится анализ исходных гидрогеологических районов. По гидрогеологическим описаниям и карте подземного стока устанавливается величина водности в водоносных комплексах данного гидрогеологического мегарегиона или региона. В случае пестрой водности слагающих район почво-грунтов необходимо предварительное деление на районы с близкой по величине водностью, границы которых впоследствии уточняются построением зависимостей минимальных 30-дневных расходов воды от площади бассейна реки. Например, мегарегион Байкальской складчатой области в гидрогеологическом отношении представляет систему гидрогеологических массивов (горные хребты) и артезианских бассейнов (межгорные впадины). В пределах северной и северо-западной частей распространены воды докембрийских и палеозойских образований и интрузивных пород различного возраста. Расходы отдельных родников трещинно-жильных вод изменяются от 1 до 25 л/сек. Более высокодебитные родники свойственны зонам крупных тектонических нарушений (Ингодинский, Тукурингрский и др.). В пределах Забайкалья развиты трещинные воды зоны выветривания и трещинно-жильные воды зоны тектонических нарушений.

Дебиты родников колеблются от 0,2 до 2 л/сек. На юго-западе территории развиты воды протерозойских и кембрийских образований с дебитами родников от 0,1 до 10 л/сек. из карбонатных отложений.

В межгорных впадинах широко развиты воды средне-, верхнеюрских, нижнемеловых и четвертичных отложений; средний удельный дебит скважин изменяется от 0,1 до 1,5 л/сек. или до 7 л/сек. из верхних водоносных горизонтов, а дебит родников 0,05—3 л/сек. В пределах Верхне-Зейской депрессии питание рек осуществляется в основном из неогеновых и четвертичных отложений, содержащих подмерзлотные воды с дебитом родников 2—15 л/сек.

В межгорных впадинах Байкало-Селенгинской, Баргузинской, Верхне-Ангарской и других развиты артезианские бассейны порово-пластовых вод, дающих дебиты скважин от 1 до 11 л/сек.

Таким образом, можно видеть, что мегарегион имеет довольно разнообразное гидрогеологическое строение и пеструю водность горизонтов подземных вод. Анализ распределения величин среднемноголетних модулей подземного стока на территории Байкальской складчатой области показал, что они изменяются от 5 до 0,5 л/сек. км^2. Наибольшие значения приурочены к юго-западному углу области. Около 3 л/сек. км^2 наблюдается на склонах хребтов, примыкающих к Байкалу, и в Верхне-Ангарской котловине. В пределах Витимского плато значения модуля минимальные (0,5 л/сек. км^2). Следовательно, имеется необходимость разделения мегарегиона на районы с относительно равными условиями и величинами подземного стока в реки в соответствии с гидрогеологическим описанием. Предварительное разделение было уточнено путем более подробного анализа физико-географических, геологоструктурных и гидрогеологических условий и графиков зависимости минимальных 30-дневных расходов воды от площади бассейна реки. На рис. 44 показаны выделенные районы однозначных условий формирования минимального стока. Аналогичные работы производились и в остальных случаях.

При достаточно подробной гидрогеологической изученности территории и соответствующем масштабе карт, когда имеется возможность выделить с необходимой точностью основные водоносные горизонты, участвующие в питании рек данного гидрогеологического района, т. е. когда за гидрогеологическую основу берется не мегарегион, а регион или более мелкая единица, часто не наблюдается значительного расхождения границ гидрогеологических районов и районов однотипных условий формирования минимального стока. Пример тому территория Курской магнитной аномалии (КМА). Питание рек этой территории осуществляется из 6 основных водоносных комплексов, сменяющих друг друга в широтном направлении (рис. 45).

Произведенный анализ климатических и гидрогеологических условий территории КМА с одновременным изучением зависимости минимального 30-дневного стока показал, что на изучае-

мой территории выделяется 8 районов с однозначными условиями формирования минимального стока. Границы районов в основном совпадают с границами главных водоносных горизонтов, дренируемых реками (рис. 46). Расхождения в границах, наблюдающиеся на территориях одного литологического строения, связаны с различной обводненностью вследствие отличия физико-географических условий (разное количество осадков, разная залесенность водосборов и т. п.). Некоторое несовпадение

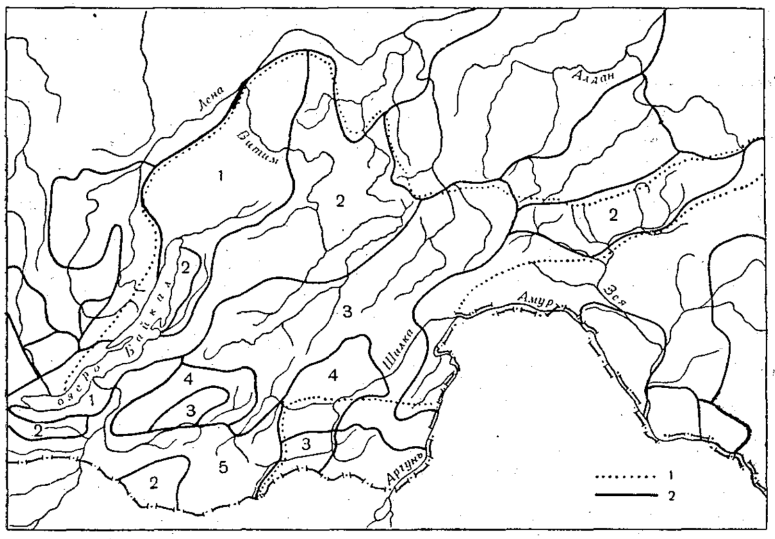


Рис. 44. Районы однотипных условий формирования минимального 30-дневного стока малых рек на территории Байкальской складчатой области в летне-осенний сезон.
1 — граница мегарегиона, *2* — граница районов.

границ происходит и в результате принятой методики наведения границ районов однотипных условий формирования минимального стока, о которой будет сказано ниже.

На основании анализа гидрогеологического строения регионов, морфологических характеристик бассейнов рек (рельефа, подстилающей поверхности, глубины эрозионного вреза и т. п.), величины подземного стока в реки исследуемых районов и климатических условий (осадков, температуры воздуха, испарения) произведено районирование территории СССР по единому виду зависимости минимальных 30-дневных расходов воды от площади бассейна реки.

Границы районов однотипных условий формирования минимального 30-дневного стока проводились по границам резкой смены гидрогеологических комплексов и по границам водоразделов с учетом веса площади бассейна с едиными

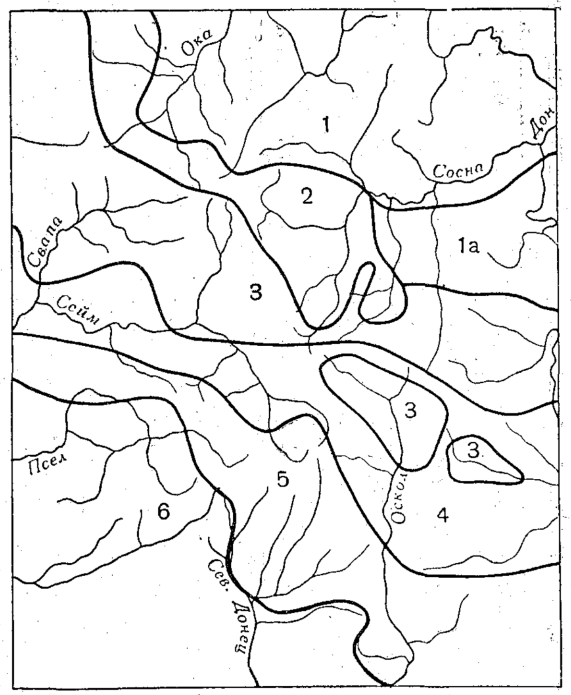


Рис. 45. Карта основных водоносных горизонтов, дренируемых реками на территории КМА.
1 — I, *1а* — D_3 fm_2; *2* — Cr_{1-2} al+cm; *3* — Cr_1 ap+nc; *4* — Cr_2 t+cn; *5* — Cr_2 st; *6* — Cr_2 cp+m.

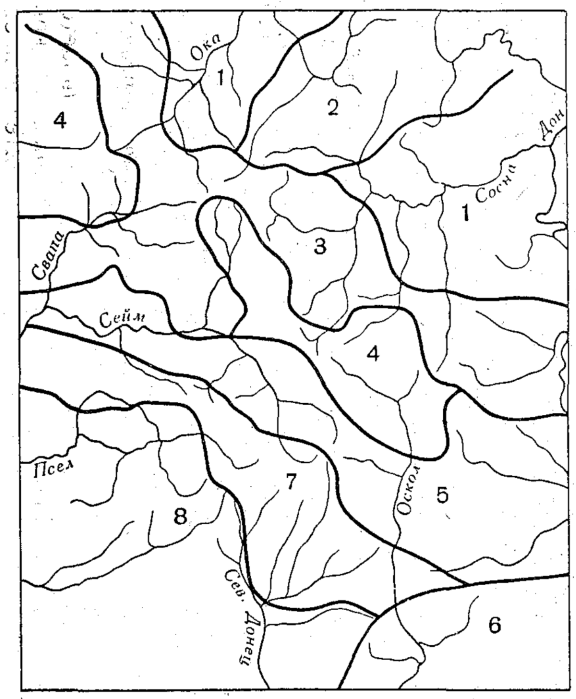


Рис. 46. Районы однотипных условий формирования минимального 30-дневного стока малых рек в летне-осенний сезон на территории КМА.

гидрогеологическими условиями в общей площади. Например, в случае смены в бассейне реки гидрогеологических комплексов изменения в величине стока реки будут наблюдаться не сразу, а постепенно. Наиболее заметное изменение произойдет при слиянии двух потоков, формирование минимального стока одного из которых происходит полностью в других гидрогеологических условиях. В этом случае граница района проходит по водоразделу между этими потоками и через место их слияния.

Зависимость минимального 30-дневного расхода воды от площади бассейна реки имеет параболический вид и описывается уравнением

$$Q_{\text{мин}} = aF^n, \tag{45}$$

где $Q_{\text{мин}}$ — минимальный 30-дневный расход воды, средний за многолетний период, соответственно за зимний или летне-осенний сезоны в м³/сек.; F — площадь бассейна реки в км²; a, n — параметры, характеризующие условия формирования минимального 30-дневного стока.

Для районов, где интенсивность питания рек увеличивается с площадью бассейна, параметр n больше 1,0 (рис. 47, кривые *I*, *II*). В районах с обратным соотношением интенсивности питания и площади бассейна, т. е. при более интенсивном питании в верховьях бассейна реки, чем в среднем и нижнем течении, параметр n меньше 1,0 (рис. 47, кривые *III*, *IV*).

При наличии в данном районе интенсивного подземного питания вследствие того, что подземный бассейн больше поверхностного (выходы глубоких трещинных вод, подпитывание из водоносных горизонтов других бассейнов, хорошая гидравлическая связь с глубокими водоносными горизонтами, обычно не участвующими в питании рек — зона замедленного водообмена и т. п.), уравнение получает вид

$$Q_{\text{мин}} = a(F + f)^n, \tag{46}$$

где f характеризует среднюю величину площади бассейна, дающей дополнительное питание рекам данного района.

Для районов, где наблюдаются явления отсутствия стока на части рек в какой-либо сезон (рис. 47, кривая *IV*), параметр f характеризует площадь бассейна с отсутствием стока (в км²), и уравнение получает вид

$$Q_{\text{мин}} = a(F - f)^n. \tag{47}$$

Влияние площади бассейна, вернее, его физико-географических условий, на величину минимального стока наблюдается не только для равнинных, но и для возвышенных и некоторых горных районов, поскольку основным стокообразующим фактором в период минимального стока в этих районах также являются

гидрогеологические условия. Это подтверждается исследованиями и других авторов. Так, в результате изучения условий формирования минимального стока рек Горного Алтая А. М. Комлев и Г. А. Орлов пришли к заключению, что минимальный сток рек «обязан своим происхождением почти исключительно подземным (или грунтовым) водам, в значительной мере зависит от физико-географических факторов — климата,

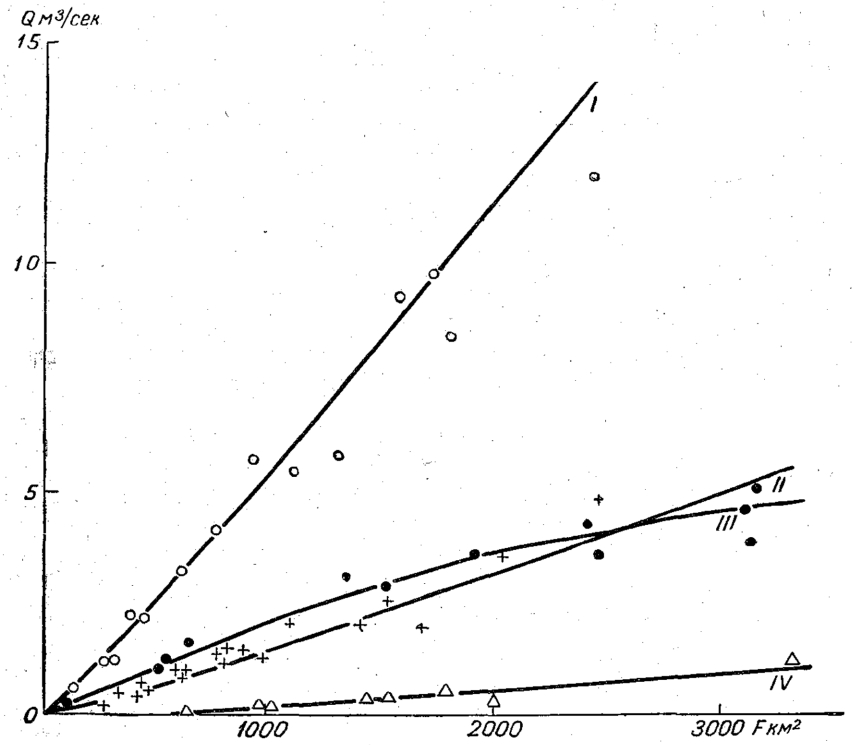


Рис. 47. Зависимость минимального 30-дневного расхода воды от площади бассейна реки.

геологии, гидрогеологии, геоморфологии водосбора. Значительную роль играет также величина бассейна».[1]

Высотное положение водосбора имеет существенное значение для формирования поверхностного стока. Для минимального стока его роль уменьшается, так как величина стока

[1] А. М. Комлев, Г. А. Орлов. Минимальный сток рек Горного Алтая и его многолетняя изменчивость. Изв. Алтайского отд. Геогр. общ-ва СССР, вып. 5, Барнаул, 1965.

определяется в основном гидрогеологическими условиями территории и характером подстилающей поверхности, оказывающей значительное влияние на величину питания подземных вод.

Всего на территории СССР (кроме Кавказа и Средней Азии) выделено 148 районов с одинаковыми условиями формирования минимального стока на малых реках в летне-осенний сезон и 158 районов — в зимний сезон. Для рек зоны избыточного и достаточного увлажнения характерно увеличение интенсивности питания подземными водами с увеличением длины реки и площади ее бассейна. На реках засушливых областей (зона недостаточного увлажнения) в некоторых районах наиболее интенсивное питание может наблюдаться только в верховьях. По мере увеличения бассейна оно будет уменьшаться. Это происходит, например, в районах, занятых поглощающим карстом, или при смене водообильных горизонтов малообводненными, а также в результате значительного увеличения количества осадков, выпадающих на водоразделах рек или в высокогорной части бассейна, которая имеет бóльшие отметки высот, вызывающие и выпадение большего количества осадков.

Уменьшение минимального стока может наблюдаться даже при одинаковой интенсивности питания по длине реки вследствие включения в бассейн реки бессточных территорий или увеличения потерь стока на испарение и инфильтрацию воды в берега и ложе реки.

В некоторых районах наблюдается различная интенсивность подземного питания рек по их длине в разные сезоны. Если интенсивность подземного питания рек в значительной степени зависит от климатических факторов (осадки, испарение), то ее уменьшение по длине реки наблюдается преимущественно только в сезон, когда наиболее сильно проявляется влияние этих факторов. Если же взаимодействие реки с подземными водами в основном определяется гидрогеологическими факторами, то одинаковый характер питания сохраняется в оба сезона. Наиболее интенсивное уменьшение питания рек в период минимального стока с увеличением площади бассейна наблюдается на территории междуречья Камы, Белой, Самары на ЕТС и на реках Северного Казахстана, в некоторых районах Прибайкалья, а также на восточных склонах хребта Сихотэ-Алинь (бассейн р. Уссури) и в южной части Камчатки в летне-осенний сезон. Большое значение в увеличении интенсивности питания в верховьях рек имеют осадки. Поэтому, например, на реках Корякско-Камчатской области наблюдается уменьшение интенсивности питания по длине реки, так как здесь наиболее обводнены атмосферными осадками возвышенные части водосборов. В зимний сезон уменьшению стока в значительной степени способствует образование наледей в руслах и на водосборах рек. Нарастание величины минимального стока может отставать от степени

увеличения площади бассейна также и за счет увеличения площади болот в бассейне, отрицательно влияющих на величину минимального стока, что наблюдается, например, на Западно-Сибирской низменности.

Изложенный метод расчета минимального стока позволяет получать данные, не производя полевых работ, с затратой минимального количества средств и времени. Конечно, он еще не является достаточно совершенным, чтобы абсолютно исключить потребность в проведении полевых работ при проектировании особенно важных объектов, но позволяет в подавляющем числе случаев судить с достаточной степенью надежности о возможных величинах забора воды из рек в период минимального стока. Предлагаемый метод расчета минимального стока может дать значительную экономию средств как за счет ускорения процесса получения необходимых стоковых данных, так и за счет повышения надежности данных по сравнению с существующими методами, что подтверждается точностью расчетов по разным методам.

Так, наиболее часто применяемые в практике проектирования методы Н. Д. Антонова, М. Э. Шевелева, Б. В. Полякова для расчета минимального месячного стока малых рек дают среднюю ошибку для большинства рек от ±30 до +400% при максимальной ошибке в 4—5 раз больше. Произведенные для 1500 пунктов расчеты по предложенной методике дали среднюю ошибку ±15—20% при максимальной ±50—90%. Таким образом, применяемые до настоящего времени формулы для расчета минимального месячного стока малых рек, как правило, завышают его величину в 2—3 раза и больше, особенно на реках слабо изученных в гидрологическом отношении районов и в районах со сложными условиями формирования минимального стока. Расчет по предлагаемой методике позволяет с большей надежностью определять минимальные расходы воды на малых реках, играющих значительную роль в народном хозяйстве, особенно в водоснабжении.

ЧАСТЬ III

ПОДЗЕМНОЕ ПИТАНИЕ РЕК СССР

Глава 7

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНОГО ПИТАНИЯ РЕК СССР

Закономерности формирования подземного стока как одного из важнейших звеньев общего водного баланса суши определяются сложным комплексом природных факторов — геологических, гидрогеологических, геоморфологических, климатических, гидрологических и др. В зависимости от различного сочетания действий этих факторов в различных физико-географических условиях степень воздействия их на подземный сток может изменяться, и выявление значения отдельных факторов представляет собой сложную задачу. Комплексное изучение влияния всех факторов в их сложной взаимосвязи и взаимодействии применительно к конкретным природным условиям позволяет определить роль отдельных факторов в формировании подземного стока и выделить главные из них, определяющие общие закономерности явлений.

При изучении особенностей формирования подземного питания рек на обширной территории нашей страны большое значение имеет правильный учет общих физико-географических условий, на фоне которых происходит подземный сток в реки. При региональной оценке подземного питания рек практически невозможно описать все природные особенности его развития в отдельных речных бассейнах. Но дальнейшее развитие исследований подземного стока в реки на основе установления общих закономерностей формирования этого многообразного процесса в первую очередь должно базироваться на выявлении основных его особенностей в характерных природных условиях. В первую очередь это относится к особенностям климата и общих структурно-гидрологических условий формирования режима подземных вод и стока их в реки.

Поэтому ниже приводятся данные об элементах водного баланса территории страны как характеристике климатических и гидрологических факторов формирования режима речного стока и подземных вод, структурно-гидролого-гидрогеологическое районирование, в котором в общей форме находят выражение общие закономерности влияния на подземный сток геологических, геоморфологических и гидрологических факторов, а также структурно-тектонические особенности строения территории СССР.

Главной особенностью климатических условий и распределения элементов водного баланса на обширных пространствах Советского Союза является их общее зональное изменение с севера на юг, в соответствии с законами географической зональности.

При оценке влияния климатических факторов на подземный сток прежде всего выделяются атмосферные осадки и испарение, в значительной мере определяющие питание подземных вод и поэтому наиболее действенно оказывающие влияние на особенности его формирования. В то же время эти элементы вместе с речным стоком представляют собой основные составляющие водного баланса территории и служат основой для определения роли естественных ресурсов подземных вод в водном балансе СССР.

Атмосферные осадки, составляющие приходную часть водного баланса, являются основным источником питания подземных вод. Среднемноголетние значения атмосферных осадков и их распределение по территории страны характеризуются картой изолиний осадков [1] (рис. 48).

Как видно из карты, общая закономерность распределения атмосферных осадков определяется местоположением данного района по отношению к морскому побережью, откуда поступают влажные массы воздуха, и во многих случаях связана с увеличением осадков, обусловленным влиянием рельефа.

Увеличение осадков на возвышенностях равнин и в горах, определяемое влиянием рельефа на циркуляцию атмосферы, в соответствии с основным направлением циклонов харкатеризуется следующими закономерностями: в пределах Русской плиты увеличение осадков наблюдается на западных склонах возвышенностей, на Урале — на западном склоне, в Средней Азии — на западных и юго-западных склонах, на Алтае и

[1] Схематическая карта среднего годового слоя осадков составлена в ГГИ на основе расчета нормы осадков с учетом дифференцированных поправок на неполный учет осадков из-за влияния ветра (выдувание осадков, особенно выпадающих в виде снега) и на потери осадков вследствие смачивания ведра прибора и испарения из него, с использованием карты осадков ГГО издания 1960 г. (Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза, 1967).

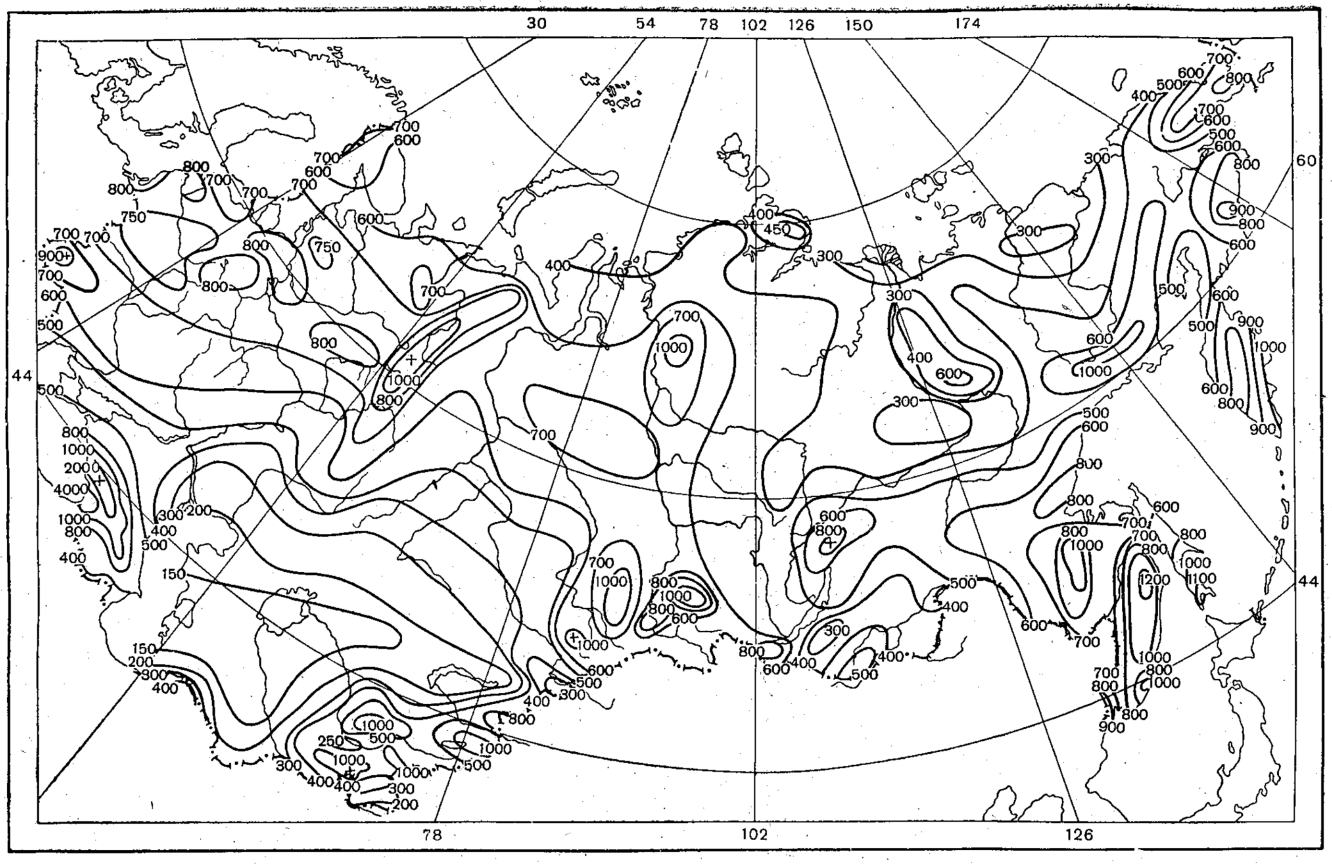


Рис. 48. Схематическая карта среднего годового количества атмосферных осадков на территории СССР, в мм (по А. П. Бочкову).

Саянах — на западных и северо-западных, на Дальнем Востоке — на восточных и юго-восточных.

Испарение с поверхности речных бассейнов является основной расходной частью их водного баланса. В то же время испарение оказывает существенное воздействие на формирование естественных ресурсов подземных вод и на режим грунтовых вод в целом. В первую очередь это определяется тем, что при инфильтрации атмосферных осадков в результате испарения происходит резкое изменение величины питания грунтовых вод. Одновременно с этим процесс испарения в зоне аэрации при неглубоком залегании грунтовых вод может приводить к уменьшению их запасов, тем самым снижая естественные ресурсы подземных вод.

Карта суммарного испарения с поверхности суши, составленная в ГГИ, представлена на рис. 49.

Анализ закономерности распределения суммарного испарения показывает, что в изменении его величин по территории СССР ярко выражены черты географической зональности, отражающие такую же закономерность радиационного баланса.

Представленная карта наглядно показывает хорошо известный факт сравнительно близких значений величин испарения по побережью северных морей и в Средней Азии (150 мм) при значительном различии здесь количеств осадков (300—400 и 150—200 мм соответственно). Если на севере фактором, обусловливающим низкое испарение, является недостаток тепла, то на юге низкое испарение определяется малым количеством атмосферных осадков при больших потенциалах возможного испарения в зависимости от радиационного баланса.

В оценке роли естественных ресурсов подземных вод как одного из самостоятельных источников водных ресурсов имеют большое значение данные об общем речном стоке как элементе водного баланса.

Основой генерализованной характеристики распределения общего речного стока на территории СССР может служить карта среднего годового стока рек СССР (в мм слоя), составленная в ГГИ (рис. 50).

Распределение речного стока на территории СССР в общих чертах отражает географическую зональность и вертикальную поясность, что говорит об определяющем влиянии на его формирование климатических факторов.

При средней величине стока для всей территории СССР, равной 105 мм, амплитуда изменения среднего стока составляет около 3150 мм, а общие ресурсы стока достигают 4384 км^3 в год.

В основу районирования территории СССР по условиям формирования подземного стока, принятого при региональной оценке и составлении карт основных параметров подземного стока, положен структурно-гидролого-гидрогеологический принцип,

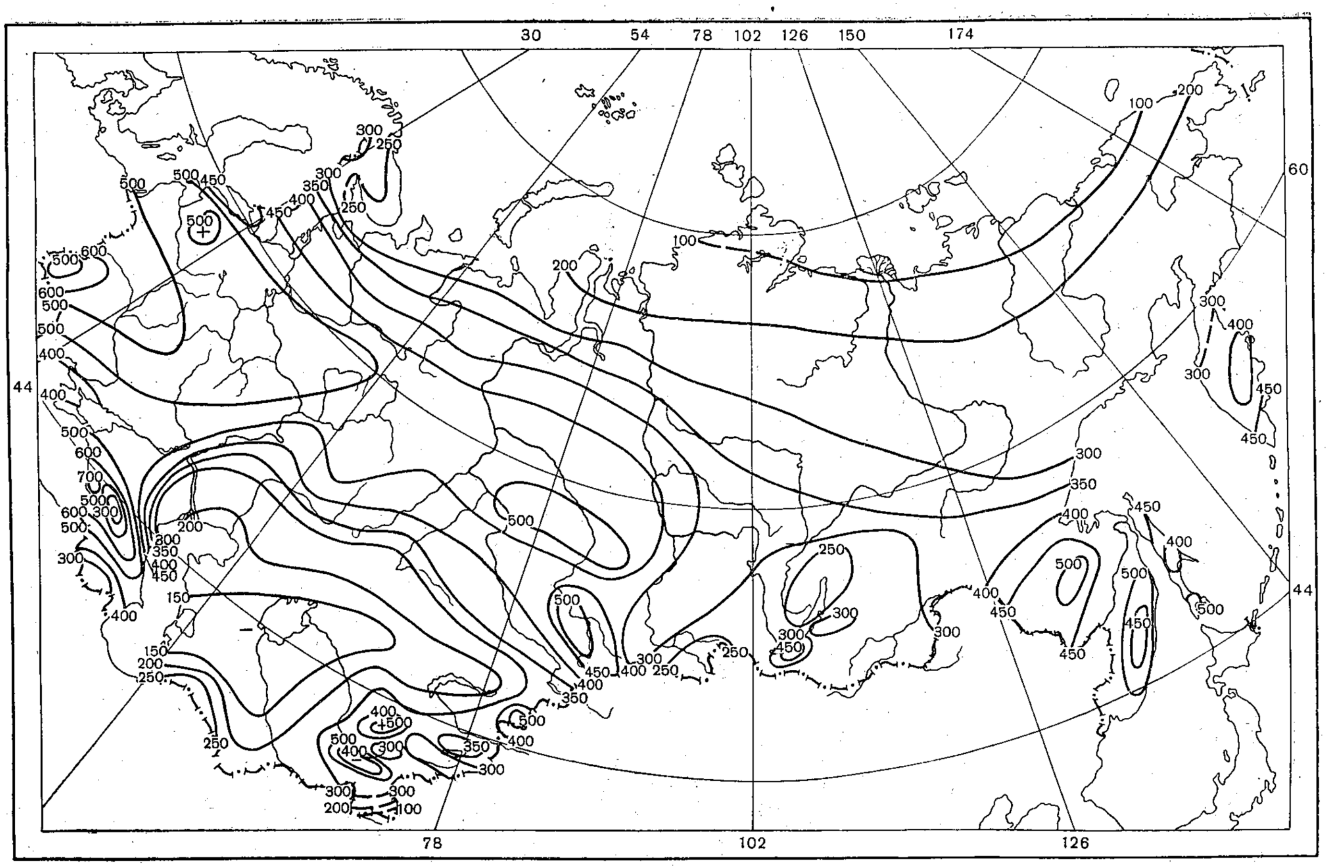


Рис. 49. Карта среднего годового слоя испарения на территории СССР, в мм (по А. П. Бочкову).

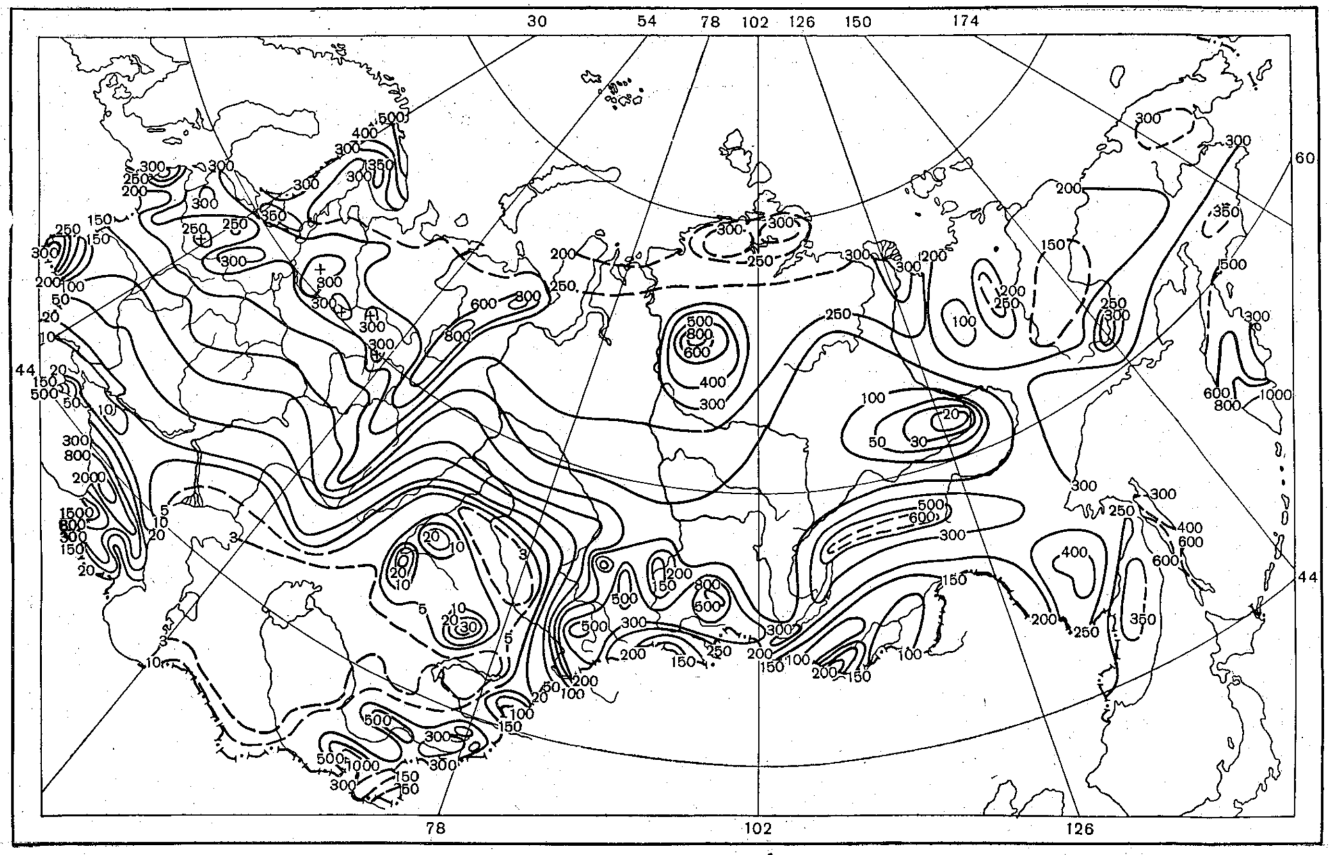


Рис. 50. Карта среднего годового стока рек СССР, в мм (по К. П. Воскресенскому).

позволяющий отразить основные закономерности формирования подземного стока и водного баланса с учетом влияния на них основных природных факторов (рис. 51) [1].

Наиболее общие региональные закономерности распределения и формирования подземного стока для территории Советского Союза в первую очередь определяются ее структурными особенностями. Поэтому наиболее контрастные особенности распределения, динамики и режима подземного стока можно выявить при сравнении условий его формирования для основных геоструктурных подразделений территории — на платформах и в горноскладчатых областях.

В соответствии с различием условий формирования подземного стока в пределах платформ выделяются наиболее крупные единицы районирования — **мегарегионы плит,** складчатые фундаменты которых перекрыты чехлом недислоцированных или слабо дислоцированных пород, и **мегарегионы щитов** — обнаженных выступов кристаллического фундамента платформ.

Мегарегионы плит представляют собой в гидрогеологическом отношении системы крупных артезианских бассейнов платформенного типа, в которых широкое распространение получают пластовые, порово-пластовые и трещинно-пластовые воды.

Значительная мощность осадочной толщи мегарегионов плит обусловливает возможность развития подземного стока в трех основных вертикальных зонах (ярусах).

В верхних слоях этой толщи получает развитие зона (ярус) интенсивного подземного стока, формирующегося под дренирующим воздействием преимущественно местной гидрографической сети и озер. По побережьям морей разгрузка подземных вод в зоне интенсивного стока может частично происходить непосредственно в моря, а в аридных и полуаридных областях страны на формирование стока в этой зоне оказывает влияние расход подземных вод в бессточных впадинах, связанный с интенсивным испарением.

Подземный сток этой зоны, как правило, имеет локальный характер и благодаря относительно высокой связи подземных вод с атмосферными и поверхностными водами находится под воздействием сезонных изменений гидрометеорологических факторов. Влияние местных базисов дренирования на подземные воды зоны интенсивного стока определяет его большую роль в формировании подземной составляющей водного баланса речных бассейнов.

---

[1] Принципы районирования территории СССР по условиям формирования подземного стока разработаны Б. И. Куделиным, Н. А. Мариновым, О. В. Поповым и Д. С. Соколовым. Практическая работа по районированию выполнена И. Ф. Фиделли и В. П. Калужниковой при участии всех районных гидрогеологов и гидрологов. Полное описание принципов районирования дано в монографии под редакцией Б. И. Куделина [42].

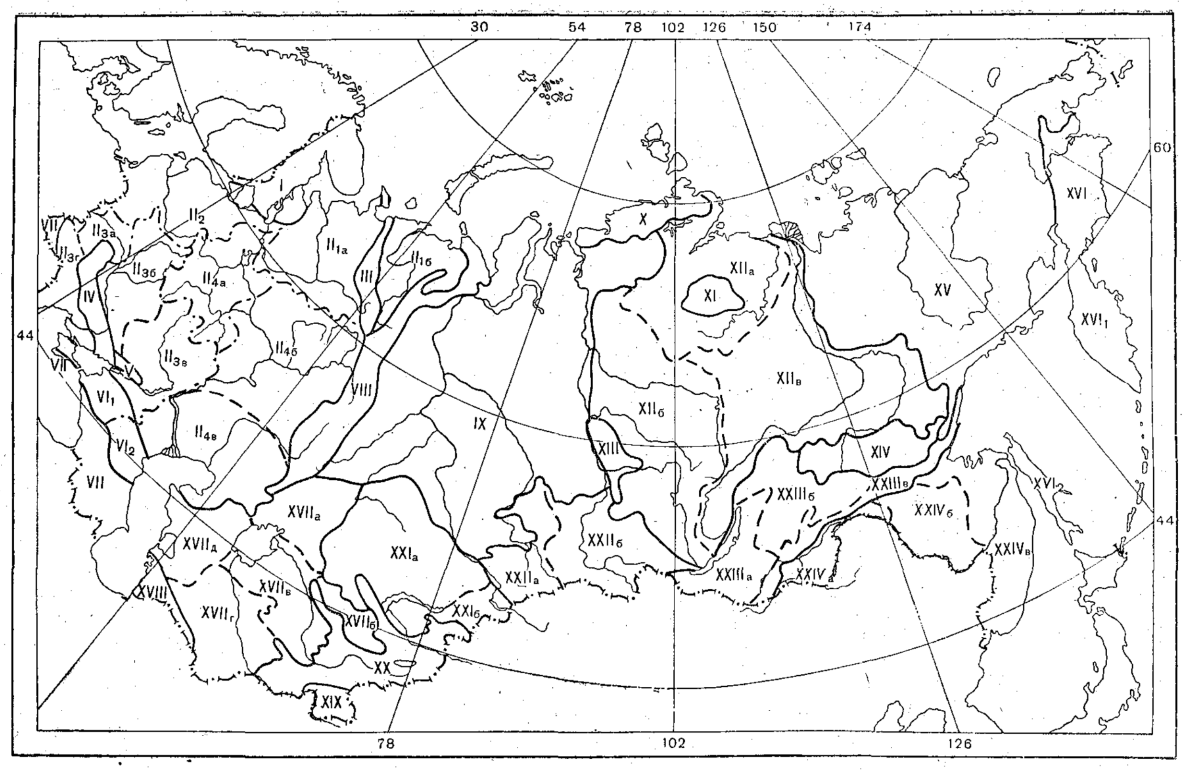


Рис. 51. Районирование территории СССР по условиям формирования подземного стока [42].

Римскими цифрами обозначаются номера: I — мегарегионов, I_3 — регионов, $I_{3а}$ — районов. I — Балтийский щит; II — Русская плита: II_1 — бассейн северных морей ЕТС, $II_{1а}$ — бассейн р. Северной Двины, $II_{1б}$ — бассейн р. Печоры; II_2 — бассейн Балтийского моря; II_3 — бассейн Черного и Азовского морей, $II_{3а}$ — бассейн р. Припяти, $II_{3б}$ — бассейн р. Днепра, $II_{3в}$ — бассейн р. Дона, $II_{3г}$ — Причерно-

морский; II_4 — бассейн Каспийского моря, $II_{4а}$ — Верхневолжский, $II_{4б}$ — Волго-Камский, $II_{4в}$ — Прикаспийский; *III* — Тиманский кряж; *IV* — Украинский щит; *V* — Донецкий кряж; *VI* — Скифская плита: VI_1 — бассейн Черного и Азовского морей — Степной Крым и Западное Предкавказье, VI_2 — бассейн Каспийского моря — Восточное Предкавказье; *VII* — Карпатско-Крымско-Кавказская горноскладчатая область; *VIII* — Уральская горноскладчатая область; *IX* — Западно-Сибирская плита; *X* — Таймырская складчатая область; *XI* — Анабарский щит; *XII* — Сибирская платформа: $XII_а$ — бассейн рек Хатанги, Анабара, Оленёка, $XII_б$ — бассейн р. Енисея, $XII_в$ — бассейн р. Лены; *XIII* — Енисейский кряж; *XIV* — Алданский щит; *XV* — Верхояно-Чукотская горноскладчатая область; *XVI* — Корякско-Камчатская и Сахалинская горноскладчатые области: XVI_1 — бассейны Берингова и Охотского морей (Корякско-Камчатская область), XVI_2 — бассейн Охотского моря и Татарского пролива (Сахалин); *XVII* — Туранская плита: $XVII_а$ — Тургайский, $XVII_б$ — Чуйский, $XVII_в$ — Сырдарьинский, $XVII_г$ — Амударьинский, $XVII_д$ — район Устюрта и Мангышлака; *XVIII* — Копетдагская горноскладчатая область; *XIX* — Памирская горноскладчатая область; *XX* — Джунгаро-Тяньшанская горноскладчатая область; *XXI* — Центрально-Казахстанская горноскладчатая область: $XXI_а$ — Центрально-Казахстанский, $XXI_б$ — Алаколь-Балханский; *XXII* — Саяно-Алтайская горноскладчатая область: $XXII_а$ — бассейн Верхней Оби, $XXII_б$ — бассейн Верхнего Енисея, *XXIII* — Байкальская складчатая область: $XXIII_а$ — бассейн оз. Байкал, $XXIII_б$ — бассейн правых притоков р. Лены, $XXIII_в$ — бассейн левых притоков р. Шилки; *XXIV* — Амурская и Сихотэ-Алиньская горноскладчатая область: $XXIV_а$ — бассейн Верхнего Амура, $XXIV_б$ — бассейн Среднего Амура, $XXIV_в$ — бассейн Нижнего Амура.

Сроки возобновления подземных вод зоны в зависимости от степени дренированности измеряются днями, годами, десятками и сотнями лет. По химическому составу в зоне преобладают пресные воды гидрокарбонатного класса. В условиях аридного и полуаридного климата в зоне интенсивного стока возобновление подземных вод, как правило, проходит в большие промежутки времени, и здесь обычно отмечается повышенная минерализация воды.

Среднюю часть толщи осадочных пород на плитах занимает зона (ярус) замедленного подземного стока, связанного главным образом с дренирующим воздействием более крупных рек, глубоких озер и морских впадин. Подземный сток зоны в большинстве случаев имеет региональный, реже — локальный характер. Региональный характер стока в значительной мере определяется уменьшением роли местных базисов дренирования в формировании подземного стока. Степень влияния на формирование подземного стока местных гидрометеорологических факторов по сравнению с зоной интенсивного стока значительно понижается.

При оценке естественных ресурсов подземных вод, формирующихся в зоне замедленного подземного стока, и сопоставлении их с другими элементами водного баланса речных бассейнов региональный характер стока приводит к необходимости составления баланса бассейнов относительно больших площадей, охватывающих области питания и разгрузки подземных вод.

Естественная зарегулированность подземного стока в таких бассейнах обусловливает необходимость при анализе водного баланса рассматривать его в многолетнем аспекте с учетом

возможности формирования переходящих из года в год больших запасов подземных вод

Сроки возобновления подземных вод зоны замедленного стока могут изменяться от сотен до тысяч лет. По химическому составу подземные воды относятся к смешанным водам гидрокарбонатного, сульфатного и хлоридного классов, по степени минерализации являются пресными или солоноватыми.

Зона (ярус) весьма замедленного подземного стока, занимающая наиболее глубокие слои осадочной толщи, определяется дренирующим воздействием глубоких разломов земной коры, диопировых структур соляных куполов, дренирующим влиянием глубоких участков морских и океанических впадин. Подземный сток имеет региональный характер в пределах больших участков платформ. На формирование подземного стока в этой зоне влияние климатических факторов практически не сказывается. Сроки возобновления вод зоны измеряются десятками, сотнями, тысячами и миллионами лет. Подземные воды здесь имеют высокую степень концентрации солей и представляют собой соленые воды и рассолы преимущественно хлоридного состава.

На территории ЕТС выделяются мегарегионы Русской и Скифской плит, на АТС — Западно-Сибирской, Сибирской и Тургайской плит.

Мегарегионы щитов представляют собой типичные бассейны трещинных и трещинно-грунтовых вод в зоне выветривания и трещинно-жильных вод по зонам разломов. Мегарегионы щитов, в отличие от плит, характеризуются развитием только верхней зоны интенсивного подземного стока, формирующейся под дренирующим воздействием местной гидрографической сети и в меньшей мере зон тектонических нарушений. Локальный характер развития подземного стока в относительно небольших бассейнах — блоках, дренируемых руслами основных рек, развитых в границах щитов, как правило, обеспечивает замкнутый водный баланс отдельных речных бассейнов. Формирование подземного стока в пределах щитов тесно связано с относительно интенсивным воздействием гидрометеорологических факторов и довольно высокой реакцией подземных вод на их изменения. Основным, ведущим фактором в этих условиях в первую очередь являются атмосферные осадки.

Сроки возобновления подземных вод здесь более продолжительные, чем в зоне интенсивного подземного стока плит. По химическому составу преобладают пресные воды гидрокарбонатного класса.

В пределах ЕТС выделяются мегарегионы Балтийского и Украинского щитов, на АТС — Анабарского и Алданского щитов.

Мегарегионы горноскладчатых областей характеризуются преимущественным распространением бассейнов трещинных, тре-

щинно-пластовых, трещинно-карстовых и трещинно-жильных вод, а также малых артезианских бассейнов межгорных впадин, имеющих подчиненное значение.

В горноскладчатых областях преимущественное распространение получает верхняя зона интенсивного подземного стока. Локальный характер развития подземного стока, относительно небольшие размеры подземных водосборов и интенсивно развитая гидрографическая сеть этих областей определяют большую динамичность подземного стока и небольшие сроки возобновления подземных вод. В водном балансе речных бассейнов этих мегарегионов может иметь значение водообмен между участками подземных водосборов, расположенных в горных и предгорных районах. В артезианских бассейнах межгорных впадин во многих случаях получают развитие все три вертикальные зоны подземного стока различной интенсивности. В питании подземных вод таких артезианских бассейнов имеет значение транзитный подземный сток из речных бассейнов горных районов, что должно учитываться при воднобалансовых расчетах и определении роли подземных вод в формировании водных ресурсов межгорных впадин.

К категории мегарегионов горноскладчатых областей относятся на ЕТС мегарегионы Карпатско-Крымско-Кавказской и Уральской горноскладчатых областей, Тиманского кряжа, Донецкого кряжа; на АТС — мегарегионы Таймырской складчатой области, Енисейского кряжа, Верхояно-Чукотской, Корякско-Камчатской, Сахалинской, Копетдагской, Памирской, Джунгаро-Тяньшанской, Центрально-Казахстанской, Саяно-Алтайской горноскладчатых областей, Байкальской складчатой области и Сихотэ-Алиньской горноскладчатой области.

Таким образом, уже само расположение определенного района страны в пределах того или иного геоструктурного элемента ее территории позволяет определить общие особенности формирования и режима подземного стока в границах этого района.

Установленная в гидрогеологии тесная связь особенностей формирования подземного стока с орографическими элементами земной поверхности, а также приуроченность бассейнов подземного стока зоны интенсивного водообмена к определенным бассейнам рек, русла которых определяют базис дренирования подземных вод этой зоны, позволяют при региональном исследовании подземного стока использовать орографический принцип районирования территории мегарегионов. Указанный принцип хорошо подтверждается региональными гидрогеологическими исследованиями, результаты которых показывают в очень многих случаях совпадение границ областей питания артезианских бассейнов с современными орографическими водоразделами и зависимость от положения этих водоразделов общей направленности подземного стока к основным базисам дренирования.

Поэтому для учета особенностей формирования подземного стока внутри границ обширных мегарегионов, выделенных с учетом геологических структур, используются орографические водоразделы, в соответствии с положением которых в пределах мегарегионов могут быть выделены регионы, отвечающие бассейнам стока морей.

Наиболее наглядно целесообразность такого подразделения некоторых мегарегионов можно видеть на примере Русской плиты. Как по общим физико-географическим, так и по гидродинамическим условиям формирования подземного стока и водного баланса артезианских бассейнов на территории мегарегиона четко выделяются четыре региона, отвечающих бассейнам северных морей ЕТС, Балтийского моря, Черного и Азовского морей, а также бассейну Каспийского моря.

На территории Скифской плиты по тому же принципу выделены районы бассейнов Черного и Азовского морей (Степной Крым и Западное Предкавказье) и бассейна Каспийского моря (Восточное Предкавказье). В пределах Корякско-Камчатской и Сахалинской горноскладчатых областей соответственно выделяются регион бассейнов Берингова и Охотского морей и регион бассейна Охотского моря и Татарского пролива.

Более дробной таксономической единицей рассматриваемого районирования является район, границы которого в зависимости от различного сочетания природных условий и гидрогеологических особенностей территории могут в одном случае отражать принадлежность территории к бассейну крупной реки, в другом — учитывать гидрогеологические структуры второго порядка.

В первом случае выделение района связано с особенностями формирования водного баланса бассейна крупной реки с определенным комплексом физико-географических условий. Для региона бассейна северных морей ЕТС таким образом выделены районы: бассейна р. Северной Двины и бассейна р. Печоры; регион Черного и Азовского морей Русской плиты разделен на районы бассейнов рек Припяти, Днепра, Дона и Причерноморский. В последнем районе формирование подземного стока по побережью осуществляется непосредственно под дренирующим воздействием Черного моря.

По принадлежности к бассейнам крупных рек по территории Сибирской платформы выделены районы бассейнов рек Хатанги, Анабара, Оленека (в одном районе), Енисея и Лены; в Саяно-Алтайской горноскладчатой области — районы бассейнов Верхней Оби и Верхнего Енисея, а для Байкальской складчатой области — бассейны оз. Байкал, Верхней Лены и левых притоков р. Шилки.

Некоторые крупные регионы занимают огромные площади, в границах которых особенности формирования подземного стока связаны с гидрогеологическими структурами второго по-

рядка и различием режима подземных вод в артезианских бассейнах, приуроченных к этим структурам. В этом отношении ярким примером является регион бассейна Каспийского моря Русской плиты, большую часть которого занимает бассейн Волги. Здесь выделены: Верхневолжский район, охватывающий в основном территорию Московского артезианского бассейна; Волго-Камский район, отвечающий системе Волго-Камских артезианских бассейнов, и Прикаспийский район, соответствующий Прикаспийскому артезианскому бассейну.

По принципу выделения гидрогеологических структур второго порядка проведено районирование Туранской плиты. Здесь выделены районы Тургайский, Чуйский, Амударьинский и Сырдарьинский, соответственно связанные с границами Тургайского прогиба, Чуйской впадины, Амударьинской и Сырдарьинской синеклиз и приуроченным к ним артезианским бассейнам, а также район Устюрта и Мангышлака.

В некоторых мегарегионах основные особенности формирования подземного стока, непосредственно связанные с наличием внутри мегарегиона гидрогеологических структур второго порядка, позволяют разделить его на районы без выделения бассейнов морей и крупных рек. В пределах Сихотэ-Алиньской горноскладчатой области на этом принципе выделены три района — бассейнов Верхнего, Среднего и Нижнего Амура.

В первом районе, охватывающем верховья Амура до слияния рек Шилки и Аргуни, формирование подземного стока происходит в пределах горных массивов и мелких впадин с приуроченной к ним системой небольших артезианских бассейнов.

Район бассейна Среднего Амура включает в свои границы артезианские бассейны Верхнеамурский, Зейско-Буреинский (в пределах одноименной впадины), Буреинский и системы горных хребтов Малый Хинган, Буреинский, Дусэ-Ахинь, Джакты.

Район бассейна Нижнего Амура занимает территорию, на которой находятся Среднеамурский артезианский бассейн, Эворон-Чукчагырский, Кизийский, Приханнойский, Удинский, Уля-Орельский артезианские бассейны и другие, более мелкие. В границах района подземный сток формируется также в пределах хребтов Сихотэ-Алиньского, восточных отрогов Буреинского и других на междуречье Амура и Тугура.

Таким образом, в этом мегарегионе особенности формирования и режима подземного стока в первую очередь определяются приуроченностью подземных водосборов к гидрогеологическим структурам второго порядка.

Во всех случаях при выделении районов применительно к гидрогеологическим структурам второго порядка наблюдается тесная связь структур с бассейнами поверхностного стока, с особенностями природных условий и формирования водного режима этих бассейнов. В этой закономерности находит отражение

тесная связь условий формирования подземного стока с основными орогидрографическими особенностями территории, отмеченная выше при описании принципа выделения регионов.

Накопленный уже в настоящее время материал по закономерностям формирования подземного стока в зависимости от различных природных факторов позволяет на основе разработанных принципов структурно-гидролого-гидрогеологического районирования производить дальнейшее более детальное выделение природных районов на территории страны, отличающихся более характерными особенностями формирования подземного стока, применительно к отдельным речным бассейнам и даже к отдельным его участкам с учетом возможного влияния местных физико-географических факторов. Особое значение такое детальное районирование приобретает при проектировании управляемого водного режима отдельных речных бассейнов для рационального использования водных ресурсов. В этом случае при составлении водного баланса этих бассейнов, лежащего в основе схемы комплексного использования природных вод, и разработке водохозяйственных балансов открываются широкие возможности более детальной оценки их подземной составляющей и учета возможного подземного водообмена между отдельными речными бассейнами.

Глава 8

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНОГО ПИТАНИЯ РЕК СССР

1. Особенности распределения подземного стока

Выполненные исследования по региональной оценке подземного стока и составленный комплекс карт его основных количественных показателей для всей территории Советского Союза позволили установить общие закономерности формирования подземного стока и особенности его распределения по территории (рис. 52). Эти закономерности в общих чертах сводятся к следующему.

Вполне четко выделяются три основных фактора, влияющих на формирование подземного стока: климат, рельеф и структурно-гидрологическое строение территории. Все эти факторы действуют взаимосвязанно, и величина подземного стока представляет собой обобщенную (интегральную) количественную характеристику весьма сложного природного явления, объединяющего процессы питания, движения и дренирования подземных вод.

Климат придает распределению подземного стока черты ярко выраженной широтной зональности. Это вполне закономерно,

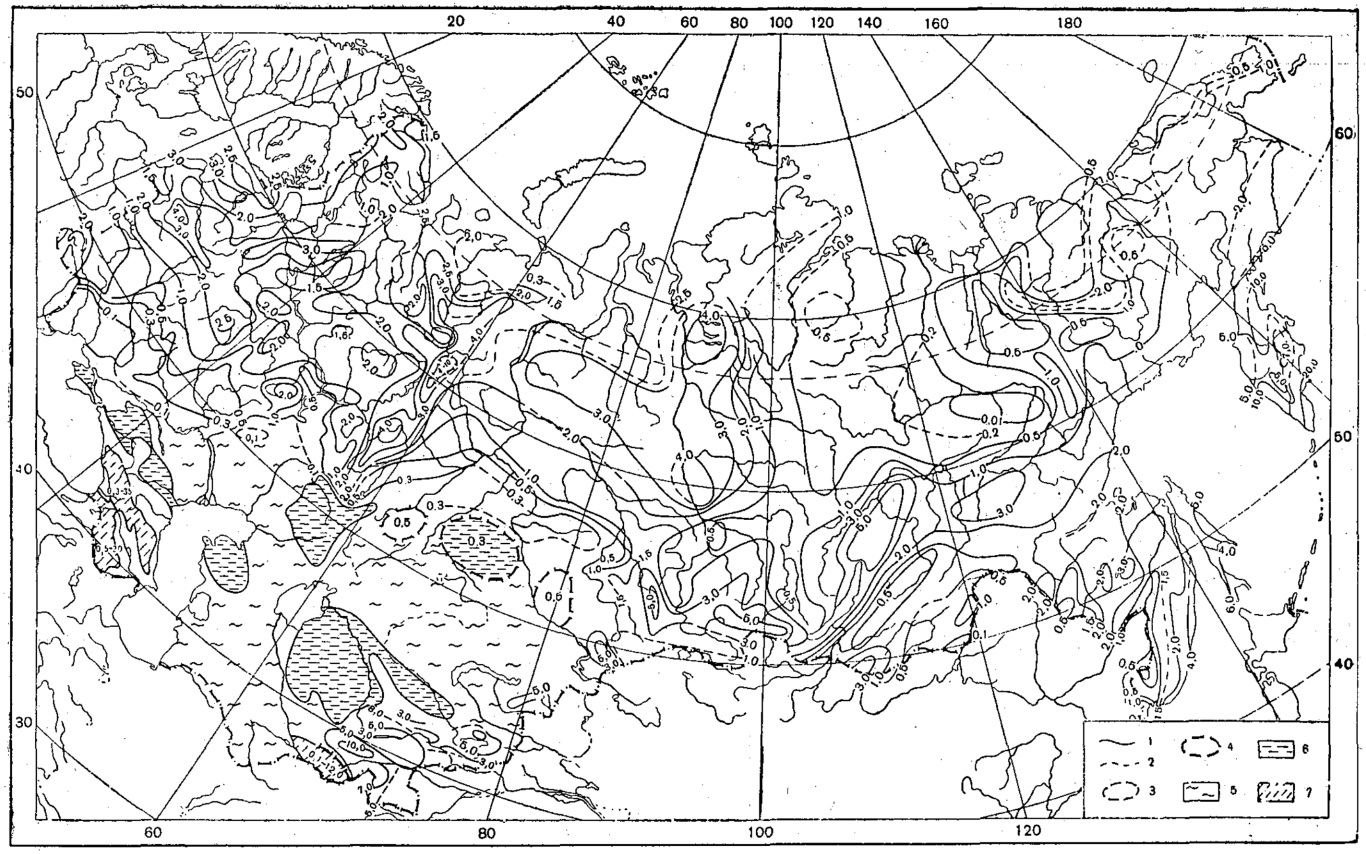


Рис. 52. Распределение подземного стока в реки (модули, л/сек. км^2).

1 — изолинии модулей подземного стока в л/сек. км^2, *2* — то же, рассчитанного приближенно, *3* — контур участков особых условий формирования подземного стока под влиянием карста, *4* — контур участков, для которых расчет подземного стока проведен по водному балансу озер, *5* — область спорадического распространения пресных грунтовых вод, *6* — область распространения грунтовых вод с пестрой минерализацией и наличием стока пресных артезианских вод, *7* — области с колебаниями модулей подземного стока в больших пределах.

если учесть, что величина питания подземных вод определяется в первую очередь количеством выпадающих атмосферных осадков, распределение которых на территории СССР подчиняется географической зональности.

Величины подземного стока на равнинной территории ЕТС, отражая характерную для этих районов общую географическую зональность, закономерно уменьшаются с северо-запада на юго-восток от 4—6 л/сек. с 1 км² в районах Прибалтики до долей литра в степях южных районов России и Украины. Количество атмосферных осадков уменьшается в том же направлении от 700—600 до 400—300 мм в год, а испаряемость возрастает.

Влияние испарения на формирование подземного стока можно оценить следующим сопоставлением. В северных и южных районах ЕТС, где выпадает примерно одно и то же количество осадков (около 300—400 мм в год), величина подземного стока резко различается. Если на побережье северных морей он характеризуется величиной модуля 1—3 л/сек. км², то на юге значение его уменьшается в десятки раз и более.

Указанные черты широтной зональности подземного стока находят отражение и на территории Западной Сибири, где с севера на юг под влиянием тех же причин происходит общее уменьшение модулей от 3,0—2,5 л/сек. км² в районе Обской губы и Енисейского залива до 0,5—0,3 л/сек. км² в Северном Казахстане, Барабинской и Кулундинской степях.

В распределении подземного стока по территории Восточной Сибири также сказывается значительное влияние климатического фактора в сочетании с особыми условиями многолетнемерзлых пород. В общем изменении величин подземного стока (от 0,5 л/сек. с 1 км² на севере до 3—4 л/сек. с 1 км² и более на юге) сказывается изменение климата от арктического и полупустынного до климата типично горных стран при изменении количества осадков от 150—200 мм (север Яно-Индигирской низменности) до 800 мм в год (северная часть Прибайкальского хребта и отроги Верхоянского).

Влияние климатических условий для этих территорий определяет и аналогичные закономерности изменения других характеристик подземного стока (минимального модуля, коэффициента подземного питания и коэффициента подземного стока).

В пределах горных сооружений ЕТС, в Средней Азии, в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке в распределении подземного стока наблюдается вертикальная зональность, связанная с вертикальной климатической поясностью и в первую очередь с увеличением атмосферных осадков с высотой местности. Увеличение подземного стока с высотой наблюдается в пределах горных сооружений Кавказа, Урала, Тянь-Шаня и др. Вертикальная зональность подземного стока в зависимости от атмосферных осадков наиболее ярко может быть показана для

Кавказа, где анализ связи изменения подземного стока с увеличением осадков хорошо обеспечен материалами наблюдений метеорологических станций. В горных районах в однородных гидрогеологических условиях основным фактором, определяющим величину подземного стока и характер его изменения с высотой, является изменение количества осадков с повышением местности.

Для Кавказа эта зависимость находит подтверждение в многочисленных примерах. Однако неоднородность условий формирования подземного стока Горного Кавказа обусловливает для разных гидрогеологических районов или их отдельных участков различные зависимости подземного стока от высоты местности (рис. 53).

Анализ материалов показывает, что кривая зависимости абсолютных величин подземного стока от высоты не повторяет очертание кривой зависимости изменения величины осадков от высоты, что имеет место при изменении общего речного стока в горных районах. Это связано с дополнительным влиянием на величину подземного стока гидрогеологических условий, часто изменяющихся с высотой местности (рис. 53). Поэтому величина высотного градиента подземного стока определяется как градиентом осадков, так и изменением с высотой условий питания подземных вод.

Из анализа материалов следует, что минимальный модуль подземного стока изменяется с увеличением высоты местности медленнее, чем среднегодовой. Это объясняется тем, что минимальный модуль как характеристика подземного стока большей обеспеченности в меньшей мере связан с сезонными изменениями осадков, в большей степени зависит от общих устойчивых запасов подземных вод.

В большей зарегулированности подземного стока находит отражение наличие связей речного и подземного стока с высотой для некоторых районов. Так, например, в восточной части Аджаро-Триалетской горноскладчатой области Малого Кавказа различные экспозиции водораздельных хребтов обусловливают неравномерность количества атмосферных осадков, по-разному изменяющихся с высотой местности. Это обусловливает необходимость выделения здесь трех районов, различающихся по характеру изменения водности рек с высотой. В то же время эта территория характеризуется одной зависимостью подземного стока от высоты (рис. 53), что также в значительной мере объясняется регулирующим влиянием емкости водоносных пластов. В других условиях для одного и того же гидрогеологического района отмечается наличие нескольких кривых зависимостей подземного стока от высоты (рис. 53).

Для горных районов существует связь величины подземного стока в процентах от общего речного стока с высотой местности. Однако зависимость коэффициентов подземного питания

от высоты носит более сложный характер, так как изменение с высотой других физико-географических и геологических факторов одновременно может влиять на поверхностный и подземный сток, но в разном направлении.

Коэффициент подземного стока, в большей мере отражающий гидрогеологические условия местности, не дает четко выраженной зависимости от высоты.

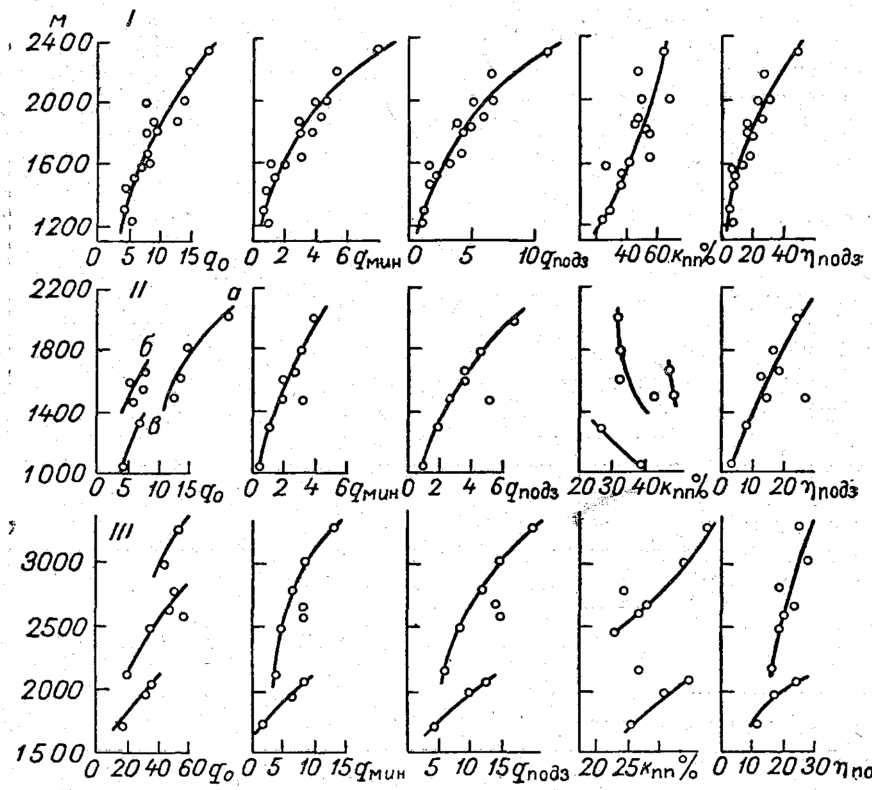


Рис. 53. Зависимость подземного стока от средней высоты водосбора для различных районов Горного Кавказа.

I — Самхетско-Карабахская зона Малого Кавказа, *II* — восточная часть Аджаро-Триалетской области Малого Кавказа, *III* — район высокогорного кристаллического ядра Большого Кавказа. q_0 — среднегодовой модуль общего речного стока в л/сек. км², $q_{мин}$ — минимальный модуль подземного стока в л/сек. км², $q_{подз}$ — среднегодовой модуль подземного стока в л/сек. км², $k_{пп}$% — доля подземной составляющей в общем речном стоке, $\eta_{подз}$ — коэффициент подземного стока в %.

Изменение величин подземного стока с высотой местности, связанное с изменением осадков и гидрогеологических условий, отмечается для всех горных сооружений. Но во многих случаях влияние первого фактора может перекрываться искажающим влиянием гидрогеологических условий. В первую очередь это

относится к увеличению трещиноватости и выветренности пород, уменьшающих условия инфильтрации атмосферных осадков. При этом необходимо учитывать и увеличение инфильтрации за счет увеличения с высотой количества твердых осадков, талые воды которых в большей степени трансформируются в подземный сток, чем кратковременные осадки. Повышение коэффициента подземного питания с высотой местности, связанное с улучшением условий инфильтрации осадков, подтверждается имеющей место

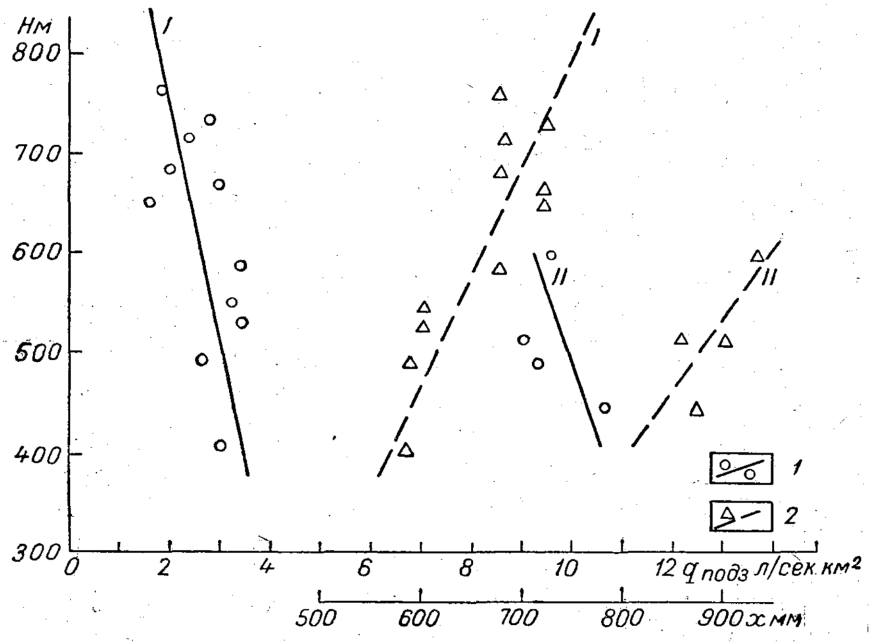


Рис. 54. Зависимость подземного стока в реки западного склона Урала от осадков и средней высоты водосбора.
1 — модуль подземного стока, *2* — осадки; *I* — р Белая, *II* — р. Вишера.

в таких случаях хорошей связью доли подземного стока в речном с коэффициентом подземного стока.

Характер закономерностей связи величины подземного стока с высотой местности может быть проиллюстрирован графиками для Урала, горных районов Средней Азии и Камчатки (рис. 54—56).

В меньшей мере орографическое увеличение осадков сказывается на подземном стоке на равнинах. Однако и здесь на местных возвышенностях, которые, как правило, служат областями питания крупных артезианских бассейнов, также происходит увеличение подземного стока, связанное с повышением

количества осадков (Валдайская, Среднерусская, Приволжская и другие возвышенности).

Геоструктурные особенности территории Советского Союза находят наиболее яркое отражение в различии закономерностей распределения величин и режима подземного стока горноскладчатых областей и равнин.

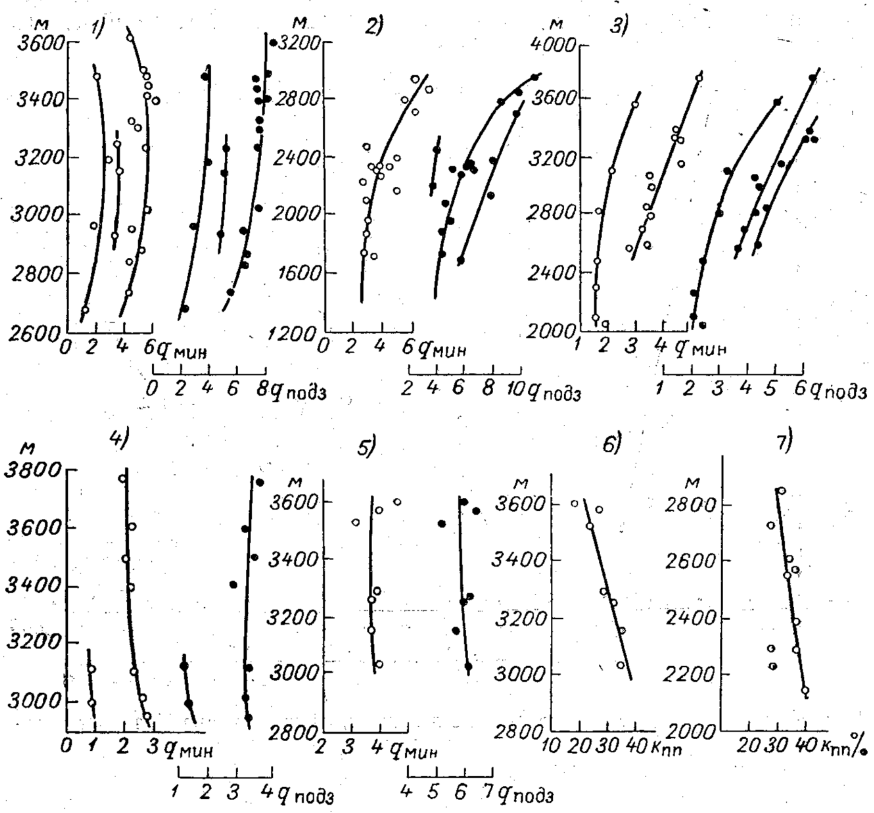


Рис. 55. Зависимость подземного стока от средней высоты водосбора для различных районов Средней Азии.

1 — бассейн оз. Иссык-Куль, *2* — Джунгарский Алатау, *3* — южное обрамление Ферганской впадины, *4* — бассейн р. Нарын, *5*, *6* — восточная часть бассейна р. Зеравшан, *7* — южный склон Гиссарского хребта. Условные обозначения см. рис. 53.

Основной особенностью формирования подземного стока горных сооружений является его высокая динамичность во времени и резкая смена по территории участков с различной величиной. Это обусловлено сильной расчлененностью местности, быстрой сменой геологических условий и характером залегания подземных вод — трещинных, трещинно-жильных и трещинно-карсто-

вых. Указанное в сочетании с климатом обусловливает интенсивный подземный сток в горных районах.

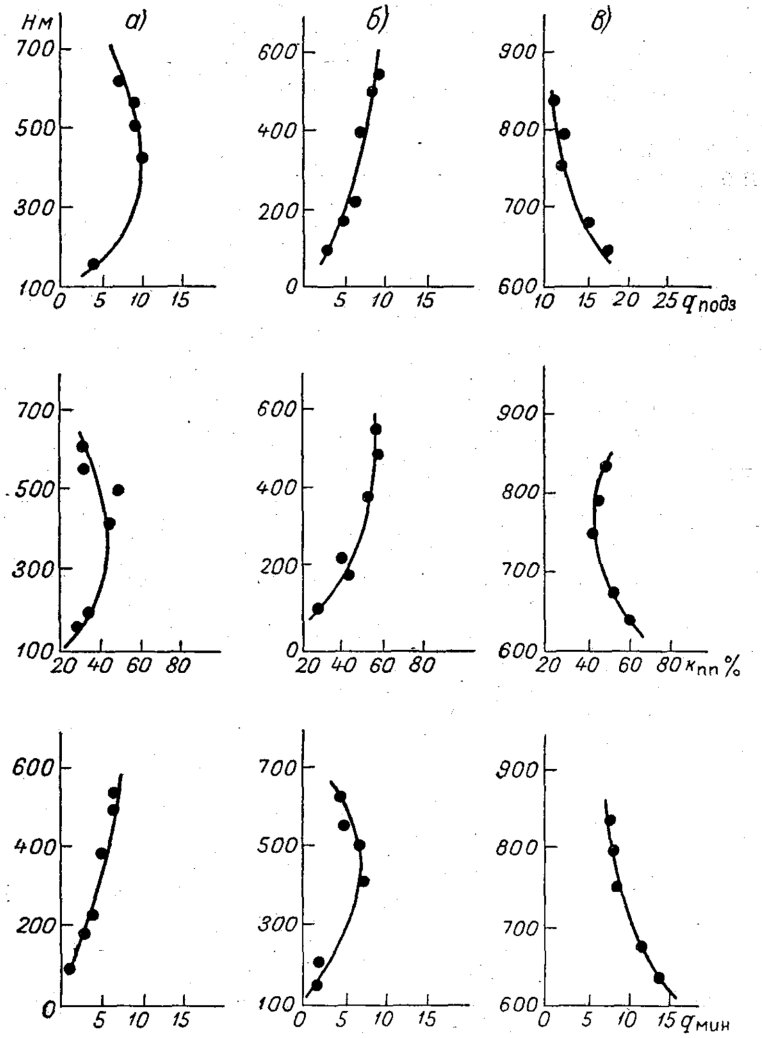


Рис. 56. Зависимость подземного стока в реки от средней высоты водсбора для различных районов Камчатки.

а — район преимущественно терригенных сцементированных, слабо дислоцированных пород (неоген), *б* — район преимущественно терригенных сцементированных, сильно дислоцированных и метаморфизированных пород (палеоген и неоген), *в* — район метаморфических пород (протерозой и палеозой). Условные обозначения см. рис. 53.

Примером проявления геоструктурных особенностей в формировании подземного стока, определяющих повышенный и

более динамичный сток в горных сооружениях, может служить Карпатско-Крымско-Кавказская горноскладчатая область.

Средний модуль подземного стока, определенный для отдельных регионов этой области, составляет: для Кавказа 6,3 л/сек. км^2, для Крыма 2,3 л/сек. км^2, для Карпат 4,3 л/сек. км^2 (при пределах колебания модуля на небольших расстояниях от 0,3 до 33, от 0 до 15 и от 2 до 8 л/сек. км^2 соответственно).

Как можно видеть из сводной таблицы характеристик подземного стока и естественных ресурсов СССР (табл. 16), во всех случаях величины подземного стока в горноскладчатых областях отличаются бóльшими значениями, чем на прилежащих участках платформ.

Указанные особенности формирования подземного стока горноскладчатых сооружений в различных горных районах страны в зависимости от влияния других физико-географических факторов проявляются в разной степени. Закономерности распределения подземного стока на территории Уральской горноскладчатой области служат подтверждением этому.

Если рассматривать территорию Урала по участкам с различной градацией величин подземного стока, то можно выделить четыре хорошо выраженных района. На севере, в зоне значительного влияния многолетней мерзлоты, в границах Полярного Урала, намечается район с величинами модуля подземного стока от 0,3 до 1,5 л/сек. км^2 и более (средний модуль 1,05 л/сек. км^2). Увеличение модулей происходит с севера на юг по мере ослабления влияния многолетней мерзлоты, увеличения высоты и расчлененности местности. Южнее, на западном склоне Урала, в бассейнах, где нет карста, средний модуль подземного стока равен 2,5 л/сек. км^2. На этом фоне резко выделяется район, где горный рельеф в сочетании с карстом обусловливает резкие колебания модулей в пределах 4—12 л/сек. км^2 (при среднем модуле 6,3 л/сек. км^2 для всего района).

Восточный склон Урала, на котором уже не сказывается действие влажных атлантических масс воздуха, как отдельный район рассматриваемой горной области характеризуется средним модулем 1,78 л/сек. км^2. Внутри этого района выделяется участок, где карст повышает средний модуль до 3,5 л/сек. км^2. И, наконец, четвертый район приурочен к южной части горноскладчатой области (Зауралье, Мугоджары), уже входящей в полуаридную зону; он отличается самым низким модулем — 0,3 л/сек. км^2.

Распределение объемов подземного стока по выделенным районам можно видеть в табл. 17.

Оценивая рассмотренные закономерности распределения величин подземного стока на Урале с точки зрения выделения особенностей подземного стока, свойственных горноскладчатым областям, можно во всех случаях отметить значительно бóльшие величины модулей подземного стока для горной территории, чем

Таблица 16

Подземный сток зоны интенсивного водообмена по территории СССР

Мегарегион, регион и район	Расчетная площадь, км²	Объем, км³/год	Расход, м³/сек.
I. Балтийский щит	334	16,6	527
II. Русская плита			
II-1. Бассейн северных морей ЕТС			
II-1а. Бассейн р. Северной Двины . . .	522	35,3	1119
II-1б. Бассейн р. Печоры	267	11,8	373
Итого	789	47,1	1492
II-2. Бассейн Балтийского моря	497	34,1	1082
II-3. Бассейн Черного и Азовского морей			
II-3а. Бассейн р. Припяти	106	3,9	124
II-3б. Бассейн р. Днепра	300	11,8	375
II-3в. Бассейн р. Дона	378	5,7	181
II-3г. Причерноморский	168	2,1	66,7
Итого	952	23,5	749
II-4. Бассейн Каспийского моря			
II-4а. Верхневолжский	415	22,4	710
II-4б. Волго-Камский	898	39,8	1263
II-4в. Прикаспийский	471	3,3	103
Итого	1784	65,5	2076
Всего	4022	170,2	5399
III. Тиманский кряж	89,4	9,0	285
IV. Украинский щит	144	1,8	57,1
V. Донецкий кряж	28,9	0,36	11,4
VI. Скифская плита			
VI-1. Бассейн Черного и Азовского морей — Степной Крым и Западное Предкавказье			
Степной Крым . . .	19,0	0,32	10,0
Западное Предкавказье	75,3	2,5	80,7
Итого	94,3	2,8	90,7

Мегарегион, регион и район	Расчетная площадь, км^2	Объем, км^3/год	Расход, м^3/сек.
VI-2. Бассейн Каспийского моря — Восточное Предкавказье	77,0	2,2	70,7
Итого	171	5,0	161
VII. Карпатско-Крымско-Кавказская горноскладчатая область			
Кавказ	237	45,7	1452
Горный Крым	1,2	0,29	9,1
Карпаты	39	4,4	139
Итого	277	50,4	1600
VIII. Уральская горноскладчатая область	514	26,3	835
Европейская территория СССР . .	5580	279,7	8876
IX. Западно-Сибирская плита	2919	136,9	4340
X. Таймырская складчатая область	223	5,2	165
XI. Анабарский щит	106	1,0	32,2
XII. Сибирская платформа			
XIIа. Бассейны рек Хатанги, Анабара, Оленека . .	735	7,7	244
XIIб. Бассейн р. Енисея . .	1222	61,1	1940
XIIв. Бассейн р. Лены . . .	1543	40,1	1272
Итого	3500	108,9	3456
XIII. Енисейский кряж	98	7,9	250
XIV. Алданский щит	228	17,1	543
XV. Верхояно-Чукотская горноскладчатая область	2418	65,0	2074
XVI. Корякско-Камчатская и Сахалинская гроноскладчатые области			
XVI-1. Бассейны Берингова и Охотского морей . . .	589	92,3	2932
XVI-2. Бассейн Охотского моря и Татарского пролива (Сахалин) . . .	75,4	12,9	410
Итого	664	105,2	3342
XVII. Туранская плита			
XVIIа. Тургайский	300	1,4	44,5
XVIIб. Чуйский	61,2	4,7	150

Мегарегион, регион и район	Расчетная площадь, км²	Объем, км³/год	Расход, м³/сек.
XVIIв. Сырдарьинский . .	365	6,1	193
XVIIг. Амударьинский . .	125	11,1	352
XVIIд. Район Устюрта и Мангышлака	266	0,5	15,9
Итого	1 117	23,8	755
XVIII. Копетдагская горноскладчатая область	7,7	0,15	4,76
XIX. Памирская горноскладчатая область	70,3	6,7	212
XX. Джунгаро-Тяньшанская горноскладчатая область . . .	477	75,9	2 410
XXI. Центрально-Казахстанская горноскладчатая область . .	864	11,1	352
XXII. Саяно-Алтайская горноскладчатая область			
XXIIа. Бассейн Верхней Оби	274	21,4	679
XXIIб. Бассейн Верхнего Енисея	481	45,9	1 456
Итого	755	67,3	2 135
XXIII. Байкальская складчатая область			
XXIIIа. Бассейн оз. Байкал	252	19,6	623
XXIIIб. Бассейн Верхней Лены	427	31,1	989
XXIIIв. Бассейн левых притоков р. Шилки . .	214	7,3	231
Итого	893	58,0	1 843
XXIV. Амурская и Сихотэ-Алиньская горноскладчатая область			
XXIVа. Бассейн Верхнего Амура	160	2,4	76,0
XXIVб. Бассейн Среднего Амура	280	14,1	448
XXIVв. Бассейн Нижнего Амура	555	32,9	1 042
Итого	995	49,4	1 566
Азиатская территория СССР . . .	15 335	739,6	23 480
Всего по СССР	20 915	1019,3	32 356

Примечание. В расчет не вошли острова Азиатской территории СССР (кроме о. Сахалина).

Таблица 17

Распределение объемов подземного стока на территории Урала по отдельным районам

Район	Площадь		Объем подземного стока	
	тыс. км²	% от общей	км³/год	% от общего
Полярный Урал . . .	82,2	19,9	2,75	10,8
Западный склон, без карстового района	88,5	21,4	6,80	26,7
Карстовый район западного склона	49,8	12,1	9,95	39,1
Восточный склон, без карстовых участков	78,7	19,1	4,30	16,9
Карстовые участки восточного склона . .	6,5	1,5	0,71	2,8
Юг Урала	107	26,0	0,94	3,7
Всего	412,7	100	25,45	100

на примыкающих участках Русской и Западно-Сибирской плит. Это увеличение прослеживается для всех климатических условий этой страны и характеризует большой удельный вес типично горных участков в формировании бо́льших объемов подземного стока.

В то же время можно видеть, что влияние фактора климата и гидрогеологических условий (карст и многолетняя мерзлота) в отдельных случаях может усиливать повышенный подземный сток в горных сооружениях (карст) или нивелировать его величины (многолетняя мерзлота, сухость климата). Урал является ярким примером того, как закономерности формирования подземного стока определяются сложным переплетением влияния комплекса факторов — геоструктурных особенностей и рельефа, географической зональности, гидрогеологических особенностей (подробнее см. ниже).

Для равнин наблюдаются иные закономерности формирования подземного стока. Эти территории, отличаясь более низкими величинами средних для всей площади отдельных мегарегионов модулей подземного стока (в пределах 1—2 л/сек. км²), одновременно характеризуются более плавным изменением величин подземного стока по площади, за исключением участков локальных нарушений (карст), рассматриваемых отдельно.

В границах Русской плиты, простирающейся от северных морей до Черного и Каспийского, модули подземного стока изменяются по отдельным районам от 2,19 л/сек. км² (бассейн Бал-

тийского моря, регион II-2) до 0,47 л/сек. км² (бассейн р. Дона, район II-3в). Внутри отдельных регионов и районов плит, несмотря на сравнительно большие их площади, также не отмечается сильных изменений величин подземного стока. Так, для указанного выше региона бассейна Балтийского моря модули изменяются от 0,5 до 6,3 л/сек. км² (приблизительно в 10 раз), для района бассейна р. Дона — от 0,1 до 2,6 л/сек. км². Последний пример, в котором для плит колебание модулей достигает максимальных величин, в большей мере характеризует влияние климата, чем всех остальных факторов формирования подземного стока. Такие закономерности можно видеть для Восточно-Сибирской плиты и других. Как видно на карте, все указанные изменения происходят на огромных расстояниях, и той пестрой смены участков с различной величиной подземного стока и изменением модулей в 20—30 раз, которая наблюдается для горных сооружений, на плитах совершенно не отмечается.

По степени изменчивости величин подземного стока по площади мегарегионы щитов незначительно отличаются от плит. На величинах среднего для мегарегиона модуля подземного стока здесь сказывается развитие интенсивного стока в зоне выветривания и по зонам разломов, а также для некоторых щитов — орографические осадки, приуроченные к повышению местности, характерному для большинства щитов. Эта особенность формирования подземного стока рельефно вырисовывается для Алданского щита, где средний модуль мегарегиона достигает 2,49 л/сек. км² (изменение модуля внутри мегарегиона от 2 до 3 л/сек. км²) при модуле 2 л/сек. км² и ниже для лежащего к северо-западу от щита участка Восточно-Сибирской плиты.

Роль отдельных геоструктурных элементов в формировании естественных ресурсов подземных вод зоны интенсивного водообмена на территории Советского Союза можно видеть из табл. 18.

Таблица 18

Распределение объемов подземного стока по геоструктурным элементам на территории СССР

Геоструктурные элементы	Расчетная площадь		Объем подземного стока	
	тыс. км²	% от общей по СССР	тыс. км³	% от общего по СССР
Плиты	9642,8	56,2	429,8	44,2
Горноскладчатые области	6704,8	39,1	506,3	52,0
Щиты	808,6	4,7	37,0	3,8

По объему подземного стока ведущими являются горноскладчатые области, на которые приходится более 50% общих ресурсов подземных вод СССР. В то же время их площадь составляет лишь 39% всей расчетной площади.

Влияние фактора расчлененности рельефа, отмеченное выше для горных сооружений, находит отражение и в закономерностях подземного стока на равнинах. Для всех возвышенностей здесь отмечаются повышенные условия дренирования верхней части горных пород в отношении как глубины, так и частоты эрозионного вреза. В сочетании с орографическими осадками влияние этого фактора приводит к интенсификации подземного стока на возвышенностях по сравнению с прилегающими равнинами. При рассмотрении карты подземного стока в отношении влияния геоморфологии на условия формирования стока подземных вод, бесспорно, обнаруживается увеличение модулей подземного стока на всех возвышенностях и уменьшение их величин на низменностях. Наиболее четко эта закономерность отмечается на ЕТС. Здесь к депрессиям рельефа модуль подземного стока снижается и достигает минимума на Ильменской, Мещерской и других низменностях. Понижение величины подземного стока на низменностях находит простое объяснение в слабой расчлененности рельефа этих районов, обусловливающей небольшую мощность зоны интенсивного водообмена, меньшую интенсивность подземного стока в верхнем ярусе подземных вод. Часто отмечаемая заболоченность низменностей является показателем замедленного подземного стока.

Однако это положение справедливо лишь для условий платформ. В межгорных впадинах, наоборот, как правило, мощность зоны пресных вод значительно увеличивается, и эти области имеют значительные ресурсы пресных подземных вод (Рионская и Куро-Араксинская впадины на Кавказе, Ферганская и другие впадины в Средней Азии и т. д.). Это связано с тем, что области питания подземных вод межгорных впадин значительно расширяются за счет прилегающих горных сооружений.

На фоне общей закономерной широтной и вертикальной зональности подземного стока, которая связана с климатической зональностью и влиянием структуры земной коры, отмечается влияние на условия формирования стока гидрогеологического фактора, нарушающего общий плавный ход изолиний на всех картах подземного стока.

Резче всего заметно влияние местных гидрогеологических условий на формирование подземного стока в районах развития карстующихся пород, грубообломочного материала конусов выноса, аллювиальных и флювиогляциальных отложений древних переуглубленных речных долин, где наблюдается резкое увели-

чение подземного стока и ресурсов подземных вод по сравнению с их величинами на окружающей территории.

Примером влияния карстовых вод на формирование подземного стока может служить Урал, особенности общего распределения стока по территории которого рассмотрены выше. Значительная обводненность территории и высокие величины модулей подземного стока (до 10—12 л/сек. км^2 в бассейнах рек Вишеры и Косьвы) связаны с развитием карста на западном склоне Урала. Здесь реки в среднем своем течении врезаны в толщу карстующихся карбонатных пород палеозоя и хорошо дренируют эти водоносные горизонты.

В то же время в расположенных рядом бассейнах, где отсутствует карст, модуль подземного стока не превышает 3—4 л/сек. км^2.

Для района Уфимского плато, поверхность которого сложена закарстованными известняками и доломитами нижней перми, легко поглощающими осадки, характерно возрастание модуля подземного стока в бассейнах рек Уфы и Ай до 4 л/сек. км^2, хотя на прилегающей к плато местности модуль подземного стока составляет 2—3 л/сек. км^2.

На восточном склоне Урала карстовые воды встречаются отдельными участками в бассейнах рек Сосьвы и Ваграна. Модули подземного стока здесь составляют 3—3,5 л/сек. км^2, тогда как в бассейнах, лишенных карста, они снижаются до 2 л/сек. км^2.

Определяющее значение влияния карста на формирование подземного стока наблюдается в Крыму. В горной части Крыма в одинаковых климатических условиях подземный сток формируется только в районе сильно обводненных закарстованных пород юрских отложений (модули 5—15 л/сек. км^2) на общем фоне распространения практически безводных водоупорных пород триаса, юры, мела.

Влияние карста на распространение подземного стока отмечается на карте и в других районах. Так, например, районами с аномальными значениями модулей являются карстовые области в среднем течении Волги — бассейны рек Сережи, Теши и Пьяны. Колебания здесь модулей от 0,6 до 1,8 л/сек. км^2 объясняются положительным и отрицательным влиянием карста на подземный сток.

На севере выделяется участок Онего-Северодвинского междуречья. Здесь в условиях закарстованных бассейнов рек Мудьюга и Кулоя модуль подземного стока достигает 5—6 л/сек. км^2, в бассейнах рек Емцы и Ваймуги — 3—3,5 л/сек. км^2 при значении фонового модуля 2—2,5 л/сек. км^2.

Характерное для Тимана возрастание модулей от периферийных частей к центру и повышенное их значение здесь до 4 л/сек. км^2 находит объяснение также в развитии карстовых и трещиноватых вод. В бассейнах рек Кос-ю, Кожима, Шугора,

Ильича также наблюдается возрастание модулей до 4—5 л/сек. км^2, объясняемое наличием карста.

В районах развития карста можно встретить и практически безводные участки, например, на Крымской Яйле, на Силурийском плато (побережье Финского залива) и в других местах. Однако это явление носит узколокальный характер. Оно связано с местными поглощениями атмосферных осадков и поверхностного стока карстовыми пустотами и приводит лишь к перераспределению подземного стока в пределах сравнительно небольших площадей.

Влияние различной водообильности пород и водопроницаемости зоны аэрации проявляется как на равнинной территории, так и в горных сооружениях. Проявление этого фактора уже частично рассмотрено на примере Кавказа.

Повышение значений модулей подземного стока, связанное с гидрогеологическими условиями, можно привести для бассейна р. Меркис (северо-запад ЕТС), где интенсивное дренирование толщи флювиогляциальных песков большой водообильности создает на общем фоне более низких модулей «пятно» повышенных значений подземного стока (до 6 л/сек. км^2).

Общее понижение модулей с севера на юг на территории Белоруссии, связанное с уменьшением количества атмосферных осадков, одновременно усиливается сменой песчаных грунтов, распространенных в северной части повсеместно (в бассейне р. Припяти), болотными почвами и более тяжелыми грунтами с меньшей водоотдачей, характерными для южных районов этой территории.

В северо-западной части Украинского кристаллического массива на карте вырисовывается область пониженного стока с изолинией 0,5 л/сек. км^2, в то время как на окружающей территории характерными являются модули 0,7 л/сек. км^2. Здесь уменьшение стока находит объяснение в меньшей трещиноватости зоны кристаллических пород, расположенных на водоразделе, и связанном с этим понижении водообильности пород.

Наиболее ярко повышение стока в зависимости от водообильности пород находит отражение в Московской синеклизе в области распространения известняков. Более детальное рассмотрение влияния отдельных факторов на особенности распределения подземного стока дано при региональном описании отдельных гидрогеологических районов (глава 9).

Карты подземного стока позволяют обнаружить общие тенденции влияния многолетней мерзлоты на пространственные особенности распределения подземного стока по территории СССР, заключающиеся в снижении его модулей в областях, где мерзлота достигает большой мощности и имеет сплошное развитие. Наиболее четко влияние многолетней мерзлоты на формирование подземного стока проявляется в том, что в поясе сплошного ее

распространения он составляет обычно меньше 10% общего речного стока, тогда как при аналогичных условиях в отношении сложения пород и количества атмосферных осадков в большинстве других районов колеблется от 20 до 40% и более. При этом величина модуля изменяется от 2 до 0,5 л/сек. км^2.

Влияние многолетнемерзлых пород на величины зимнего подземного стока в р. Лене сказывается в уменьшении модуля подземного стока по длине реки от 3 л/сек. км^2 в верховьях до 0,5 л/сек. км^2 в ее низовьях (Кюсюр). Постепенное уменьшение модуля вниз по течению связано с увеличением мощности многолетнемерзлых пород при переходе от зоны островного (верховье) в зону сплошного их распространения с редкими таликами (низовье).

Характерным проявлением влияния вечной мерзлоты на величину подземного стока является область минимальных значений модуля стока, оконтуренная на карте изолинией 0,01 л/сек. км^2 в области Вилюйской синеклизы, где мощность многолетнемерзлых пород достигает местами 600 м.

Влияние многолетнемерзлых пород на сток отмечено для Полярного Урала. Интересно проявление мерзлоты в некотором нарушении широтной зональности в формировании подземного стока на Западно-Сибирской низменности. Здесь пояс наибольшего подземного стока расположен между 60 и 65° с. ш. Если к югу от этого пояса подземный сток уменьшается под влиянием климата (уменьшение осадков, повышение испарения), то к северу его снижение объясняется развитием у самой поверхности земли многолетнемерзлых пород.

Своеобразны черты формирования подземного стока на северо-востоке страны, в области широкого распространения многолетнемерзлых пород и сурового климата. Здесь развито наледное регулирование, приводящее к сезонному перераспределению подземного стока в реки. Общий объем аккумулированной в наледях воды достигает в зимнее время (по данным А. С. Симакова) 31,5 км^3.

Ограниченность сведений об особенностях формирования подземного стока в зоне многолетней мерзлоты, сложность количественной региональной оценки подземного стока в этой зоне в связи с малой изученностью явлений наледного регулирования подземного стока в реки требует для полного выяснения значения в этом процессе многолетней мерзлоты развития исследований в этих районах.

Закономерности соотношения подземного стока и общего речного стока для территории СССР, которые выявлены при рассмотрении карты величин подземного стока в процентах от общего речного стока, можно охарактеризовать следующими особенностями (рис. 57).

Первое, что обращает на себя внимание при рассмотрении распределения доли подземного стока в общем речном стоке по

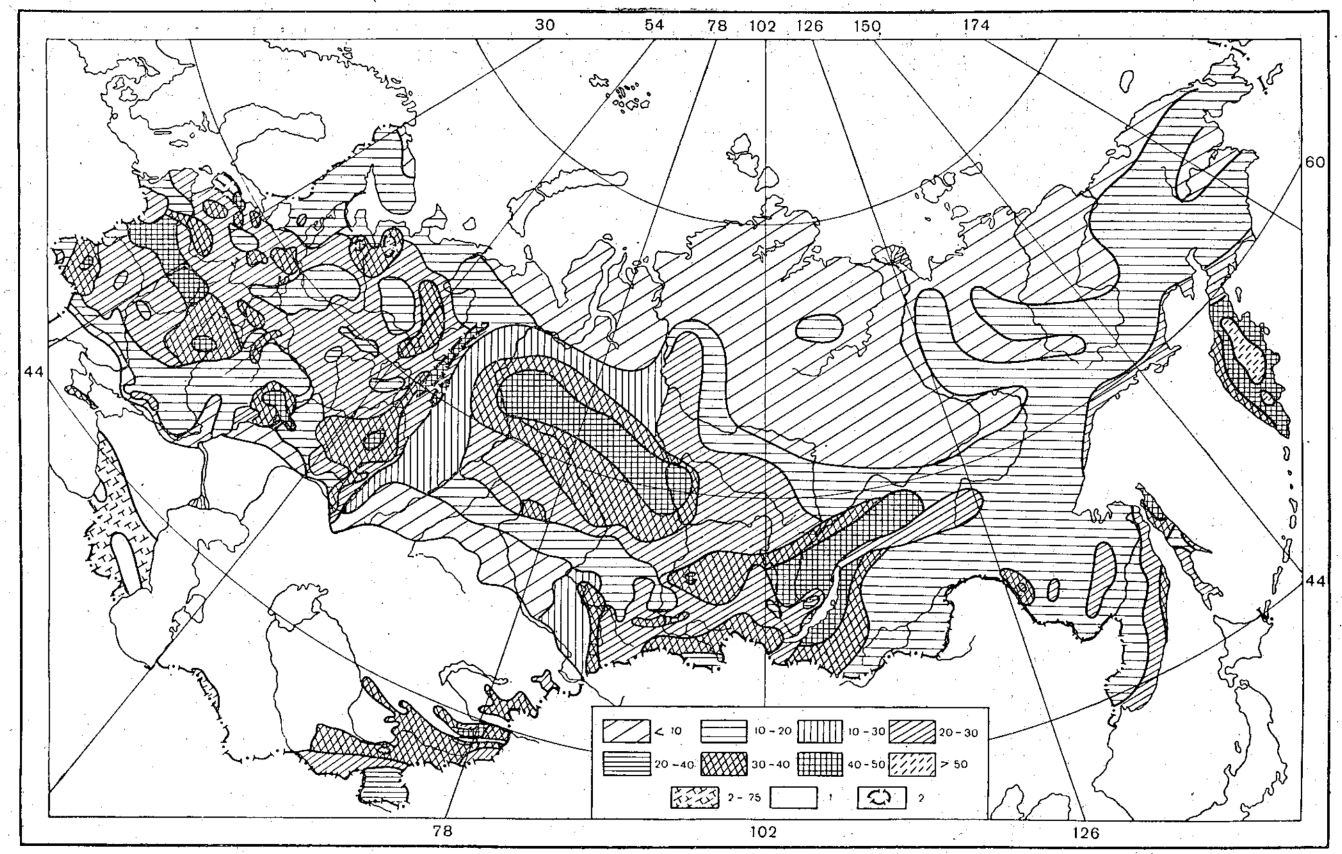


Рис. 57. Распределение величин подземного стока в реки в процентах от общего речного стока.
1 — нерассчитанная величина подземного стока, *2* — участок сложных условий формирования подземного стока.

территории Советского Союза, — это отсутствие той ярко выраженной географической зональности в распределении, которая так четко вырисовывается на карте среднегодовых модулей подземного стока. Это объясняется тем, что климатические факторы в большинстве случаев однозначно влияют на формирование подземного и поверхностного стока. Поэтому на первое место в закономерностях распределения этих величин выступают такие факторы, как рельеф и гидрогеологические условия.

Значение величины подземного стока в процентах от речного стока по территории СССР фактически изменяется от нуля (участки практических водоупоров) до 100% (карстовые участки полного поглощения осадков). В качестве примера можно привести небольшие участки без речного стока на Силурийском плато, а также участки Горного Крыма с практическими водоупорами, уже указанные выше, где формируется только поверхностный сток. Однако участки эти занимают очень небольшие площади, которые на мелкомасштабных картах показать нельзя.

Если рассматривать изменение доли подземного стока в реки для ЕТС, то четко выделяются три зоны. На территории Балтийского щита отмечается зона с преимущественным изменением этой доли от 10% и менее до 30%. Относительно небольшая мощность зоны интенсивного водообмена, малая расчлененность и благоприятные условия образования поверхностного стока при неглубоком залегании грунтовых вод обусловливают сравнительно небольшое участие подземных вод в формировании речного стока. Только на участках карста, на возвышенностях с большой расчлененностью отмечается резкое повышение подземного питания рек. Участки повышенного подземного стока приурочены к карсту Онего-Северодвинского водораздела, Кулойского плато, Тиманского кряжа и к карстовым районам Урала.

Постепенно повышаясь от «меньше 10%» на побережье Печорского моря, в средней полосе ЕТС коэффициент подземного питания рек достигает 40—50%. В этой зоне значительная величина доли подземного стока находит объяснение в относительно высокой расчлененности местности, неглубоком залегании подземных вод в водообильных породах, хорошо дренируемых реками. Южнее этой зоны степень участия подземных вод в речном стоке понижается и достигает 10—20%, а на побережье Черного, Азовского и Каспийского морей, где широкое развитие получают временные водотоки, подземные воды в формировании местного стока практически участия не принимают.

Карпатско-Крымско-Кавказской горной области, как и некоторым другим горным областям СССР (Урал, Камчатка, горы Средней Азии), свойствен большой диапазон изменения доли подземного стока на небольших площадях. Только развитие

плохо проницаемых пород на Карпатах обусловливает здесь небольшую величину подземного питания рек.

Характерной особенностью в распределении доли подземного стока для Азиатской территории СССР является наличие обширной области с небольшим ее значением (меньше 10%); эта область приурочена к зоне распространения многолетней мерзлоты.

Основным фоном карты величин подземного стока в процентах от общего речного стока на Азиатской территории СССР является область с градациями доли от 10 до 20%, занимающая центральную часть этой территории. Значение доли повышается к южному горному поясу до 20—30%, а местами на участках с благоприятными гидрогеологическими условиями — даже до 30—40% и более (сильно трещиноватые породы восточного побережья оз. Байкал — 40—50%).

Проведенный анализ карты доли подземного стока дает лишь общее представление о закономерностях взаимосвязи подземных и речных вод на территории СССР, но в конкретных количественных величинах, каким является коэффициент подземного питания рек.

2. Изменчивость подземного стока в реки

В заключение характеристики общих закономерностей формирования подземного стока целесообразно осветить вопрос о его изменчивости во времени.

Использование метода генетического расчленения гидрографов обеспечивает возможность оценки изменчивости на основе статистической обработки обширного исходного материала.

Наглядное представление об изменчивости подземного стока в многолетнем разрезе дают хронологические графики хода подземного и поверхностного стока и разностные интегральные кривые (суммарные кривые отклонения годовых величин подземного стока от среднего его значения за многолетний период наблюдений). Причем если хронологические графики хорошо отражают колебания стока из года в год (отклонения от нормы за каждый год в абсолютных или относительных единицах), то по разностным кривым можно получить полное представление о циклических колебаниях стока.

Для построения разностных интегральных кривых наиболее удобно использовать относительные величины — модульные коэффициенты $k=\frac{q_i}{q_0}$, отклонения которых от единицы последовательно суммируются:

$$\sum(k-1). \tag{48}$$

Для возможности сравнения кривых по различным пунктам наблюдений необходимо исключить влияние изменчивости. По-

этому разностные интегральные кривые строятся по ординатам

$$\frac{\sum(k-1)}{C_v} = f(t), \qquad (49)$$

где t — время, C_v — коэффициент вариации.

Интегральные кривые и хронологические графики были построены для опорных пунктов, имеющих наибольшую продолжительность наблюдения. Для сравнения одновременно построены для тех же пунктов графики изменчивости поверхностного стока, получаемого по разности общего речного и подземного стока.

Таким образом, в отличие от обычно применявшегося ранее сравнения подземного и общего речного стока, в настоящий анализ исследования закономерности многолетних колебаний включено сравнение генетически самостоятельных составляющих речного стока.

Анализ разностных интегральных кривых подземного стока, в качестве примера приведенных для отдельных рек на рис. 58, позволил выявить смену циклов пониженных (маловодные годы) или повышенных (многоводные годы) величин подземного стока. Для большинства районов выявлены циклы средней продолжительности 20—30 лет; эти циклы не обладают строгой продолжительностью, а характеризуются общей тенденцией к повышению или понижению стока. Например, можно отметить маловодные периоды: р. Днепр — г. Смоленск — 1882—1905 гг. (23 года); р. Вишера — д. Митраково — 1932—1954 гг. (22 года) и т. д. Маловодный цикл наибольшей продолжительности (62 года) отмечен для р. Западной Двины (г. Витебск) с 1881 по 1943 г. Многоводные периоды: р. Днепр — г. Смоленск — 1905—1937 гг. (32 года); р. Вятка — г. Киров — 1892—1906 гг. (14 лет) и др.

На фоне этих больших циклов выделяются колебания меньших периодов — со средней продолжительностью 1—5 лет и наибольшей 7—10 лет. Для р. Днепра у г. Смоленска это маловодный период 1882—1892 гг. (10 лет) и многоводный 1926—1931 гг. (5 лет); для р. Вятки у г. Кирова — соответственно 1949—1958 гг. (9 лет) и 1924—1929 гг. (5 лет) и др. Модули стока составляли для р. Днепра у г. Смоленска за маловодный длительный период с 1882 по 1905 г. 1,4 л/сек. км^2, а за период малого цикла внутри него (1882—1892 гг.) — 1,3 л/сек. км^2; в то же время в течение многоводного периода на той же реке с 1905 по 1937 г. средний модуль составлял 1,8 л/сек. км^2, а за короткий цикл внутри него (1926—1931 гг.) — 2 л/сек. км^2.

Совместное рассмотрение интегральных кривых и хронологических графиков поверхностного и подземного стока в реку показывает наличие общей синхронности в их колебаниях. Одновременно хронологические графики хорошо отражают меньшую изменчивость подземного стока по сравнению с поверхностным

(рис. 59), что говорит о большей зарегулированности первого. Разностные интегральные кривые показывают, что в общих чертах циклы поверхностного и подземного стока совпадают или последние запаздывают на 1—2 года. Указанная синхронность изменения поверхностного и подземного стока позволяет сделать вывод, что их изменчивость в значительной мере определяется одними и теми же причинами и в первую очередь изменчи-

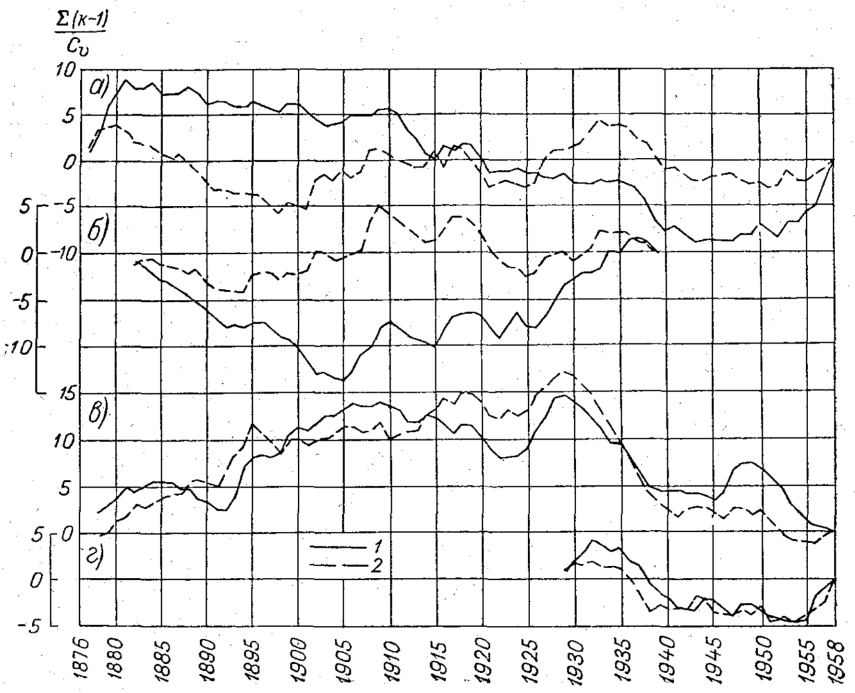


Рис. 58. Разностные интегральные кривые модульных коэффициентов подземного и поверхностного стока в реки ЕТС.

а — р. Западная Двина — г. Витебск, *б* — р. Днепр — г. Смоленск, *в* — р. Вятка — г. Киров, *г* — р. Вишера — д. Митраково. *1* — подземный сток, *2* — поверхностный сток.

востью годовых сумм осадков. Это, в частности, следует из сопоставления совмещенных интегральных кривых подземного и поверхностного стока, осадков (годовые суммы, суммы за осенний и зимний периоды), а также кривой суммы отрицательных температур воздуха (для характеристики суровости зимы), представленных на рис. 60.

Однако в отдельные годы, а иногда и за периоды в несколько лет наблюдается асинхронность в колебаниях поверхностного и подземного стока. В такие годы влияние, кроме осадков, других факторов оказалось более существенным. К таким

факторам, например, можно отнести внутригодовое распределение осадков, характер их выпадения, условия снеготаяния и просачивания талых вод, испарение с бассейна за летний период и др. На величине подземного стока могут сказываться осадки предыдущих лет и главным образом осадки за предшествующий

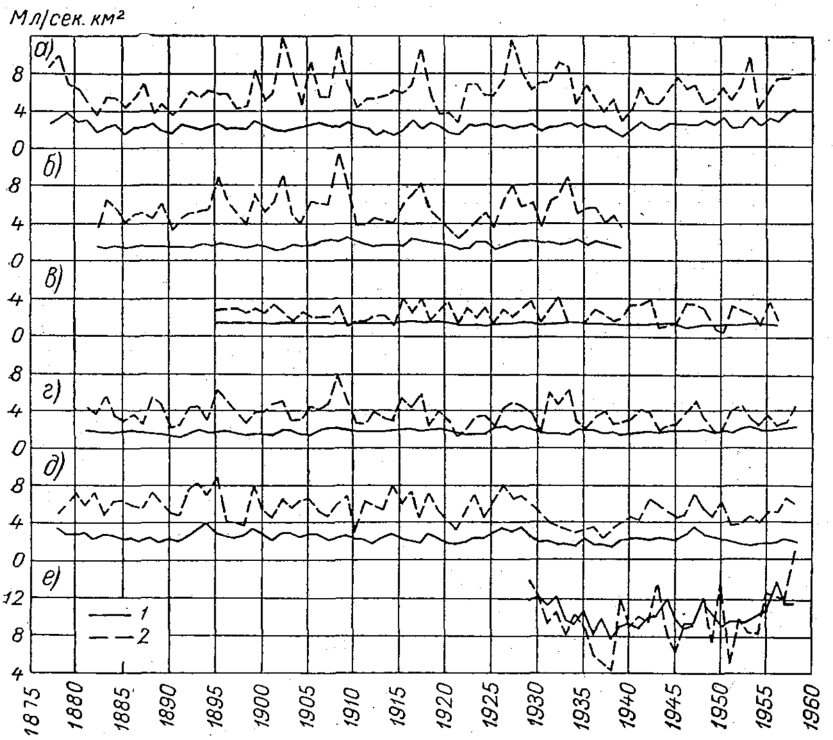


Рис. 59. Колебания модулей поверхностного и подземного стока в реки за многолетний период.

а — р. Западная Двина — г. Витебск, F=27 300 км², $C_{v\ пов}$=0,33, $C_{v\ подз}$=0,24; *б* — р. Днепр — г. Смоленск, F=13 800 км², $C_{v\ пов}$=0,30, $C_{v\ подз}$=0,22; *в* — р. Дон — ст. Лиски, F=69 100 км², $C_{v\ пов}$=0,39, $C_{v\ подз}$=0,09; *г* — р. Ока — г. Калуга, F=54 900 км², $C_{v\ пов}$=0,35, $C_{v\ подз}$=0,16; *д* — р. Вятка — г. Киров, F=48 300 км², $C_{v\ пов}$=0,26, $C_{v\ подз}$=0,24; *е* — р. Вишера — д. Митраково, F=9020 км², $C_{v\ пов}$=0,27, $C_{v\ подз}$=0,16. *1* — подземный сток, *2* — поверхностный сток.

осенний период, в то время как влияние их на поверхностный сток существенно меньше.

Это можно проиллюстрировать на примере рассмотрения интегральных кривых для р. Оки у г. Калуги, где отмечаются наиболее продолжительные периоды с общей тенденцией к асинхронности поверхностного и подземного стока. Период с 1887 по 1905 г. для подземного стока является маловодным, в то время

как для поверхностного — многоводным. Для периода с 1943 по 1958 г. наблюдается обратное явление: он многоводный для подземного стока и маловодный для поверхностного. На протяжении указанных длительных периодов наблюдаются отдельные короткие периоды с синхронными колебаниями поверхностного и подземного стока. Представленные на рис. 61 интегральные кривые годовых, зимних и осенних сумм осадков, сумм положительных и отрицательных температур воздуха, а также кривая минимальных (меженных) величин стока позволяют

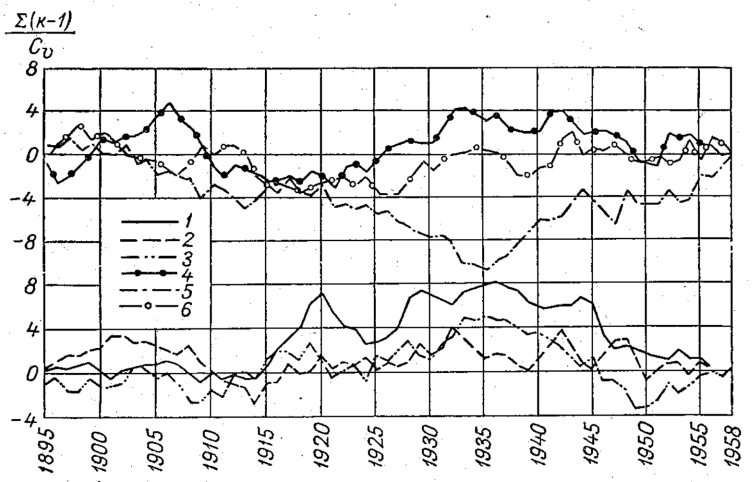


Рис. 60. Совмещенные разностные интегральные кривые стока и метеорологических элементов, р. Дон — ст. Лиски.

1 — подземный сток, *2* — поверхностный сток, *3* — годовая сумма осадков, *4* — сумма осадков за осенний период, *5* — сумма осадков за зимний период, *6* — сумма отрицательных среднемесячных температур воздуха.

сделать ряд выводов о зависимости колебаний характеристик стока от гидрометеорологических условий.

Так, маловодный период для подземного стока с 1887 по 1905 г. определяется в первую очередь пониженными величинами годовых сумм осадков за эти годы. Незначительное повышение поверхностного стока, по-видимому, происходило за счет более обильных зимних осадков, дружного снеготаяния и сильного промерзания почв (период с 1887 по 1897 г.); в последующий период решающее значение в увеличении поверхностного стока приобрели осенние осадки, сформировавшие высокие осенние паводки.

Ярким примером асинхронности поверхностного и подземного стока является 1905 г. Пониженный подземный сток этого года (1,4 л/сек. км^2) объясняется малым количеством годовых

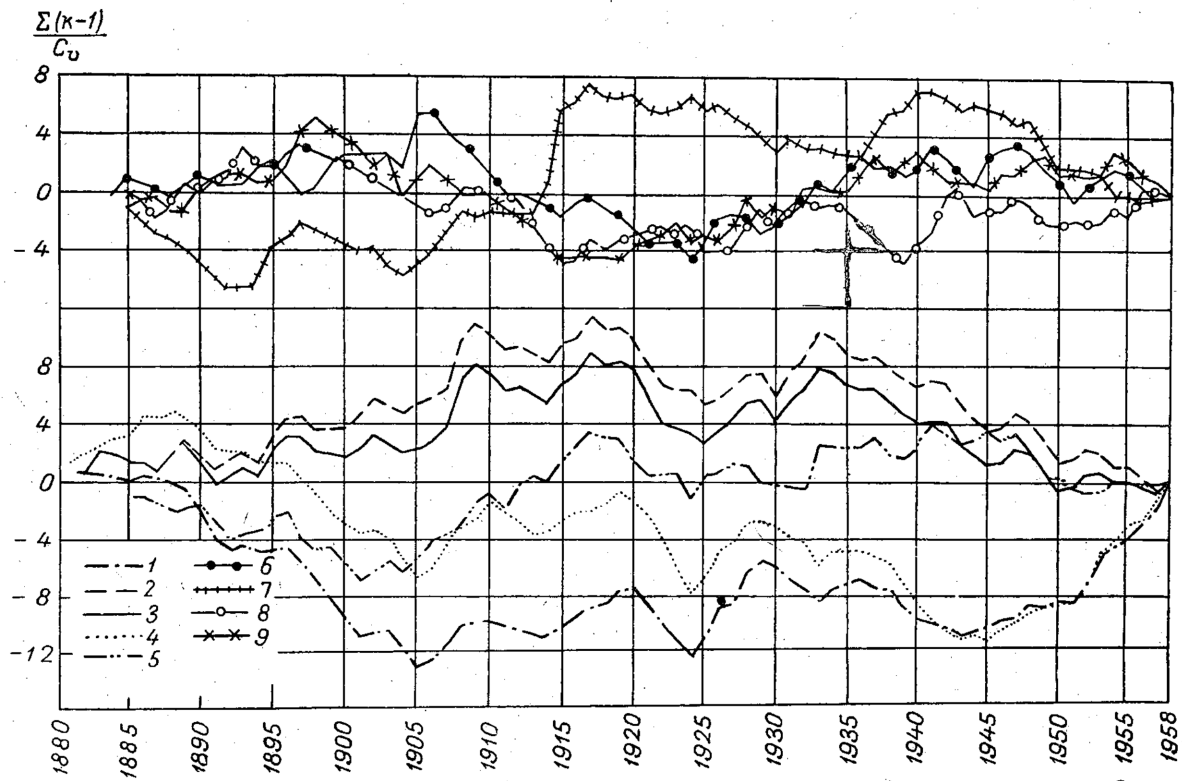


Рис. 61. Совмещенные разностные интегральные кривые стока и метеорологических элементов, р. Ока — г. Калуга.

1 — подземный сток, *2* — поверхностный сток, *3* — общий речной сток, *4* — минимальный (меженный) сток, *5* — годовая сумма осадков, *6* — сумма осадков за осенний период, *7* — сумма осадков за зимний период, *8* — сумма отрицательных среднемесячных температур воздуха, *9* — сумма среднемесячных температур воздуха за летний период.

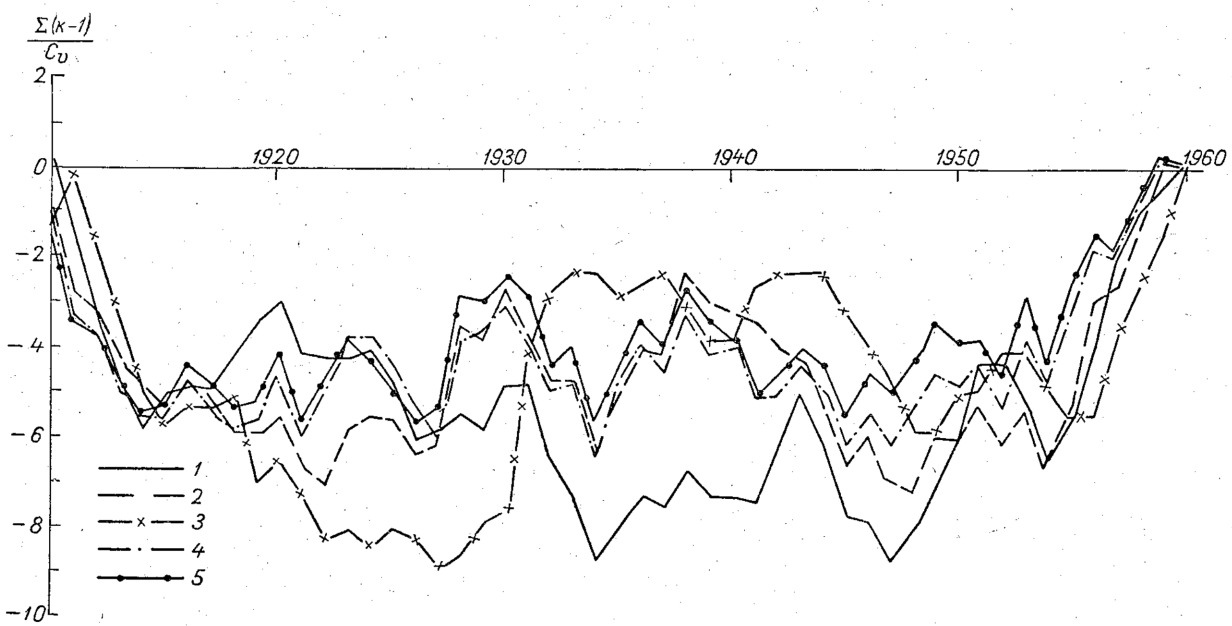


Рис. 62. Совмещенные разностные интегральные кривые стока и метеорологических элементов, р. Зея — ур. Зейские Ворота.

1 — подземный сток, *2* — поверхностный сток, *3* — минимальный сток, *4* — годовая сумма осадков, *5* — сумма осадков за летний период.

и осенних осадков предыдущего 1904 г., а также большим летним испарением (сумма летних температур значительно выше нормы). Последнее особенно сказывается на уменьшении минимального стока. Повышенный поверхностный сток в этот год (4,5 л/сек. км²) объясняется большим количеством зимних и осенних осадков.

За период 1943—1958 гг. пониженный поверхностный сток обусловлен малыми снегозапасами в эти годы (суммы зимних осадков значительно ниже нормы). Наибольшая асинхронность поверхностного и подземного стока наблюдается за период 1953—1958 гг. Повышенный подземный сток 1953 и 1954 гг. обусловлен значительными осенними осадками предшествующих лет. В 1955—1958 гг. повышение подземного стока вызвано значительными летними осадками в условиях пониженного испарения вследствие относительно невысоких температур летнего периода. Для АТС эти связи иллюстрируются рис. 62.

Влиянием тех же факторов можно объяснить и отдельные небольшие периоды асинхронности в колебаниях поверхностного и подземного стока для р. Дона у г. Лиски (Георгиу-Деж). Так, за период 1902—1906 гг. повышенный подземный сток объясняется большими осенними осадками предыдущих лет и мягкими зимами (суммы отрицательных температур меньше нормы), пониженный же поверхностный сток хорошо согласуется с малыми снегозапасами в эти годы.

Для характеристики закономерностей распределения изменчивости подземного стока по территории и влияния на нее общих физико-географических условий можно использовать зависимость коэффициента вариации от модуля подземного стока, так как последний является интегральным показателем условий формирования подземного стока.

Опыт построения таких зависимостей для различных пунктов ЕТС показывает, что эти связи носят локальный характер для отдельных районов с однородным комплексом физико-географических условий формирования подземного стока. Такие зависимости для равнинных и горных районов в качестве примера представлены на рис. 63. Во всех случаях находит отражение уменьшение коэффициента вариации подземного стока ($C_{v\,\text{подз}}$) с увеличением модуля подземного стока ($q_{\text{подз}}$). На рис. 63 *а* представлены кривые $C_{v\,\text{подз}}=f(q_{\text{подз}})$ для трех районов Русской плиты.

Кривая *1* характеризует зависимость изменчивости подземного стока от величины его модуля для района западной части Русской плиты (верховья Немана и бассейн Припяти) с преимущественным подземным стоком из четвертичных отложений.

Кривая *2* построена для участка Днепровско-Донецкой впадины (верхние левые притоки Днепра); подземный сток осуществляется в основном из меловых и палеогеновых отложений.

Кривая *3* — для района Заволжья (бассейны рек Самары, Большого и Малого Иргиза и др.); подземный сток — из песчано-глинистых триасовых и четвертичных отложений.

Для этих же районов наряду с зависимостью $C_{v\ подз} = f(q_{подз})$ приведены зависимости абсолютного среднеквадратичного

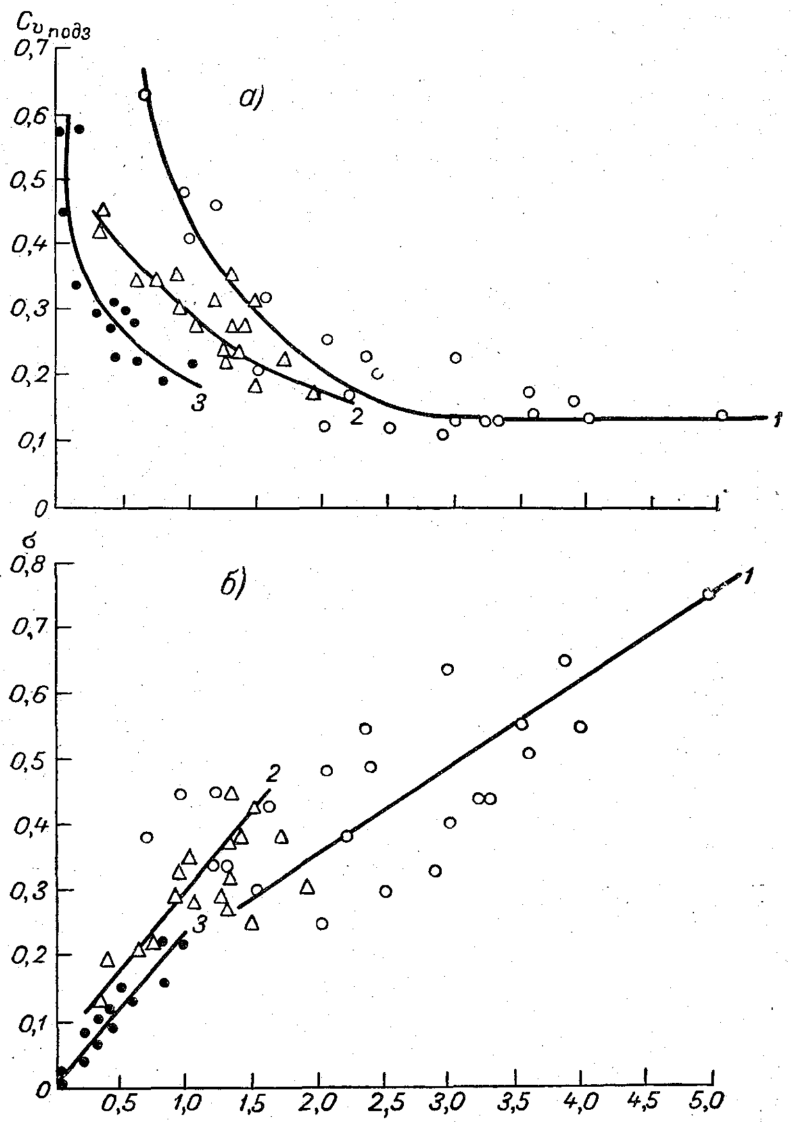
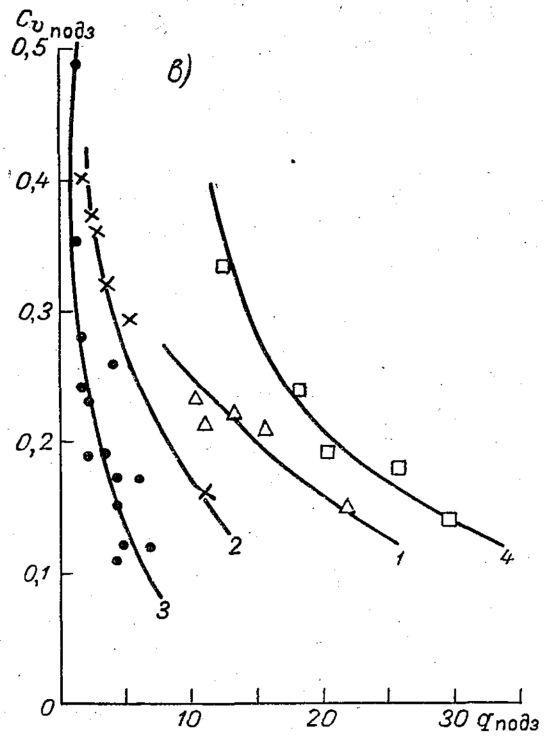


Рис. 63. Зависимость коэффициента вариации $C_{v\ подз}$ и среднеквадра
а, б — для равнинных районов, *в* — для

отклонения σ от модуля, чтобы охарактеризовать изменчивость, свободную от влияния величины членов ряда (рис. 63 *б*). Рассеивание точек для кривых *1* и *2* на рис. 63 *б* объясняется относительной неоднородностью физико-географических условий на больших площадях выбранных районов, которые при дальнейших исследованиях можно разбить на более локальные участки.

Для горных районов (рис. 63 *в*) зависимости $C_{v\ подз}=f(q_{подз})$ можно установить только для узколокальных участков, что объясняется большим разнообразием и резкой сменой условий формирования подземного стока. Например, для центральной части южного склона Большого Кавказа устанавливаются зависимости *1* и *2*, зависимость *3* характеризует небольшой район развития карстующихся пород западного склона Урала, зависимость *4* — незначительный по площади район Самхетско-Карабахской зоны Малого Кавказа.

На рис. 64 *а* приведено семейство кривых зависимости коэффициента вариации от величины модуля. Дополнительно к трем вышеуказанным районам Русской плиты (кривые *II*, *III*, *V*)



тичного отклонения $\sigma_{подз}$ от модуля подземного стока $q_{подз}$ л/сек. км². горных районов. *1*, *2*, *3*, *4* — номера кривых.

приведены кривые для двух других районов Русской плиты и одного района Украинского кристаллического щита. Кривая *I* построена для участка Русской плиты (бассейн Верхней Волги) с преимущественным подземным стоком из каменноугольных отложений, кривая *IV* — для Украинского кристаллического

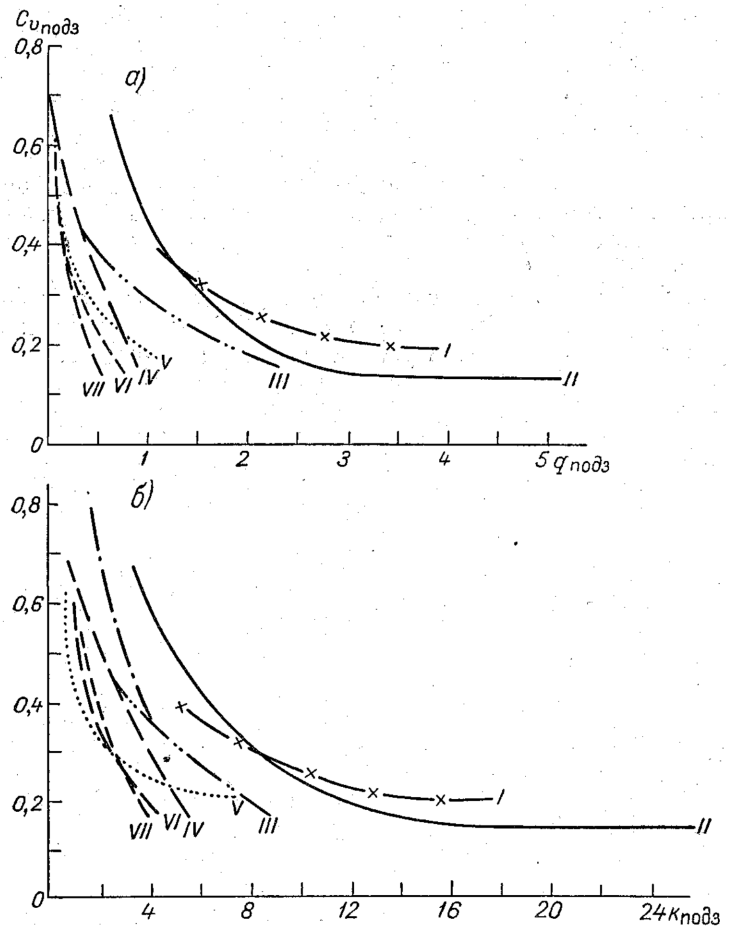


Рис. 64. Зависимость коэффициента вариации подземного стока от модуля $q_{подз}$ (*а*) и от коэффициента подземного стока $K_{подз}$ (*б*) для различных физико-географических условий

щита (правобережье Среднего Днепра и бассейн Южного Буга) с подземным стоком в трещиноватой зоне докембрийских и палеозойских пород, кривая *VI* — для участка Русской плиты (бассейн р. Дона), где подземный сток осуществляется в основном из мергельно-меловых, песчаных и песчано-глинистых отло-

жений. Кривая *VII* дана для Обь-Иртышского междуречья. На рис. 64 *б* приведены зависимости $C_{v\,\text{подз}}$ от коэффициента подземного стока $K_{\text{подз}}$, которые подтверждают закономерность уменьшения $C_{v\,\text{подз}}$ при увеличении его значений.

Характеристика изменчивости подземного стока в реки по территории Советского Союза приводится на карте коэффициентов вариации подземного питания рек (рис. 70).[1]

Коэффициенты вариации на ЕТС изменяются с северо-запада на юго-восток от 0,10 до 0,40 и более.

Низкие значения $C_{v\,\text{подз}}$ (0,10—0,20) отмечаются на севере равнинной части этой территории, в бассейне Немана, на Средне-русской возвышенности, в северной части Волыно-Подольской возвышенности и определяются устойчивым подземным питанием рек в условиях хорошо обводненных горных пород различного возраста с повышенным количеством осадков.

Значения $C_{v\,\text{подз}}=0{,}20\div0{,}30$ характеризуют речные бассейны с меньшей зарегулированностью подземного стока. Сюда нужно отнести бо́льшую площадь центральной части Русской плиты, западную часть Силурийского плато, где в формировании подземного питания рек принимают участие карстовые воды в условиях неустойчивой межени, а также участки бассейна Днестра в области Предкарпатского прогиба. В указанной изменчивости подземного питания рек в первую очередь сказывается влияние климата (изменение осадков, увеличение испарения), а также локальное влияние гидрогеологических условий.

В средней части бассейнов Днепра и Дона, в бассейнах рек Суры, Свияги, Мологи и Сожа $C_{v\,\text{подз}}$ изменяется в пределах 0,30—0,40, что главным образом связано с развитием на этой территории менее водообильных отложений и усиливающейся к южной части Русской плиты сухостью климата, определяющей для районов юга ЕТС значения $C_{v\,\text{подз}}=0{,}40$ и выше.

Изменчивость подземного стока в реки в пределах АТС характеризуется $C_{v\,\text{подз}}$ для отдельных пунктов от 0,05 до 0,60.

Север АТС, пониженные части Восточной Сибири и Северо-Востока (Северо-Сибирская, Центрально-Якутская, Колымская, Анабарская и другие низменности), бассейны рек Хатанги, Олекмы и Анабара, восточная часть Средне-Сибирского плоскогорья и Южно-Якутское плато характеризуются $C_{v\,\text{подз}}=0{,}30\div0{,}40$. Такая изменчивость подземного стока определяется малым количеством осадков, слабой дренированностью бассейна, а также многолетней мерзлотой. Сюда же относятся области Тувинской впадины, Лено-Ангарского междуречья, верховья Амура.

Для юга и юго-востока АТС характерно $C_{v\,\text{подз}}=0{,}20\div0{,}30$ с участками повышенной и более низкой изменчивости подзем-

[1] Изменчивость подземного питания рек ЕТС и АТС более подробно описана в соответствующих статьях [83, 84].

ного стока в зависимости от гидрогеологических и тектонических особенностей речных бассейнов. К зонам тектонических нарушений, как правило, приурочены области с меньшей многолетней изменчивостью поземного стока.

Наименьшие значения $C_{v\,\text{подз}}=0{,}10\div0{,}20$ в пределах Западно-Сибирской низменности (бассейн среднего и нижнего течения Оби и прилежащие участки), западной части гор Путораны, северной части Енисейского кряжа, центральной части Алданского нагорья, в Прибайкалье, на Становом и Потомском нагорье, на Камчатке и Сахалине определяются как обильными осадками, так и благоприятными условиями питания и дренирования подземных вод. Сочетание большого количества осадков и благоприятных гидрогеологических условий обеспечивает на территории Камчатки наибольшие для АТС величины подземного стока и наименьшую их многолетнюю изменчивость.

Максимальная изменчивость подземного стока для АТС характерна для наиболее засушливой части в пределах юга Западно-Сибирской низменности. Так, в пределах Омска и Кулундинской впадины при малых врезах речных долин в условиях малой увлажненности и развития невыдержанных водоносных горизонтов с низкой водообильностью $C_{v\,\text{подз}}$ превышает 0,40. Для бассейна р. Оми (г. Куйбышев) $C_{v\,\text{подз}}=0{,}61$, для пункта г. Калачинск — 0,53, а для р. Кулунды (с. Шимолино) $C_{v\,\text{подз}}=0{,}55$.

Изменчивость подземного стока в отдельных горных районах Советского Союза кратко можно охарактеризовать следующими особенностями. Для Кавказа, Урала и Карпат отмечается резкое колебание $C_{v\,\text{подз}}$ от 0,10 до 0,40, связанное с быстрой сменой общих условий формирования подземного стока по площади. Горные районы Средней Азии отличаются низким и сравнительно однородным значением $C_{v\,\text{подз}}=0{,}10\div0{,}30$.

Анализ коэффициентов вариации подземного стока в горных районах показал зависимость величин C_v подземного стока от высоты местности. Для Кавказа, Урала и Карпат характерно уменьшение $C_{v\,\text{подз}}$ с увеличением высоты местности. Из-за многообразия условий формирования подземного стока в горных районах эти зависимости, как указывалось выше, носят локальный характер. В качестве примера этих зависимостей приведены графики (рис. 65) для Кавказа по гидрогеологическому району Самхетско-Карабахской зоны (Малый Кавказ); для Урала, где отмечается влияние на подземный сток высотной поясности и широтной зональности, представлены три характерных зависимости $C_{v\,\text{подз}}=f(H)$, относящиеся к различным географическим широтам. Наличие одной кривой со значительным разбросом точек для Карпат объясняется малым количеством пунктов с длинными рядами наблюдений в этом районе.

Особого рассмотрения требует вопрос о зависимости коэффициента вариации подземного стока от глубины эрозионного среза рек. Сложность установления связи этих элементов заключается в ограниченности точных данных о глубине среза и необходимости анализа этих зависимостей для однородных гидрогеологических условий формирования подземного стока. Поэтому анализ производился в узколокальных районах, где подбор рек с различной глубиной среза ограничен. В качестве примера возможности установления такой связи приводятся графики зависимости коэффициента вариации от глубины эрозионного

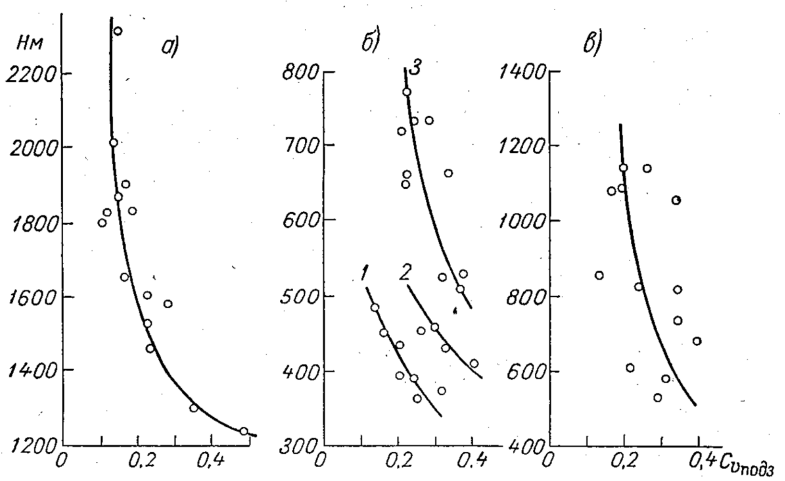


Рис. 65. Зависимость коэффициента вариации подземного стока в реки от средней высоты водосбора H для горных районов ЕТС.

а — Самхетско-Карабахская зона Малого Кавказа, *б* — Урал: *1* — широта от 61 до 57°, *2* — от 57 до 55°, *3* — от 55 до 53°; *в* — Карпаты.

среза (h м) для поля четвертичных отложений в верховьях бассейнов Немана и Припяти (рис. 66, 67).

В результате анализа закономерностей изменения коэффициента вариации подземного стока по территории можно сделать вывод, что они определяются теми же основными факторами, что и среднемноголетние величины подземного стока, — климатом, рельефом и гидрогеологическими условиями. Сложность выявления закономерностей изменчивости подземного стока под влиянием этих факторов, действующих в тесной совокупности, заключается в том, что анализ проводится по отдельным годам и четко разграничить влияние каждого фактора в отдельности весьма сложно.

Однако анализ всех данных коэффициентов вариации и приведенной карты $C_{v\,подз}$ показывает, что климат является доминирующим фактором, определяющим как характер многолетних

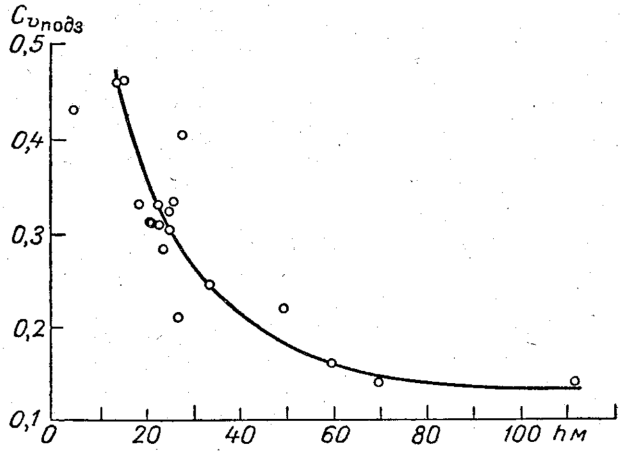


Рис. 66. Зависимость коэффициента вариации подземного стока от глубины эрозионного вреза рек (h м) для поля четвертичных отложений в западной части Русской плиты.

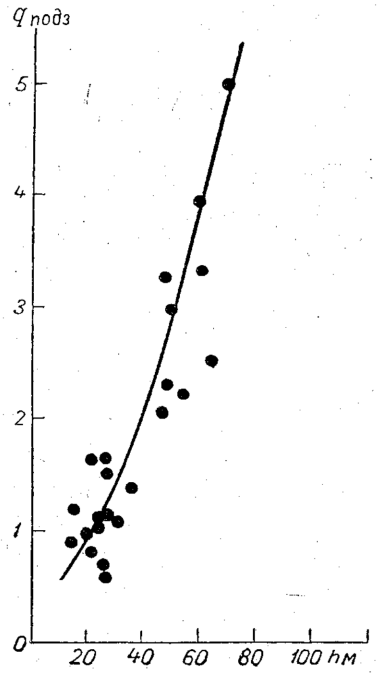


Рис. 67. Зависимость модуля подземного стока от глубины вреза гидрографической сети для поля четвертичных отложений в западной части Русской плиты.

колебаний, так и величину изменчивости подземного стока. Поэтому общая закономерность изменения коэффициентов вариации по территории подчиняется закону географической зональности.

Как было отмечено раньше, влияние рельефа сказывается на характере изменения $C_{v\,\text{подз}}$ с высотой местности, а также в зависимости его от глубины вреза.

Отмечаемые по картам аномальные значения $C_{v\,\text{подз}}$ показывают во многих случаях влияние на его распределение по территории гидрогеологических условий. Литологический состав зоны аэрации и водовмещающих пород, глубина залегания и мощность водоносных горизонтов, их водообильность и другие факторы, определяя величину модуля, в значительной мере определяют и изменение $C_{v\,\text{подз}}$ по территории.

В закономерностях распределения C_v подземного стока по территории наряду с влиянием географической зональности находит отражение и общее уменьшение абсолютных величин подземного стока с северо-запада на юго-восток. Это уменьшение характеризуется изменением модулей подземного стока от 4,0 до 0,1 л/сек. км^2 (уменьшение в 40 раз) при изменении общего речного стока на этой же территории от 12 до 1 л/сек. (в 12 раз). Коэффициент же вариации подземного стока меняется всего в 3,5 раза, в то время как C_v общего стока — в 7 раз.

Такое резкое падение абсолютной величины модуля подземного стока затушевывает явление увеличения на юге естественной зарегулированности подземного стока в связи с дренированием реками более глубоко лежащих водоносных горизонтов. Положение о большей зарегулированности подземного стока в южных районах и как бы его меньшей изменчивости подтверждается рассмотрением графика с семейством кривых (рис. 64). На этом графике наружная огибающая кривая характеризует $C_{v\,\text{подз}}$ в более северных районах, внутренняя кривая — $C_{v\,\text{подз}}$ в более южных районах. В этом случае одному и тому же значению модуля подземного стока будут соответствовать меньшие коэффициенты вариации для более южных районов и бо́льшие — для более северных районов.

Анализ изменчивости подземного и общего речного стока показал, что чаще всего C_v общего стока превышает C_v подземного стока (для анализа использованы данные о C_v общего стока по К. П. Воскресенскому [15], а в некоторых случаях, при несовпадении периодов наблюдений, произведены дополнительные расчеты). В отдельных случаях C_v общего стока меньше C_v подземного, что определяется различным удельным весом в общем речном стоке подземной и поверхностной составляющих и возможным соотношением их изменчивости. Поэтому параллельно необходимо исследовать изменчивость поверхностной составляющей общего речного стока. Сопоставление изменчивости поверх-

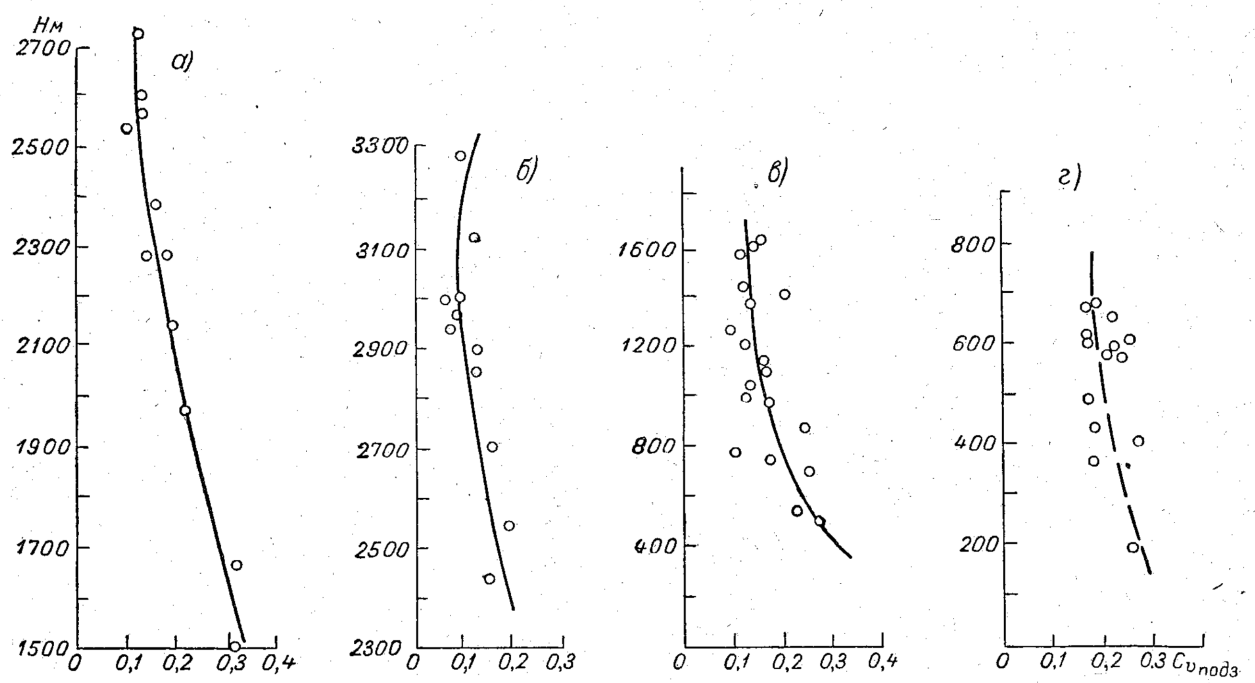


Рис. 68. Зависимость коэффициента вариации подземного стока в реки от средней высоты водосбора для горных районов Азиатской территории СССР.

а — южный склон Гиссарского хребта, *б* — Киргизский хребет, *в* — Саяны, *г* — западный склон хребта Сихотэ-Алинь.

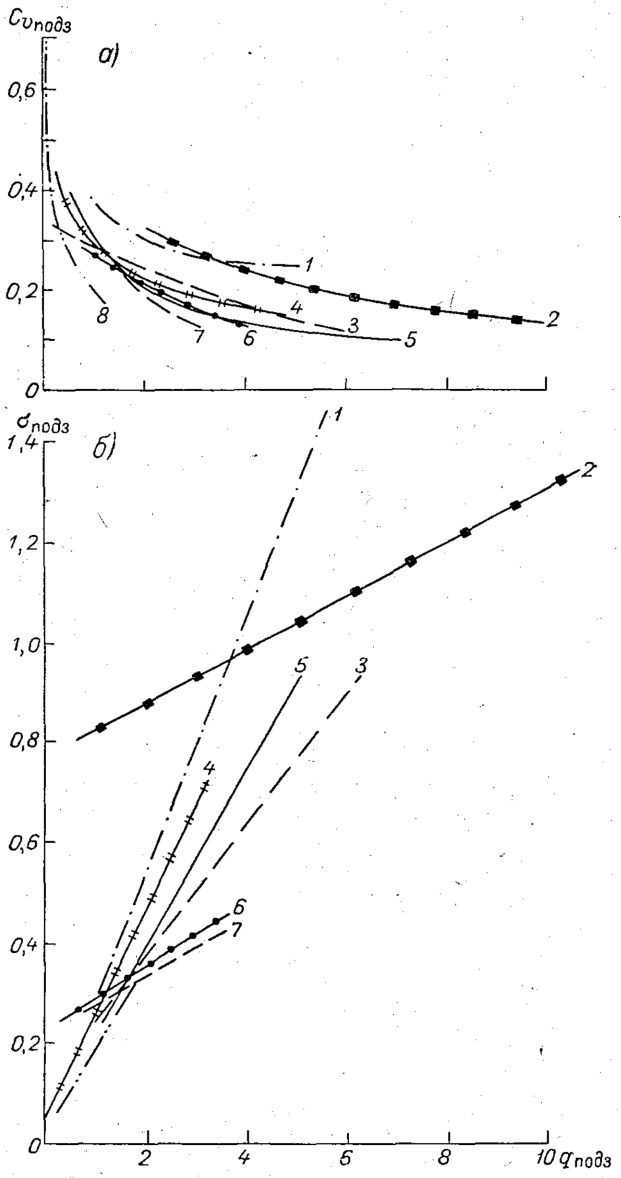


Рис. 69. Совмещенный график зависимостей коэффициентов вариации $C_{v\,подз}$ от модуля подземного стока $q_{подз}$ (*а*) и среднего квадратичного отклонения $\delta_{подз}$ (*б*) от модуля подземного стока для различных районов Азиатской территории СССР.

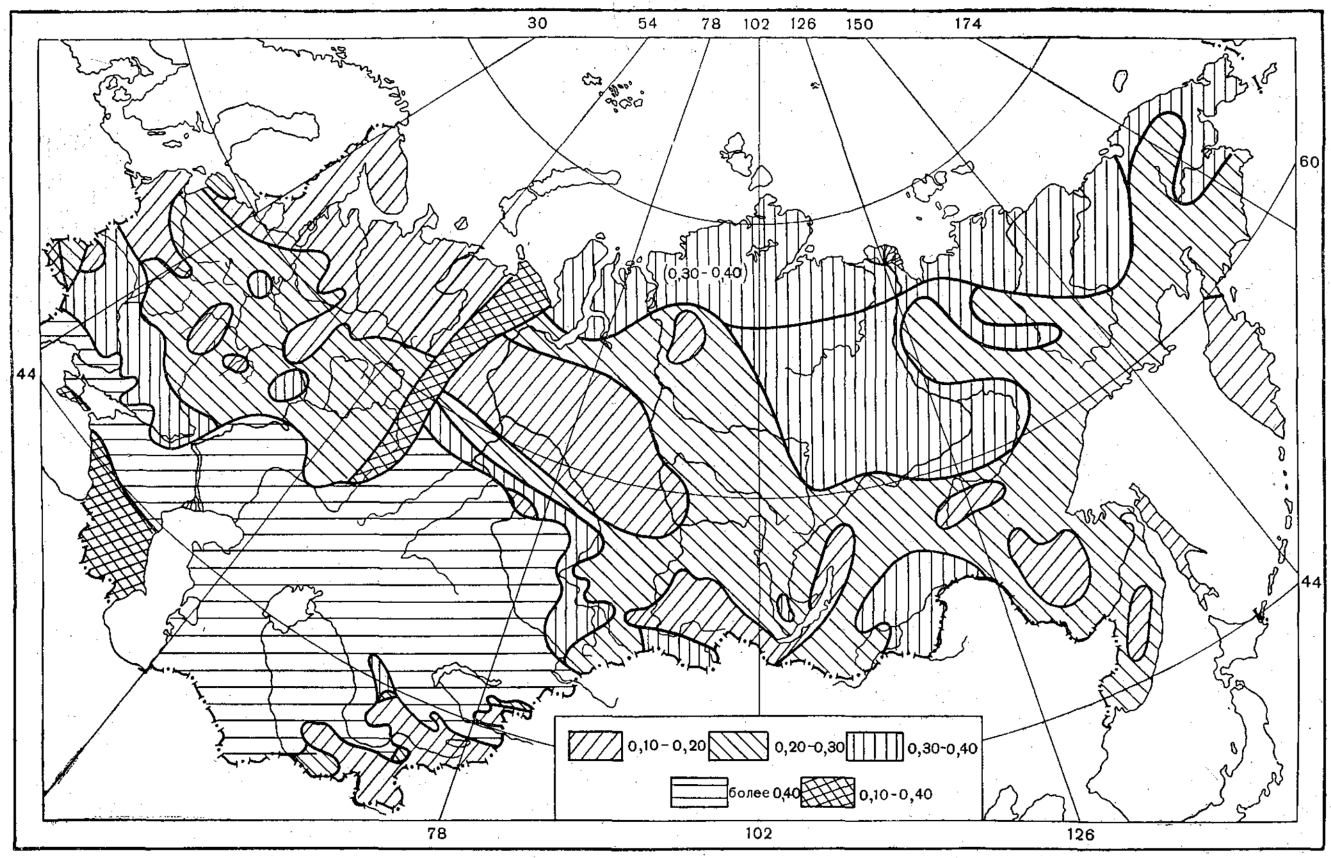


Рис. 70. Распределение коэффициентов вариации подземного стока в реки СССР. В скобках — по предположению.

ностного и подземного стока по территории произведено по 137 пунктам на ЕТС. Выполненный анализ показал, как уже упоминалось, значительно бо́льшую изменчивость поверхностного стока по сравнению с подземным.

Соотношение $C_{v\,\text{пов}}$ и $C_{v\,\text{подз}}$ не остается постоянным по территории. Они близки в районах, где поверхностный сток обладает наибольшей естественной зарегулированностью (например, в зоне избыточного увлажнения и реки высокогорных районов с ледниковым питанием).

Оценка изменчивости подземного стока АТС осложняется меньшей изученностью этой части страны. Но и здесь, как видно из рис. 68, 69, отмечаются общие закономерности, близкие к выявленным для ЕТС. На рис. 69 отдельные кривые характеризуют: *1* — Алтай, *2* — Гиссарский хребет, *3* — Саяны, *4* — Сибирскую плиту, *5* — Забайкалье, *6* — хр. Сихотэ-Алинь, *7* — бассейн Зеи, Буреи, Амгуни, *8* — Обь-Иртышского междуречья.

Выполненные работы представляют первый этап исследований изменчивости подземного стока на всей территории СССР. Развитие таких исследований должно идти в направлении уточнения методики оценки изменчивости подземного стока с учетом многообразия условий его формирования и дальнейшей обработки и анализа имеющихся материалов.

Глава 9

РЕГИОНАЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО СТОКА В РЕКИ[1]

1. Бассейны Белого и Баренцева морей

Территория бассейнов Белого и Баренцева морей по условиям формирования подземного стока разделяется на мегарегион Балтийского щита, в пределах Кольского полуострова и Карелии (I) и регион — бассейн северных морей Русской плиты (II).

Оценка условий формирования подземного питания рек на территории Балтийского щита может быть сделана из рассмотрения общей закономерности подземного стока по двум основным районам — территории Кольского полуострова и Карелии.

Особенность формирования подземного стока здесь определяется тем, что мощность зоны интенсивного водообмена определяется трещиноватостью и водопроницаемостью коренных пород и относительно широким развитием по территории озер, которые наряду с реками и являются местными очагами разгрузки под-

[1] Дается по результатам исследований авторского коллектива карт подземного стока СССР [29, 30, 42].

земных вод. Общим базисом дренирования подземных вод щита служат Баренцево и Белое моря.

В целом по территории Кольского полуострова увеличение подземного стока происходит от центральной части полуострова р. Поной (верховья рек Вороньи, Варзуги, Стрельны — 1,0—1,2 л/сек. км^2 к побережью омывающих полуостров морей низовья рек Стрельны, Поноя, Иоканьги, Вороньей, Восточной Лицы и др. — 1,5—1,7 л/сек.км^2) и к горным частям территории (район оз. Имандра, р. Печенга, 2,0—2,3 л/сек. км^2).

Уменьшение расчлененности рельефа от государственной границы (от 50—100 м) к побережью Белого моря (до 25—0 м) при однородных гидрогеологических условиях приводит к уменьшению величин подземного стока в Карелии с запада на восток (от 1,7—1,8 л/сек. км^2 у границы до 0,9—1,0 л/сек. км^2 на побережье Белого моря).

Увеличение расчлененности рельефа вблизи Беломорско-Балтийского водораздела и на Онежско-Ладожском перешейке в сочетании с увеличением количества осадков от 470 мм на севере Карелии до 5240 мм на юге улучшает условия питания подземных вод и находит отражение в повышении величин модулей подземного стока (до 2,0 л/сек.км^2).

Общей зональности подземных вод, проявляющейся в уменьшении величин подземного стока с северо-запада на юго-восток ЕТС, в пределах данного мегарегиона не прослеживается.

Под влиянием местных климатических условий, особенностей рельефа и гидрографической сети уменьшение модулей подземного стока наблюдается от более возвышенных частей территории к более равнинным. Сравнительная однородность климата и гидрогеологических условий объясняет небольшую амплитуду колебания модулей подземного стока в пределах данного мегарегиона (от 1,0 до 2,0 л/сек.км^2).

Минимальные модули подземного стока на территории мегарегиона изменяются от 0,5 до 1,5 л/сек.км^2, составляя 0,5—0,7 от среднегодового подземного стока. Причем это соотношение увеличивается в районах с повышенным подземным стоком: в горах, на возвышенностях, т. е. в местах с лучшими условиями питания и дренирования подземных вод обеспечивается более высокий гарантированный модуль подземного стока.

Доля участия подземного стока в общем для большей части территории мегарегиона составляет 10—20%. Немного меньшая величина ее (5—10%) наблюдается на побережье Баренцева моря (в районе Мурманска). Расчлененность местности и хорошо водопроницаемые трещинные породы в этом районе в сочетании с большими уклонами рек, протекающих в каньонообразных долинах, обусловливают более быстрое, чем на остальной территории полуострова, стекание подземных вод в реки и благоприятные условия для поверхностного стока.

Бассейн северных морей, составляющий остальную часть рассматриваемой территории, в гидрологической литературе иногда называют Северным краем.

Черты географической зональности в распределении подземного стока можно проследить в западной части территории. Здесь имеет место уменьшение с севера на юг модуля подземного стока от 2,5 до 0,5 л/сек. км^2. Оно объясняется прежде всего климатическими особенностями. Увеличение осадков на этой территории, входящей в зону избыточного увлажнения, происходит незначительное (500—550 мм) в то время как величина испарения растет от 180 до 320 мм. Это превышение роста испарения над ростом осадков и сказывается на уменьшении подземного стока.

Наряду с климатическими факторами на снижение стока влияют особенности рельефа и гидрогеологии. Местность представляет собой плоскую равнину, сильно заболоченную, особенно в районе г. Вологды, в окрестностях Кубенского озера и в верховьях р. Сухоны. Заболачиванию местности способствует довольно значительное количество осадков (до 550 мм) и благоприятный состав почв (глины, суглинки). Правда, на подземный сток, распространенный в этом районе, болота верхового типа влияния не оказывает, но сам факт их существования подчеркивает неблагоприятные условия для формирования подземного стока: поверхность — плоская низина, на которой реки характеризуются малым эрозионным врезом, а следовательно, и неполнотой дренирования реками водоносных горизонтов. В гидрогеологическом отношении территория эта характеризуется погружением более водообильных пород каменноугольного и пермского возрастов под мощную толщу четвертичных отложений в направлении к Сухонской депрессии. Четвертичные отложения представлены маловодообильными моренными суглинками с преимущественным развитием глинистых озерно-аллювиальных отложений.

Наблюдающееся в западной части Северного края закономерное уменьшение подземного стока с севера на юг нарушается азональными величинами пониженных значений модулей подземного стока (3; 3—5; 5—6 л/сек.км^2). Они объясняются особенностями только гидрогеологических условий. Здесь на Онего-Двинском междуречье, Северо-Двинском и Кулойском плато развиты интенсивно закарстованные карбонатные отложения каменноугольного и пермского возрастов.

Соотношение величин подземного и общего стока в западной части Северного края сохраняется довольно постоянным. Доля подземного стока от общего 10—30%, только в карстовых районах она увеличивается до 30—40 и даже 50%.

Модуль минимального стока в западной части изменяется от 2,0 до 0,5 л/сек.км^2. Соотношение минимального и грунтового

стока составляет 0,5—0,8, увеличиваясь в карстовых районах и приближаясь к I, в связи с тем, что вычисленный по периоду устойчивой межени подземный сток очень близок по своему значению к минимальному стоку.

Определенную зависимость модуля подземного стока от климатических условий можно также проследить по направлению ко второй депрессии Северного края — Печорской низменности. Небольшое количество осадков (до 350 мм) обусловлено тем, что равнина эта находится между возвышенностями Семужий-мусюр, Белужий-мусюр и Уралом, которые располагаются на пути главного северо-западного переноса влаги, закрывая низменность от поступающих осадков. Климат характеризуется суровыми чертами, переходя от континентального в этом северо-восточном углу к субарктическому, с отрицательными значениями среднегодовых температур воздуха. В районе распространена островная многолетняя мерзлота, переходящая к северу от 65-й параллели в область сплошной мерзлоты с максимальной мощностью до 130—200 мм.

Помимо климатических факторов, на условия формирования подземного стока в этом районе накладывает отпечаток равнинная поверхность с отметками 100—150 м, имеющая пологий наклон к северу, слабо дренируемая реками.

В гидрогеологическом отношении здесь создаются также неблагоприятные условия для формирования подземного стока — Печорская равнина в северной и центральной частях сложена мощной толщей четвертичных отложений с прослоями моренных суглинков.

Все эти факторы приводят к тому, что эта территория отличается наименьшими для всего Северного края модулями подземного стока (до 0,5 л/сек.км^2). Пониженным значениям подземного стока соответствует и незначительная доля подземного стока от общего — меньше 10%. В южной части Печорской низменности величина подземного стока растет (до 2—2,5 л/сек.км^2) в связи с тем, что рельеф местности более возвышенный, создаются лучшие по сравнению с северной частью условия для дренирования реками водоносных горизонтов, сплошная вечная мерзлота сменяется островной, мощность четвертичных отложений снижается, близко к дневной поверхности подходят породы пермского, юрского и мелового периодов. Увеличивается доля подземного стока от общего до 10—20%.

Соотношение минимального и среднегодового подземного стока для Печорской низменности составляет 0,6—0,7.

Отдельные азональные районы пониженных значений подземного стока (2 л/сек. км^2) в бассейне рек Вашки и Пинеги, в Предтиманском прогибе, а также в бассейне рек Вычегды и Печоры объясняются исключительно особенностями геологического строения — все это участки развития преимущественно

глинистых отложений четвертичного, юрского периодов, нижнего триаса и верхней перми.

Доля подземного стока от общего на этих участках колеблется от 10 до 30%. Соотношение минимального и среднегодового подземного стока составляет 0,7—0,8.

Обширная область повышенного подземного стока (3—4 л/сек. км^2) приурочена к таким приподнятым участкам территории, как Тиманский кряж и отроги Уральских гор. Здесь уже наблюдается вертикальная поясность в распределении стока.

Тиманский кряж представляет собой водораздел между системами рек Северной Двины и Мезени с одной стороны и Печоры с другой. Характерная для Тимана особенность рельефа — вытянутость хребтов от побережья Баренцева моря на северо-западе до Урала на юго-востоке — нашла свое отражение и в изолиниях модулей подземного стока, причем его модули возрастают от периферийных частей к центру (от 2,5 до 4 л/сек. км^2), достигая максимальной величины в местах карстовых и трещиновато-карстовых вод в северной и средней частях Тиманского кряжа. Характерно, что даже такое незначительное повышение местности, как Тиманский кряж, оказалось достаточным, чтобы благоприятно сказаться на увеличении подземного стока в этом районе (увеличилось количество осадков до 500 мм, улучшились условия дренирования реками водоносных горизонтов).

Кроме того, наложил свой отпечаток и элемент гидрогеологии — участки распространения карбонатных и гипсовых пород палеозоя на Северном и Среднем Тимане, где идет разгрузка карстовых вод, отличаются особенно повышенными значениями величин подземного стока.

Такая же закономерность, только выраженная еще ярче, наблюдается на западных отрогах Уральских гор. Здесь с увеличением высоты местности резко возрастает количество выпадающих осадков (до 1000 мм), увеличиваются врезы рек (до 600—800 м), они начинают интенсивно дренировать водоносные горизонты, возрастает подземный сток.

Доля подземного стока на Тиманском кряже и в Предуралье довольно значительная — 30—40%, соотношение минимального и среднегодового подземного стока изменяется от 0,5 до 0,9.

2. Бассейн Балтийского моря

Бассейн Балтийского моря по структурно-гидролого-гидрогеологическому районированию представляет собой территорию региона Русской плиты, носящего то же название (II_2).

Для данной территории характерно относительно широкое и глубокое развитие речной сети, которое приводит к значительному подземному стоку в зоне интенсивного водообмена.

Мощность зоны интенсивного водообмена (пресных вод) определяется, как правило, дренирующей способностью рек,

находящейся в зависимости от глубины эрозионного вреза речных долин. На данной территории глубина эрозионного вреза изменяется от нескольких метров в наиболее низменных равнинных частях района (Ильменская впадина, Средне-Литовская и Приладожская низменности, побережья Финского и Рижского заливов) до 80—100 м на возвышенностях (Балтийская гряда, Валдайская, Латгальская, Ошмянская, Видземская возвышенности).

Уменьшение зоны интенсивного водообмена в депрессиях, обусловленное меньшей глубиной эрозионного вреза по сравнению с возвышенностями, приводит к снижению модулей подземного стока. Так, на указанных выше низменностях модули подземного стока составляют 1,0—1,5 л/сек. км^2.

На возвышенностях увеличение мощности зоны интенсивного водообмена (до 200—250 м) в сочетании с повышенным количеством атмосферных осадков, наблюдаемых в повышенных частях рельефа, и хорошими условиями дренажа их гидрографической сетью, приводит к тому, что они (возвышенности) являются основными областями питания подземных вод и характеризуются повышенными модулями подземного стока (3,0—4,0 л/сек. км^2). В среднем для территории района характерны модули подземного стока 2,0—2,5 л/сек. км^2.

Особо следует упомянуть о районе распространения карста, протягивающемся полосой на севере области вдоль южного побережья Финского залива (Силурийское плато). Основными областями питания подземных вод здесь являются Ижорская и Пандиверская возвышенности. Для центральных частей их характерно отсутствие постоянной гидрографической сети и наличие большого количества провальных карстовых воронок, через которые выпадающие атмосферные осадки попадают под землю и пополняют запасы подземных вод. По периферии этих возвышенностей наблюдается обильное выклинивание подземных вод, что обусловливает здесь повышенные значения модулей подземного стока (на Ижорской возвышенности до 4,9 л/сек. км^2, на Пандиверской до 6,0—11,0 л/сек. км^2). Для территории распространения карстовых подземных вод характерны большие изменения величины подземного стока на небольших площадях, несовпадение поверхностных и подземных водосборов. Все эти особенности условий формирования подземных вод необходимо учитывать при оценке подземного стока в этих районах.

Основным базисом всего континентального стока, в том числе и подземного, на данной территории служит Балтийское море. Наряду с общей направленностью подземного стока в сторону моря существует движение подземных вод в сторону крупных водоемов (озера Ладожское, Онежское, Ильмень, Псковское, Чудское, Вырь-ярь), приуроченных к обширным котловинам тектонического происхождения и древним речным долинам (рек

Волхова, Свири, Ловати, Мсты, Великой, Нарвы, Западной Двины, Венты, Немана).

На фоне указанных выше направлений подземного стока можно выделить движение подземных вод более высокого яруса, направленное в сторону современных речных долин (рр. Оять, Сясь, Пчевжа, Луга, Пярну, Межа, Дисна, Огре, Лиелуппе, Шара, Котра, Швентойн и др.).

Основные направления движения подземных вод находят свое отражение в распределении по территории изолиний модулей подземного стока. Общее уменьшение модуля подземного стока наблюдается с юго-востока на северо-запад от главного водораздела (4,0—5,0 л/сек. км^2) к побережью (1,5—2,0 л/сек. км^2). На этом общем фоне выделяются отдельные районы с повышенным подземным стоком, обусловленные местными физико-географическими и гидрогеологическими условиями (отдельные возвышенности с повышенным количеством осадков, области распространения карста и др.). Наибольший для данного региона (не считая карстовых районов) модуль подземного стока (6,2 л/сек. км^2) отмечен в бассейне р. Меркис и обусловлен интенсивным дренажем подземных вод толщи флювиогляциальных песков, отличающихся высокой водообильностью.

Распределение минимальных модулей подземного стока в общих чертах соответствует изменению годовых модулей подземного стока: от 2,5—3,0 л/сек. км^2 на Белорусской гряде до 0,5—1,0 л/сек. км^2 на низменностях и побережьях.

Минимальные модули подземного стока на данной территории составляют 0,5—0,8 от среднегодовых модулей подземного стока.

Доля подземного стока в общем речном стоке на территории региона изменяется в пределах от 10 до 50%. Наибольшие значения ее наблюдаются в среднем течении р. Немана (50% и более), где в формировании подземного стока в реки наряду с водами зоны активного водообмена, имеющих большую мощность, принимают участие и артезианские воды глубоких водоносных комплексов.

Уменьшение доли подземного стока в общем речном стоке (до 10—20%) отмечается в пониженных частях территории и вблизи очагов разгрузки подземных вод (Приильменская впадина, побережье Рижского залива, Средне-Литовская низменность).

3. Бассейны Черного и Азовского морей

По общим гидрогеологическим условиям формирования подземного питания рек на территории бассейнов Черного и Азовского морей выделяются следующие структурно-гидролого-гидрогеологические единицы: районы бассейнов рек — Припяти (II-3а), Днепра (II-3б), Дона (II-3в), Причерноморский бассейн (II-3г), относящиеся к мегарегиону Русской плиты, а также отдельные

мегарегионы — Украинский щит (IV) и Донецкий кряж (V) и территория горноскладчатого сооружения — Восточные Карпаты.

Ниже дается описание особенностей распределения подземного стока в реки применительно к принятому районированию.

Бассейны рек Припяти, Днепра, Причерноморский бассейн

Модуль подземного стока в реки на описываемой территории изменяется от 3,5 л/сек. км^2 в северных частях территории до 0,1 л/сек. км^2 и меньше на юге.

Зональность изменения подземного стока в восточной части территории (район II-3б) выражена лучше, чем в западной и юго-западной частях, как в силу большей удаленности этого района от смягчающего влияния Атлантического океана, так и в силу большей однородности гидрогеологических и других условий. Почти вся территория района II-3б занята Днепровско-Донецкой впадиной, выполненной палеогеновыми отложениями различного возраста.

На территории всех районов при повышении местности отмечается увеличение подземного стока, обусловленное обычно как увеличением осадков (орографические осадки), так и увеличением густоты и глубины вреза речной и овражно-балочной сети. Последнее приводит к увеличению интенсивности дренирования водоносных горизонтов. В условиях же плоских пониженных равнин, наоборот, как правило, наблюдается уменьшение подземного стока. На таких равнинах значительная часть выпавших осадков задерживается в блюдцеобразных впадинах различных размеров и расходуется на испарение. Количество испарившейся воды тем больше, чем южнее расположена равнина. В то же время скорости стекания как речных, так и подземных вод очень малы, что приводит к уменьшению расхода подземного потока в водоносном пласте.

Примеры азональных отклонений в колебаниях модулей подземного стока даются при описании отдельных районов.

В бассейне р. Припяти, на Полесской низменности, характерным является малая изменчивость подземного стока по территории: от 1,0 до 0,5 л/сек. км^2. Это объясняется однотипным строением пониженной, сильно заболоченной и залесенной, неглубоко расчлененной равнины, сложенной маловодообильными четвертичными отложениями. К северу и югу при повышении местности к водоразделам величины среднегодовых модулей подземного стока увеличиваются: на севере — до 1,5—2,0 л/сек. км^2, в южной части — до 3 л/сек. км^2 и больше (Волыно-Подольская возвышенность).

В бассейне Днепра (район II-3б) модуль подземного стока изменяется от 3 до 0,2 л/сек. км^2 и менее — (уменьшение с севера на юг).

На Приднепровской низменности модуль колеблется от 1 до

0,2 л/сек. км². Северо-восточнее г. Киева в пределах низменности отмечается аномальное понижение величины подземного стока до 0,5 л/сек. км² и менее, приуроченное к наиболее плоскому, низменному, слаборасчлененному участку равнины. Одновременно здесь отмечается меньшая водообильность полтавско-харьковских отложений, не подпитываемых на описанном участке бучакско-каневским водоносным горизонтом, погруженным в этом районе на глубину 100—200 м и перекрытым сверху водоупорной прослойкой.

На Смоленско-Московской возвышенности и части Белорусской моренной гряды модули среднегодового подземного стока достигают величины 3,5 л/сек. км² (орографическое повышение подземного стока и благоприятные гидрогеологические условия). Средне-Русская возвышенность дает менее значительное повышение подземного стока. В пределах Причерноморского бассейна (район II-3г) модули подземного стока изменяются от 3 до 0,1 л/сек. км² и менее. Наибольшие их величины отмечаются в северо-западной части Волыно-Подольской возвышенности, что обусловлено как бóльшей расчлененностью и бóльшим выпадением осадков, так и благоприятными гидрогеологическими условиями этого района — наличие огромной толщи хорошо обводненных мергельно-меловых пород, прикрытых маломощной толщей четвертичных отложений. В средней части Волыно-Подольской возвышенности, еще достаточно обеспеченной осадками (500—550 мм в год) и сильно расчлененной левобережными притоками р. Днестра, модули подземного стока составляют 1,0—1,5 л/сек. км². К югу и юго-востоку модуль подземного стока быстро снижается до 0,1 л/сек. км² и менее. Это объясняется понижением высоты местности, уменьшением количества осадков, увеличением сухости и повышением температур воздуха, а также сменой гидрогеологических условий.

Наименьший подземный сток имеет место в пределах Причерноморской низменности, находящейся в наиболее неблагоприятных климатических, рельефных и гидрогеологических условиях (малообводненные неогеновые отложения). Подземный сток здесь осуществляется в водоносных пластах, дренируемых только крупными глубоко врезанными транзитными реками или выклинивающихся непосредственно в Черное море.

Закономерности изменения минимальных модулей подземного стока, коэффициентов подземного стока и величин доли подземного стока в общем речном повторяют в общих чертах закономерности изменения среднегодовых модулей подземного стока, приведенные выше. Так, минимальные модули подземного стока изменяются по территории от 2,5 до 0,05 л/сек. км² и менее, составляя от 0,2 до 0,9 от среднегодовых; коэффициенты подземного стока — от 18 до 1% и меньше; доля подземного стока в общем речном — от 40—50 до 10% и менее.

Распределение величины подземного стока по территории бассейна Дона, с одной стороны, подчиняется законам географической зональности, с другой стороны, нарушается азональными факторами.

Зональный характер выражается в общем уменьшении величин подземного стока от 2,5 л/сек. км^2 на северо-западе территории до 0,1 л/сек. км^2 на юго-востоке, что свидетельствует о доминирующем значении климатических факторов в формировании подземного стока.

Общая закономерность распределения величин подземного стока нарушается под влиянием орографических и гидрогеологических условий. Область максимального подземного стока отмечается в пределах Средне-Русской возвышенности, в бассейнах рек Красивой Мечи и Сосны, где модули подземного стока достигают 2,5 л/сек. км^2. Повышенный подземный сток объясняется не только особенностями рельефа и наибольшей увлажненностью этой части территории, но и влиянием геоморфологических и гидрогеологических условий. Глубоко врезанные долины рек вскрывают коренные породы девона, отличающиеся высокой водообильностью.

Максимальному значению модуля подземного стока соответствует максимальная величина доли подземного стока от общего, составляющая в бассейне рек Красивой Мечи, Сосны и Верхнего Дона 40—50%.

К югу, по всей территории бассейна Дона, величина подземного стока понижается. В правобережной части (в пределах Средне-Русской возвышенности) подземный сток значительно выше, чем в левобережной, низменной части (в пределах Тамбовской равнины). Наибольшее отклонение изолиний модулей подземного стока к югу в бассейне р. Оскола и в верховьях Северского Донца обусловлено наличием в этой части региона наиболее водообильной мергельно-меловой толщи верхнего мела, дренируемой реками. Далее к югу и юго-западу отложения мела погружаются под менее водообильные отложения палеогена, и подземный сток снижается здесь от 1,5 л/сек. км^2 на севере до 0,3—0,2 л/сек. км^2 на юге. Доля подземного стока от общего к югу также уменьшается, составляя в нижнем течении Дона менее 10%.

На территории Тамбовской равнины модули подземного стока изменяются от 1,0 до 0,3 л/сек. км^2. Равнинный характер рельефа, местами заболоченного, с незначительными врезами речных долин, вызывает понижение модулей подземного стока по сравнению с западной частью бассейна Дона. Кроме того, реки Тамбовской равнины отличаются тем, что прорезают главным образом песчано-глинистую толщу четвертичных отложений, характе-

ризующихся слабой водообильностью. В западной части Тамбовской равнины, в бассейне р. Воронежа, величины подземного стока несколько выше и составляют 1,5—1,0 л/сек. км². Это вызвано наличием здесь более водообильных четвертичных отложений, представленных флювиогляциальными и аллювиальными песчаными фациями. Доля подземного стока от общего в пределах Тамбовской равнины изменяется от 10 до 20%, повышаясь в бассейне р. Воронежа до 30—40%.

Юго-восточная и южная части нижнего течения Дона — бассейны рек Бузулука, Чира, нижнее течение Медведицы — характеризуются наиболее низкими значениями подземного стока (0,3—0,1 л/сек. км²) с наибольшим повышением до 0,4 л/сек. км² в районе Калачской возвышенности и в бассейне р. Арчеды.

На понижение подземного стока в юго-восточной части территории, кроме указанных факторов, оказывают влияние гидрогеологические условия. Здесь развиты преимущественно древнечетвертичные песчано-глинистые отложения, обладающие плохой водоотдачей. Ввиду небольшого эрозионного вреза речная сеть почти не вскрывает водоносных горизонтов коренных пород. В результате создаются неблагоприятные условия для формирования подземного стока в южной и юго-восточной частях бассейна Дона.

Минимальные модули подземного стока в пределах рассматриваемого региона изменяются от 1,5 до 0,05 л/сек. км². Распределение минимальных модулей подземного стока аналогично распределению среднегодового подземного стока, но изолинии первого имеют более плавный характер. Соотношение минимального и среднегодового подземного стока составляет 0,5—0,7.

Восточные Карпаты

Восточные Карпаты, участок Карпат в границах СССР, входят в мегарегион VII, который служит южным обрамлением Восточно-Европейской платформы и составляет отдельный регион 3.

На формирование подземного стока в реки на территории Восточных Карпат значительное влияние оказывают, помимо гидрогеологических условий, особенности орографии — горный характер рельефа, климатические различия, различия в водном режиме рек.

По условиям формирования подземного стока в реки в Восточных Карпатах можно выделить следующие районы: Предкарпатский краевой прогиб, Складчатые Восточные Карпаты и Закарпатская низменность (Закарпатский внутренний прогиб).

Предкарпатский краевой прогиб вытянут сравнительно неширокой изогнутой полосой вдоль северо-восточного края Складчатых Карпат. Границы Предкарпатского прогиба в основном

совпадают с Предкарпатской равниной, которая наклонена от гор к северо-востоку, к долине Днестра.

В Предкарпатье подземный сток формируется главным образом за счет вод, развитых в аллювиальных отложениях, занимающих примерно от одной трети до половины всей территории.

Среднегодовые модули подземного стока изменяются от 1 до 4 л/сек. км². Минимальные модули подземного стока изменяются от <1 до 3 л/сек. км². Подземный сток составляет от 10 до 26% общего речного стока.

На территории Складчатых Восточных Карпат, несмотря на довольно пестрое распределение среднегодовых модулей подземного стока, можно наметить закономерность в изменении его в направлении изменения годовых сумм осадков. Среднегодовые модули подземного стока изменяются от 3 до 12 л/сек. км², а минимальные — от 2 до 9 л/сек. км². Подземный сток составляет от 12 до 32% общего речного.

На территории Закарпатской низменности воды аллювиальных отложений являются основным источником подземного питания рек. Среднегодовые модули подземного стока изменяются от 2 до 7 л/сек. км², а минимальные — от 1 до 6 л/сек. км². Среднегодовые и минимальные модули подземного стока увеличиваются с запада на восток. Подземный сток составляет 15—32% общего речного стока.

Украинский щит и Донецкий кряж

Территорию Украинского кристаллического щита занимает правобережная часть бассейна Днепра (среднее и нижнее течение), бассейны левобережных притоков нижнего течения Днепра и водораздельное пространство между левобережными притоками Днепра и реками, впадающими в Азовское море. Территория Донбасса включает в себя правобережье р. Северского Донца и верхние части бассейнов рек, впадающих в Азовское море.

Условия формирования подземного стока на территории мегарегионов находятся в зависимости от совокупности многих факторов, ведущим из которых является географическая зональность.

Вслед за изменением климата с северо-запада на юго-восток происходит и зональное уменьшение подземного стока. Для северо-западной части мегарегиона характерно значение среднегодовых модулей 0,7—0,8 л/сек. км². В этой части отмечаются благоприятные условия для просачивания атмосферных осадков, которые выпадают здесь в количестве 600—650 мм в год. Кристаллические породы этого участка сверху покрыты незначительным слоем хорошо проницаемых песков и вода быстро и в достаточном количестве поступает в трещины кристаллических пород. Наибольшие величины подземного стока (до 0,8 л/сек. км²) на-

блюдаются при переходе Полесья в лесостепь. Частичное уменьшение осадков в этом районе до 550 мм в год (верхняя часть бассейнов рек Южного Буга и Рось) компенсируется повышенной расчлененностью приподнятой части мегарегиона, приуроченной к Приднепровской возвышенности, и величины среднегодовых модулей подземного стока остаются высокими.

В юго-восточном направлении величина среднегодовых модулей подземного стока быстро снижается как в силу большей континентальности климата, так и в силу гидрогеологических условий (развитие слабопроницаемых почв на лёссовидных суглинках и дренирование реками менее обводненных пород палеогена и неогена при постепенном погружении к юго-востоку кровли докембрийских отложений).

В юго-восточной части мегарегионов величины модулей подземного стока уменьшаются до 0,1 л/сек. км^2 и менее.

Соответственно с северо-запада на юго-восток уменьшаются и минимальные модули подземного стока — от 0,4 до 0,05 л/сек. км^2 и доля подземного стока в общем речном стоке — от 20—30 до 10% и менее.

Большое влияние на формирование подземного стока на территории мегарегионов оказывает рельеф и связанная с ним различная степень расчлененности местности речными долинами, балками и оврагами. Как правило, в местах повышения местности наблюдается и более высокий подземный сток, обусловленный двумя причинами: с увеличением высоты местности наблюдается увеличение осадков и с увеличением высоты местности увеличивается густота и глубина вреза речной и овражно-балочной сети, что приводит к увеличению интенсивности дренирования подземных вод.

В Полесье в верховьях бассейнов рек Уборть, Уж, Ирша, Тня наблюдается область пониженного подземного стока (менее 0,5 л/сек. км^2). Такое понижение можно объяснить на этом участке меньшей трещиноватостью пород, чем на окружающей территории, а следовательно, их меньшей обводненностью. Это подтверждается наличием здесь скважин с небольшим дебитом. Одновременно для этого участка характерен рельеф: «плоская равнина с редкими ложбинами» (или «плоская равнина в комплексе с гривистыми равнинами»).

На возвышенностях Донецкий кряж и Приазовской отмечается увеличение модулей подземного стока по сравнению с более низким подземным стоком окружающей территории; в Донецком кряже — до 0,7—0,9 л/сек. км^2, на Приазовской возвышенности — до 0,4 л/сек. км^2.

Эти районы характеризуются густотой речной сети около 0,5 км/км^2, густотой овражно-балочной сети 0,75—1,0 км/км^2 при глубине эрозионного вреза около 150 м, иногда до 200—250 м. Количество осадков в Донецком кряже достигает 600 мм в год.

При оценке увеличения модулей этих районов необходимо учитывать также лучшую обводненность пород по сравнению с окружающей территорией: каменноугольных отложений в Донбассе и кристаллических пород на Приазовской возвышенности.

Здесь наблюдаются также и наибольшие минимальные модули подземного стока: Донецкий кряж — до 0,5 л/сек. км^2, Приазовская возвышенность — до 0,2 л/сек. км^2. Для территорий указанных возвышенностей характерно и увеличение доли подземного стока в общем речном до 20—30% по сравнению с долей на равнинных пространствах в 10—20% от общего.

В юго-восточной части мегарегионов в верховьях р. Волчьей находится область самых низких среднегодовых модулей подземного стока (от менее 0,1 до 0,05 л/сек. км^2).

Это находит объяснение в гидрогеологических условиях этого участка. Расположенная здесь так называемая Орехово-Гуляйпольская депрессия кристаллических пород заполнена малообводненными неогеновыми отложениями мощностью до 150 м, водоносные горизонты которых и дренируются реками.

4. Бассейн Каспийского моря

Учитывая в бассейне Каспийского моря особые условия формирования подземного питания рек, стекающих с Кавказа и впадающих в него с территории аридных областей Казахстана и Средней Азии, ниже рассмотрены характеристики распределения подземного стока в реки для бассейна р. Волги.

Регион бассейна р. Волги входит в состав мегарегиона Русской плиты. Речная сеть региона принадлежит к бассейну Каспийского моря и составляет часть одного из крупнейших районов внутреннего или замкнутого стока Евразии.

По структурному гидролого-гидрогеологическому районированию на территории региона выделяют три района: Верхне-Волжский, Волго-Камский, Прикаспийский.

Огромная территория региона включает в себя такие крупные бассейны рек, как бассейн Оки, Суры, Ветлуги, почти весь бассейн ($^9/_{10}$) Камы и Вятки.

В распределении подземного стока на территории региона необходимо отметить следующие общие закономерности. Ведущим фактором в распределении подземного стока по территории является климат, придающий распределению подземного стока зональный характер. Модуль подземного стока на территории региона изменяется от 3,0 л/сек. км^2 на северо-западе до десятых долей литра в секунду и отсутствия подземного стока в реки на юго-востоке региона. В этом же направлении изменяются и годовые величины осадков от 700 до 150 мм.

В формировании и распределении подземного стока на территории региона значительную роль играет рельеф. Области

повышенного подземного стока на территории региона приурочены к районам возвышенностей, пониженного — к низменностям. Районы возвышенностей получают бо́льшее количество осадков, чем низменности, поэтому речная сеть в этих районах отличается более глубокими врезами долин (100—300 м) и благоприятными условиями дренирования. Так, на Приволжской возвышенности наблюдается высотная зональность в распределении величин подземного стока (увеличение модуля с высотой), на что указывают области с величиной подземного стока 2,0; 1,5; 1,0 л/сек. км^2, соответствующие количествам осадков 450, 400 и 350 мм.

Повышенные значения модуля подземного стока наблюдаются в районе Валдайской возвышенности (3,0 л/сек. км^2), Средне-Русской (2,5 л/сек. км^2), Бугульминско-Белебеевской (1,5 л/сек. км^2), Северных Увалов (4,0 л/сек. км^2). Менее благоприятны условия формирования подземного стока в районах низменностей: Молого-Шекснинской, Марийской, Мещерской, Тамбовской. Слаборазработанные долины рек, небольшие эрозионные врезы русел обусловливают низкие значения модулей подземного стока в районах низменностей (до 0,5 л/сек. км^2 и ниже).

Существенное влияние на условия питания подземных вод, а также на величину и характер распределения подземного стока оказывают, кроме климата и рельефа, гидрогеологические условия. Наиболее ярко влияние гидрогеологических факторов проявляется в карстовых районах, где карст выступает как азональный фактор в формировании и распределении подземного стока по территории региона. Так, карстовые области бассейнов рек Сережи, Теши и Пьяны являются районами с аномальными значениями модулей подземного стока. В бассейне р. Сережи наблюдается отрицательный карст и низкий модуль стока (0,6 л/сек. км^2), что объясняется, очевидно, несоответствием подземного и поверхностного водосбора реки, т. е. уходом воды подземным путем за пределы поверхностного водосбора. Усилению этого процесса способствует сложная система карстовых озер.

В бассейне р. Пьяны карст положительный. Модуль подземного стока, вычисленный по частному бассейну, равен 2,3 л/сек. км^2, в то время как в верховьях бассейна он равен всего лишь 0,35 л/сек. км^2.

Большое развитие карст получил на территории Камского бассейна в области Предуральского прогиба и Уфимского плато. В районе Уфимского плато карст проходной, аккумулирующие емкости небольшие по сравнению с карстовыми районами горной части Урала. Эта территория характерна модулем подземного стока порядка 4 л/сек. км^2. На севере Верхней Волги повышенные модули подземного стока (3,0—2,5 л/сек. км^2) объясняются распространением отложений карбона, содержащими основные горизонты пресных вод. К югу отложения карбона погружаются

на большую глубину и перекрываются мощной толщей мезозойских пород, менее водообильных, поэтому в этом районе модули подземного стока уменьшаются до 2,0—1,5 л/сек. км^2. Гидрогеологическими причинами, а именно литологией, объясняются приблизительно одинаковые значения модулей подземного стока территории средней левобережной Волги. Близкие между собой значения модулей подземного стока в бассейнах рек Унжы и Немды объясняются тем, что на этой территории в связи с пестротой литологического состава не выделяется выдержанный водоупор, наличие которого меняло бы дренирующую роль рек.

На севере Приволжской возвышенности, где реки дренируют маловодные юрские, нижнемеловые и пермские отложения, представленные глинами, модуль подземного стока резко уменьшается до 0,5 л/сек. км^2 и ниже.

На территории Сухого Заволжья формирование подземного стока обусловлено гидрогеологическими особенностями района. Большое развитие здесь получили сыртовые глины, достигающие значительной мощности, до 20—50 м, а первый от поверхности устойчивый водоносный горизонт заключен в слоистых песках, залегающих под толщей этих глин. Подземное питание рек района очень слабое, неустойчивое, количественно характеризуется модулями подземного стока порядка 0,1 л/сек. км^2 и меньше.

Влиянием физико-географических факторов можно объяснить и распределение по территории региона минимального стока, доли подземного стока от общего речного и коэффициента подземного стока.

Минимальный модуль подземного стока изменяется по территории Волжского региона от 1,5 л/сек. км^2 (северо-западная часть Верхне-Волжского района) до 0,01 л/сек. км^2 (район Сухого Заволжья) и полного отсутствия подземного стока в реки (Прикаспийская низменность). Соотношение минимального и подземного стока в среднем по территории региона равно 0,5—0,7.

Доля подземного стока от общего речного изменяется по территории от 10% и менее (район Сухого Заволжья) до 40—50 и >50% (Приволжская возвышенность). Значение доли 10—20% приурочено, как правило, к районам низменностей: Мологo-Шекснинской, Верхне-Волжской, Мещерской, а также району Сухого Заволжья, где условия формирования подземного стока неблагоприятны в силу комплекса физико-географических факторов и в первую очередь климата. Повышенные значения доли (30—40, 40—50%) приурочены, как правило, к районам возвышенностей, являющихся местными областями питания (Приволжская, Валдайская, Бугульминско-Белебеевская возвышенности). На территории Верхне-Волжского района довольно высокое значение доли (30—40%) совпадает с областью распространения водообильных карбоновых отложений. К югу, по мере

погружения карбона под четвертичные отложения, доля подземного стока снижается до 20—30%.

Коэффициент подземного стока рек на территории региона изменяется от 10 (район возвышенностей) до 1 (район Заволжья).

Таким образом, формирование подземного стока на территории Волжского региона определяется комплексом физико-географических факторов. Распределение подземного стока на территории региона носит в общем зональный характер.

5. Бассейны рек Кавказа

Общие особенности подземного питания рек Кавказа обусловлены тем, что территория их бассейнов расположена в границах горноскладчатой области, являющейся частью обширного мегарегиона — Карпатско-Крымско-Кавказской горно-складчатой области (VII).

Горные районы Кавказа являются областями питания подземных вод в силу своего гипсометрического положения, большого количества выпадающих в связи с этим осадков и гидрогеологических особенностей. Области питания и области распространения подземных вод, как правило, совпадают.

Подземный сток формируется под дренирующим воздействием многочисленных рек. Для горных рек Кавказа характерен нисходящий режим подземного стока, в основном при отсутствии гидравлической связи. Интенсивное дренирование подземных вод вызывает значительный подземный сток в реки.

Определяющее влияние на величину подземного стока оказывают климатические и гидрогеологические особенности горных районов. Как и для всех гидрологических характеристик на Кавказе, отчетливо прослеживается высотная поясность подземного стока: с увеличением высоты местности увеличивается величина подземного стока.

Сложные физико-географические условия определяют большую пестроту в распределении подземного стока в реки.

На территории Горного Кавказа среднегодовые модули подземного стока изменяются в пределах от 0,3 до 35,0 л/сек. км^2, а минимальные модули — от 0,2 до 25,0 л/сек. км^2. Степень участия подземных вод в общем стоке реки зависит главным образом от гидрогеологических условий. Благодаря хорошей проницаемости пород (карст южного склона Большого Кавказа, Джавахетское нагорье Малого Кавказа, вулканическое нагорье Армении) коэффициент подземного питания достигает максимальных значений — 70—75%. На северо-западной оконечности северного склона Большого Кавказа, сложенного плохо проницаемыми глинистыми породами, величина его меньше 10%.

Для центральных районов Большого Кавказа (осевая часть горного сооружения и северное и южное его обрамление) характерно преобладание поверхностного стока над подземным. Доля подземного стока от общего в среднем составляет здесь 25—35%.

Распределение модулей по этой территории отражает высотную зональность подземного стока и согласуется с изменением количества осадков в зависимости от высоты и экспозиции склонов. На северном склоне модуль подземного стока изменяется от 1,5 до 10,0 л/сек. км^2 при интервале высот от 1700 до 2700 м (минимальные модули изменяются от 1,0 до 6,0 л/сек. км^2). На южном склоне преобладает влияние изменения количества осадков с запада на восток, поэтому модули подземного стока составляют от 16,0 л/сек. км^2 в восточной части до 25,0 л/сек. км^2 на западе (минимальные модули соответственно изменяются от 12 до 20 л/сек. км^2). Северный склон Центрального Кавказа характеризуется модулями подземного стока от 3,5—4,0 до 7,0—10,0 л/сек. км^2 (соответственно минимальные модули — от 2,5 до 4,0—7,0 л/сек. км^2), что составляет примерно половину речного стока. Значительная доля подземного питания (40—50%) объясняется наличием единого водоносного комплекса трещинно-пластовых и трещинно-карстовых вод, отличающихся значительной динамичностью.

В восточной части северного склона в пределах горного Дагестана в силу неблагоприятных климатических условий (незначительные осадки 400—700 мм и большое испарение до 400—500 мм) карстообразующие процессы не получили достаточного развития, поэтому коэффициент подземного питания не превышает 40—50%. Модуль подземного стока в среднем не превышает 7 л/сек. км^2 (минимальные модули 4,0 л/сек. км^2).

На территории юго-восточной части Большого Кавказа, где количество осадков уменьшается до 150—200 мм, значение модулей подземного стока снижается до 1 л/сек. км^2, а коэффициент подземного питания — до 20—30%.

Центральная и восточная части южного склона Большого Кавказа сложены известняковыми флешевыми, сложно дислоцированными с большой трещиноватостью отложениями. Хорошо проницаемые породы и значительное количество выпадающих осадков (до 1200 мм/год) обусловливают большие величины подземного стока (среднегодовой модуль подземного стока достигает 30—35 л/сек. км^2, минимальный — до 25,0 л/сек. км^2) и значительный коэффициент подземного питания (60—70%). В юго-западной части Большого Кавказа преобладают сравнительно слабоводообильные породы, поэтому коэффициент подземного питания здесь до 30—40% при значениях модулей подземного стока от 8 до 20 л/сек. км^2 (минимальные модули от

5 до 16 л/сек. км^2) в зависимости от изменения количества осадков с высотой.

К западу от этого района подземный сток достигает максимальных для Кавказа величин. Наличие известковых пород и обильных осадков (до 2000 мм за год) создает здесь благоприятные условия для развития карста. Участки развитого карста характеризуются среднегодовыми модулями подземного стока порядка 35—40 л/сек. км^2, при минимальных модулях до 20 л/сек. км^2.

Особо выделяется по характеристикам подземного стока северо-западная часть Большого Кавказа. Распространение маловодообильных глинистых пород объясняет самый низкий по Кавказу коэффициент подземного питания (2—6%) и модули подземного стока 1—2 л/сек. км^2 (минимальный модуль 0,5—1,0 л/сек. км^2).

Западное предгорье Большого Кавказа и Восточный Дагестан представлены преимущественно слабоводообильными глинисто-мергелистыми и песчано-глинистыми отложениями, характеризующимися модулями подземного стока 0,2—0,3 л/сек. км^2.

Таким образом, для Большого Кавказа хорошо прослеживается общая тенденция к уменьшению величины подземного стока с северо-запада на юго-восток, что согласуется с соответствующим уменьшением количества осадков и увеличением сухости климата в этом же направлении.

Климатические и гидрогеологические условия районов Малого Кавказа более однородны. Поэтому распределение модулей подземного стока на территории менее пестро, хотя и достаточно разнообразно.

Наибольшим коэффициентом подземного питания (>50%) характеризуются районы Джавахетского вулканического нагорья и центральной части вулканического нагорья Армении, сложенные сильно трещиноватыми, хорошо проницаемыми вулканогенными породами. Модули подземного стока изменяются здесь от 4,0 до 8,0 л/сек. км^2 (минимальные модули 2,0—7,0 л/сек. км^2) в соответствии с количеством осадков (600—800 мм за год), выпадающих в зависимости от высоты. Наименьшее участие в общем стоке реки принимают подземные воды на территории Горного Талыша. Доля подземного стока от общего здесь не превышает 20%, что объясняется распространением сравнительно маловодообильных пород (песчаники, мергели, глины). Особенным для этого района является уменьшение количества выпадающих осадков с высоты ниже 800 м. Это сказывается и на изменении модуля подземного стока с высотой (среднегодовой модуль изменяется от 0,7 до 3,5 л/сек. км^2, минимальный — от 0,5 до 2,0 л/сек. км^2).

Для остальной территории Малого Кавказа характерно преобладание поверхностного стока над подземным (как правило,

коэффициент подземного питания порядка 30—40%). Это объясняется распространением довольно однородных слаботрещиноватых вулканогенных пород. Разнообразие значений модуля подземного стока для этой территории объясняется различием климатических условий.

Наибольшие величины подземного стока приходятся на территорию западной части Аджаро-Триалетской складчатой зоны, где выпадает до 2500 мм осадков за год. Здесь величины среднегодовых модулей подземного стока достигают 12—20 л/сек. км^2 (минимальные модули 10—15 л/сек. км^2).

В восточной части Аджаро-Триалетской области, где выпадает не больше 600—700 мм осадков за год, модуль подземного стока изменяется от 0,5 до 4,0 л/сек. км^2, увеличиваясь с увеличением высоты местности (минимальные модули изменяются от 0,2 до 3,0 л/сек. км^2).

Таким образом, так же как и для Большого Кавказа, на территории Малого Кавказа хорошо прослеживается общая тенденция к уменьшению величин подземного стока в направлении с северо-запада на юго-восток.

6. Бассейны рек Урала

Территория бассейнов рек Урала входит составной частью в мегарегион Уральская горноскладчатая область, включающий в себя собственно Урал, острова Новой Земли и Вайгач, хребты Пай-Хой и Мугоджары.

Подземное питание рек этого мегарегиона осуществляется из верхних водоносных пластов, развитых в границах водосбора и питающихся за счет инфильтрации атмосферных осадков, а также за счет перетока подземных вод из других водоносных комплексов соседних водосборов. При этом разгрузка может осуществляться как непосредственно в реки, так и в водоносные пласты закарстованных пород.

Развитие многолетней мерзлоты в пределах Полярного и частично Приполярного Урала обусловливает сток талых вод по мерзлым породам, что исключает возможность берегового регулирования в этих районах.

Доля подземного стока в формировании общего речного изменяется по территории от 40—50 до 10% и менее. Наибольшее ее значение (40—50% и выше) наблюдается на закарстованных участках западного склона в бассейнах рек Вишеры, Косьвы, Усьвы, Сосьвы, Шугора и на участке рек Сосьвы и Ваграна на восточном склоне. Наименьшее участие в общем стоке рек — 10% и ниже принимают подземные воды, приуроченные к районам развития многолетней мерзлоты в бассейнах рек Полярного Урала и району развития рыхлых мезокайнозойских отложений

юго-восточной окраины восточного склона — бассейн р. Тобола и его притоки.

Для большой части водораздельного Урала, сложенного метаморфизованными маловодообильными породами, подземный сток от общего составляет 20—30%, для восточного склона 10—30%, для западного склона 30—40%.

Хорошо развитая гидрографическая сеть, глубокие врезы речных долин (до 80—100 м, по данным А. О. Кеммериха, и до 600—800 м на Полярном Урале, по данным Л. Б. Ковальского) при больших уклонах рек в их горной части повсеместно способствуют полноте дренирования основных водоносных горизонтов в реки Урала.

Вместе с тем реки предгорий (Южное Зауралье и Мугоджары с холмистым ландшафтом и слаборасчлененной равниной) характеризуются незначительной глубиной эрозионного вреза, малой водностью и периодичностью стока.

Сложность ландшафтов и разнообразие физико-географических условий Уральской горноскладчатой области определяют значительные колебания средних многолетних модулей подземного стока по территории — от 0,1 до 10 л/сек. км². Наиболее высокий подземный сток формируется в области развития закарстованных пород палеозоя на западном склоне и карстующихся карбонатных силура и девона на восточном склоне.

Наибольшие модули подземного стока (до 12 л/сек. км²) отмечаются на территории бассейнов рек Вишеры, Шугора, Кожима, где выпадает максимальное количество атмосферных осадков (1000 мм и больше) и наблюдается наибольшая закарстованность пород, связанная с их сильной трещиноватостью. Подземный сток этих территорий обладает высокой динамичностью (коэффициент динамичности $K_д$=3—4—5) и может существенно меняться на участках интенсивного развития карста (5—10 л/сек. км²). Отмечается область повышенного подземного стока (4,0 л/сек. км²) на территории Уфимского плато, связанная со значительной трещиноватостью закарстованных пород и некоторым увеличением осадков (до 780 мм). Вся полоса карбонатной карстующейся толщи западного склона оценивается среднегодовым модулем подземного стока от 3,0 до 4,0 л/сек. км².

Области повышенного подземного стока обусловливают отсутствие зонального хода изолиний на западном склоне.

На восточном склоне распределение величин подземного стока в большей степени подчиняется широтной зональности и вертикальной поясности. Изменение модулей подземного стока от 2,0 до 0,5 л/сек. км² происходит с северо-запада на юго-восток, нарушаясь на Северном Урале на участках интенсивного развития карста с повышенным стоком в бассейнах рек Сосьвы, Ваграна (3,0—3,5 л/сек. км²). Следует отметить, что для Горного Урала вертикальная зональность подземного стока не всегда

связана с изменением осадков с высотой, а определяется поясностью распределения пород разной степени трещиноватости. Так, на западном склоне Урала наблюдается уменьшение модуля подземного стока с высотой вследствие того, что горные породы водораздельной части хуже фильтруют выпадающие осадки, чем участки, расположенные ниже по течению и находящиеся в полосе карбонатных пород. В то же время на восточном склоне, где участки карста менее значительны, происходит увеличение модулей подземного стока, обусловленное увеличением атмосферных осадков.

Наименьшие значения среднегодового многолетнего модуля подземного стока — 0,3—0,1 л/сек. км² — приурочены к юго-восточной части Урала, где меньше осадков, испарение велико и палеозойские породы перекрыты довольно мощным чехлом рыхлых менее водообильных мезокайнозойских отложений.

Рассматривая закономерности распределения величин подземного стока по территории Уральской горноскладчатой области, следует отметить особое значение в формировании подземного стока испарения с речных бассейнов, которое по-разному проявляется по территории мегарегиона. При одних и тех же величинах атмосферных осадков на севере и на юге 300—400 мм в год подземный сток северных районов может быть в несколько раз выше подземного стока южных районов, где он снижается за счет большого испарения.

Минимальные модули подземного стока как характеристика наибольшей обеспеченности приурочены к периоду устойчивой межени в основном зимнего периода. Величина минимальных модулей подземного стока резко уменьшается, изменяясь по территории от 4,0 до 0,05—0,1 л/сек. км², т. е. в 2—3 раза и более меньше среднего годового, рассчитанного с учетом сезонной динамичности подземного стока в году. Наибольшие значения минимальных модулей подземного стока (4,0—2,0 л/сек. км²) приурочены к западному склону Северного и Среднего Урала и к району Уфимского плато, сложенных преимущественно карстующимися породами.

На восточном склоне в бассейнах рек Лозьвы и Сосьвы отчетливо прослеживается увеличение минимальных модулей подземного стока до 1,5 л/сек. км² за счет дренирования силурийских и девонских карбонатных отложений. На остальной территории величина минимальных модулей подземного стока меняется в пределах от 0,05—0,1 до 1,0 л/сек. км².

7. Бассейн Карского моря

По гидрогеологическим особенностям формирования подземного стока и участия подземных вод в водном режиме речного стока в границах бассейна Карского моря могут быть выделены

следующие территории: мегарегион — Западно-Сибирская плита (IX), мегарегион — Саяно-Алтайская горноскладчатая область (XXII), в котором выделяются районы бассейна верхнего течения р. Оби (XXIIа) и бассейна верхнего течения р. Енисея (XXIIб); участок Центрально-Казахстанской горноскладчатой области (XXI) в границах речных бассейнов притоков р. Оби и мегарегион Енисейский кряж (XIII).

Одновременно с характеристиками подземного питания указанных районов рассмотрены условия подземного стока в реки на территории Таймырской складчатой области (X), основная часть рек которой разгружается в Карское море.

Западно-Сибирская низменность

По гидрологическому режиму рек и условиям формирования подземного стока на территории Западно-Сибирской низменности — плиты (XI) можно выделить три района.

Район, характеризующийся близким к поверхности залеганием многолетней мерзлоты, занимает север Западно-Сибирской низменности до Сибирских Увалов на юге.

Основным источником питания рек района являются снеговые и дождевые воды с преобладанием снеговых. Доля подземного питания рек на севере района незначительна (3—6%), что связано с развитием многолетней мерзлоты.

Подземное питание рек в основном формируется за счет вод деятельного слоя. Разгрузка глубоких подмерзлотных подземных вод происходит только на участках сквозных таликов, существующих в подрусловых зонах крупных речных долин. Зимой подмерзлотные воды промерзают и подземный сток прекращается почти повсеместно, за исключением самых крупных рек. В южной части района в подземном питании рек принимают участие межмерзлотные подземные воды. Доля подземного стока в реки возрастает здесь до 30—40%. В формировании подземного стока верхней зоны интенсивного водообмена основное участие принимают грунтовые и слабонапорные воды четвертичных отложений. Гидравлическая связь речных и подземных вод характерна для всего района. Однако половодье проходит по мерзлым породам, и процессы берегового регулирования существенного значения не имеют.

Модуль подземного стока в южной части рассматриваемого района составляет 2,5—3,5 л/сек. км^2, уменьшаясь к Северному Зауралью до 1,5—1,2 л/сек. км^2.

В северной части района гидрометрическая сеть почти полностью отсутствует, можно предполагать, что к северу подземный сток уменьшается в связи с уменьшением осадков, а главное с уменьшением глубины слоя сезонного протаивания и увеличением мощности многолетнемерзлых пород. Так, модуль

подземного стока на р. Щучьей, которая находится далеко за Полярным кругом, составляет всего 0,11 л/сек. км^2.

Лесо-болотный район, характеризующийся максимальным развитием процессов заболачивания, охватывает центральную часть Западно-Сибирской низменности от Сибирских Увалов до бассейна р. Оми.

По типам болот район можно подразделить на две зоны: зону верховых (олиготрофных грядово-мочажинных) и зону низинных (эвтрофных равнинных) болот.

В зоне распространения верховых болот модули подземного стока изменяются от 2,5—3,0 до 1 л/сек. км^2 (в бассейнах рек Вах и Пайдужна свыше 4 л/сек. км^2). Южнее, в зоне распространения низинных болот, модуль подземного стока уменьшается до 0,5 л/сек. км^2. Доля подземного стока от общего в северной части района изменяется от 30 до 50%, в южной и западной — от 15 до 30%.

Распределение величин подземного стока носит зональный характер и зависит прежде всего от условий увлажнения, от соотношения тепла и влаги. Область максимальных величин подземного стока охватывает северную и часть средней тайги. Ее положение обусловлено обилием атмосферных осадков, незначительными потерями на испарение. Кроме климатических факторов, большое влияние оказывают гидрогеологические условия. Максимальные величины модуля и доли подземного стока от общего приходятся на область распространения флювиогляциальных песчаных отложений (от р. Назым до р. Вах), характеризующихся высокими инфильтрационными свойствами.

Модули минимального стока изменяются по району в широких пределах — от 2,0—2,5 л/сек. км^2 на севере до 0,5—0,3 л/сек. км^2 на юге.

Степной район (зона недостаточного увлажнения) расположен в южной части Западно-Сибирской низменности, охватывая междуречья Оби и Иртыша (Барабинская и Кулундинская степи), Иртыша и Ишима, Ишима и Тобола и Зауральское предгорное плато.

Характерным элементом гидрографии района является обилие озер различной величины и различной степени минерализации.

Основным источником питания озер являются снеговые талые воды, частично дождевые и подземные. В южной и юго-восточной частях Ишимской степи в глубоких впадинах расположены крупные соленые озера (Чеглы-Тенгиз, Теке, Кызыл-Кап, Селеты-Тенгиз и др.), дно которых лежит значительно ниже уровня Иртыша. Эти озера являются областями разгрузки подземных вод. Подземное питание их составляет значительную долю.

Южные районы Западно-Сибирской низменности отличаются неблагоприятными условиями подземного стока.

Питание рек степной зоны происходит в основном за счет снеготаяния (около 90%). Летние осадки почти полностью испаряются, грунтовое питание рек незначительно. К северу роль грунтовых и дождевых вод в питании рек несколько увеличивается.

Подземное питание рек на севере и юго-востоке рассматриваемого района равно 0,2—0,5 л/сек. км². К югу речная сеть становится все реже. Здесь модуль подземного стока в реки составляет всего 0,03—0,07 л/сек. км², в верховьях р. Тобола — 0,01—0,02 л/сек. км². Доля подземного стока от общего на севере и юго-востоке района составляет 20—25%, на юге 3—7%, местами до 1%.

В целом для Западно-Сибирской низменности изменения модуля подземного стока в основном носят широтный характер. Широтная зональность нарушена вблизи горных хребтов Урала и Алтая. Здесь расположение изолиний стока меняется и становится меридиональным. Пояс наибольшего подземного стока расположен между 62 и 65° с. ш.

В Южном Зауралье величина модуля подземного стока, очевидно, занижена, так как реки здесь зарегулированы озерами (озерность 3—5%). Кроме того, летом вода разбирается на орошение. Величину снижения за счет испарения с поверхности озер и за счет разбора на орошение определить пока невозможно.

Саяно-Алтайская горноскладчатая область

К Саяно-Алтайской горноскладчатой области (XXII) относится территория Южной Сибири, лежащая между Зайсанской котловиной на западе и Байкальской котловиной на востоке.

Эта область представлена системами горных хребтов Алтая, Кузнецкого Алатау с Горной Шорией и Саян, включая хребты Танну-Ола и межгорные впадины Кузнецкую, Минусинскую и Тувинскую.

В Саяно-Алтайской области подземное питание в основном осуществляется за счет водоносных горизонтов, гидравлически связанных с рекой, без берегового регулирования с нисходящим режимом.

На территории Саяно-Алтайской области модули подземного стока колеблются в очень широких пределах — от 16,8 до 0,28 л/сек. км². Наибольшими модулями подземного стока характеризуются районы с большим количеством осадков и благоприятными гидрогеологическими условиями. Так, в районе Кузнецкого Алатау с Горной Шорией модуль подземного стока до 9,4 л/сек. км², осадков до 1000 мм в год, интенсивно трещиноватые и местами закарстованные породы протерозойского и кембрийского возраста. Высокие модули подземного стока — до

16,8 л/сек. км^2 наблюдаются в Западном Алтае. Это объясняется осадками до 1500 мм в год, большим развитием зон тектонических разломов и наличием закарстованности палеозойских пород. Трещиноватость кембрийских и архейских пород, количество осадков до 900 мм в год обусловливают на стыке Западного и Восточного Саяна, в бассейне р. Казыр, модули подземного стока местами до 9 л/сек. км^2. Повышенный модуль подземного стока на р. Б. Енисее, вероятно, объясняется глубиной эрозионного вреза более 1000 м в верхней части течения; даже в пределах Восточно-Тувинского нагорья долина реки переуглублена (200—400 м).

Низкими модулями подземного стока (<1 л/сек. км^2) характеризуются межгорные впадины Тувинская, Кузнецкая и Минусинская. Это обусловливается незначительным количеством осадков, большим испарением и слабым расчленением рельефа.

В центральном высокогорном районе Алтая режим источников непостоянен, дебит зимой понижается в 10 раз. Район изучен слабо, гидрометрическая сеть отсутствует, поэтому нет данных о подземном стоке.

Изменение модуля минимального подземного стока от 3 до 0,1 л/сек. км^2 подчиняется той же закономерности, что и среднемноголетний модуль подземного стока. Наиболее высокие модули подземного минимального стока (3—2 л/сек. км^2) характерны для горных сооружений Западного Алтая, Кузнецкого Алатау и Восточного Саяна. В Западном Алтае минимальный подземный сток местами достигает 8 л/сек. км^2. Наиболее низкие значения минимального подземного стока (0,1—1,0 л/сек. км^2) приурочены к Кузнецкой, Минусинской и Тувинской впадинам.

Участие подземных вод в общем стоке рек определяется коэффициентом подземного питания, зависящим главным образом от гидрогеологических условий.

В условиях карста и большой трещиноватости пород коэффициент подземного питания достигает 20—40%. Наименьшее значение коэффициента подземного питания (<10—20%) наблюдается на территории Минусинской впадины.

Центрально-Казахстанская горноскладчатая область (притоки р. Оби)

По геолого-геоморфологическим условиям в пределах описываемой территории (XXI) выделяются горные хребты Тарбагатай и Саур; низкогорье и возвышенный мелкосопочник, мелкосопочная равнина; плато Бет-Пак-Дала; Тенгиз-Кургальджинская впадина; Балхашская впадина; Алакульская межгорная впадина; Зайсанская котловина.

Горные хребты Тарбагатай и Саур (Саур-Тарбагатайская складчатая область) расположены на юго-востоке рассматривае-

мой территории и протягиваются в северо-западном направлении. Наиболее широко распространены трещинные и трещинно-карстовые воды палеозойских образований, которые приурочены к верхней трещиноватой зоне выветривания. Расходы родников колеблются от 0,2 до 2 л/сек. Воды пресные, гидрокарбонатно-кальциевые с плотным остатком до 0,5 г/л. Модуль подземного стока в пределах распространения водоносного комплекса палеозойских отложений колеблется от 3 до 0,7—0,8 л/сек. км^2.

Низкогорье и возвышенный мелкосопочник занимают Кокчетавское нагорье, Улутауские, Нияз-Ерементауские, Чингизтауские горы и водораздельные возвышенности Балхаша и Иртыша.

Низкогорные возвышенности сложены преимущественно палеозойскими и допалеозойскими изверженными и метаморфизованными породами — гранитоидами, кварцитами, вулканогенными породами. Высокий мелкосопочник, обрамляющий низкогорье, сложен карбонатными и терригенными осадками верхнего девона — нижнего карбона и вулканогенно-терригенными породами среднего и верхнего карбона.

Вследствие интенсивной трещиноватости, хорошей обнаженности пород, глубоких эрозионных врезов и раскрытости структур водоносные горизонты допалеозойских и палеозойских образований в пределах низкогорья отличаются значительной водообильностью. Подземные воды гранитоидов приурочены к трещиноватой зоне выветривания, прослеживающейся на глубину 40—50 м, и к трещинам зон разломов глубиной 100 м и более. Многочисленные родники, выходящие на склонах и у подножия возвышенностей, имеют дебиты от 0,5 до 15—20 л/сек. Особенно высокодебитны родники, приуроченные к крупнозернистым пермским гранитам, хорошо обнаженным и сильно трещиноватым. Родниковый сток по отдельным массивам достигает 400 л/сек.

Модуль родникового стока на площади распространения гранитоидов низкогорья колеблется от 0,8 до 1 л/сек. км^2, а в среднем составляет 0,9 л/сек. км^2.

Кварцитовые толщи протерозоя, слагающие осевые части антиклинальных поднятий, разбиты многочисленными крутопадающими трещинами, интенсивно поглощают атмосферные осадки, способствуя формированию значительных ресурсов подземных вод. Вдоль подножия гор, особенно Нияз-Ерементау, наблюдаются родники, дебиты которых достигают 15 л/сек. и более, а суммарный расход восьми родников восточного склона гор на площади 69 км^2 составляет 75 л/сек. Несколько меньшей водообильностью отличаются трещиноватые метаморфические породы Улутау, где расходы скважин достигают 3—5 л/сек, а дебиты родников — 0,5—2 л/сек. Модуль подземного стока изменяется от 1 л/сек. км^2 для Ерементау до 0,2—0,3 л/сек. км^2 для Улутау.

Мелкосопочная равнина занимает значительную часть Центрально-Казахстанской горноскладчатой области. На севере и северо-востоке мелкосопочной равнины много озер с пресной и соленой водой. Реки Ишим (средний годовой расход 6,3 м³/сек), Нура (14,8 м³/сек.), Шерубай-Нура (5 м³/сек.) и другие имеют плоские долины с глубиной вреза порядка 50—70 м. Короткие бурные паводки и затяжная межень — отличительная черта режима стока большинства рек. В отдельных руслах рек и в межень сток отсутствует, а весь паводковый расход их идет на пополнение ресурсов грунтовых вод аллювиальных отложений.

Все породы района в той или иной степени водоносны. Наиболее широко распространены трещинные воды вулканогенно-терригенных пород палеозоя (на площади 345 тыс. км²). Мощность обводненной трещиноватой зоны колеблется от 2—5 до 35 м. В местах глубоких эрозионных врезов наблюдаются выходы родников, имеющих дебит от 0,1—0,5 л/сек., в зонах тектонических разломов до 2—3 л/сек. Дебиты скважин, вскрывших на всю мощность водоносный горизонт или же пройденных в зонах разлома, достигают 2—5 л/сек. Минерализация подземных вод комплекса изменяется преимущественно от 1 до 3 г/л. Модуль подземного стока в пределах распространения водоносного комплекса колеблется от 0,1 до 0,5 л/сек. км². Минимальное его значение (0,1—0,2 л/сек. км²) наблюдается в бассейне оз. Балхаш. Учитывая спорадичность распространения подземных вод комплекса, около $^1/_3$ площади которого слабо обводнено, средневзвешенная величина модуля подземного стока составляет 0,2 л/сек. км² и лишь в восточной части повышается до 0,5 л/сек. км².

Синклинальные структуры, развитые на севере района, сложены песчаниками и известняками девона и карбона. К ним относятся Жолбулдинская, Конурская, Акмолинская, Тамсорская, Богембайская, Владимировская содержащие пресные и слабосолоноватые воды с минерализацией от 0,5 до 2,5 г/л, хлоридно-натриевого и гидрокарбонатно-кальциевого состава. Модуль подземного стока на площади распространения этих структур (4,8 тыс. км²), определенный по балансовым данным, изменяется от 0,5 до 1 л/сек. км² и в среднем составляет 0,6 л/сек. км².

В северной и восточной частях района также широко распространены подземные воды в терригенных отложениях (песчаники, сланцы, аргиллиты, конгломераты и др.). Модуль подземного стока для северной части территории, с учетом спорадичности распространения подземных вод, равен 0,3 л/сек. км², для восточной части — 0,5 л/сек. км².

Хорошими аккумуляторами подземных вод мелкосопочной равнины служат грубообломочные песчано-гравийные несцементированные аллювиальные отложения речных долин Нуры, Чурубай-Нуры, Токрау и др. (коэффициент водоотдачи 0,12—

0,22). В отложениях долин формируются грунтовые потоки с уклонами 0,001—0,002 и шириной, достигающей 5—10 и реже 20 км. Мощность водоносных отложений 10—50 м.

Питание грунтовых вод долин происходит за счёт фильтрации паводкового, а иногда и всего годового стока рек и инфильтрации атмосферных осадков. Модуль подземного стока аллювиальных отложений долин, определенный по естественному расходу потока в пределах долин, равен 1—2 л/сек. км^2.

Плато Бет-Пак-Дала занимает обширную равнину, ограниченную на юге Чу-Таласской депрессией, на севере Центрально-Казахстанским мелкосопочником.

Большая часть территории плато сложена глинистыми отложениями, содержащими высокоминерализованные воды, а местами безводными.

Модуль подземного стока колеблется от 0,2 л/сек. км^2 для трещинных вод каменистой части плато и песчаных отложений запада до 0,3 л/сек. км^2 для грунтовых вод эоловых песков.

Тенгиз-Кургальджинская впадина ограничена на севере долиной р. Ишима, на западе — Терсаккана и мелкосопочником на юге. В центре впадины располагаются соленые озера Тенгиз и Кургальджин, последнее несколько опресняется водами впадающей в него с востока р. Нуры.

В долинах рек Нуры, Терсаккана и на левобережном участке долины р. Ишима модуль подземного стока, определенный по меженному расходу рек, составляет 0,1 л/сек.км^2, а при площади 9700 км^2 естественные ресурсы 1,9 м^3/сек. В центральной части впадины на площади около 30 тыс. км^2 подземный сток практически отсутствует.

Балхашская впадина представляет плоскую аллювиально-пролювиальную предгорную и обширную бугристо-грядовую аллювиально-озерно-эоловую равнину. Равнину пересекают реки Или (среднегодовой расход 466 м^3/сек.), Каратал (62 м^3/сек.), Лепсы (24 м^3/сек.) и Аксу (11 м^3/сек.), транзитом проносящие воды горных районов через песчаные пустыни.

Формирование подземного стока впадины происходит за счет фильтрации из рек, которые в условиях аридного климата в течение всего гидрологического года питают грунтовые воды, фильтрации из ирригационных каналов, а также инфильтрации зимне-весенних атмосферных осадков, особенно скапливающихся в межбугристых понижениях, и отчасти подземного стока с вышележащих участков. Общий объем воды, просачивающейся в водоносные горизонты предгорных шлейфов и пролювиальных наклонных равнин (включая питание артезианских вод), достигает более 1 км^3/год, а в песчаных массивах 2,8 км^3/год.

Расход подземных вод осуществляется в виде стока в оз. Балхаш, транспирации растений, «внутригрунтового» и капиллярного испарения.

Байкальской складчатой области (XXIII), Анабарского щита (XI), Алданского щита (XIV) и Верхояно-Чукотской горно-складчатой области (XV).

Сибирская плита

С территории мегарегиона в основном формируется сток бассейна р. Лены, впадающей в море Лаптевых.

Мегарегион занимает огромную территорию от р. Енисея (на западе) до Верхоянского хребта, оз. Байкал (на востоке) и Восточных Саян (на юге, юго-западе).

Подземный сток формируется в основном под дренирующим воздействием рек Енисея, Лены, а также Хатанги, Анабара, Оленека. Поэтому при его изучении на территории Сибирской плиты выделено три района (бассейн р. Енисея, бассейн р. Лены и бассейны рек Хатанги, Оленека и Анабара). Для территории данного мегарегиона характерно наличие трех основных зон распространения многолетнемерзлых пород.

Бассейн р. Енисея

Включает район, расположенный в зоне сплошной мерзлоты с широким развитием таликов, с мощностью многолетнемерзлых пород 100—200 м, и район в зоне островной мерзлоты с мощностью мерзлых пород 25—100 м (бассейн р. Ангары).

Величины годовых модулей подземного стока изменяются на этой территории от 0,5 до 5 л/сек. км^2. Наибольшие величины модулей подземного стока характерны для отрогов Восточных Саян, горноскладчатой системы Прибайкалья (высотой до 2570 м над уровнем моря) и для Енисейского кряжа. Повышение модулей в Присаянье связано с благоприятными климатическими и гидрогеологическими условиями. К востоку наблюдается постепенное уменьшение модулей подземного стока, совпадающее с увеличением мощности многолетнемерзлых пород. Наименьшие значения средних за период модулей подземного стока — 0,5 л/сек. км^2 — приурочены к участку нижнего течения р. Енисея и к площади интенсивного развития карста вдоль р. Ангары и ее притоков. Распределение минимальных модулей примерно повторяет изменение средних за период модулей подземного стока. Наиболее низкие значения (меньше 0,1 л/сек. км^2) получены на территории Иркутского артезианского бассейна, в верхнем течении Ангары и в северной и центральной частях Тунгусского артезианского бассейна. Наибольшие значения доли подземного стока (30—40%) приурочены к среднему течению р. Ангары, средние значения (20—30%) — к территории бассей-

нов рек Каменки, Мурина, к нижнему течению Ангары и к южной окраине Тунгусского артезианского бассейна.

Уменьшение участия подземного стока в формировании речного стока наблюдается в юго-западном и северном направлении по периферии Иркутского и Тунгусского артезианского бассейнов.

Бассейн р. Лены

Расположен в трех зонах распространения многолетнемерзлых пород от сплошного распространения до островного, в основном с мощностью многолетнемерзлых пород 100—200 м, а в Вилюйском синеклизе 400—600 м и более.

В районе Центральной Якутской низменности средние за период модули подземного стока составляют от 0,01 до 0,2 л/сек км^2 (средние и нижние части бассейнов рек Вилюя, Нюй и др.). Нередко реки пересыхают, а зимой перемерзают. Доля подземного стока от общего составляет 10—20%. Средний за период минимальный подземный сток для этой территории составляет 0,01 л/сек. км^2.

Бассейны рек Хатанги, Анабара, Оленека и низовья рек Енисея и Лены расположены в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород с редкими таликами, с мощностью пород 200—500 м и больше. Сквозные талики редки. Это территория арктического и субарктического климата.

Наличие почти повсеместно мощной зоны многолетнемерзлых пород в первую очередь сказывается на том, что подземные воды, залегающие под мерзлой зоной, имеют затрудненную связь с дневной поверхностью. В гидрологическом отношении район изучен слабо.

Средние годовые модули подземного стока для этой территории составляют 0,5 л/сек. км^2, увеличиваясь к западу (в отрогах Путораны).

Доля подземного стока составляет 5—10%. Распространение минимальных модулей подземного стока соответствует средним за период модулям подземного стока и колеблется от 0,01 до 0,05 л/сек. км^2.

Байкальская складчатая область

В пределах области формируется сток бассейна оз. Байкал, притоков рек Енисея и Лены, а также и бассейна р. Амура.

Мегарегион расположен к юго-востоку от Сибирской платформы и протягивается от отрогов Восточных Саян до побережья Охотского моря.

Орографически территория представляет собой чередование хребтов (Хамар-Дабан, Джидинский, Яблоновый, Становой, Верхне-Ангарский и др.), нагорий (Северо-Байкальское, Патомское и Становое); плоскогорий (Витимское) и межгорных котловин (Джидинская, Байкало-Селенгинская, Бургузинская и др.). Абсолютные высоты хребтов колеблются от 1000 до 2000 м, с отдельными вершинами, значительно превышающими эти цифры (до 3000 м), в котловинах же они снижаются до 800—600 м. Такое разнообразие условий рельефа создает большие различия климатических условий от сухого степного климата в центральной части до холодного альпийского в гольцевой зоне. Существенное влияние оказывает также наличие на территории самого глубокого в мире оз. Байкал. Влияние его на климат прилежащих областей и на дренирование территории огромно, что хорошо заметно на картах подземного стока СССР.

Подземный сток формируется под дренирующим влиянием рек Баргузина, Селенги с притоками Витима и других, обусловливающим три основных направления стока: в оз. Байкал, на северо-восток в бассейн р. Лены и на северо-запад в бассейн р. Ангары.

Средний годовой подземный сток на рассматриваемой территории изменяется от 0,5 до 5,0 л/сек. км^2. Наибольшие значения его так же как и среднегодового общего стока, приурочены к северо-западному склону хребта Хамар-Дабан и Северо-Байкальскому нагорью (более 5 и 4,0 л/сек. км^2), к южной части района в верховьях рек Менза, Чикой, Аца (4,0 л/сек. км^2). Это в значительной степени объясняется повышенным количеством выпадающих здесь осадков и высокогорным сильно расчлененным рельефом, о чем говорилось ранее. Наименьшие модули подземного стока, наблюдающегося в верхних частях бассейнов рек Хилок, Тарбагатай, Алентуй, Оронгой, Уса и Витим, по-видимому, обусловлены умеренным степным климатом и слабой расчлененностью этих территорий.

Минимальные модули подземного стока (от 0,05 до 3,0 л/сек. км^2) распределяются на территории аналогично среднегодовому подземному стоку и зависят от тех же факторов, но, как полагает А. Н. Афанасьев, минимальный подземный сток в противоположность формированию среднего годового подземного стока уменьшается с увеличением средней абсолютной высоты речных бассейнов, поэтому соотношения минимального подземного стока со среднегодовым подземным стоком на различных участках будут варьировать.

Подземный сток на территории составляет от 10 до 50% общего. Эта величина в каждом конкретном случае зависит от совокупности климатических, орографических и гидрогеологических условий.

Анабарский щит

В гидрологическом отношении район изучен очень слабо; регулярно действующих гидрометрических створов нет. По аналогии физико-географических условий окружающей территории Анабарского щита можно предположить, что он оконтуривается изолинией 0,5 л/сек. км^2 с повышением модуля к его центру. Повышение подземного стока на Анабарском щите связано с геоморфологическими условиями и повышенным по сравнению с окружающей территорий количеством осадков.

В пределах Анабарского щита мощность многолетней мерзлоты достигает 400 м; здесь нет ледников и наледей, питающихся подземными водами. Однако, если учесть, что такие крупные реки, как Анабар и Попигай, не промерзают в течение всей зимы, то полностью исключить возможность некоторого подтока подземных вод в реки нельзя.

На территории выделяется три района стока: Анабарский — восточный, Хатангский — северо-западный и Оленекский — южный. Предполагается, что основное участие в подземном питании рек всех этих районов принимают подмерзлотные воды, а подчиненное — воды деятельного слоя.

Алданский щит

Алданский щит расположен в южной части восточной половины Сибирской платформы и представляет собой обширное поднятие, в пределах которого складчатый фундамент Сибирской платформы выходит на поверхность. На формирование подземного стока Алданского щита оказывают влияние в первую очередь геоморфологические особенности.

Для Алданского щита характерны однородные физико-географические условия.

Модуль подземного стока достигает 3 л/сек. км^2, минимальный модуль изменяется от 0,3 до 0,5 л/сек. км^2, увеличиваясь в северо-западном направлении. Доля подземного стока от общего составляет от 10—20% в бассейнах рек Маи, Учура до 20—30% в бассейнах рек Олекмы, Алдана, Тимптона, Гыныма. Повышение ее характерно для западной части щита, где развиты закарстованные породы.

Верхояно-Чукотская горноскладчатая область

Территория мегарегиона в основном характеризуется сравнительно небольшими значениями среднего за год модуля подземного стока — от 0,3 до 2 л/сек. км^2.

В первую очередь это объясняется суровыми климатическими условиями, наличием многолетнемерзлых пород на всей территории.

Сложенные рыхлыми отложениями низменности и межгорные понижения Северо-Восточной Сибири выделяются широким распространением эпигенетических жильных и повторно-жильных подземных льдов. На о. Большом Ляховском мощность их достигает даже 70—80 м. Значительная часть льдов этого типа является «ископаемым», так как их формирование началось еще в среднечетвертичное время. Наличие подземных льдов существенно сказывается на процессах формирования рельефа, гидрологическом режиме рек и на условиях хозяйственной деятельности населения.

В пределах рассматриваемой территории встречаются сквозные талики, приуроченные к долинам крупных рек и тектоническим разломам, с которыми связаны выходы термальных источников. Суровые климатические условия и широкое распространение мерзлой зоны обусловливают весьма интенсивное образование наледей во многих районах данной территории. Всего здесь зарегистрировано около 7500 наледей, из которых больше 40% сохраняются круглый год. Многие наледи являются очагами разгрузки подземных вод. Наледи встречаются почти на всех реках, прорезающих хребты Верхоянский, Колымский, Черского, Момский и др. Площади наледей достигают сотен квадратных километров и заключают в себе объемы льда, оцениваемые в миллионы и миллиарды кубических метров.

Характерным для ряда рек является перемерзание. Иногда перемерзают реки с площадями водосборов до 200 000 км² (Яна, Индигирка). Зимой большинство рек Северо-Востока на значительной части своего протяжения промерзают до дна и даже сток таких больших рек, как Яна, Индигирка, Алазея, Колыма, в течение зимы составляют менее 1% годового стока. Но в ряде случаев промерзание не является результатом истощения подземного стока, а есть следствие образования мощных наледей, в которых происходит его аккумуляция, т. е. перераспределение подземного стока с зимы на летне-осенний период, когда происходят большие потери на испарение.

Не менее существенным является и влияние рельефа на формирование подземного стока. Основными формами рельефа являются горные хребты Верхоянский, Черского, Колымский, Чукотский и другие, с высотами 2500—3000 м (вытянутые в виде дуг и образующие отдельные горные группы с узкими и глубокими речными долинами), нагорья — Оймяконское, Норское и плоскогорья — Янское, Юкагирское с высотами до 800—1600 м, в разной степени расчлененные, а также обширные низменности, слабо приподнятые над уровнем моря (от 30 до 200 м) и изрезанные густой сетью рек.

Наименьшие значения среднего за год модуля подземного стока, равные 0,5—0,3 л/сек. км² и меньше, приурочены к низменной части, а также к отдельным прогибам Верхояно-

Колымской складчатой области, которые характеризуются почти полным отсутствием наледей.

Наибольшие средние за год модули, равные 2,0 л/сек. км^2, характерны для Колымского срединного массива, отличающегося большей водопроводимостью. Преобладающая величина среднего за год модуля подземного стока равна 0,5—1,0 л/сек. км^2 и характеризуют горноскладчатые области.

Модули минимального подземного стока на территории мегарегиона с севера на юг и с запада на восток изменяются от 0,05 до 0,3 л/сек. км^2 и соответствуют закономерностям распространения среднемноголетнего модуля подземного стока.

Описываемый мегарегион в гидрологическом отношении еще слабо изучен.

9. Бассейны Берингова, Охотского и Японского морей

Основная часть территории бассейнов Берингова и Охотского морей по условиям формирования подземного стока относится к мегарегиону Верхояно-Чукотской горноскладчатой области, рассмотренной выше, а также Корякско-Камчатской горноскладчатой области. Подземный сток в реки бассейна Японского моря формируется главным образом в пределах Амурской и Сихотэ-Алиньской горноскладчатой области. Реки о. Сахалин относятся к бассейнам Охотского моря и Татарского пролива.

Полуостров Камчатка и прилежащая территория материка

Территория полуострова представляет собой горноскладчатую область. По характеру подземного стока большинство рек Камчатки относится к типу с нисходящим подземным питанием. Прежде всего это относится к подавляющему большинству рек, имеющих горный характер: большие уклоны дна долины, большие скорости течения. Если же в своих низовьях горная река протекает в условиях низменности (например, таких транзитных рек много на Западной прибрежной низменности), уклоны и скорости течения ее значительно снижаются, река начинает меандрировать. На таких плоских низменных участках равнин возможен подпор подземных вод речными в период половодий и паводков, но только в случаях ничтожно малых врезов речных долин, так как амплитуда колебания уровней на реках Камчатки составляет всего 1,5—3 м. В условиях же холмисто-увалистых равнин, где глубины врезов составляют несколько десятков метров и больше, подпорные явления приводят лишь к приуменьшению напора подземных вод, а режим стока подземных вод в реку остается нисходящим.

Динамичность подземного стока в реки приближенно можно охарактеризовать сравнением меженных расходов в предпаво-

дочный и послепаводочный периоды, приблизительно соответствующие периодам наибольшего истощения и наибольшего накопления запасов подземных вод. Для большинства рек величина меженных послепаводочных расходов больше предпаводочных в 1,8—2 раза, на некоторых реках — в 1,2—1,5 раза (сюда относятся рр. Камчатка, Тигиль, Еловка, Озерная и др.) и лишь на реках равнинно-лесной зоны умеренного климата — в 5—6 раз (например, р. Корн — п. Корн). Подземные воды получают основное питание из тех же источников, что и речные (от таяния снега в горах и от летних дождей, меньше от таяния снега на равнине и от таяния ледников), и частичное, видимо, от конденсации водяных паров в трещинах лавовых покровов.

Физико-географические особенности территории Камчатки влияют на условия формирования и распределения подземного стока по территории следующим образом.

В рисунке изолиний модулей подземного стока нашли свое отражение выделяемые здесь Центрально-Камчатская депрессия, Западная прибрежная равнина, Срединный хребет.

На плоских низменных заболоченных равнинах наблюдается уменьшение подземного стока до 5 л/сек. км^2 и меньше на Западной прибрежной низменности и 7 л/сек. км^2 и меньше (местами до 3—4 л/сек. км^2) в Центрально-Камчатской депрессии. Это объясняется сильным уменьшением зоны активного водообмена по сравнению с горными районами и значительно меньшим количеством в этих районах атмосферных осадков. На Срединном хребте со значительным увеличением жидких осадков и мощной зоной интенсивного водообмена модули подземного стока увеличиваются до 10 л/сек. км^2. В северной части Срединного хребта (бассейны рек Тигиля, Воямполки, Еловки) к тому же имеются благоприятные гидрогеологические условия формирования подземного стока. Поэтому здесь выделяется зона повышенного подземного стока (до 15 л/сек. км^2).

На территории юго-восточного горно-вулканического и восточного приморского районов происходит увеличение подземного стока с северо-запада к юго-восточному побережью от 10 до 25 л/сек. км^2. Это объясняется сильным увеличением осадков, приблизительно в том же направлении, благоприятным гидрогеологическими условиями, мощной зоной интенсивного водообмена. Наибольшие величины подземного стока (до 30 л/сек. км^2) приурочены к самой юго-восточной оконечности п-ова Камчатка. Такие большие величины подземного стока на этой территории региона объясняются чрезвычайно благоприятными гидрогеологическими условиями (наличие хорошо проницаемых рыхлых вулканогенных пород и насыпного материала, прекрасно инфильтрирующих выпадающие атмосферные осадки), а также большой продолжительностью теплого периода, что удлиняет сроки инфильтрации осадков в породы.

Минимальный модуль подземного стока колеблется по территории от 3 до 15 л/сек. км^2 и более. Коэффициент подземного стока изменяется от 30% и менее до 75% и более. В распределении коэффициента подземного питания рек по территории Камчатки отмечаются следующие особенности. В Центральной Камчатской депрессии, несмотря на уменьшение подземного стока, доля его участия в общем стоке не уменьшается, так как имеет место и сильное уменьшение общего речного стока. В юго-восточной части Камчатки с увеличением подземного стока доля его в общем стоке не увеличивается, поскольку в этой части полуострова очень сильно возрастают величины общего речного стока. Наибольшая доля (более 50%) приурочена к сильно расчлененным и благоприятным в гидрогеологическом отношении частям Срединного и Восточного хребтов.

Для бассейнов рек, «затененных» от осадков высокими горами, величины подземного стока намного меньше, чем на окружающей их территории (например, р. Толбачик — п. Толбачик — 3,7 л/сек. км^2 на фоне 7 л/сек. км^2; р. Быстрая — 0,8 км от устья — 7,8 л/сек. км^2 на фоне 20 л/сек. км^2).

С севера к полуострову примыкает Корякская горноскладчатая страна.

Территория региона относится к бассейнам Берингова и Охотского морей и охватывает часть материка, расположенную от Пенжинской губы юго-восточнее Анадырской горной группы, южнее Амгуэмо-Кувэтского горного массива, до залива Южного Креста. От п-ова Камчатка регион отделяется по узкому перешейку Парапольского дола. По условиям рельефа на территории региона четко выделяются два района: Корякская горная группа и Пенжинско-Анадырская низменность.

Большинство рек региона относится к рекам с нисходящим режимом подземного стока. На нижних участках крупных рек, протекающих в условиях плоской и низменной Анадырско-Пенжинской депрессии, наблюдается подпорный тип питания.

Наименьшая величина подземного стока (0,5 л/сек. км^2) наблюдается в северо-восточной части региона, в бассейне р. Анадыря (на территории Анадырско-Пенжинской депрессии). Незначительная величина подземного стока в этой части территории связана с небольшим количеством атмосферных осадков, неглубокой зоной интенсивного водообмена в условиях плоской слабо расчлененной низменной равнины с замедленным речным и подземным стоком. Почти полное отсутствие наледей на реках этого района также говорит о скудном подземном питании. Малая глубина оттаивания деятельного слоя затрудняет инфильтрацию поверхностных вод в глубину пород, что определяет малое пополнение запасов подземных вод.

К югу и юго-западу от области пониженного подземного стока его модули повышаются до 2,0 л/сек. км^2 на юге региона,

что обусловлено увеличением атмосферных осадков, улучшением условий инфильтрации талых вод в грунты в связи с большей толщиной деятельного слоя, увеличением зоны интенсивного водообмена. Последнее определяется общим повышением местности и ее большой расчлененностью.

Остальные характеристики подземного стока изменяются соответственно в том же направлении. Доля подземного стока от общего колеблется от величин меньших 10% до 15%, коэффициент подземного стока — от 5 до 10%, минимальный модуль подземного стока — от 0,1 до 0,3 л/сек. км^2.

К бассейну Охотского моря относится район, узкой полосой протягивающийся по его побережью с северо-востока (от р. Пенжина) на юго-запад (до р. Убы).

Территория его представляет собой горную страну, включающую ряд хребтов, простирающихся в северо-восточном направлении. По условиям и распределению подземного стока в реки этот район аналогичен району Верхояно-Чукотской горноскладчатой области, принадлежащему к бассейну Восточно-Сибирского моря, описанному выше.

Бассейн Амура, Татарского пролива и Японского моря

Реки района формируются в пределах Амурской и Сихотэ-Алиньской горноскладчатых областей.

Амурская и Сихотэ-Алиньская горноскладчатые области занимают огромную площадь на юге Дальнего Востока, охватывая полностью бассейн Амура и южную часть побережья Охотского моря. Большая протяженность территории с запада на восток (от Забайкалья до хр. Сихотэ-Алинь) и с юга на север (от залива Петра Великого до Сахалинского залива и Станового хребта) обусловливает различие физико-географических условий в отдельных ее частях, что приводит к разным условиям формирования и режима подземного питания рек.

Условия формирования подземного стока по территории мегарегиона определяются разнообразием и особенностями физико-географических факторов юга Дальнего Востока.

Основным источником питания подземных вод на данной территории являются атмосферные осадки. В связи с этим накопление запасов подземных вод происходит в летний период, однако первое пополнение подземные воды получают еще весной при оттаивании верхнего слоя сезонной мерзлоты и за счет талых снеговых вод и весенних дождей. Затем в течение всего лета происходит непрерывное увеличение запасов подземных вод, так как обильные дожди и оттаивание почвы способствуют непрерывному улучшению условий питания и разгрузки подземных вод. Максимальный подземный сток формируется, как правило, в конце паводочного периода, приходящегося на сен-

тябрь — октябрь, когда создаются наибольшие запасы подземных вод. С наступлением первых морозов прекращается выпадение жидких осадков на водосбор, а следовательно, и пополнение запасов подземных вод. Это вызывает снижение величины подземного стока в реку. Зимой подземные воды не пополняются, а только расходуются на питание рек, образование льда, наледей и увеличение слоя вечной и сезонной мерзлоты.

Минимальные значения подземного стока приходятся обычно на конец зимы (февраль — март). Таким образом, режим стока подземных вод в годовом цикле может быть охарактеризован следующим образом: максимум — в сентябре — октябре, минимум — в конце марта — начале апреля; с января по март происходит постепенное уменьшение стока, а в апреле начинается подъем уровня подземных вод и увеличение стока.

Модули подземного стока по территории мегарегиона изменяются в зависимости от количества атмосферных осадков и условий, благоприятных для накопления подземных вод. По данным карты модулей подземного стока, величины их колеблются в довольно широких пределах: от 0,1 до 3,0 л/сек. км^2 Общее увеличение подземного стока прослеживается в направлении с запада на восток и обусловлено изменением климатических условий по мере продвижения к океану. На фоне этой общей закономерности наблюдаются отдельные области повышенных и пониженных значений подземного стока, обусловленные влиянием различных физико-географических факторов (рельеф, промерзание грунтов и др.).

По условиям формирования подземного стока в пределах описываемой территории выделяются три района, охватывающие территорию бассейна р. Амура в верхнем, среднем и нижнем течении.

Район верхнего течения Амура, охватывающий бассейны Шилки, Аргуни и левых притоков Амура выше впадения р. Ольги, характеризуется наименьшим подземным стоком. Резко континентальный климат с общим небольшим количеством осадков и глубоким промерзанием грунтов обусловливает здесь невысокие модули подземного стока, не превышающие в среднем для района 1,0—2,0 л/сек. км^2. В пределах района они уменьшаются от горных областей (бассейн Ингоды — 2,0 л/сек. км^2, р. Газимур — Газимурский завод — 0,85 л/сек. км^2) к равнинным пространствам типа сухих степей и полупустынь (верховья Аргуни — 0,1 л/сек. км^2, р. Борзя — ст. Борзя — 0,09 л/сек. км^2 и р. Урулюнгуй — ферма № 2 — 0,04 л/сек. км^2). В среднем для района модуль подземного стока составляет 0,65 л/сек. км^2.

Район среднего течения Амура занимает территорию к востоку от устья р. Ольги до устья р. Бира и охватывает полностью бассейны Зеи и Буреи. В среднем модули подземного стока здесь составляют 1,0—2,0 л/сек. км^2. На этом фоне

выделяется область повышенного стока на Амуро-Зейском плато (р. Берея — с. Саскаль — 2,99 л/сек. км², р. Ульмин — с. Аносово — 1,99 л/сек. км²), что связано с большой трещиноватостью и водообильностью слагающих его пород. Слабая расчлененность рельефа и небольшая глубина эрозионного вреза долин в пределах Верхне-Зейской равнины приводят к незначительному уменьшению величин подземного стока на ее территории (р. Арга — устье р. Амкан — 0,90 л/сек. км², р. Уркан — 19 км от устья — 0,90 л/сек. км²). Область пониженного подземного стока с модулями менее 0,5 л/сек. км² (р. Гильчин — с. Гильчин — 0,30 л/сек. км², р. Бурунда — с. Ивановка — 0,20 л/сек. км²) расположена в пределах Зейско-Буреинской равнины, имеющей малые уклоны поверхности, сложенной слабоводообильными породами. Неблагоприятные для накопления подземных вод гидрогеологические условия в сочетании с небольшим количеством выпадающих здесь осадков приводят к появлению здесь пониженных значений модулей подземного стока.

Район нижнего течения Амура занимает всю восточную часть мегарегиона и наиболее богат подземными водами. Он охватывает бассейн Уссури и бассейны притоков Амура ниже Биры. В среднем для района модуль подземного стока составляет 1,72 л/сек. км², изменяясь от 3,6 до 0,3 л/сек. км².

Общее уменьшение модулей происходит от водоразделов (хр. Сихотэ-Алинь и Буреинского) в сторону долин Уссури и Амура, являющихся областями разгрузки подземных вод. Область пониженного стока (0,3—0,5 л/сек. км²), расположенная вокруг оз. Ханко, обусловлена распространением здесь слабоводообильных глинистых пород и сравнительно небольшим количеством выпадающих здесь атмосферных осадков.

Две области с повышенным подземным стоком расположены в горных районах: в средней части хребта Сихотэ-Алинь и в пределах Буреинского хребта. Эти области наряду с благоприятными для инфильтрации условиями характерны и наибольшим количеством осадков. В связи с этим модули подземного стока здесь увеличиваются до 3,4—3,5 л/сек. км² в бассейне р. Тайдзибе (хр. Сихотэ-Алинь) и до 2,5—3,0 л/сек. км² в верховьях рек Кур, Урми и Амгуни (Буреинский хребет).

В среднем для территории мегарегиона подземная составляющая речного стока равна 18% и изменяется от 10—15% на равнинах до 20—25% в горных районах. Резкое увеличение доли подземного стока до 40—60% наблюдается только на Амуро-Зейском плато, что вызвано гидрогеологическими особенностями этой территории.

Минимальные модули подземного стока по территории мегарегиона увеличиваются с запада на восток от 0,03—0,05 л/сек. км² в пределах верхнего течения Амура до 0,1—0,5 л/сек. км² в Приморском крае, на Среднем и Нижнем Амуре и в общих чертах

повторяют изменение годовых величин его. Местные увеличения минимальных модулей подземного стока, так же как и годовых, наблюдаются в горных районах (хребты Сихотэ-Алинь, Буреинский). Соотношение между минимальными и годовыми модулями подземного стока колеблется в пределах от 0,1 до 0,5.

Остров Сахалин

Высокими модулями подземного стока отличаются реки Северного Сахалина. Обводненные торфяники, подзолистые почвы, имеющие песчаный или супесчаный механический состав, мощные толщи терригенных кайнозойских отложений, значительное увлажнение территории и достаточное количество осадков благоприятствуют накоплению подземных вод.

Район Тымь-Поронайской равнины характеризуется модулями 2,5—4 л/сек. км^2, западный склон Западно-Сахалинского хребта — 6,0—7,0 л/сек. км^2, восточный склон — 5,0—6,0 л/сек. км^2.

Минимальные модули подземного стока по территории острова изменяются от 6,0—4,0 л/сек. км^2 на севере до 3,0—2,0 л/сек. км^2 в горных районах — Западно- и Восточно-Сахалинских гор, хребтов Камышового и Сусунайского. В Тымь-Поронайской депрессии минимальные модули составляют 1,0 л/сек. км^2.

Северо-Сахалинская низменность отличается высокой долей подземного стока в общем речном стоке (40—60%), что вызвано благоприятными гидрогеологическими условиями. В Западно- и Восточно-Сахалинских горах, Камышовом и Сусунайском хребтах эта доля составляет 20—30%, в Тымь-Поронайской депрессии 10—20%.

10. Бессточные районы Казахстана и Средней Азии

Основной особенностью бессточных районов Казахстана и Средней Азии в отношении подземного питания рек является резкое различие условий подземного стока в реки горных районов, с одной стороны, и в реки, выходящие из гор в область предгорий, межгорных впадин и равнинные части бассейнов, с другой. В формировании стока горных рек подземный сток принимает относительно большое участие, несмотря на небольшую естественную их зарегулированность. В условиях аридного климата рассматриваемых бассейнов роль подземного стока в формированнии режима равнинных рек весьма незначительна. Если в предгорьях в питании рек еще принимает участие подземный сток, транзитом поступающий из горных районов, то в большинстве случаев при выходе рек на равнину можно

наблюдать потери речного стока на питание подземных вод. В межгорных впадинах и на равнине у гор, в условиях орошения, водообмен рек с водоносными горизонтами принимает весьма сложный характер. Участки потерь речного стока сменяются участками, где возвратные воды орошения снова поступают в реку, и т. д. Однако во всех случаях потери речного стока на инфильтрацию в берега превалируют над подземным питанием рек.

Сложный характер водообмена реки с водоносными пластами и сложность количественной оценки этого процесса в условиях интенсивного водозабора речного стока на орошение, сложности учета его потерь и наличие возвратных вод при региональной общей оценке взаимосвязи речных и подземных вод этих районов позволяют дать в настоящее время только количественную характеристику подземного стока горных рек бессточных районов. Основная часть таких рек формируется в границах мегарегионов Джунгаро-Тяньшаньской (XX) и Памирской (XIX) горноскладчатых областей, а также на участках Центрально-Казахстанской горноскладчатой области, занятых речными бассейнами, входящими в рассматриваемый бессточный район.

В горных районах, где подземный сток дренируется интенсивно, подземная составляющая речного стока приобретает особо важное значение. Основным источником питания подземных вод являются атмосферные осадки и талые воды снежников и ледников. Условия питания подземных вод, так же как и речных в пределах рассматриваемой территории, прежде всего изменяются с высотой местности.

Подземный сток в реки формируется под дренирующим воздействием речных систем. Режим подземного стока в горной Средней Азии в основном нисходящий. Основное пополнение запасов подземных вод в горных областях происходит во время таяния вечных снегов и ледников (в высокогорной зоне), сезонных снегов (в среднегорной зоне), совпадающего с весенне-летним периодом. Частично пополнение подземных вод идет в период выпадения дождевых осадков. В этот период наблюдается наибольший подземный сток в реки. С наступлением отрицательных температур пополнение запасов подземных вод прекращается. Зимой подземные воды только расходуются на питание рек, образование льда и т. д. В наиболее высоких областях мегарегиона минимум запасов подземных вод обычно приходится на конец зимы, в это же время происходит минимальный подземный сток в реки.

В среднегорной зоне может наблюдаться два минимума запасов подземных вод и соответственно подземного стока: в конце лета и зимой. В низкогорной зоне минимум запасов подземных вод приходится обычно на лето; до наступления осенне-зимних

дождевых паводков подземный сток в реки здесь достигает особенно низких величин за счет потерь на транспирацию и испарение.

В Средней Азии, как нигде, режим подземного стока нарушается хозяйственной деятельностью человека. Огромные массы воды, взятые на орошение, инфильтруют в почво-грунты русел каналов и на полях, вызывая усиленное питание подземных вод.

Особенностью режима этих подземных вод, часто называемых возвратными, является не только то, что они возвращаются в реку ниже того места, из которого были забраны, но и позже времени этого забора. В связи с этим возвратные воды не только перераспределяют сток между отдельными участками рек, но и изменяют распределение стока на протяжении года.

Формирование подземного стока в значительной мере зависит от гидрогеологичских условий, которые на территории мегарегиона достаточно сложны и многообразны. Сложное взаимодействие основных трех факторов, определяющих условия формирования подземного стока, — гидрогеологии, рельефа и климата, обусловливает особенность распределения подземного стока в реки по территории. Разнообразие физико-географических условий определяет значительную пестроту полученных данных.

Среднегодовой модуль подземного стока изменяется по территории мегарегиона в пределах от 0,75 до 10—14 л/сек. км^2 при коэффициенте подземного питания, изменяющемся в среднем от 20 до 65—75%.

Наибольшими величинами подземного стока отмечаются хребты юго-западной и западной ориентации, открытые влагоносным ветрам. Максимальное для Средней Азии количество осадков, выпадающих на южном склоне Гиссарского хребта, обусловливает и максимальные величины подземного стока в притоки р. Кафирнигана, Вахша и в некоторые притоки р. Сурхан-Дарьи. Здесь при средневзвешенной высоте 2500 м среднегодовой модуль подземного стока составляет 10 л/сек. км^2, на больших высотах достигая 12—14 л/сек. км^2. Минимальные модули подземного стока соответственно составляют 7 л/сек. км^2 на высоте 2500 м, увеличиваясь с высотой до 8—9 л/сек. км^2. С понижением высотных отметок до 2200—2000 м среднегодовые модули подземного стока падают до 6 л/сек. км^2, минимальные — соответственно до 4 л/сек. км^2.

В пределах Пскемского и Угамского хребтов (рр. Пскем, Угам, Кок-Су и др.), расположенных на севере Западного Тянь-Шаня и открытых для внешних воздушных масс, приходящих с запада, при средних взвешенных высотах водосборов 2500—3000 м, годовые модули подземного стока составляют в среднем 8 л/сек. км^2, минимальные — 6 л/сек. км^2.

Повышенное значение подземного стока наблюдается также на периферийных, открытых влагоносным массам, хребтах других ориентаций.

Северные склоны Таласского и Киргизского Алатау характеризуются среднегодовыми модулями подземного стока 6 л/сек. км^2 на высоте 3000 м (минимальный модуль подземного стока 4 л/сек. км^2), уменьшаясь на высоте 2500 м до 4 л/сек. км^2 (минимальный модуль 3 л/сек. км^2) на Киргизском Алатау и до 2 л/сек. км^2 (минимальный модуль 1 л/сек. км^2) на той же высоте на северном склоне Таласского Алатау, частично прикрытом с севера Киргизским хребтом.

Из северных склонов наибольшими модулями подземного стока отличается Заилийский Алатау в его западной части, где он не прикрыт Джунгарским Алатау. Значительное количество осадков (800—1000 мм) и хорошие условия инфильтрации (большое количество обломочного материала), которые подтверждаются большим коэффициентом подземного питания здесь (>50%), объясняют величину среднегодового модуля подземного стока 10 л/сек. км^2 на средневзвешенной высоте 3000 м. Минимальный модуль подземного стока здесь 8 л/сек. км^2. В восточной части Заилийского Алатау, затененной Джунгарским Алатау, где количество осадков резко уменьшается до 200 мм, модуль подземного стока снижается до 3 л/сек. км^2 (минимальный модуль — до 2 л/сек. км^2). Меньшими величинами подземного стока характеризуются внутренние районы горной части мегарегиона.

Северный склон Гиссарского хребта и часть Зеравшанского, прикрытая с юга Гиссарским хребтом, получают не больше 800—900 мм осадков; здесь среднегодовой модуль подземного стока на высоте 3000—3500 м не превышает 5—6 л/сек. км^2, а минимальный модуль — 3—4 л/сек. км^2.

Затененные от осадков восточная часть северного склона Алайского хребта и юго-западные отроги Ферганского хребта (глубокие долины рек Тар, Курбаш, Акбура, Исфайрам) получают не более 500—550 мм осадков в год, что обусловливает здесь среднегодовые величины модуля подземного стока порядка 4 л/сек. км^2 (минимальные модули 3 л/сек. км^2).

Северный склон Туркестанского хребта, получающий не более 400—500 мм осадков в год, характеризуется среднегодовыми модулями подземного стока, не превышающими 3,0 л/сек. км^2 на высотах порядка 3000 м (минимальные 2 л/сек. км^2). Такие же величины подземного стока имеют место на территории, занимаемой труднодоступными для влагоносных масс Кураминским и частью Чаткальского хребтами. Бассейны Большого и Малого Нарына и верховья Чу характеризуются величиной подземного стока на высотах 3000—3500 м 3—3,5 л/сек. км^2 при значениях осадков порядка 400—450 мм.

Модуль подземного стока в западной части бассейна оз. Иссык-Куль изменяется от 2 л/сек. км² на высоте 2500 м до 5 л/сек. км² на высоте 3500 м. В восточной же части бассейна модуль подземного стока увеличивается до 5 л/сек. км² на высоте 2500 м и 8 л/сек. км² на высоте 3500 м. Это объясняется повышенным количеством выпадающих здесь осадков (до 900—1000 мм) вследствие обогащения воздушных масс влагой при продвижении над поверхностью оз. Иссык-Куль при общей благоприятной ориентации этой территории.

Низкогорный хребет Каратау, получающий достаточно большое количество осадков (от 400 до 800 мм), несмотря на значительное испарение (за год более 300 мм), в силу благоприятных гидрогеологических условий характеризуется довольно высокими для этих районов модулями подземного стока на сравнительно низких отметках местности (на высоте 1500 м — 3 л/сек. км, 1000 м — 2 л/сек. км²).

Джунгарский Алатау отличается значительными модулями подземного стока — от 4 л/сек. км² на высоте 1500 м до 9,0 л/сек. км² на высоте 3000 м при количестве осадков, не превышающем 1200 мм.

Различные по степени увлажнения северо-восточный (600—900 мм за год) и юго-западный (300—400 мм) склоны Тарбагатая характеризуются соответственно модулями подземного стока на высотах 1800—2000 м 4 и 1 л/сек. км² (минимальный модуль подземного стока на северо-восточном склоне составляет 0,5 л/сек. км², на юго-западном 2 л/сек. км²).

Значительная часть горной территории мегарегиона характеризуется величинами доли подземного стока в общем речном 30—40% (горное обрамление Ферганской долины и большая часть Внутреннего Тянь-Шаня). Меньшими значениями коэффициента подземного питания (20—30%) характеризуются следующие районы: наиболее высокогорный с обилием ледников бассейн р. Сарыджаз; сильно расчлененные районы Гиссарского, Зеравшанского хребтов, бассейн р. Ангрена; Тарбагатай и сложенное в основном слабоводообильными глинистыми породами предгорное обрамление Южно-Таджикской депрессии.

Повышенные значения коэффициента подземного питания (40—50 и >50%) приурочены к территории северной части Внутреннего Тянь-Шаня (хребты Киргизский, Заилийский, Кунгей-Алатау), а также частично распространяются на хребты Алайский, Туркестанский и Джунгарский Алатау в пределах территории, сложенной хорошо фильтрующими породами.

В пределах мегарегиона широкое распространение имеют конуса выноса, в периферийных частях которых коэффициент подземного питания становится значительно $\geqslant 50\%$. Здесь встречаются реки преимущественно подземного питания (Карасу, Джины-Дарья и т. д.).

Таблица 19

Поверхностный и подземный сток в основные реки Советского Союза (по замыкающим створам у устья)

№ п/п	Река	Площадь водосбора, км²	Модуль общего стока, л/сек. км²	Модуль поверхностного стока, л/сек. км²	Объем подземного стока, 10^6 м³	Модуль подземного стока, л/сек. км²	Коэффициент подземного питания, %	Примечание
	I. *Баренцево море*							
1	Печора	322 000	12,6	10,3	23 300	2,3	18	
	II. Белое море							
1	Сев. Двина	357 000	9,8	7,4	26 800	2,4	25	
2	Мезень	78 000	11,4	9,2	5 390	2,2	19	
3	Онега	56 900	8,8	6,2	4 810	2,6	30	
4	Кемь	27 700	9,9	8,1	1 600	1,8	19	
	III. Балтийское море							
1	Нева	281 000	9,0	6,5	22 200	(2,5)	28	
2	Пярну	6 910	9,3	6,7	135	2,6	26	
3	Гауя	8 900	8,5	5,0	1 100	3,5	41	
4	Зап. Двина	87 000	7,7	5,0	7 100	2,7	35	
5	Вента	11 900	8,0	5,9	79	2,1	26	
6	Неман	98 200	7,0	4,1	9 100	2,9	40	
	IV. Черное и Азовское моря							
1	Днестр	72 100	3,8	2,4	3 220	1,4	30	
2	Днепр	504 000	3,3	2,2	17 000	1,1	33	
3	Дон	422 000	2,2	1,7	6 560	0,49	22	
4	Кубань[1]	45 900	9,1	5,7	4 190	3,4	3,7	
5	Риони	13 400	(2,0)	11,4	3 620	8,6	43	
6	Южный Буг	63 700	1,7	1,3	733	0,36	22	

№ п/п	Река	Площадь водосбора, км²	Модуль общего стока, л/сек. км²	Модуль поверхностного стока, л/сек. км²	Объем подземного стока, 10^6 м³	Модуль подземного стока, л/сек. км²	Коэффициент подземного питания, %	Примечание
	V. Каспийское море							
1	Кура	178 000	3,1	1,2	11 300	1,9	61	
2	Терек	43 200	7,0	4,8	3 080	2,2	31	
3	Волга	1 360 000	5,7	3,9	6 200	1,8	32	
4	Урал	229 000	1,6	1,3	1 920	0,31	16	Сток рассчитан до створа с. Тополи. Данных по общему стоку до устоя нет
5	Эмба	40 400	(0,3)	0,28	31,1	0,022	7	
	VI. Карское море							
1	Обь	2 890 000	5,1	3,7	1 120 000	1,4	27	
2	Таз	150 000	8,5	6,0	11 100	2,5	29	
3	Пур	112 000	9,0	6,5	9 440	2,5	28	
4	Енисей	2 612 000	7,6	5,8	152 000	1,8	24	
5	Пясина	182 400	15,0	13,1	10 800	1,9	12	
	VII. Море Лаптевых							
1	Хатанга	364 000	9,0	8,1	8 030	0,86	10	
2	Оленек	212 000	8,0	7,5	3 640	0,51	6	
3	Лена	2 490 000	6,5	5,3	94 500	1,2	18	
4	Яна	238 000	4,2	3,3	6 440	0,86	20	

№ п/п	Река	Площадь водосбора, км²	Модуль общего стока, л/сек. км²	Модуль поверхностного стока, л/сек. км²	Объем подземного стока, 10^6 м³	Модуль подземного стока, л/сек. км²	Коэффициент подземного питания, %	Примечание
	VIII. Восточно-Сибирское море							
1	Индигирка	360 000	5,0	4,6	4 810	0,42	8	
2	Алазея	64 400	5,0	4,4	126	0,63	13	
3	Колыма	665 000	5,9	4,7	24 900	1,21	20	
	IX. Чукотское море							
1	Амгуема	28 200	10,0	8,7	1 360	1,3	13	
	X. Берингово море							
1	Анадырь	191 000	8,4	7,3	6 810	1,1	13	
2	Камчатка	55 900	18,5	7,4	19 600	11,1	60	
	XI. Охотское море							
1	Амур	1 855 000	5,9	4,1	53 500	0,89	15	
	XII. Японское море							
1	Тумнин	22 400	11,0	7,9	2 230	3,1	28	
2	Суйфун	16 830	5,3	4,3	526	1,0	53	
	XIII. Бессточные районы Средней Азии и Казахстана							
1	Иргиз	30 300	(0,22)	Не рассчитывались				
2	Или	134 400	2,6					
3	Сыр-Дарья[2]	174 000	(4,0)	(1,2)	15 500	2,8	(70)	
4	Аму-Дарья[3]	227 000	8,8	6,5	1 600	2,3	26	

[1] Общий сток в устье искажен забором воды на орошение. Данные приведены по створу у г. Краснодара.
[2] Расчет сделан до кишл. Кокбулак по карте слоя.
[3] Расчет сделан по карте слоя до створа гидрометстанции Бахача.

В районах межгорных впадин и понижений, заполненных аллювиальными отложениями, формирование подземных вод происходит за счет больших потерь на инфильтрацию из постоянных и временных поверхностных водотоков, атмосферных осадков и притока подземных вод из других районов. Образованные таким образом запасы подземных вод расходуются на питание тех же водотоков на участках, где они являются дренами. Таким образом, здесь имеет место грунтовое регулирование стока, т. е. его перераспределение по длине реки (рр. Нарын, Кара-Дарья и др.). Разгрузка подземных вод происходит также за счет выходов их на поверхность в виде родников и образования заболоченных участков.

При рассмотрении распределения подземного стока по территории в целом необходимо отметить уменьшение подземного стока от внешних периферийных хребтов к внутренним зонам горных областей, что согласуется в общих чертах с распределением по территории годовых сумм осадков. В целом в пределах мегарегиона наблюдается тенденция к уменьшению подземного стока с запада на юго-восток.

В заключение региональной характеристики подземного питания рек на территории Советского Союза приведены данные о подземной и поверхностной составляющих речного стока основных рек страны (табл. 19).

Разделение общего речного стока на составляющие произведено на основе расчета подземного стока в реки методом генетического расчленения гидрографа (данные для составления карт подземного стока СССР в масштабе 1 : 2 500 000, полученные в совместных исследованиях ГГИ, МГУ и ВСЕГИНГЕО).

Для речных бассейнов, площадь которых превышает 50—70 тыс. км^2, определение подземной составляющей произведено суммированием объемов подземного стока, поступающих в реки. Для бассейнов, не включенных в расчеты при расчленении гидрографов, объем подземного стока определен по картам масштаба 1 : 2 500 000.

Для крупных рек Советского Союза (для отдельных створов с площадью водосбора более 50 тыс. км^2) в приложении даны норма подземного стока (в модулях, л/сек. км^2), коэффициент подземного питания реки (в %) и подземного стока (в %) в ее бассейне. Эти данные следует рассматривать как составную часть публикуемых Гидрометслужбой «Основных гидрологических характеристик».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение проблемы подземного питания рек показывает, что ее решение должно идти по двум основным направлениям.

Первое из них заключается в наиболее полном изучении гидрогеологической сущности процесса взаимосвязи между подземными водами и рекой и направлено на выявление особенностей формирования подземного стока в речном бассейне с учетом общего режима подземных вод, гидродинамических условий поступления их к гидрографической сети и непосредственного водообмена между водоносными пластами и рекой. В основе таких исследований должны лежать полевые наблюдения за процессом стока подземных вод в конкретных речных бассейнах, с использованием гидрогеологических и гидродинамических методов анализа и обобщения полученного материала.

Из-за значительной сложности организации гидрогеологических наблюдений, связанной в первую очередь с трудоемкими работами по заложению наблюдательных скважин и определением основных гидрогеологических параметров для расчета величин подземного стока, эти наблюдения можно проводить лишь в ограниченном объеме. Сложность и многообразие взаимосвязей рек с подземными водами в различных физико-географических условиях на территории нашей страны даже при грубой схематизации этого процесса не позволяет на основе только таких исследований получить региональные количественные характеристики подземного стока в реки для целых речных бассейнов. Отсюда возникает необходимость организации гидрогеологических наблюдений для изучения подземного стока в реки лишь на отдельных пунктах речных бассейнов для количественной оценки основных закономерностей подземного стока в реки, для типа подземного питания рек на ключевых, наиболее характерных участках. Для распространения полученных закономерностей на весь изучаемый бассейн большое значение имеют региональные обобщения геологического и гидрогеологического ма-

териала, позволяющие получить качественную характеристику режима подземных вод и взаимосвязи их с реками.

Второе направление в исследованиях подземного питания рек связано с изучением гидрологической сущности этого процесса.

Содержание гидрологических исследований подземного питания рек определяется, с одной стороны, необходимостью учета влияния реки на режим подземного стока в период половодья и паводков, когда в условиях гидравлической связи речных и подземных вод это влияние определяет закономерности поступления в реку подземных вод. С другой стороны, гидрологические данные позволяют освещать период межени, когда питание реки почти полностью формируется подземным стоком, и определять точные количественные характеристики всего подземного стока, поступающего в гидрографическую сеть со всего речного бассейна.

Гидрологические исследования должны основываться на полевых наблюдениях в едином комплексе с натурными гидрогеологическими исследованиями первого направления, а также на широком региональном обобщении имеющихся гидрологических данных о стоке рек и водном режиме речных бассейнов.

Прямые гидрологические определения величин подземного стока в реки, полученные в меженные периоды, трансформируются на основе установленных в гидрогеологических исследованиях закономерностей динамики подземного питания рек в количественные региональные характеристики абсолютных величин подземного стока за любой период и за год в целом.

Одновременно с гидрологическими и гидрогеологическими аспектами проблемы подземного питания рек для более полного ее решения имеют значение исследования водного режима почв, который в советской почвенной гидрологии рассматривается как отражение сложного процесса трансформации влаги атмосферных осадков в воды поверхностного и подземного стока.

Указанные основные направления в исследованиях подземного питания рек гармонически сочетаются в комплексном гидролого-гидрогеологическом методе изучения и оценки подземного стока, основные положения которого автор стремился рассмотреть в настоящей книге.

Возможности широкого использования данных о речном стоке для оценки подземного стока зоны интенсивного водообмена, наиболее полно показанные в работах по составлению карт подземного стока Советского Союза, открывают перспективы дальнейшего развития исследований подземного питания рек.

Метод генетического расчленения гидрографа реки, лежащий в основе количественной оценки естественных ресурсов подземных вод основных водоносных горизонтов для составления указанных карт, требует дальнейшего развития и уточнения.

В первую очередь это относится к учету сезонного подземного питания рек и возможной асинхронности формирования основных составляющих речного стока в реальных бассейнах выше расчетных замыкающих створов.

В сложных гидрогеологических условиях, в особенности для больших речных бассейнов и в горных условиях, необходимо рассмотреть возможные изменения типов подземного питания на притоках различного порядка и объективно оценить генетические условия формирования подземного стока на всех участках изучаемого водосбора.

В то же время при изучении подземного питания рек в условиях гидравлической связи их с подземными водами требуется дальнейшее уточнение степени развития процессов берегового регулирования речного стока в различных природных условиях конкретных речных бассейнов, как одного из важнейших факторов, определяющих динамику подземного питания реки.

Практическая необходимость использования данных о подземном стоке в самом широком плане для решения многих вопросов гидрологии, гидрогеологии и смежных областей обусловливает дальнейшее развитие исследований подземного питания рек. В основе этих исследований должно лежать изучение подземного питания рек как одного из звеньев общего круговорота природных вод. Успех в решении этой задачи обеспечивается достижениями в исследованиях водного баланса речных бассейнов — в гидрологии, закономерностей формирования подземных вод — в гидрогеологии и водного режима почв — в почвоведении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверьянов С. Ф. Некоторые вопросы подземного питания равнинных рек. Труды III Всесоюзного гидрол. съезда, т. IX. Гидрометеоиздат, 1959.
2. Акопян А. С. К вопросу об определении испарения с поверхности суши при различных глубинах стояния уровня грунтовых вод. Труды ГГИ, вып. 135, 1966.
3. Алекин О. А. Ионный сток и средний состав речной воды для территории СССР. Труды ГГИ, вып. 33, 1951.
4. Алекин О. А. Основы гидрохимии. Гидрометеоиздат, Л., 1953.
5. Альтовский М. Е. К вопросу о классификации подземных вод. Труды ВСЕГИНГЕО, сб. 18. Госгеолтехиздат, 1959.
6. Андреянов В. Г. Гидрологические расчеты при проектировании малых и средних ГЭС. Гидрометеоиздат, Л., 1957.
7. Асатур К. Г. О неустановившемся движении грунтовых вод, притекающих к водохранилищу. ДАН СССР, т. XCV, № 2, 1954.
8. Бочевер Ф. М., Гармонов И. В., Лебедев А. В., Шестоков В. М. Основы гидрогеологических расчетов. Изд-во «Недра», М., 1965.
9. Вевиоровская М. А. Режим грунтовых вод в прибрежных зонах поверхностных водотоков и водоемов. Режим подземных вод. ГОНТИ, М.—Л., 1938.
10. Вевиоровская М. А. К вопросу о дренировании грунтовых вод руслами рек. Бюллетень Моск. о-ва испытателей природы, отд. геол., т. XXXIII, вып. 3, 1958.
11. Веригин Н. Н. Об оценке грунтового стока рек. Труды Лаборатории гидротехнических сооружений ВНИИ водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии, сб. 4, 1963.
12. Вольфцун И. Б. Об использовании результатов определения запасов влаги в почво-грунтах на водосборах при воднобалансовых расчетах. Труды ГГИ, вып. 92, 1964.
13. Вольфцун И. Б. Способ расчета суточных величин поверхностного и подземного питания малых водотоков по гидрометеорологическим данным. Труды ГГИ, вып. 139, 1967.
14. Воронков П. П. Формирование химического состава поверхностных вод степной и лесостепной зон Европейской территории СССР. Гидрометеоиздат, Л., 1955.
15. Воскресенский К. П. Гидрометрические расчеты при проектировке на малых реках, ручьях и временных водотоках. Гидрометеоиздат, Л., 1958.
16. Гатальский М. А. Значение динамики в формировании подземных вод Русской платформы. Геол. сборник, № 2. Труды ВНИГРМ, нов. серия, вып. 95. Госгеолтехиздат, Л., 1956.

17. Гармонов И. В. и Каменский Г. Н. Карты водопроводимости и динамических запасов грунтовых вод в Пехорско-Купавенском районе близ г. Москвы. Сб. «Водные богатства недр земли на службу соц. строительства», № 6, 1933.
18. Глушков В. Г. Методы приближенного расчета стока при недостаточности гидрометрических данных. Труды II Всесоюзного гидрол. съезда в г. Ленинграде 20—27 апреля 1928 г., ч. II, 1929.
19. Григорьев С. В., Ладохин В. И., Сульдин А. В. О методе разности в гидрологических расчетах. Изв. Казанского филиала АН СССР, серия энергетики и водного хоз-ва, вып. 3. Вопросы изучения рек и водохранилищ. 1961.
20. Гуревич М. И. Элементарный приток в русловую систему и генетические формулы стока. Труды ГГИ, вып. 61, 1957.
21. Дрейер Н. Н. Определение подземной составляющей речного стока для оценки водных ресурсов. Изв. АН СССР, серия геогр., № 1, 1964.
22. Зайков Б. Д. и Белинков С. Ю. Средний многолетний сток рек СССР, Труды ГГИ, вып. 2, 1937.
23. Зайцев И. К. Принципы гидрогеологического районирования. Сов. геология, № 19, 1947.
24. Идзон П. Ф. Об использовании гидрометрических данных при изучении подземных вод (Автореферат доклада 15 марта 1961 г.). Бюллетень МОИП, отд. геол., вып. 3, 1951.
25. Иванов А. Т. Определение подземной составляющей речного стока гидрохимическим способом. Труды Лабор. гидрогеол. проблем им. Ф. П. Саваренского АН СССР, т. 3, 1948.
26. Калабин А. И. О влиянии подмерзлотных вод и наледей на питание рек и водный баланс на Северо-Востоке СССР. К вопросу регулирования запасов и стока подземных и поверхностных вод. Труды III Всесоюзного гидрол. съезда, т. IX. Гидрометеоиздат, Л., 1959.
27. Калинин Г. П., Аболян Т. С. Об определении подземного питания рек. Метеорология и гидрология, № 5, 1957.
28. Каменский Г. Н. Гидродинамические принципы изучения режима грунтовых вод. Сб. «Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии». Госгеолтехиздат, М., 1953.
29. Карта подземного стока СССР (зона интенсивного водообмена). М. 1 : 5 000 000. Изд. ГУГК Мин. геологии СССР, М., 1965.
30. Карта подземного стока СССР в процентах от общего речного стока и коэффициентов подземного стока в процентах от осадков. М. 1: 5 000 000. Изд. ГУГК Мин. геологии СССР, М., 1965.
31. Келлер Р. Воды и водный баланс суши. Изд-во «Прогресс», М., 1965.
32. Кенесарин Н. А. Предварительные итоги изучения режима и баланса подземных вод в Узбекистане. Труды II Узбек. гидрогеол. совещания. Изд. АН УзССР, 1959.
33. Кенесарин Н. А. Формирование режима грунтовых вод орошаемых районов. Изд. АН УзССР, 1959.
34. Киселев П. А. Исследование закономерностей режима грунтовых вод в районе Полесской низменности на основе гидродинамического анализа. В книге «Режим и баланс подземных вод». Изд-во «Наука и техника», Минск, 1964.
35. Киселев П. А. Графоаналитический метод определения по режимным данным гидрогеологических параметров, необходимых для прогноза изменений уровня грунтовых вод. ДАН СССР, т. IX, № 8. Минск, 1965.
36. Колесов Г. П. К вопросу об артезианском питании рек. Труды ГГИ, вып. 122, 1965.
37. Конопляницев А. А., Ковалевский В. С. К вопросу о региональных закономерностях режима грунтовых вод. Проблемы гидрогеологии. Доклад к собранию Международной ассоциации гидрогеологов 1960 г. Госгеолтехиздат, М., 1960.

38. Коноплянцев А. А., Ковалевский В. С., Семенов С. М. Естественный режим подземных вод и его закономерности. Госгеолтехиздат, М., 1963.
39. Куделин Б. И. Гидрогеологический анализ и методы определения подземного питания рек. Труды Лабор. гидрогеол. проблем им. Ф. П. Саваренского АН СССР, т. V, 1949.
40. Куделин Б. И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. Изд. МГУ, М., 1960.
41. Куделин Б. И. Закономерности подземного стока и гидрогеологическое обоснование генетического расчленения гидрографа реки. Труды Ин-та геологии АН СССР, Уральский филиал, вып. 76. Закономерности формирования и распределения подземных вод. Гидрогеологический сб., № 4. Свердловск, 1965.
42. Куделин Б. И. (ред.). Подземный сток на территории СССР. Изд. МГУ, 1966.
43. Крестовский О. И. Грунтовое питание малых водотоков в период весеннего половодья. Труды ГГИ, вып. 81, 1960.
44. Кузин П. С. Классификация рек и гидрологическое районирование СССР. Гидрометеоиздат, Л., 1960.
45. Ланге О. К. Основы гидрогеологии. Изд. 2-е. Изд. МГУ, 1958.
46. Лебедев А. В. Методы изучения баланса грунтовых вод. Госгеолтехиздат, М., 1963.
47. Линслей Р. К., Колер М. А., Паулюс Д. Л. Х. Прикладная гидрология. Гидрометеоиздат, Л., 1963.
48. Личков Б. Л. Материалы к вопросу о классификации подземных вод. «Материалы по геологии и полезным ископаемым России», вып. 93., 1928.
49. Личков Б. Л. Основные черты классификации подземных вод. Исследования подземных вод СССР, вып. 2. ГГИ, Л., 1933.
50. Личков Б. Л. О законе горизонтальной зональности В. В. Докучаева в применении к грунтовым водам и о степени подчинения горизонтальной зависимости остальных подземных вод. Геогр. сб., № VI, 1954.
51. Личков Б. Л. Формирование подземных вод и единство природных вод. Труды Лабор. гидрогеол. проблем им. Ф. П. Саваренского АН СССР, т. XVI, 1958.
52. Личков Б. Л. Природные воды земли и литосферы. Изд. АН СССР, М.—Л., 1960.
53. Львович М. И. Опыт классификации рек СССР. Труды ГГИ, вып. 6, 1938.
54. Львович М. И. Человек и воды. Географгиз М., 1963.
55. Львович М. И., Грин А. М., Дрейер Н. Н. Основы метода изучения водного баланса и его преобразований. Ин-т географии АН СССР, М., 1963.
56. Макаренко Ф. А. О закономерностях подземного питания рек. ДАН СССР, т. 57, № 5, 1947.
57. Макаренко Ф. А. Современное состояние и основные проблемы советской гидрогеологии. Изв. АН СССР, серия геол. № 12, 1957.
58. Макаренко Ф. А. Опыт изучения закономерностей связи подземных вод с поверхностным стоком. Труды III Всесоюзного гидрол. съезда, т. IX. Гидрометеоиздат, Л., 1959.
59. Материалы Междуведомственного семинара по методике гидрометрической оценки подземного стока в реки. Изд. ГГИ, Валдай, 1966.
60. Мятиев А. Н. Напорный комплекс подземных вод и колодцы. Изв. АН СССР, отд. техн. наук, № 9, М., 1947.
61. Огиевский А. В. О подземном питании р. Днепра. Исследования рек СССР, вып. IV, ГГИ, Л., 1933.
62. Петров Г. Н. Меженний сток и его изучение. Труды Казанского филиала АН СССР, серия энерг. и водн. хоз-ва, вып. I. Казань, 1956.

63. Поляков Б. В. Водный баланс р. Волги на участке Куйбышев—Камышев. Метеорология и гидрология, № 2, 1936.
64. Поляков Б. В. Определение связи между подземными водами и поверхностным стоком. Труды ЦИП, вып. 2 (29), 1947.
65. Попов И. В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Гидрометеоиздат, Л., 1965.
66. Попов О. В. Методы изучения и расчета подземного питания рек. Труды ГГИ, вып. 114, 1964.
67. Попов О. В. Общие закономерности формирования подземного стока в реки на территории СССР. Труды ГГИ, вып. 122, 1965.
68. Попов О. В. Региональная оценка подземного питания рек в гидрологических целях. Труды ГГИ, вып. 133, 1966.
69. Распопов М. П. Районирование подземных вод равнины Европейской части СССР по условиям их стока в реки. Труды ГГИ, вып. 27 (81), 1950.
70. Рекомендации рабочего семинара Ин-та географии АН СССР, ГГИ, кафедры гидрогеологии МГУ и института «Гидропроект» по методике оценки подземного стока в реки для Генеральной схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов СССР (Москва, 22—23 ноября 1962 г.). Изв. АН СССР, серия геогр., 2, М., 1963.
71. Решение секции подземных вод и проблем подземного питания рек. Труды III Всесоюзного гидрол. съезда, т. IX. Гидрометеоиздат, Л., 1959.
72. Роде А. А. Водный режим почв и его типы. Труды III Всесоюзного гидрол. съезда, т. IX. Гидрометеоиздат, Л., 1959.
73. Саваренский Ф. П. Гидрогеология. ОНТИ, М., 1934.
74. Силин-Бекчурин А. И. Динамика подземных вод. Изд. 2-е. Изд. МГУ, 1965.
75. Соколов А. А. Гидрография СССР (воды суши). Гидрометеоиздат, Л., 1964.
76. Соколовский Д. Л. Исследования и расчеты стока в СССР, их состояние и перспективы развития. Труды III Всесоюзного гидрол. съезда, т. I. Гидрометеоиздат, Л., 1958.
77. Субботин А. И. О взаимосвязи подземных вод и речного стока. Труды ЦИП, вып. 9 (30), 1948.
78. Указания по определению расчетных минимальных расходов воды рек при строительном проектировании СН-346-66. Гидрометеоиздат, Л., 1966.
79. Урываев В. А. Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае. Гидрометеоиздат, Л., 1953.
80. Федоров Л. Т. О грунтовом водообмене рек. Труды «Гидропроекта», сб. 4, 1960.
81. Чеботарев А. И. (ред.). Вопросы изучения подземного стока в реки. Труды ГГИ, вып. 114, 1964.
82. Чеботарев А. И. и Попов О. В. (ред.). Исследования подземного стока в реки. Труды ГГИ, вып. 122, 1965.
83. Чеботарев А. И. и Попов О. В. (ред.). Исследования подземного стока в реки. Труды ГГИ, вып. 133, 1966.
84. Чеботарев А. И. и Попов О. В. (ред.). Расчеты минимального стока и подземного питания рек. Труды ГГИ, вып. 139, 1967.
85. Шестаков В. М. Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа. Изд. МГУ, 1965.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Характеристика подземного питания крупных рек Советского Союза (по отдельным створам)

№ п/п	Река	Пункт	Площадь водосбора, км²	Норма стока M л/сек. км²	Модуль подземного стока, л/сек. км²	Коэффициент подземного питания, %	Коэффициент подземного стока, %	Примечание
		Бассейн Белого и Баренцева морей						
1	Печора	с. Троицко-Печорск . .	35 600	14,3	2,85	20	15	По расчленению гидрографа
2	„	с. Усть-Цильма . . .	248 000	(12,8)	2,54	(19)	14	То же
3	Сев. Двина	с. Усть-Пинега . . .	348 000	9,7	2,38	25		По карте модулей
		Бассейн Балтийского моря						
4	Нева	г. Петрокрепость . . .	276 000	9,0	(2,5)	(20)		По осредненному модулю
5	Вуокса	ГЭС X (Иматра) . .	615 000	9,6	(2,0—2,5)	(20)		То же
6	Свирь	ГЭС XII (с. Мятусово)	66 400	9,3	(2,5)	(20)		»
7	Волхов	ГЭС VI	79 800	7,4	(1,5—2,0)	(20)		По среднему модулю
8	Зап. Двина	г. Даугавпилс . . .	64 600	7,3	2,40	33	11	По расчленению
9	Неман	г. Смалининкай	81 200	6,8	3,20	47	15	То же
		Бассейн Черного и Азовского морей						
10	Днестр	г. Бендеры	66 100	4,7	1,55	33		По карте модулей
11	Днепр	г. Речица	58 200	6,5	1,97	30		То же

12	„	г. Киев	328 000	4,2	1,42	34		По карте модулей
13	„	г. Кременчуг	383 000	3,8	1,30	34		То же
14	„	с. Лоцманская Каменка	459 020	3,5	1,16	33		»
15	Припять	г. Мозырь	97 000	3,8	1,37	36		По расчленению
16	Салгир	г. Симферополь . . .	321	4,6	—	—	—	
17	Дон	ст. Георгиу-Деж . . .	69 500	3,7	1,33	36		По расчленению
18	Десна	г. Чернигов	81 400	4,0	1,36	34		По карте модулей
19	Дон	х. Хованский	169 000	3,0	0,86	29		То же
20	„	г. Калач	222 000	3,0	0,74	25		»
21	„	ст-ца Раздорская . . .	378 000	2,3	0,55	24		»
22	Сал	ст-ца Батлаевская . .	19 300	0,6	(0,10)	(1)		»
23	Кубань	г. Краснодар (КРЭС)	45 900	9,1	3,45	(38)		»
24	Сочи	с. Пластунки	238	66,5	—	—	—	»
25	Рионн	с. Намохвани	3 450	35,9	1,4	(48)		»

Бассейн Каспийского моря

26	Волга	с. Ельцы	9 130	8,6	(3,0)	(2)		По карте модулей
27	„	г. Старица	21 100	8,6	(2,2)	(25)		То же
28	„	г. Калинин	24 900	8,6	(2,0)	(25)		»
29	„	г. Ярославль	154 000	6,2	1,91	26		»
30	„	г. Чкаловск	228 000	6,4	1,85	25		»
31	„	г. Горький	479 000	6,2	1,2	28		»
32	„	с. Вязовые	629 000	6,0	1,63	27		»
33	„	пос. Поляна им. Фрунзе	1 220 000	6,3	1,93	31		»
34	Ока	г. Муром	188 000	4,9	1,63	33		»
35	Кама	г. Березники	84 400	20,6	3,91			»
36	„	г. Пермь	169 000	9,9	3,39	34		»
37	Белая	г. Уфа	100 000	9,6	2,90	38		»
38	Вятка	г. Вятские Поляны . .	124 000	9,0	1,3	25		»

№ п/п	Река	Пункт	Площадь водосбора, км²	Норма стока M л/сек. км²	Модуль подземного стока, л/сек. км²	Коэффициент подземного питания, %	Коэффициент подземного стока, %	Примечание
39	Малый Узень	с. Малый Узень . . .	3 930	1,3	(0,05)	(4)		По карте модулей
40	Большой Узень	г. Новокузнецк . . .	7 480	1,2	(0,05)	(4)		То же
41	Урал	с. Кушум	190 000	2,2	0,33	15		»
42	Илек	г. Актюбинск	11 000	(2,0)	(0,20)	10		»
		Бассейн Карского моря						
43	Обь	г. Камень-на-Оби . .	216 000	7,3	1,8	25		По карте модулей
44	„	г. Новосибирск . . .	252 000	6,9	1,7	25		То же
45	Бия	г. Бийск	36 900	13,0	(2,0)	(20)		»
46	Иртыш	пос. Аблакетка (г. Усть-Каменогорск) . . .	146 000	4,2				Бассейн уходит за пределы СССР
47	„	г. Тобольск	969 000	2,25				То же
48	Ишим	г. Петропавловск . . .	118 000	0,52				По карте модулей
49	Тобол	г. Ялутуровск	220 000	0,50	0,35	70		То же
50	„	с. Липовка	402 000	2,1	0,76	36		По расчленению гидрографа
52	Тавда	с. Тавда	80 700	5,7	1,00	18	5	По карте модулей
53	Енисей	пос. Базаиха (г. Красноярск)	300 000	9,7	2,7	28		То же
54	„	г. Енисейск	1 400 000	5,4	1,7	31		»
55	Ангара	с. Пашки	572 000	3,3	1,0	29		»
56	Селенга	с. Ново-Селенгинск . .	360 000	2,0	(0,27)	(14)		»
57	Ока	с. Больше-Окинское . .	71 100	6,7		34		

БИБЛИОТЕКА
Ленинградского
Гидрометеорологического
Института

Бассейн моря Лаптевых								
58	Оленек	с. Сухана	127 000	5,3	0,43	8	4	По карте модулей
59	Витим	г. Бодайбо	186 000	8,1	1,10	14	8	То же
60	Вилюй	с. Сунтар	202 000	3,5	0,29	8	2	»
61	Яна	местн. Джангкы . . .	216 000	4,2		17		»
62	Адыча	местн. Урдюк-Кумах	89 600	5,4	0,40	7	4	По расчленению гидрографа
Бассейн Восточно-Сибирского моря								
63	Индигирка	местн. Воронцово . . .	305 000	5,1	0,44	9	5	По карте модулей
64	Колыма	пос. Усть-Среднекан (гмст Среднекан)	99 400	7,3	0,9	13		»
Бассейн Охотского моря								
65	Амур	г. Хабаровск	1 630 000	15,3	1	—		Часть бассейна расположена за пределами СССР
66	Шилка	г. Сретинск	175 000	2,1				То же
67	Зея	уроч. Зейские Ворота	82 400	8,7	1,58	18	8	По карте модулей
Бессточные районы Казахстана и Средней Азии								
68	Или	с. Илийское	111 000	4,1				По карте модулей
69	Кара-Дарья	пос. Кампыр-Рават . .	12 400	10,0				То же
70	Зеравшан	Мост Дупули	10 200	15,1	(3,0)	30		»
71	Аму-Дарья	г. Керки	309 000	8,8				»

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

Часть I

Процесс формирования подземного питания рек и его изучение

Глава 1. Развитие и состояние исследований подземного питания рек 17
Глава 2. Подземные воды как источник питания рек 37
1. Источники подземного питания рек . . . . . —
2. О режиме основных источников подземного питания рек . . 42
Глава 3. Взаимосвязь рек и подземных вод 59
Глава 4. Классификация подземного питания рек 79
1. Основные факторы формирования подземного питания рек —
2. Параметры подземного стока 84
3. Типы подземного питания рек 87

Часть II

Методы изучения подземного питания рек

Глава 5. Полевые исследования подземного стока в реки 100
Глава 6. Анализ гидрогеологических и гидрологических данных для оценки подземного питания рек 124
1. Основные положения . . . . . —
2. Принципы анализа материала 146
3. Оценка минимального стока рек 159

Часть III

Подземное питание рек СССР

Глава 7. Условия формирования подземного питания рек СССР . . 175
Глава 8. Общие закономерности формирования подземного питания рек СССР 188
1. Особенности распределения подземного стока . . . . . —
2. Изменчивость подземного стока в реки 208

Глава 9. Региональная оценка условий формирования и распределения подземного стока в реки 227
1. Бассейны Белого и Баренцева морей . . . . . —
2. Бассейн Балтийского моря 231
3. Бассейны Черного и Азовского морей 233
4. Бассейн Каспийского моря 240
5. Бассейны рек Кавказа 243
6. Бассейны рек Урала 246
7. Бассейн Карского моря 248
8. Бассейны морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского 257
9. Бассейны морей Берингова, Охотского и Японского . . . 263
10. Бессточные районы Казахстана и Средней Азии 269

Заключение 278

Литература 281

Приложение 285

Попов Олег Владимирович

ПОДЗЕМНОЕ ПИТАНИЕ РЕК

Отв. редактор *И. В. Попов*

Редактор *З. И. Мироненко*

Переплет художника *В. М. Морозова*

Технич. редактор *Г. С. Николаева*

Корректоры: *В. С. Игнатова*
и *Б. А. Минц*

Сдано в набор 16/I 1968 г.
Подписано к печати 22/IV 1968 г.
Бумага тип. № 1 60×90¹/₁₆.
Печ. л. 18,25. Уч.-изд. л. 19,56.
М-12370. Индекс ГЛ-162.
Тираж 2000 экз. Заказ 56. Цена 1 р. 38 к.

Гидрометеорологическое издательство.
Ленинград, В-53, 2-я линия, 23.

Ленинградская типография № 8
Главполиграфпрома Комитета
по печати при Совете Министров
СССР
Ленинград, Прачечный пер., 6