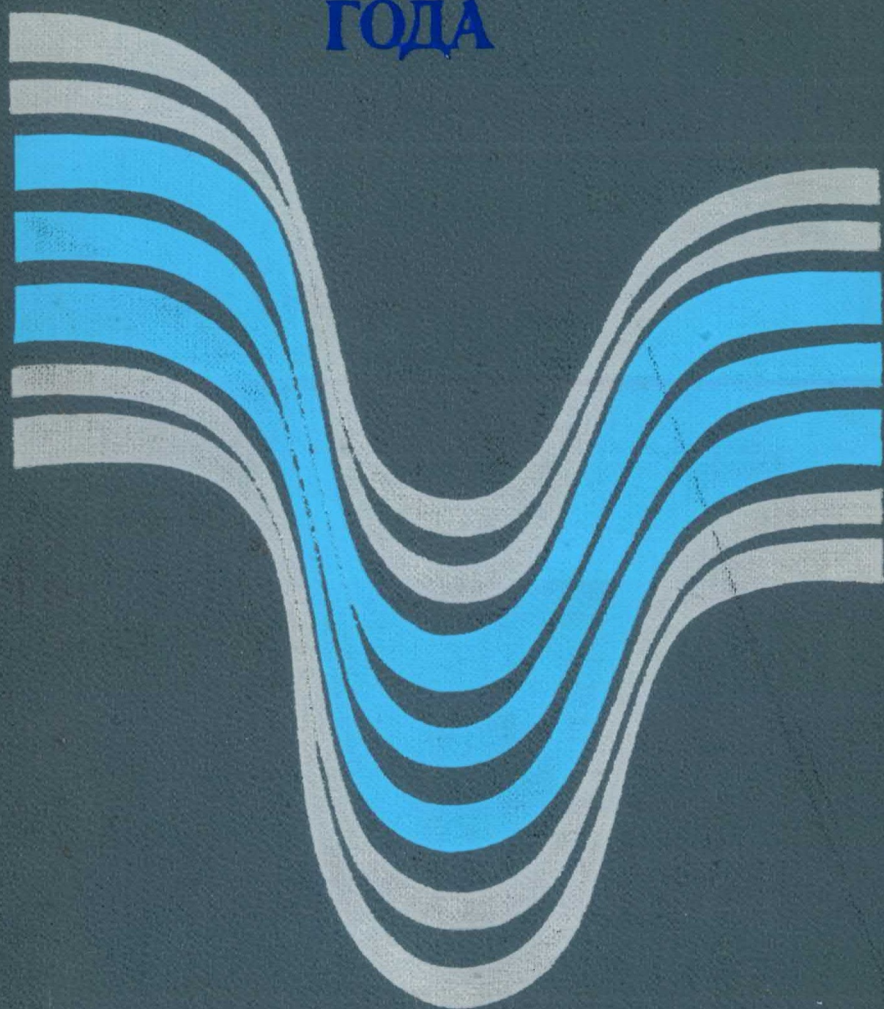


556.167
8-57

А. М. Владимиров

СТОК РЕК
В МАЛОВОДНЫЙ
ПЕРИОД
ГОДА



А. М. Владимиров

550707
Б-54

СТОК РЕК
В МАЛОВОДНЫЙ
ПЕРИОД
ГОДА

-528-



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ ЛЕНИНГРАД • 1976

В монографии впервые рассматривается комплексная проблема оценки временных, количественных и качественных характеристик сезонного (лимитирующего), межennale и минимального стока с учетом влияния хозяйственной деятельности человека в бассейне реки. Расчетные методы разработаны для случаев наличия и отсутствия гидрологических данных и базируются на генетическом и вероятностно-статистическом анализе информации по 3000 пунктам наблюдения на реках СССР.

Рассчитана на научных работников и инженеров-гидрологов, гидротехников, мелiorаторов, гидрогеологов, географов, а также аспирантов и студентов гидрологических и географических факультетов институтов и университетов.

The publication is dealt with the complex problem of computation of the characteristics of duration, quantity and quality characteristics of seasonal (limit), low and minimal flows, as well as the influence of human activity in river basins. Methods of computation are worked out for case of presence and lack of hydrological data they are based on the genetical and probability—statistical analysis of information for 3000 observational stations on the rivers of the USSR.

The publication is addressed for scientific workers and engineers—hydrologists, hydrotechnicians, meliorations, hydrogeologists, geographers, as well as to postgraduates and students of hydrological and geographical faculties of Institutes and of Universities.

В водном режиме рек отчетливо выделяются две фазы — многоводная и маловодная. Во время многоводной фазы сток рек формируется главным образом за счет поверхностных вод, образующихся от таяния снега или выпадения дождей, поэтому многоводная фаза наблюдается в теплый период года. В это время по речным системам сбрасывается до 60—80% годовых запасов воды, однако длительность фазы невелика, чаще всего два-три месяца.

Маловодная фаза наступает на реках в результате резкого сокращения притока поверхностных вод в речную сеть. На реках Советского Союза она может наблюдаться в зимний, летний и осенний сезоны. Ее общая продолжительность достигает 300 дней и более. Водность рек в период этой фазы снижается в десятки и даже сотни раз по сравнению с величиной стока в многоводную фазу.

За годы Советской власти суммарный объем воды, потребляемой промышленностью и населением нашей страны, возрос в 25 раз, а за последние 15 лет — более чем в 2 раза. 75% всей потребляемой воды тратится на орошение. В ближайшие десятилетия в СССР предполагается увеличить площади орошаемых земель почти в 3 раза, соответственно возрастет и водопотребление.

Резкое увеличение потребления воды при неравномерном распределении водных ресурсов во времени и по территории (в наиболее экономически развитой части СССР сосредоточено всего 20% суммарных водных ресурсов, а в маловодную фазу и того меньше), а также увеличивающееся загрязнение рек в результате сброса промышленно-коммунальных вод и стока ядохимикатов с сельскохозяйственных полей заставляет относиться к воде как к одному из основных видов природных ресурсов, имеющих ограниченные запасы. Не случайно в Советском Союзе проводятся широкие мероприятия по сохранению водных ресурсов, обеспечению рационального их использования и охране от загрязнения и истощения. В 1970 г. Верховный Совет СССР принял закон «Об утверждении Основ водного законодательства Союза ССР и союзных республик»,

устанавливающий порядок использования и охраны вод и водных объектов. В последние годы ЦК КПСС и Совет Министров СССР приняли ряд постановлений по упорядочению использования и охране водных ресурсов.

Таким образом, необходимость детального изучения речного стока, особенно в маловодный период, диктуется требованиями экономического развития нашей страны. Поэтому в решениях IV Всесоюзного гидрологического съезда указано на необходимость дальнейшего расширения исследований низкого стока рек, т. е. стока рек в маловодный период.

Определенное внимание вопросам минимального стока уделяется в социалистических странах, а также в ряде капиталистических стран. Необходимость систематизации и обобщения мирового опыта исследований низкого стока, разработки рекомендаций по его расчету отмечается в программных документах ЮНЕСКО и других международных организаций.

Следует отметить, что интерес к низкому стоку рек особенно повысился в последние годы в связи с возрастающим дефицитом воды и ухудшением ее качества для многих районов земного шара. Это ведет к усилению использования малых рек как источников водоснабжения. Однако именно для них вопросы расчета стока в маловодный период стоят наиболее остро.

Длительное время исследованиями низкого стока рек занимались совершенно недостаточно, относительно интенсивно изучался лишь минимальный сток. Основные работы проводились в Государственном гидрологическом институте (ГГИ), где автором были разработаны методические основы исследований минимального и меженного стока рек [38]. В 1970 г. автором была опубликована монография [40], посвященная обоснованию принципов и методов расчета основных характеристик минимального стока, пригодных для широкого использования в расчетной практике и изложенных в Указаниях СН 346-66 [156]. В этой монографии впервые был систематизирован и обобщен накопленный к концу 60-х годов материал по исследованиям минимального стока рек СССР.

Дальнейшее накопление материалов о стоке рек СССР, особенно рек АТС, а также наличие исследований по минимальному и подземному стоку позволило автору значительно усовершенствовать разработанные в середине 60-х годов методы расчета наиболее используемых в практике характеристик минимального стока. При этом были получены расчетные методы, обладающие заметно повышенной точностью конечных результатов.

В настоящей работе излагаются новые методы определения основных расчетных характеристик минимального, меженного и лимитирующего стока, базирующиеся на всестороннем анализе условий формирования речного стока в маловодный период. Предлагаемые методы позволяют достаточно надежно оп-

ределять необходимые характеристики стока для рек, на которых отсутствуют гидрометрические измерения. Относительно минимального стока эти методы уже нашли широкое практическое применение, будучи включены в нормативный документ Госстроя СССР — Указания СН 435-72 [155].

С маловодным периодом непосредственно связаны явления пересыхания и перемерзания рек. Эти явления наблюдаются в период наибольшего истощения речного стока и являются завершающим моментом маловодной фазы. Сведения о возможности отсутствия стока и продолжительности этого явления относятся к весьма важным практическим характеристикам, так как большинство народнохозяйственных и промышленных предприятий не допускает даже кратковременного перерыва в подаче воды. Однако исследования указанных явлений находятся еще в начальной стадии.

Помимо сведений о количестве воды, на практике все чаще требуются данные о качестве воды, особенно в маловодный период. Увеличение количества промышленно-бытовых сточных вод, химизация сельского хозяйства, возрастание количества коллекторно-дренажных вод в результате развития орошения и борьбы с засолением почв ведут к интенсивному загрязнению рек. В 1926 г. количество вод, сброшенных в речную сеть Советского Союза, составило 0,6% общих запасов поверхностных вод, а в 1970 г. эта величина возросла уже до 1,5%, при этом для разбавления сточных вод потребовалось израсходовать 15% водных ресурсов. При условии сохранения подобных темпов сброса сточных вод к 2000 г. только на их разбавление потребуется 86% всех водных ресурсов нашей страны. Практически на больших пространствах возможно полное или частичное загрязнение всех рек. Следует отметить, что действенные меры по улучшению качества загрязняемых вод не могут быть разработаны в должной мере без ясного представления о водном режиме рек, особенно в наиболее напряженные по водности периоды (маловодные сезоны). В предлагаемой работе сделана попытка соединить вопросы расчета стока с учетом качества воды поверхностных водотоков.

Человек все в большей мере влияет на речной сток, изменяя не только качество воды, но и ее количество. Строительство гидроузлов, создание водохранилищ, увеличение мощности водозаборов, мелиорация земель, искусственное изменение условий стока воды на водосборах рек, перераспределение стока, интенсивное использование подземных вод (водоснабжение, водопонижительные работы и пр.) ведут к изменению режима водотоков и количества протекающей в них воды. С развитием народного хозяйства использование водных ресурсов будет интенсивно возрастать. Следовательно, будет увеличиваться и влияние хозяйственной деятельности на сток рек, особенно в маловодный период. Таким образом, необходимо иметь достаточно надежные

методы оценки степени влияния различного рода хозяйственной деятельности человека на величину речного стока в маловодный период. Это позволит значительно улучшить долгосрочные прогнозы использования водных ресурсов нашей страны.

Проблема изучения стока рек в маловодный период является комплексной и содержит большое число важных вопросов. Естественно, что в одной работе дать достаточно полный ответ на все вопросы практически невозможно. Учитывая вышесказанное, автор считает целесообразным в первую очередь уделить внимание анализу временных (время появления, продолжительность) характеристик речного стока в маловодный период и применительно к ним рассмотреть количественные показатели низкого стока, чтобы затем сопоставить их с характеристиками качества воды, оценивая таким образом потенциальные возможности рек в отношении их народнохозяйственного использования с учетом влияния хозяйственной деятельности на речной сток в маловодный период.

Приводимые гидрологические обобщения низкого стока базируются на обширном гидрометрическом материале, собранном управлениями Гидрометслужбы СССР, ГГИ и ВНИИ ВОДГЕО, а также на большом фонде гидрогеологических материалов и сведений о подземном стоке, обобщенных в ГГИ, МГУ и ВСЕГИНГЕО.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЧНОГО СТОКА В МАЛОВОДНЫЙ ПЕРИОД

Приступая к анализу процессов формирования стока рек в маловодный период года и изложению методов его расчета, целесообразно остановиться на основных понятиях, используемых в настоящей работе.

В годовом цикле изменения водности рек отчетливо выделяются многоводные и маловодные сезоны. На реках Советского Союза наблюдаются два маловодных сезона: летне-осенний и зимний в районах с весенним половодьем или осенний и зимний в районах с весенне-летним половодьем и паводками. Указанные маловодные сезоны являются смежными и в целом образуют маловодный период года. При этом во избежание разделения зимнего сезона рассматривается не календарный, а водохозяйственный год, т. е. год, начинающийся с весеннего (многоводного) сезона.

Следует отметить, что понятие «маловодный период» не является синонимом понятия «маловодный цикл». Последний используется при оценке многолетних колебаний речного стока и относится к группе (серии) маловодных лет, в которые величина стока значительно ниже нормы. Исследование такого вопроса является специальной задачей, поэтому он не рассматривается в данной работе.

Речной сток, наблюдающийся в маловодные сезоны при отсутствии значительных паводков, принято называть меженным, а время, в которое он наблюдается, — меженным периодом, понимая таким образом под последним фазу водного режима реки, наблюдающуюся в зимний или летне-осенний сезоны и характеризующуюся наличием относительно малых, устойчивых по величине расходов воды.

В меженный период включаются паводки, если величина объема каждого из них не превышает 10—15% объема стока за меженный период, предшествующий и последующий этому паводку. При частых и различных по величине паводках (пилообразный вид гидрографа) в меженный период не включаются паводки с максимальными расходами воды, превышающими предшествующие среднесуточные минимумы больше чем в 3—5 раз (чем больше объем пика паводка, тем меньше должна быть величина превышения).

Изложенное определение меженного периода в большей мере отвечает его физической сущности, чем ранее существовавшее представление о межени как периоде, характеризующем продолжительным (сезонным) наличием низких уровней и расходов воды в реке вследствие прекращения поверхностного стока и перехода реки на подземное питание главным образом за счет грунтовых вод [118]. Анализ водного режима рек СССР показал, что ограничение понятия межени по продолжительности и происхождению стока только вышеприведенными характеристиками (сезонная продолжительность и питание за счет грунтовых вод) представляется недостаточным, так как на реках СССР в многоводные годы, а в отдельных районах и в средние по водности годы наблюдаются маловодные периоды, имеющие небольшую продолжительность (30—20 дней и менее). При этом сток в такие периоды формируется как подземными, причем не только грунтовыми, так и поверхностными водами. Более подробно этот вопрос рассмотрен в работе [40].

В меженном периоде имеется отрезок времени, когда сток является наименьшим. Период наименьшего стока продолжительностью от 1 до 30 дней называется периодом минимального стока. Как показала практика исследований, на основной части рек СССР можно выделить в зимний и летне-осенний сезоны 30-дневный период, когда реки питаются в основном лишь подземными водами. Такое разграничение понятий «меженный» и «минимальный сток» позволяет более надежно осуществить исследование условий их формирования и произвести соответствующие обобщения.

Следует отметить, что в гидрологической литературе, особенно в зарубежной, до сих пор отсутствует четкое разделение понятий «меженный» и «минимальный сток». В работах английских и американских авторов эти понятия нередко объединяются общим термином «низкий сток» (low flow или low runoff).

В практике водохозяйственного проектирования основными расчетными величинами меженного и минимального стока являются:

- средние многолетние (норма) расходы воды, средние за весь меженный период, за 30 дней (месяц) или сутки с наименьшим стоком, наблюдавшимся в данном сезоне;

- минимальные (суточные и 30-дневные) и меженные расходы воды расчетной вероятности ежегодного превышения (обеспеченности), главным образом в диапазоне обеспеченностей 75—97%.

Меженный период характеризуется сведениями о начале, конце и продолжительности этого периода.

Самый наименьший за весь период наблюдений суточный расход воды называется абсолютным минимумом. Он показывает максимально возможную естественную степень истощения речного стока.

Понятия «меженный» и «минимальный сток» являются генетическими характеристиками маловодного периода года, поскольку основной критерий при их определении — единство условий их формирования (отсутствие значительных паводков).

Применительно к задачам хозяйственного использования водных ресурсов в маловодный период важное значение имеет оценка критического, или так называемого лимитирующего стока, т. е. расходов воды за маловодный сезон (или сезоны), в который данная отрасль хозяйства испытывает наибольшую нужду в воде или наибольшие трудности с водоснабжением. Очевидно, что это понятие имеет смысл при сопоставлении естественных водных ресурсов с потребностями в них народного хозяйства. Те периоды времени, в течение которых возможны более или менее длительные перебои в обеспечении водой хозяйственных мероприятий, относятся к категории лимитирующих. В этом смысле подобное понятие, строго говоря, является динамически изменяющимся применительно к конкретной водохозяйственной задаче.

Однако при обобщении характеристик стока в целом для маловодных сезонов и для значительной территории оценку лимитирующего стока целесообразно осуществлять на основе сопоставления водных ресурсов с запросами основных водопотребителей. Для условий маловодного периода к ним относятся главным образом водоснабжение и орошение земель. Следовательно, за лимитирующий принимается сезон года с наименьшим стоком. Для рек АТС и северной половины ЕТС таким сезоном является зимний, поскольку величина стока за этот сезон составляет 50—10% летне-осеннего стока (чем севернее и восточнее, тем меньше). Применительно к этим зонам остальную часть маловодного периода, включающую летне-осенний сезон и имеющую большую (чем сток за зимний сезон) водность, принимают в качестве маловодного нелимитирующего сезона. В дальнейшем в этом смысле в основном употребляется термин «маловодный сезон».

Для западной и южной частей ЕТС в качестве лимитирующего сезона целесообразно принять летне-осенний, сток в течение которого в 1,5—2 раза меньше, чем сток за зимний сезон. Соответственно за маловодный нелимитирующий сезон для этой территории принимается зима.

При расчетах внутригодового распределения стока совокупность смежных лимитирующего и нелимитирующего сезонов называется лимитирующим периодом [13]. Начало и конец указанных сезонов назначаются единичными для всех лет в данном районе с округлением до целого месяца, т. е. сроки сезонов и в целом лимитирующего периода жестко закреплены во времени и по территории.

В отдельных случаях, например при разработке мероприятий по борьбе с наводнениями или при осушении переувлажнен-

ных земель, за лимитирующий период принимается отрезок времени с наибольшей водностью. В настоящей работе эти ситуации не рассматриваются.

Таким образом, в принятом в данной работе понимании лимитирующий и маловодный периоды являются в известной мере синонимами.

Основными характеристиками лимитирующего стока служат:

— средние многолетние (норма) расходы воды, средние за лимитирующий и нелимитирующий сезоны и лимитирующий период;

— лимитирующие расходы воды расчетной обеспеченности (вероятности превышения).

Несмотря на то что меженный и лимитирующий сток относятся к одному и тому же сезону, они обычно различаются по величине и продолжительности вследствие отличий в методике выборки меженного периода и лимитирующего и нелимитирующего (маловодного) сезонов.

Меженный период в зависимости от водности года может быть длительным и коротким, устойчивым и прерывистым. Продолжительность же лимитирующего и нелимитирующего сезонов не зависит от водности данного года, так как принимается постоянной во времени. Поэтому сток рек в эти сезоны, особенно в нелимитирующий, может формироваться в большой мере за счет поверхностных вод (паводки) и значительно превышать меженный сток. На реках с устойчивым и длительным меженным периодом (например, в зимний сезон на АТС) разница в величине стока за меженный период и лимитирующий сезон незначительна, поскольку они в наибольшей мере совпадают по времени. Основное различие между меженным стоком и стоком лимитирующего и нелимитирующего сезонов существует в районах или в годы с частым выпадением дождей в летне-осенний сезон или частыми оттепелями в зимний, когда образующие ими паводки включаются в сток сезонов, но не попадают в меженный период. Пример выделения меженного периода и лимитирующего и нелимитирующего (маловодного) сезонов в годы различной водности показан на рис. 1.

При изложении общих положений вместо нескольких терминов, характеризующих сток рек в маловодный период года, целесообразно употреблять обобщающий термин — «низкий сток рек». При рассмотрении же конкретных периодов в годовом цикле водного режима рек, а тем более расчетных характеристик маловодного периода, необходимо употреблять вышеуказанные собственные понятия — минимальный суточный или 30-дневный сток, меженный сток, сток лимитирующего и нелимитирующего (маловодного) сезонов, сток лимитирующего периода.

В процессе изучения стока рек в маловодный период года, особенно при разработке его расчетных характеристик, осуще-

вляется дифференциация рек по величине бассейна на малые, средние и большие. К малым относятся реки, не полностью дренирующие водоносные горизонты, участвующие в питании водотоков данного региона, вследствие чего их модуль стока изменяется с увеличением площади бассейна. Сток малых рек формируется в значительной мере под влиянием местных условий, что имеет особое значение при исследовании низкого стока

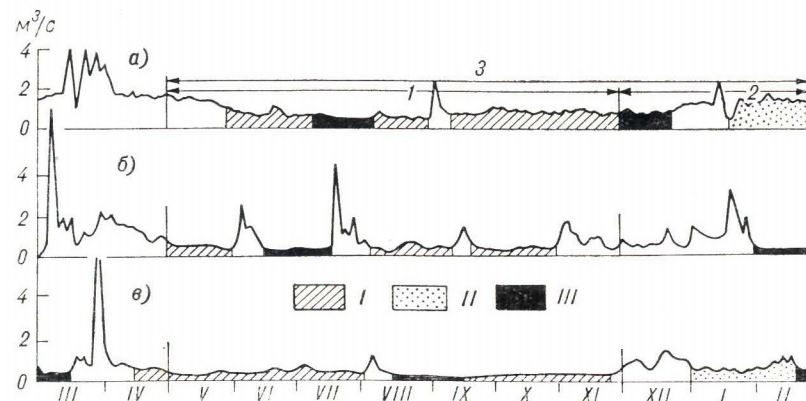


Рис. 1. Гидрограф р. Молочной у г. Токмак в многоводный (а), средний по водности (б) и маловодный (в) годы.

1 — лимитирующий сезон, 2 — нелимитирующий (маловодный) сезон, 3 — лимитирующий период; I — летне-осенний меженный период, II — зимний меженный период, III — 30-дневный период минимального стока.

с точки зрения учета гидрогеологических условий речных бассейнов.

Под средними реками понимаются реки, полностью дренирующие питающие их водоносные горизонты, поэтому модуль стока таких рек слабо изменяется с ростом площади бассейна. Режим стока средних рек имеет зональные черты и формируется в однородных физико-географических условиях.

Большие реки формируют свой сток в различных географических зонах и в пределах отдельных зон он часто имеет не свойственные данной зоне черты. Поэтому при исследовании территориальных изменений характеристик речного стока в маловодный период большие реки не представляют интереса.

1.2. СУЩЕСТВУЮЩИЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ НИЗКОГО СТОКА РЕК

Низкий сток как комплексное понятие в гидрологии не изучался. В той или иной мере как в нашей стране, так и за рубежом исследовались лишь отдельные его аспекты. Основное внимание обычно уделялось минимальному стоку рек.

Широкий круг затрагиваемых в данной работе вопросов (меженный и минимальный сток, сток лимитирующего и маловодного сезонов, явления отсутствия стока на реках, оценка качества воды и влияния хозяйственной деятельности на сток рек в маловодный период) обуславливает сложность обобщения существующей по рассматриваемой проблеме литературы и необходимость анализа лишь основных работ во избежание излишней перегрузки раздела. При этом целесообразно проанализировать раздельно работы, посвященные исследованиям минимального и меженного стока, и работы, в которых затрагивается лимитирующий сток.

Как в СССР, так и в других странах по меженному стоку практически отсутствуют широкие обобщения, позволившие бы осуществлять расчет временных и стоковых характеристик межени. Количество работ, посвященных непосредственно вопросам меженного стока, весьма невелико, хотя нередко в гидрологической литературе можно встретить работы, имеющие в своем названии слово «меженный». Но, как правило, большая их часть посвящена исследованиям суточного, недельного, декадного или месячного стока в маловодный период, т. е. исследованиям минимального стока.

Существующие по меженному стоку работы носят локальный характер и затрагивают обычно одну из сторон проблемы: выделение меженного периода на реках данного района, отличающихся своеобразным режимом стока (З. В. Джорджио, 1950 г.; Г. Н. Петров [126]); влияние поступления поверхностных вод на величину меженного стока (например, для рек Среднего Урала — Б. И. Быдин [29]). Исследование зимнего меженного стока на реках Западной Сибири произведено А. М. Комлевым [90], а на реках Северо-Востока СССР — Б. В. Зоновым [73]; условия формирования летнего меженного стока рек лесостепной зоны ЕТС и Прибалтики рассматривались А. М. Норватовым [120].

До начала 60-х годов отсутствовали даже принципы выделения меженных периодов на гидрографах рек. Они были разработаны автором в 1962 г. в форме «Методических рекомендаций к составлению Справочника по водным ресурсам СССР», послуживших основой при сборе материалов о межени, опубликованных в серии монографий «Ресурсы поверхностных вод СССР». В них приводятся сведения о некоторых временных характеристиках меженных периодов и средней величине меженного стока для отдельных пунктов гидрометрических наблюдений на рассматриваемой в них территории, но отсутствуют какие-либо обобщения, позволившие бы осуществить расчет меженного стока для неизученных рек. Позднее автором было произведено районирование территории СССР по условиям питания рек в меженный период [40]. Однако количественных обобщений как временных, так и стоковых меженных характери-

стик не производилось. В настоящее время появилась возможность рассмотреть проблему меженного стока в более конкретном плане и дать количественное решение вопросов, интересующих науку и практику.

Аналогичное положение с расчетами меженного стока наблюдается за рубежом. Отсутствуют достаточно надежные расчетные зависимости, использование которых можно было бы рекомендовать в широком плане. Сам подход к изучению меженного стока носит иногда утилитарный характер [203, 205]. Правда, японские ученые Ишихара и Токаге [181] рассмотрели динамику меженного стока и для условий Японии предложили дифференциальные уравнения, выражающие изменение меженного стока при наличии или отсутствии осадков для водосборов с площадью до 2000 км².

Значительно большее внимание уделяется минимальному стоку. Начало его исследованиям положено в конце 20-х годов нашего века Д. И. Кочериным. Им была построена первая карта изолиний минимального стока. Наибольший вклад в развитие исследований минимального стока в 30—40-х годах внес Н. Д. Антонов [14]. Разработанные им расчетные уравнения основаны на зависимости модуля минимального стока $M_{\min}$ от модуля годового стока M_0 и площади бассейна реки F

$$M_{\min} = M_0^m \left(aF^{0,025} - \frac{f}{\sqrt{\omega + 1}} \right),$$

здесь параметрами ω и f одновременно учитывалось влияние озерности бассейна на величину минимального стока. Уравнения такого вида использовались для практических расчетов минимального месячного и суточного стока неизученных рек.

В начале 50-х годов Норватов впервые применил комплексный подход к изучению проблемы минимального стока, разработав схему выделения районов с однотипными условиями формирования минимального стока на основе изучения условий подземного питания малых рек в период минимального стока [118]. При этом он установил, что внутри относительно однородных по гидрогеологическому строению районов модуль минимального стока увеличивается пропорционально глубине эрозионного вреза реки или площади ее бассейна. Это явилось очень важным фактом для развития дальнейших исследований.

В середине 60-х годов появился ряд работ [20, 38, 39], посвященных изучению условий формирования минимального стока и его расчету. Было осуществлено строгое деление рек на малые и средние и применительно к ним разработаны два способа расчета минимального 30-дневного (месячного) стока рек: по картам изолиний стока (для средних рек), построенным Л. Н. Поповым при участии В. А. Баранова и З. И. Петерсен для зимнего и летне-осеннего сезонов почти по всей территории СССР [19, 20],

и по районным эмпирическим зависимостям, учитывающим влияние площади бассейна как интегрального показателя условий формирования минимального стока на его величину. Эти зависимости разработаны автором для зимнего и летне-осеннего сезонов [38, 39] и имеют вид

$$Q = a(F \pm c)^n,$$

где Q — минимальный 30-дневный расход воды; F — площадь бассейна реки; a , n , c — районные параметры.

В основу указанных исследований были положены данные о минимальных расходах воды для 3000 пунктов наблюдения за стоком на территории СССР. При этом наиболее полно по сравнению с другими предшествующими исследованиями был учтен такой важный фактор, как гидрогеологические условия формирования минимального стока рек. Все это позволило впервые в истории гидрологии создать нормативный документ по расчету минимального 30-дневного (месячного) и суточного стока на реках СССР [156], который был утвержден Госстроем СССР и нашел широкое применение в проектных и научно-исследовательских учреждениях Советского Союза.

Конец 60-х и начало 70-х годов характеризуются все увеличивающимся вниманием к вопросам минимального стока. Появился ряд региональных работ, в которых использовались традиционные гидрологические методы обобщения минимального 30-дневного или суточного стока [90, 117, 125]. В ГГИ продолжались работы по усовершенствованию метода расчета минимального стока, в результате которых автором для условий всей территории СССР был разработан метод переходных коэффициентов для расчета минимального 30-дневного и суточного стока различной обеспеченности малых и средних рек без использования коэффициентов изменчивости и асимметрии [41]. Этот более совершенный расчетный метод был включен в новое издание нормативного документа Госстроя СССР по расчетам основных характеристик речного стока [155].

Наряду с применением методов обобщения, базирующихся на генетической основе, в последнее время делаются попытки более широкого использования статистических приемов обобщения, например с применением метода множественной линейной корреляции [57]. При этом используются такие факторы, как модуль годового стока, площадь бассейна, средняя высота водосбора, залесенность, озерность, заболоченность водосбора. Следует отметить, что применение в качестве показателя увлажненности территории модуля годового стока M_0 несколько снижает ценность исследований в научном и практическом отношении, поскольку модуль M_0 не является стокообразующим фактором, а лишь косвенно характеризует условия формирования речного стока. К тому же минимальный сток является составляющей годового, что предопределяет высокое значение парного коэф-

фициента корреляции между этими параметрами. Практическое использование для неизученных рек расчетных уравнений, содержащих модуль M_0 в виде основного параметра, предусматривает обязательное наличие метода определения этой величины. Она может устанавливаться лишь расчетным (косвенным) путем, что, естественно, отражается на точности расчета минимального стока. При подобных исследованиях, очевидно, целесообразнее оперировать непосредственно измеряемыми характеристиками.

В изданной Гидрометслужбой СССР серии монографий «Ресурсы поверхностных вод СССР» имеются специальные главы, посвященные условиям формирования и методам расчета минимального стока. Большинство таких глав составлены по единой методике, разработанной автором («Методические рекомендации к составлению Справочника по водным ресурсам СССР», 1962) и имеют прикладное значение. Для определения нормы минимального 30-дневного стока неизученных рек приводятся карты изолиний, действие которых иногда распространяется на весь диапазон рек, но для большей части районов производится дифференциация рек по их размеру и для малых рек рекомендуется использовать переходные коэффициенты от карты изолиний или районные эмпирические зависимости, связывающие расход воды (или модуль стока) с площадью бассейна реки. Минимальные расходы воды различной обеспеченности устанавливаются или с помощью коэффициентов изменчивости и асимметрии, или по переходным коэффициентам от карт минимального стока 80 либо 90%-ной обеспеченности к расчетной обеспеченности в диапазоне 75—97%. Величина минимального суточного стока определяется по связи с 30-дневным стоком.

Следует отметить, что достаточного единообразия в форме обобщений и их полноты не достигнуто. Для ряда районов (Белоруссия, бассейн Верхнего Амура и др.) за основную характеристику принят минимальный суточный сток и все обобщения сделаны для него. Во многих районах мало внимания уделено малым рекам, недостаточно исследовано влияние основных физико-географических факторов на условия формирования минимального стока, особенно малых рек. Поэтому далеко не со всеми положениями о роли, например, площади бассейна в формировании величины минимального стока малых рек можно согласиться. Осуществление обобщений стока по относительно небольшим территориям является довольно сложной задачей, так как недостаточное число фактических данных обычно не позволяет достоверно выявить общие условия формирования стока, особенно в периферийных частях районов. Поэтому использование в подобном случае дедуктивного метода исследований, т. е. от общего к частному, является необходимой предпосылкой исследований. В этом отношении наличие таких материалов, как карты изолиний стока по всей территории СССР

или районирование территории СССР, является необходимым условием для осуществления достаточно надежных локальных проработок, призванных уточнять более общие генерализованные исследования, опираясь на вскрытые закономерности для больших территорий. Особо важное значение это имеет при построении региональных карт стока. Отсутствие или игнорирование фактических данных соседних территорий и общих (генеральных) карт стока может привести и, к сожалению, приводит к неправильному направлению изолиний не только в периферийных областях региона, но даже и в его центральной части, особенно если регион сильно вытянут в одном направлении. Столь же трудно распространить на другие территории выявленные в данном регионе зависимости или их параметры и коэффициенты, поскольку, как показывает практика исследований, в соответствии с условиями региона меняется величина вклада данного параметра в расчетное уравнение, изменяется вид и степень функциональной связи аргументов. Поэтому встречающиеся иногда в гидрологической литературе рекомендации об априорном распространении локальных расчетных уравнений с местными параметрами на обширные территории с различными физико-географическими условиями формирования речного стока не могут считаться достаточно обоснованными.

Определенное внимание вопросам минимального стока уделяют гидрологи развитых стран Европы и Америки. Наибольшее количество работ по минимальному стоку выполнено в таких странах, как США (основное число работ), Польша, Болгария, Румыния, Франция.

Гидрологи США рассматривают проблему минимального стока (также и меженного), как правило, для отдельных бассейнов или относительно крупных регионов. Их разработки осуществляются главным образом в двух направлениях: эмпирическое изучение фактического стока с получением отдельных графических зависимостей и использование статистических методов обобщения. В первом случае исследуются зависимости, учитывающие связь минимального стока с метеозементами — осадками [181, 183], дефицитом осадков [180], суммарным погодным показателем [172], а также с площадью бассейна реки [176], величиной подземного стока [172], растительностью на водосборе рек [173]; во втором — кривые истощения речного стока в маловодный период [184], кривые распределения стока с целью определения минимального стока различной обеспеченности [178].

Методы обобщения, применяемые гидрологами социалистических стран, существенно не отличаются от методов, используемых в СССР. Основным способом пространственного обобщения величин минимального стока являются карты изолиний, строящиеся либо для отдельных регионов, либо для всей страны (Болгария [192], Польша [200], Румыния [206]). Гидрологи

Польши при исследовании минимального стока большое внимание уделяют математическим методам расчета. Определение минимального стока различной обеспеченности осуществляется обычно по трем параметрам — норме стока, коэффициентам изменчивости и асимметрии.

Работы локального характера по минимальному стоку имеются также у гидрологов Франции [209], Канады [174], Италии [198], Финляндии [208], ГДР [196] и некоторых других стран. Большинство исследований по минимальному стоку, особенно выполненных в США, Франции, Италии, имеют чисто прикладное значение и ограничиваются той частной задачей, которую они были призваны решить.

Нередко в предлагаемых расчетных уравнениях используются параметры, в свою очередь требующие разработки способов их определения для неизученных территорий, что, естественно, снижает точность расчетных методов. Например, устанавливается зависимость величины минимального стока от осадков или длительности маловодного периода [141, 175].

Следует отметить увеличение математизации зарубежных гидрологических исследований в последние годы, использование относительно сложных вероятностно-статистических методов анализа, в частности методов автокорреляционного и спектрального анализа [151, 205].

Исследования сезонного стока осуществлялись главным образом в разрезе изучения внутригодового распределения стока. Это обусловило необходимость назначения определенных и постоянных сроков начала и конца сезонов для рек данного района. Изменение сроков сезонов, определяемых с точностью до календарного месяца, может происходить лишь на больших территориях и зависит от географического положения бассейна. Принятие постоянными сроков начала и конца сезонов является условной мерой, вызванной требованиями практики и желанием упростить производство расчетов. Но такое допущение осложняет осуществление научных обобщений в связи с генетической неоднородностью сезонного стока (в зависимости от водности года лимитирующий сток одной и той же реки может быть сформирован в основном либо подземными, либо поверхностными водами), которое усугубляется еще и схематичностью назначения границ сезонов (за начало — первое число месяца, за конец — последнее число). Естественнее было бы принимать границы сезонов, исходя из климатических условий и с учетом водного режима рек в данном году, поскольку, например, дата окончания половодья может изменяться от года к году в пределах 1—2 месяцев. Ясно, что при постоянных сроках сезонов в одном случае, например в летний сезон, будет включен сток половодья, а в другом — часть стока, генетически однородного с летним, не попадет в летний сезон. Попытки разработать методику определения сезонного стока с учетом вышесказанного

в настоящее время имеются, об этом будет сказано далее. Вместе с тем наличие обобщений по меженному стоку, сделанных с учетом фаз водного режима рек, в известной мере восполнит указанные недостатки.

Изучение сезонного стока в Советском Союзе началось лишь в конце 30-х — начале 40-х годов. К числу первых относится работа Г. В. Казанцева (1936 г.), посвященная сезонным колебаниям стока рек юга ЕТС. Более крупную работу осуществил Б. Д. Зайков [72]. Им были построены карты среднего сезонного стока (в процентах от годового), показывающие распределение годового стока между четырьмя сезонами, жестко закрепленными по всей территории СССР (весна: март—июнь; лето: июль—август; осень: сентябрь—ноябрь; зима: декабрь—февраль), что является, конечно, в значительной мере условным. К тому же Зайковым было использовано сравнительно небольшое количество пунктов наблюдения за стоком с преимущественно коротким периодом наблюдений. В 1943 г. Д. Л. Соколовский построил для ЕТС карты изолиний средних модулей стока за лето (июль—сентябрь), осень (октябрь—ноябрь) и зиму (декабрь—февраль и декабрь—март) [149], т. е. им были использованы несколько другие сроки сезонов.

Наибольший вклад в развитие методов расчета сезонного стока внес В. Г. Андреянов. Еще в 1948 г. им была предложена методика расчета сезонного стока в целях его регулирования, основанная на использовании кривых обеспеченности расходов воды [9]. В 1953 г. Андреяновым разработан метод расчета внутригодового распределения стока с учетом водности года [8]. Позднее им были построены карты изолиний среднего слоя сезонного стока за летне-осенний и зимний периоды для рек ЕТС. В 1960 г. результаты своих исследований он обобщил в виде монографии, посвященной вопросам внутригодового распределения речного стока [11]. Работы Андреянова нашли широкое практическое применение и, в частности, вошли в нормативный документ Госстроя СССР [155, 142], а также в форме методических указаний, излагающих методы расчета внутригодового распределения стока при строительном проектировании [13]. Большое внимание в своих работах Андреянов уделял установлению количественного соотношения стока сезонов между собой и по отношению ко всему году. В частности, им рассматривался коэффициент корреляции между стоком весны и следующей за ней межени, а также стоком летне-осеннего и зимнего сезонов. Исследовались вопросы возможных сочетаний разной водности (обеспеченности) года и сезонов на основании использования кривых условной обеспеченности сезонного стока. Андреяновым разработана схема определения сезонного стока неизученных рек, основанная на использовании параметров кривой обеспеченности годового стока (норма стока, коэффициенты изменчивости и асимметрии) и переходных коэффициентов от этих

параметров к параметрам сезонного стока. Однако при такой схеме расчета возникает необходимость иметь сведения о параметрах кривой обеспеченности годового стока для неизученных рек и величинах переходных коэффициентов, обобщения по которым не производились. Использование подобных параметров, определяемых косвенным путем, при расчетах приводит в конечном счете, как уже указывалось, к росту ошибки искомой характеристики. При этом весьма слабо изучено влияние физико-географических факторов на величину сезонного стока, особенно малых рек, что значительно осложняет практическое использование этой расчетной схемы. Поэтому применительно к расчетам сезонного стока маловодного периода для неизученных рек схема требует дальнейшего усовершенствования с целью получения наиболее рационального практического решения, имеющего достаточное научное обоснование и необходимую простоту и точность расчетов.

При региональных исследованиях сезонного стока применительно к вопросам внутригодового распределения стока рядом авторов учитывалось влияние основных физико-географических факторов. Для территории ЦЧО К. П. Воскресенский составил расчетные схемы определения внутригодового распределения стока с учетом влияния площади бассейна реки [52]. Аналогичные исследования для Украины и Крыма осуществил И. А. Железняк [69]. Влияние озерности водосбора при разработке типовых схем распределения месячного стока для рек Кольского полуострова, Карелии и Ленинградской области рассмотрел Соколовский (1946 г.). Роль подземного стока в питании рек для отдельных сезонов показал Зайков (1946 г.). Влияние средней высоты водосбора на величину сезонного стока в горных районах исследовали Л. А. Владимиров на примере Кавказа (1948 г.) и В. Л. Шульц для рек Средней Азии (1949 г.).

Вышеизложенная схема Андреянова была использована М. П. Колпачевой при расчете сезонного стока различной обеспеченности на реках ЦЧО [88]. При этом величина стока межени периода и летне-осеннего сезона устанавливалась по эмпирическим уравнениям, отражающим прямолинейную связь модульных коэффициентов годового стока с указанными характеристиками. Зимний сток определялся по связи с летним меженным стоком, имеющей вид параболы. Следовательно, полученные расчетные коэффициенты и параметры имеют лишь локальное значение.

В работах А. М. Комлева [89, 90] исследован зимний сток различной обеспеченности на реках Западной Сибири. При этом им осуществлена дифференциация рек по величине их площади бассейна. Для средних рек построены карты изолиний стока, а зимний сток малых рек определяется по переходным коэффициентам от этих карт. Подобный подход, т. е. различные способы расчета сезонного стока для малых и средних рек,

является наиболее правильным, поскольку позволяет полнее учесть различия в формировании стока рек, по-разному дренирующие подземные воды.

И. Н. Стеженской [152] для территории Западно-Сибирской низменности были построены карты времени начала и средней продолжительности весеннего, летне-осеннего и зимнего сезонов и средней величины стока за эти сезоны для малых и средних рек отдельно. Важно, что выделение сезонов производилось с учетом водного режима рек и размеров их бассейна.

Распределение сезонного стока рек по территории Белоруссии показано в работе И. М. Лившиц [107]. В основу обобщения положена средняя величина стока сезона, имеющего календарные сроки.

В справочниках «Ресурсы поверхностных вод СССР» имеются рекомендации по расчету лимитирующего стока, изложенные, однако, в аспекте внутригодового распределения стока согласно вышеизложенной схеме Андреянова. Территориальных обобщений лимитирующего стока для сезона и периода, позволивших бы определить его для неизученных рек, практически не имеется. Сезонный же сток как самостоятельная генетическая характеристика вообще не рассматривается.

Таким образом, унифицированные схемы расчета сезонного стока отсутствуют, а существующая схема определения лимитирующего стока для неизученных рек требует дальнейшего упрощения и повышения точности расчетов. Имеющиеся исследования носят региональный характер и не позволяют выявить общие закономерности формирования стока рек в период малой водности на больших территориях. Отсутствие таких обобщений создает почву для появления субъективных оценок при анализе лимитирующего стока, приводит к трудностям в определении характеристик речного стока за маловодный период при разработке конкретных проектов или схем комплексного использования вод, при составлении прогнозов, особенно фоновых характера, сезонного стока и при решении ряда других задач, возникающих при разработке систем орошения, водоснабжения, энергетики.

Практически отсутствуют работы, связанные с исследованием сезонного стока рек с учетом качества воды в водотоках в этот период. Вопросы качества воды в связи с ее количеством при оценке хозяйственного значения водотоков приобрели важное значение в широком плане лишь в последние годы в связи с возникновением проблемы загрязнения окружающей среды. Исследования стока рек за маловодный период с учетом качества воды осуществлялись только в локальном плане [35, 54]. Так, на примере рек Эстонии А. Г. Каск [81] разработал метод определения величины минимально допустимого расхода воды в реке, который необходимо оставить там в случае большого водозабора из нее, в зависимости от величины месячного

минимального стока и существующих санитарных норм. Для условий Болгарии И. Маринов [191] дал характеристику продолжительности маловодных периодов, объем стока и минерализацию речных вод за эти периоды. Известны отдельные работы гидрологов США [171], Польши [199], Чехословакии [211], в которых осуществлен одновременный анализ количества и соответствующего ему качества воды.

Явления отсутствия стока на реках (пересыхание и перемерзание), представляя огромный научный и практический интерес, изучаются еще слабо. Лишь в работах Норватова и автора эти явления рассматриваются в масштабах всего Советского Союза, но в основном в качественной форме. Осуществлена типизация рек по наличию явлений отсутствия стока и дан способ определения наибольшей площади с постоянным отсутствием стока в продолжение 30 дней на реках рассматриваемого района [40]. Однако нет расчетных схем и практических обобщений, позволяющих определить вероятность и продолжительность отсутствия стока, а также количественно учесть влияние факторов, определяющих явления пересыхания и перемерзания рек.

В «Ресурсах поверхностных вод СССР» для ряда областей и районов приводятся сведения только по отдельным гидрометрическим постам на реках с наличием явлений пересыхания или перемерзания, но отсутствуют какие-либо обобщения, позволившие бы определить время появления, продолжительность и вероятность отсутствия стока для неизученных рек данного района.

Вопросы отсутствия стока в работах иностранных авторов затрагиваются главным образом в локальном плане, в форме констатации существующего факта, без должного анализа причин явления. Например, в работе [207] рассматривается пересыхание рек в бассейне р. Матра, выделяются районы с постоянными и временными водотоками и приводится их физико-географическая характеристика.

Таким образом, изучение условий формирования и расчета стока рек в маловодный период является обширной комплексной проблемой, затрагивающей различные стороны гидрологических, а также гидрогеологических и гидрохимических исследований. Для количественной оценки стока рек за маловодный период существует несколько характеристик: минимальные величины стока (суточный, месячный), меженный сток и сток лимитирующего и маловодного сезонов. Степень изученности этих характеристик различна, а в целом недостаточна. Отсутствуют рекомендации по расчету меженного стока, лишь частично затронут исследованиями лимитирующий сток, и только по минимальному стоку существуют расчетные методы, доведенные до практического использования и обеспеченные необходимым прикладным материалом. Такое положение в известной мере объясняется тем, что длительное время основное внимание в области расчетов

стока гидрологи обращали на максимальный и годовой сток, так как область применения характеристик речного стока за маловодный период была значительно уже, чем, например, максимального стока. Основными объектами водохозяйственного использования чаще всего являлись достаточно большие реки, обеспечивающие промышленные и хозяйственные потребности в воде в маловодный период за счет естественного притока, не стояла остро и проблема качества воды. Помимо этого, развитие исследований в известной мере сдерживалось недостаточной гидрогеологической и гидрохимической изученностью отдельных районов СССР, затруднявшей построение обоснованных расчетных схем. Однако в настоящее время назрела необходимость иметь достаточно надежные рекомендации по расчету всех основных характеристик маловодного периода, как временных, так и количественных.

Появление ряда крупных обобщающих работ как в области расчетов стока — поверхностного [6, 11, 53, 75, 140] и подземного [127, 129], так и по гидрохимии [3, 50] позволяет с большей уверенностью и обоснованием подойти к решению вопросов расчета стока рек за маловодный период. Этому же способствует накопление обширного гидрометрического материала о стоке рек СССР, особенно по Азиатской территории как менее исследованной в гидрологическом отношении, а также опубликование серии справочников «Ресурсы поверхностных вод СССР».

При осуществлении исследований, изложенных в данной монографии, было изучено значительное количество литературы, имеющей то или иное отношение к рассматриваемым вопросам (более 350 работ, включая около 100 работ иностранных авторов). В связи с ограниченным объемом книги не представляется возможным дать подробный анализ даже тех работ, которые непосредственно касаются изучаемой проблемы. Поэтому в соответствующих разделах работы будет уделено определенное внимание наиболее интересным исследованиям по рассматриваемым вопросам. В список литературы включены лишь те работы, которые имеют прямое отношение к излагаемым вопросам.

Анализируя имеющуюся литературу, можно отметить два направления, получившие наибольшее развитие при обобщении данных о низком стоке рек в целях разработки расчетных методов: показ пространственного распределения искомых характеристик путем построения карт изолиний стока и построение эмпирических зависимостей основных характеристик изучаемого стока от главных стокоформирующих факторов с использованием статистических методов обобщения и генетического анализа. При этом основные усилия исследователей направлялись на установление количественных закономерностей изменения величины той или иной характеристики низкого стока. Время же их появления и продолжительность стояния в широких масштабах практически не рассматривались, за исключением нескольких

региональных работ, о чем было сказано выше. Следовательно, временные характеристики маловодного периода еще менее исследованы, чем количественные.

Весьма слабо, в основном в декларативной форме, освещались вопросы влияния физико-географических факторов на характер формирования и величину различных параметров низкого стока рек. Однако ясно, что без четкого представления о роли того или иного физико-географического фактора в процессах формирования величины низкого стока и распределения ее во времени и по территории невозможно осуществить достаточно качественный анализ и разработать пригодную для практического использования расчетную схему. При этом необходимо учитывать, что расчетные методы должны быть достаточно простыми в практическом отношении и обеспечивать необходимую точность расчетов в подавляющем большинстве случаев.

Глава 2

ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА РЕК В МАЛОВОДНЫЙ ПЕРИОД

2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ФОРМИРУЮЩИХ НИЗКИЙ СТОК РЕК

Весь комплекс факторов, в той или иной мере влияющих на режим и величину низкого стока в зимний и летне-осенний сезоны, разделяется на климатические факторы и факторы подстилающей поверхности. Помимо этого, в настоящее время все большее значение приобретает хозяйственная деятельность человека на водосборе и в русле реки, в отдельных случаях кардинальным образом изменяющая водный режим. Однако роль и значение указанных групп факторов в формировании низкого стока могут быть весьма различны. Поэтому целесообразно дополнительно сгруппировать их с учетом генетического влияния и выделить, во-первых, факторы, непосредственно определяющие величину низкого стока, точнее создающие речной сток в маловодный период (стокообразующие факторы), во-вторых факторы, влияющие на режим и величину низкого стока путем сокращения или перераспределения во времени и по территории стокообразующих осадков или подземных вод (косвенные факторы), и, в-третьих, факторы, определенным образом связанные с величиной расхода воды и интегрально отражающие влияние стокообразующих и косвенных факторов (условные факторы).

Стокообразующие факторы составляют самую малочисленную, но наиболее важную группу. К ним относятся осадки (климатический фактор) и подземные воды (гидрогеологический фактор). Нет необходимости останавливаться на роли осадков в жизни рек, поскольку они являются основной составляющей круговорота воды в природе. Следует лишь отметить, что их влияние сказывается и на подземном стоке. Последний является весьма важной характеристикой по отношению к низкому стоку рек, формируя его величину в период отсутствия осадков. Стокообразующие факторы в своем распределении по территории подчиняются закону географической зональности.

Косвенные факторы непосредственно не участвуют в образовании низкого стока рек, так как не создают приходящей части воды, но участвуют в перераспределении и изменении его величины во времени и пространстве. К этой группе относятся испарение, температура воздуха и почвы, дефицит влажности

воздуха, и факторы подстилающей поверхности — рельеф водосбора, озера, болота, лес и гидрогеологическое строение бассейна речной системы (инфильтрационная и водоудерживающая способность почво-грунтов, мощность и количество водоносных горизонтов, питающих реки, характер их гидравлической связи с рекой, литологический состав водовмещающих пород). Факторы подстилающей поверхности имеют обычно местное значение и относятся к разряду азональных факторов. К группе азональных факторов можно отнести и хозяйственную деятельность человека.

К группе условных факторов, используемых при анализе характера формирования низкого стока и разработке методов его расчета, относятся морфометрические характеристики: площадь бассейна (водосбора), средняя высота водосбора и его уклон, глубина эрозионного вреза русла, густота речной сети — и стоковые: величина годового стока рек, годовой подземный сток в реки, коэффициент естественной зарегулированности стока и др. Факторы этой группы в известной мере являются интегральными показателями условий формирования низкого стока и водности территории. При этом в каждой подгруппе условных факторов, как правило, отмечается наличие коррелятивной связи между ними, так что одна из характеристик в определенном отношении может отражать влияние других.

Стокообразующие и косвенные факторы являются основными для процесса формирования низкого стока, поскольку определяют его величину, и должны в первую очередь учитываться при анализе этого процесса и разработке способов расчета низкого стока. Однако их количественный учет возможен далеко не всегда, и в этом случае на первое место при создании расчетных построений выступают условные факторы, которые можно определить количественно значительно проще и точнее.

Надо сказать, что связь различных характеристик низкого стока с годовым или другими стоковыми характеристиками не может полностью отражать условий формирования низкого стока, поскольку годовой сток не отражает дифференцированно стокоформирующих факторов. При этом сами исходные параметры (годовой сток, коэффициент естественной зарегулированности и др.) при использовании их для расчета низкого стока неизученных рек приходится определять не прямыми измерениями, а косвенным путем (по картам и зависимостям). Это отражается на точности определения исследуемой величины низкого стока, так как ошибка последней складывается из ошибки, возникающей при определении этого условного фактора, и ошибки, зависящей от тесноты их связи. Поэтому представляется, что в расчетных схемах по определению низкого стока неизученных рек стоковые параметры (или факторы) применять нецелесообразно.

2.2. СТОКООБРАЗУЮЩИЕ ФАКТОРЫ

Осадки. Низкий сток наблюдается в периоды с ограниченным поступлением поверхностных вод в русло рек или их полным отсутствием. Однако значение осадков в формировании низкого стока от этого не становится меньше, поскольку подземные воды, питающие реки в этот период, в свою очередь сформированы осадками. В зависимости от физико-географиче-

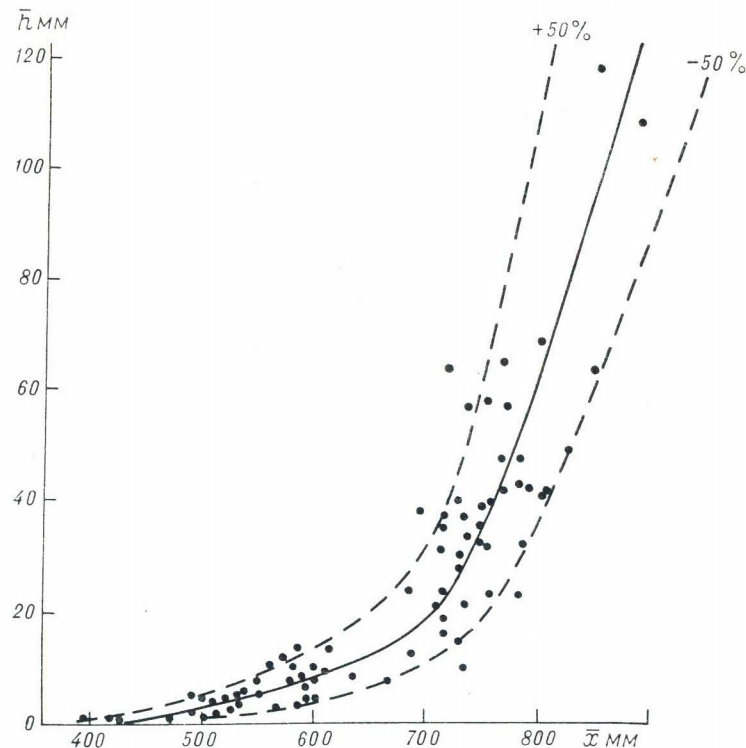


Рис. 2. Связь стока лимитирующего сезона со среднегодовыми осадками для ЕТС.

ских условий (климатическая зона, геологическое и гидрогеологическое строение территории и пр.) это могут быть осадки как данного или предшествующего месяца, так и предшествующего сезона, года или большего периода.

Для выявления роли осадков в формировании низкого стока рек и определения характера этого влияния автором построены графики связи нормы годовых осадков, средних по водосбору, с величиной среднемноголетнего слоя стока за лимитирующий и маловодный сезоны (рис. 2 и 3) для рек ЕТС с площадью бассейна 2000—4000 км². Такие реки имеют относительно од-

нообразные по бассейну физико-географические условия и не испытывают значительного влияния его местных особенностей. Данные по озерным, карстовым и другим зарегулированным рекам не учитывались. Обширность территории, использованной для исследований, позволила рассмотреть указанную зависи-

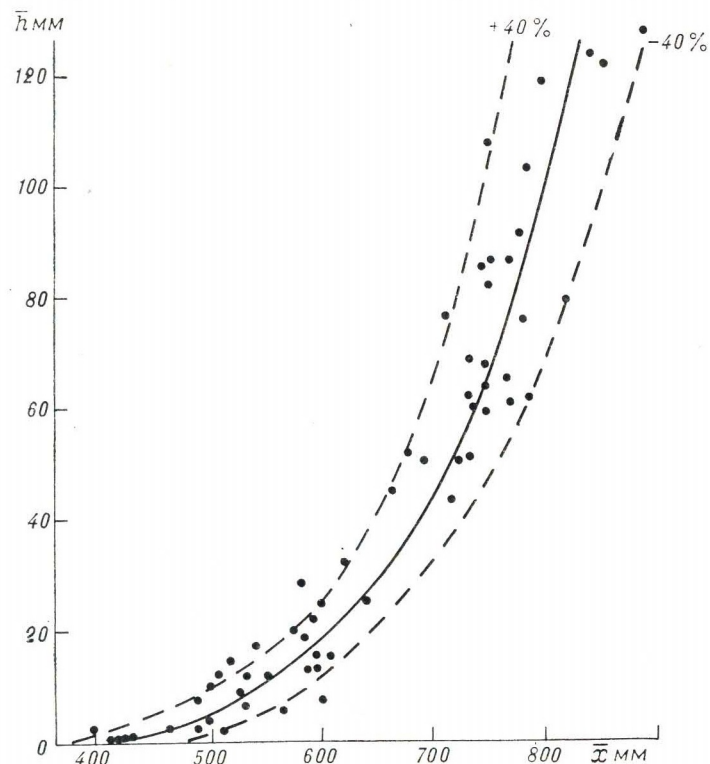


Рис. 3. Связь стока маловодного сезона со среднегодовыми осадками для ЕТС.

мость в широком диапазоне осадков (от 450 до 900 мм) и стока (от 0 до 140 мм).

Полученные зависимости не являются расчетными в связи со значительным рассеянием точек, но хорошо показывают характер влияния изменения количества осадков по территории на изменение величины сезонного стока. Причем чем меньшее участие в формировании рассматриваемой стоковой характеристики принимают поверхностные воды, например в лимитирующий сезон, тем больше рассеяние точек на графиках связи. На рис. 3 показана связь стока маловодного сезона с годовыми осадками, имеющая более тесный характер, чем для лимитирующего сезона. Это объясняется тем, что в формировании стока

маловодного сезона осадки принимают непосредственное и значительно большее участие, чем в формировании стока лимитирующего сезона. Наличие ясно выраженной зависимости характеристик низкого стока от осадков, которые являются показателями зональности, свидетельствует о связи распределения низкого стока по территории с географической зональностью.

Но учет только количества выпавших осадков не может выявить действительной зависимости стока от осадков, поскольку необходимо учесть количество осадков, испарившихся, просочившихся в почвенно-грунтовую толщу и не попавших в реку за рассматриваемый отрезок времени (так называемые потери). Поэтому ожидать тесной связи низкого стока с осадками даже в летне-осенний сезон не приходится.

Характер влияния осадков на величину стока рек в маловодный период определяется видом сезона (зимний или летне-осенний), строением поверхности водосбора, типом почво-грунтов и литологическим составом слагающих бассейн пород.

Выпадающие в летне-осенний сезон дожди лишь частично участвуют в пополнении подземных вод. Малые уклоны местности, наличие разного рода понижений на водосборе, растительность, легко проницаемые почво-грунты — все это обуславливает хорошее просачивание осадков в глубокие водоносные горизонты или аккумуляирование их в верхних слоях бассейна. При этом большое значение имеет интенсивность дождей и водопоглощающая способность почв (инфильтрационная способность).

Выпавшие в зимний сезон в виде снега осадки практически не участвуют в формировании речного стока на большей части территории СССР. Лишь в западных и юго-юго-западных районах ЕТС в результате оттепелей осадки могут принимать непосредственное участие в формировании речного стока. Весной при снеготаянии выпавшие за зиму осадки проникают под землю и участвуют в питании рек в течение всего лета, а иногда и осени и последующей за ней зимы (особенно в многоводные годы). Поэтому существует принципиальная связь сезонного стока с величиной годовых осадков, как это показано на рис. 2 и 3. Правда, для территорий с постоянно суровыми зимами (АТС) связь часто отсутствует. Так, для Западной Сибири в 65—90% случаев коэффициент корреляции связи зимнего стока (сезонного и минимального) с суммой зимних осадков находится в пределах 0,30—0,50 [89].

Влияние атмосферных осадков на сезонный сток различно в зонах избыточного и недостаточного увлажнения вследствие существенного отличия в величине испарения. Сток в летне-осенний сезон на реках лесной зоны в среднем в 7—9 раз меньше годовых осадков, а в зоне недостаточного увлажнения, где величина испарения наибольшая, в этот сезон указанная разница увеличивается до 50—100 раз. Поэтому линии связи

на рис. 2 и 3 имеют резкое искривление в нижней части, соответствующее зоне недостаточного увлажнения.

Таким образом, наблюдается общее соответствие между распределением по территории количества выпадающих осадков и величины стока маловодного периода. В районах с большим количеством осадков, как правило, отмечается и большая величина низкого стока (минимального, сезонного). Величина минимального стока, например, на реках ЕТС уменьшается с севера — северо-запада на юг — юго-восток, что совпадает с характером убывания осадков.

В процессе трансформации осадков в речной сток большое значение имеют локальные особенности водосборов, с наибольшей силой проявляющиеся для малых рек. В то же время для больших водосборов характерно смешение и нивелирование особенностей формирования стока отдельных районов и областей.

Подземные воды. В период длительного отсутствия дождей питание рек осуществляется за счет подземных вод, заключенных в водоносных горизонтах, которые дренируются реками. Мощность, количество и величина водоотдачи этих горизонтов определяют объем воды, поступающей в речную сеть и формирующей сток в русле. Запасы подземных вод в том или ином речном бассейне зависят как от степени общего увлажнения территории, определяющейся климатической зоной, так и от геологического строения и гидрогеологических условий бассейна.

О достаточно тесной связи низкого стока рек, особенно минимального, с подземным стоком свидетельствуют, например, графики связи нормы минимального летнего стока с нормой подземного стока для рек верхней части бассейна р. Немана (рис. 4) [67]. Следует отметить, что подобные зависимости являются наиболее тесными для районов с однообразными гидрогеологическими условиями.

Чтобы раскрыть характер влияния подземных вод на величину и режим речного стока в маловодный период, необходимо иметь ясное представление о видах подземных вод, питающих реки. Это позволяют сделать работы Ф. П. Саваренского, Б. И. Куделина, Б. Л. Личкова, Ф. А. Макаренко, О. К. Ланге и др.

Распределение подземных вод по площади и глубине речного бассейна может быть весьма разнообразным и довольно сложным. В основном реки получают подземное питание из зоны интенсивного водообмена. Согласно гидрогеологической классификации подземных вод [97], подземное питание разделяется на два основных класса: грунтовое и артезианское. Водоносные горизонты, содержащие грунтовые или артезианские воды, отличаются друг от друга по условиям залегания, распространения, питанию, режиму, характеру напора и взаимосвязи с поверхностными водами. Перечисленные различия определяют

условия разгрузки водоносных горизонтов и закономерности режима подземного стока в реки.

Грунтовое питание разделяется на сезонное и постоянное. Режим сезонных вод близок к режиму поверхностных: подъем и спад уровней этих вод в целом совпадает с появлением пиков стока на реках, но отстает во времени. Роль сезонного питания в формировании низкого стока рек может быть весьма различной — от незначительной до преобладающей. Она определяется главным образом климатическими и гидрогеологическими условиями. Воды верховодки формируются в результате снеготая-

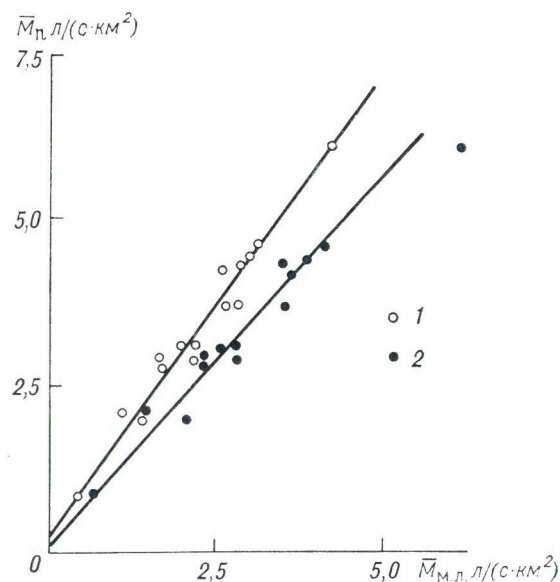


Рис. 4. Связь нормы подземного стока $M_{\text{п}}$ с нормой минимального летне-осеннего стока $M_{\text{м.л}}$ (бассейн р. Немана).

1 — суточный сток, 2 — месячный сток.

ния весной и выпадения дождей в летне-осенний период. Однако в южных районах они могут образовываться и зимой при длительных оттепелях и отсутствии сплошного промерзания почв. В северных и северо-восточных районах СССР, особенно в зоне развития многолетней мерзлоты, сезонное питание приобретает очень большое значение в теплый период года. В результате оттаивания верхнего слоя многолетнемерзлых пород, выпадения дождей и сравнительно небольшого испарения почвенная толща становится насыщенной водой и речные системы получают хорошее питание за счет вод верховодки. Поэтому, а также из-за воздействия и других физико-географических факторов, о которых будет сказано далее, в летний сезон минимальный сток зна-

чительно выше, чем в зимний, когда отсутствует питание рек водами верховодки. Например, в средней части бассейна р. Печоры норма летнего минимального месячного стока составляет в основном $4 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$, а соответствующего зимнего $1,0—1,5 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$; при этом величина постоянного подземного стока в этом районе находится в пределах $1,0—2,0 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$. С другой стороны, в бассейне Нижнего Днепра сезонные воды развиты очень слабо, в основном лишь в многоводные годы, и питание рек осуществляется из глубоких водоносных горизонтов, поэтому разница между величиной нормы летнего и зимнего минимального месячного стока небольшая и их величина в оба сезона колеблется около $0,25—0,50 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$.

Грунтовые воды, залегающие ниже почвенной толщи, гидравлически с ней не связанные и дренируемые речной сетью, обеспечивают постоянное грунтовое питание рек. Эти воды обычно являются безнапорными или имеют слабый местный напор. Они представляют наибольший интерес при гидрологических исследованиях, поскольку непосредственно связаны с водами поверхностных водотоков и водоемов, определяя в маловодные периоды их режим и величину стока. Постоянное грунтовое питание рек может осуществляться из одного или нескольких водоносных горизонтов. При этом верхний водоносный горизонт, как правило, наиболее тесно связан с дневной поверхностью, поэтому его питание в значительной мере определяется атмосферными осадками, влияющими на динамику подземного стока в реки. Режим грунтовых вод в более глубоких водоносных горизонтах устойчивее, поскольку их питание происходит главным образом за счет глубокого просачивания воды. Эти воды довольно слабо реагируют на сезонные изменения климата.

Артезианское питание осуществляется напорными водами, залегающими обычно ниже грунтовых в водоносных пластах, заключенных между водонепроницаемыми слоями пород или в отдельных трещинах земной коры и находящимися под постоянным напором. Напорные воды выклиниваются, как правило, на отдельных небольших участках в виде родников с большим дебитом, поэтому на отдельных участках реки артезианское питание может иметь большое значение. Однако в целом величина напорного питания обычно составляет небольшую часть в меженном стоке. Так, в бассейне р. Тосны, имеющем благоприятные условия для разгрузки напорных вод, величина питания за счет этих вод не превышает 30% всего меженного стока [87]. Чаше же она составляет всего 10—20% расхода реки в межень.

К особым видам относится питание карстовыми и наледными водами. Подземные воды, заключенные в карстующихся породах, имеют весьма разнообразный режим, определяющийся степенью связи этих вод с поверхностью, водопоглотительной способностью и величиной водоотдачи пород, масштабами развития

подземных пустот и трещин, определяющих аккумулирующую способность пород.

Наибольшее значение карстовые воды имеют в период низкого стока в маловодные годы. Так, в бассейне р. Валгейги два крупных карстовых источника в период минимального стока обеспечивают такую же величину питания реки, как весь остальной бассейн площадью 400 км² [80]. В отдельные годы доля карстовых вод может быть еще большей. Например, в меженный период 1959 г. в стоке р. Сельгейги у п. Аркна (площадь бассейна 364 км²) суммарный сток карстовых источников был в три раза больше минимального стока с незакарстованной части водосбора реки.

Однако нередко реки не только не получают дополнительного питания за счет карстовых вод, но и отдают свои воды, т. е. происходит отрицательное подземное питание, вплоть до полного исчезновения стока воды в меженный период. Подобные явления наблюдаются на Южном Урале в бассейне р. Уфы (реки Вижай, Яман-Елга, Каменка), в бассейне р. Северной Двины (реки Сухая Шелекса, Теща), в верхней части бассейна р. Ангары и др.

Вышеуказанный характер влияния карстовых вод на сток рек в маловодный период свойствен лишь областям интенсивного развития карста. При слабом развитии карстовых явлений в бассейне реки заметного влияния карстовых вод на низкий сток не наблюдается. Поэтому несмотря на обширные территории, занятые карстующимися породами (в европейской части СССР они занимают 25% всей территории [78]), существенное влияние карстовые воды оказывают на сток рек, при этом в основном малых, лишь в отдельных районах.

В зоне развития многолетнемерзлых пород в зимний сезон часть подземного стока уходит на образование наледей, которые в теплый сезон в результате таяния дают добавочное питание рекам. Происходит трансформация во времени подземного стока в реки. В зимний сезон в бассейнах с наличием наледей на образование последних расходуется от 50 до 88% речного стока [147], а на перемерзающих реках весь речной сток уходит на образование наледей. Последние способствуют также переводу части русловых вод в подрусловые. В летне-осенний сезон влияние наледного стока на речной проявляется в значительно меньшей мере, поскольку основной сток с наледей происходит в весенний период. Доля наледного стока в речном в этот сезон не превышает 15%, уменьшаясь до 1—3% [147] к осени, когда наблюдается минимальный речной сток. В этот период однолетние наледы уже прекращают свое существование, а многолетние срабатывают основную часть своих запасов воды.

В районах с интенсивными наледообразовательными процессами может наблюдаться весьма пестрая картина в распре-

делении речного стока по территории, определяющаяся фактом отсутствия или наличия наледей и их мощностью. Наличие наледей в русле реки приводит в резкому изменению величины стока по длине реки — к увеличению его ниже местоположения наледи в теплый сезон и, наоборот, к уменьшению в зимний.

Определенное значение для питания рек имеет характер выклинивания подземных вод на дневную поверхность, который зависит от условий их залегания и распространения. По условиям залегания все подземные воды подразделяются на пластовые и трещинно-жильные. Пластовые воды разгружаются обычно на больших пространствах (по всему периметру русла, дренирующего данный водоносный горизонт, и на протяжении дренируемого пласта), хотя в отдельных случаях могут иметь место и концентрированные выходы подземных вод. Интенсивность разгрузки, как правило, невысокая. Такие формы питания свойственны большинству равнинных рек. Трещинно-жильные воды образуются в массивных изверженных породах, в сильно метаморфизованных осадочных породах, где накопление и сток воды происходит лишь по трещинам, а также в закарстованных породах при слабом развитии пластовой слоистости. Эти воды выклиниваются на земную поверхность в форме родников, т. е. имеют сосредоточенные выходы. Они имеют основное значение для горных рек, а также для малых и частично средних равнинных рек. В карстовых районах сосредоточенные (концентрированные) выходы подземных вод имеют преимущественное значение.

Режим подземного питания рек зависит от характера гидравлической связи водоносных горизонтов с рекой, т. е. от положения водоносных горизонтов и их мест разгрузки по отношению к врезу речного русла. В этом смысле выделяется несколько видов связи [97, 129]:

1. Водоносные горизонты гидравлически не связаны с рекой, т. е. подземные воды выклиниваются выше русла реки и режим питания реки этими водами определяется лишь режимом подземного стока самого водоносного пласта.

2. Водоносные горизонты имеют постоянную гидравлическую связь с рекой, вследствие чего наблюдается береговое регулирование речного стока, имеющее важное значение при прохождении паводков в маловодный период. В этом случае режим подземного питания рек зависит не только от режима подземных вод, но и от режима речного стока.

3. Водоносные горизонты периодически имеют гидравлическую связь с рекой, т. е. в период паводков может наблюдаться береговое регулирование стока, а в меженный период, при отсутствии паводков, питание рек происходит в основном (в зависимости от величины падения уровня) за счет подземных вод, выклинивающихся выше уреза воды, находящейся в русле. Таким образом, режим питания рек является смешанным

и определяется преимущественным характером гидравлической связи.

4. На отдельных участках рек может наблюдаться отток речных вод из русла, идущих на питание подземных вод, находящихся в водоносном пласте, расположенном ниже тальвега русла, или в случае обратного уклона водоносного пласта («отрицательное подземное питание», по Куделину). Подобные условия наблюдаются в степных и особенно в полупустынных зонах, в карстовых районах, где под землю может уходить даже весь речной сток, а также в районах, где ведутся обширные водопонижительные работы при разработке крупных месторождений открытым способом.

Таким образом, режим подземных вод, принимающих участие в подземном питании рек, в определенной мере определяется климатическими условиями и местными физико-географическими факторами, в первую очередь геологическими и гидрогеологическими условиями, а также хозяйственной деятельностью человека. Это положение является весьма важным при исследовании условий формирования не только подземных вод, но и речного стока в период, когда в его формировании в значительной мере участвуют подземные воды.

Обобщение различных типов режима грунтовых вод на генетической основе для территории СССР произведено А. А. Коноплянцевым и В. С. Ковалевским [92]. Они выделили три типа режима грунтовых вод, имеющих различные условия питания: кратковременное, преимущественно летнее питание (мерзлотный тип); сезонное, преимущественно весеннее и осеннее питание; круглогодичное, преимущественно зимнее питание.

Характер связи речных и подземных вод в период низкого стока обуславливает в значительной мере режим и величину речного стока, особенно в маловодный период. Эта связь может происходить в двух направлениях — речные системы получают питание от подземных вод и русловые воды уходят на пополнение подземных вод. Первый случай наиболее общий и наблюдается как при отсутствии гидравлической связи речных и подземных вод, так и при ее наличии. Потери речных вод на питание подземных вод свойственны лишь отдельным участкам рек степной и полупустынной зон, а также отмечаются при особом геологическом строении территории (карст, обратный уклон водоносных пластов). В этих зонах речной сток обычно формируется в возвышенных или горных районах, имеющих наибольшее увлажнение, и по мере снижения высоты местности питание рек прекращается, а русловые воды начинают фильтроваться под землю вплоть до полного их исчезновения в русле. Такая картина наблюдается на реках и временных водотоках Южного Урала, Тургая, Казахстана, Кулундинской степи, предгорных районов Средней Азии, Приазовья и других мест.

При анализе условий формирования низкого стока и разработке расчетных методов его определения необходимо в полной мере использовать сведения о характере связи речных и подземных вод, поскольку в первом случае должно наблюдаться закономерное возрастание речного стока с увеличением размеров реки (площади бассейна, глубины эрозионного вреза русла). При этом интенсивность возрастания определяется местными гидрологическими или общими зональными условиями питания рек. Во втором случае должно наблюдаться снижение величины удельной водности реки, хотя расход воды и может увеличиваться с ростом размеров бассейна реки. Несоответствие между фактическими величинами стока реки и сведениями о геологическом и гидрогеологическом строении территории, т. е. увеличение речного стока при отсутствии сведений гидрогеологического характера, подтверждающих это, свидетельствует либо о недостаточности гидрогеологических данных, либо о малой точности измерений речного стока, либо о существенном влиянии хозяйственной деятельности человека (сбросы промышленных, бытовых, шахтных и прочих вод). В настоящее время последнее может быть наиболее вероятным.

Основная цель определения влияния того или иного фактора, в данном случае подземных вод, на формирование величины речного стока заключается в выявлении его роли в указанном процессе и возможности использования этого фактора в качестве расчетной характеристики при разработке метода определения стока неизученных рек. С этой последней точки зрения подземные воды являются недостаточно удобной характеристикой, поскольку для неисследованных речных бассейнов и даже для изученных в гидрологическом отношении величина подземного стока, как правило, непосредственно не измеряется, а определяется косвенным путем. Так, широко используемый гидролого-гидрогеологический метод оценки подземного стока основан на качественной гидрогеологической характеристике закономерностей подземного стока в реку при одновременной его количественной оценке по гидрологическим данным, т. е. по измерениям речного стока.

Таким образом, при расчетах характеристик низкого стока рек, не имеющих данных наблюдения за стоком, необходимо в полной мере осуществлять качественный учет режима и величины подземных вод, участвующих в питании этих рек.

2.3. КОСВЕННЫЕ ФАКТОРЫ

Влияние косвенных факторов прослеживается на всей территории СССР и может быть столь значительным, что все присущие данным климатическим условиям особенности режима стока реки теряются полностью, особенно для малых рек. Из многообразия факторов этой группы основное значение применительно

к исследованиям низкого стока рек имеют гидрогеологические условия.

Гидрогеологические условия бассейна непосредственно связаны с его геологическим строением, определяющим распространение водовмещающих пород. Условия залегания подземных вод зависят от литологического состава и сложения горных пород. Почвенный покров оказывает главное влияние на процессы перевода выпадающих атмосферных осадков в подземные воды. Таким образом, почво-грунты являются подземными аккумуляторами влаги. Они задерживают воду в периоды повышенной водности и затем отдают ее в период маловодья.

Тип почв, их механический состав в значительной мере определяют водопоглотительную способность водосбора. Чем больше порозность почв, тем значительнее их водопроницаемость и водоотдача, но меньше водоудерживающая способность. Поэтому режим стока рек, бассейны которых сложены с поверхности песчаными или супесчаными почвами, заметно иной, чем в подобных бассейнах, сложенных суглинками или глинистыми почво-грунтами. Приведенные в табл. 1 (по данным работы [134]) величины показывают, что водоотдача песчаных почво-грунтов почти в пять раз превышает водоотдачу суглинистых. При этом лесные почвы имеют большую водопроницаемость и водоотдачу, чем полевые, вследствие наличия значительного числа пустот и ходов (большая порозность и скважность почвы). Меженные и минимальные расходы воды рек, бассейны которых сложены песчаными или супесчаными почво-грунтами, значительно больше, чем у рек, бассейны которых сложены суглинистыми или глинистыми почво-грунтами. Об этом наглядно свидетельствуют данные табл. 2. Наибольшее значение характер почво-грунтов имеет для малых рек, получающих питание из верхних водоносных горизонтов.

Поглощающая способность пород, слагающих бассейн, определяет величину инфильтрации атмосферных осадков. Естественно, что чем она больше, тем больше просочится под землю

Таблица 1

Водно-физические свойства почво-грунтов различного типа

Разности почв по механическому составу	Место наблюдения	Водопроницаемость, мм/мин	Водоудерживающая способность, % полной влагоемкости	Водоотдача, % полной влагоемкости
Суглинистые	Поле	0,19	88,0	12,0
	Лес	0,24	86,5	13,5
Супесчаные	Поле	0,23	66,5	33,5
	Лес	0,51	52,0	48,0
Песчаные	Поле	0,99	42,7	57,3
	Лес	2,93	38,3	61,7

Таблица 2

Сравнение величин минимального стока для речных бассейнов, сложенных различными почво-грунтами

№ пары	Главная река	Река — пункт	Площадь бассейна, км ²	Преобладающие почво-грунты	Залесенность, %	Водоотдача, %	Озерность, %	Сезон	Норма минимального стока, л/(с·км ²)	
									месячный	суточный
1	Западная Двина	Улла — с. Промыслы	3330	Суглинистые, глинистые	33	17	3	Летний Зимний	2,31 2,55	1,54 1,92
									3,98 3,83	3,07 2,88
2	Неман	руч. без названия — с. Кольсберг Удранка — с. Удранка	6,0 183	Суглинистые Песчаные, супесчаные	48 51	0 3	0	Летний Зимний Летний Зимний	0,68 0,77 4,12 4,58	0,40 0,55 3,12 3,32
									0,74 0,59	0,26 0,36
3	Волга (верховье)	Осуга — д. Коротцево	1230	Суглинистые	36	0	1	Летний Зимний	2,16 2,07	1,64 1,50
									0,62 0,60	0,32 0,48
4	Волга	Тьма — с. Новинки Вая — д. Большая Пристань Линда — с. Васильково	1800 601 1010	Песчаные, супесчаные Суглинистые Песчаные, супесчаные	34 80 70	2 1 0	1	Летний Зимний Летний Зимний	1,85 1,72	1,48 1,53

осадков, тем значительнее будет пополнение подземных вод, питающих реки. Поэтому наблюдается вполне определенная зависимость низкого стока от величины годовой инфильтрации. Пример такой зависимости показан на рис. 5. При построении зависимостей использовались те же данные, что и при исследовании связи низкого стока с осадками (см. рис. 2). Рассеяние точек на рис. 5 значительное, поскольку величина инфильтрации зависит от целого ряда факторов, а речной сток в рассматриваемых условиях определяется не только величиной инфильтрации, но, в частности, и водоудерживающей способностью почво-грунтов, степенью их водоотдачи, характером связи водоносных горизонтов с рекой и пр. К тому же, основное значение инфильтрация имеет в теплый сезон. Зимой для большей части территории СССР в связи с глубоким промерзанием почво-грунтов ее роль значительно снижается и влияние на речной сток сказывается через увлажненность теплого периода. Поэтому на рис. 5 а зависимость лимитирующего стока, наблюдающегося в основном в зимний сезон, от инфильтрации весьма слабо выражена.

Наиболее благоприятные условия для аккумуляции подземных вод и питания рек в период низкого стока имеются в бассейнах, сложенных рыхлыми и пористыми или трещиноватыми породами (песчаники, известняки). При смене этих пород более сцементированными или кристаллическими слаботрещиноватыми породами наблюдается резкое снижение величины подземного стока в реки. Но не один механический состав пород определяет величину подземного стока, большое значение имеет степень обводненности этих пород. Реки, бассейны которых сложены песками, могут иметь значительно меньшую величину стока, чем реки, протекающие в плотных, но пористых породах (известняки). Например, в верхней части бассейна р. Северского Донца русла некоторых его притоков (реки Корень, Короча и др.) вначале врезаны лишь в слабо обводненные пески палеогена, но затем они углубляются в породы мергельно-меловой толщи, значительно более обводненной, и в результате величина подземного стока в реки повышается в 2—2,5 раза. С другой стороны, протекающая в том же районе р. Ворскла (бассейн р. Днепра) в верховьях получает питание тоже из водоносных горизонтов палеогена, но затем она начинает дренировать слабо обводненные меловые породы кампан-маастриха. В результате величина подземного стока в реку снижается почти до нуля.

Плотные глинистые или монолитные кристаллические породы, залегающие вблизи поверхности, уменьшают регулируемую емкость бассейна, приводя к снижению величины подземного стока в реки, что в свою очередь обуславливает малую величину низкого стока. Так, Приильменская низменность (Ильменская впадина) сложена в основном глинистыми породами. Поэтому мощность зоны пресных вод в этом районе невелика (в 4—5 раз меньше, чем в прилегающих с юга районах) и величина

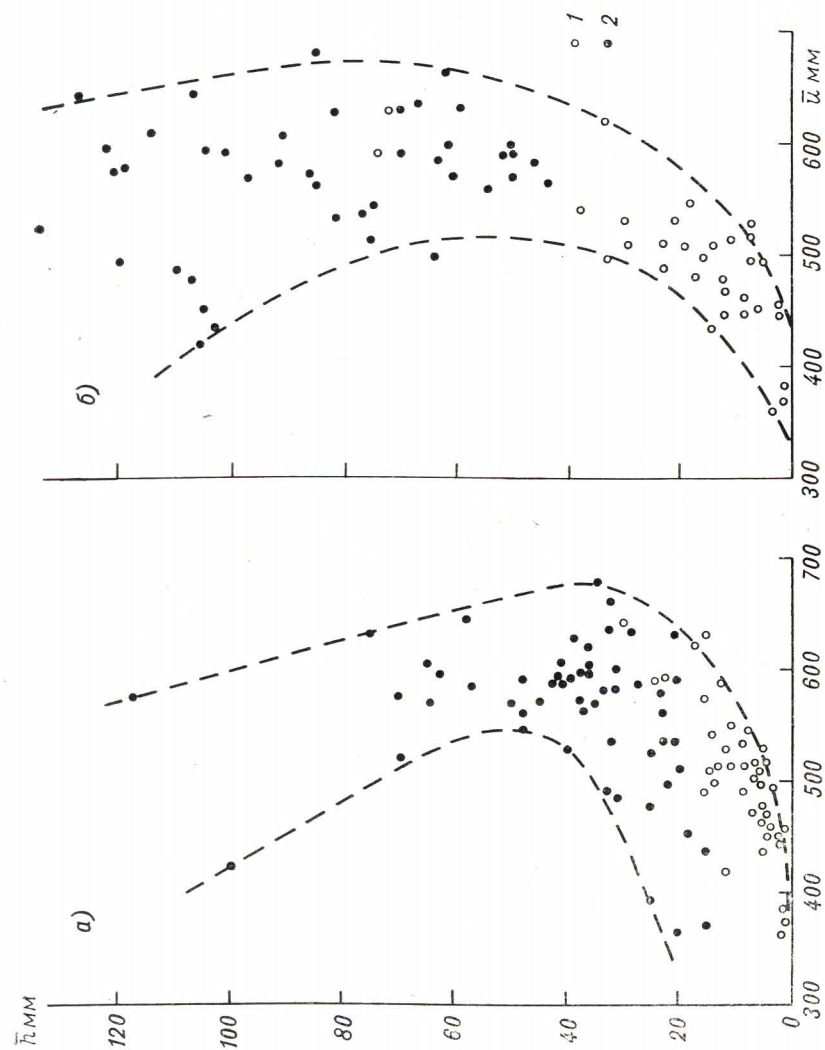


Рис. 5. Зависимость стока лимитирующего (а) и маловодного (б) сезонов от средней инфильтрации для ЕТС.

1 — для зоны недостаточного увлажнения, 2 — для зоны избыточного (достаточного) увлажнения.

нормы подземного стока является наименьшей для всего Северо-Запада ЕТС — около $1 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$. Это является основной причиной того, что минимальный месячный сток рек Приильменской низменности всего $0,2\text{—}0,5 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$, в то время как соответствующий сток рек Северо-Запада ЕТС в основном составляет $1,5\text{—}2 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$.

Геологическое строение территории имеет большое значение для отдельных речных бассейнов. Например, минимальный сток р. Вьяда, бассейн которой сложен плотными глинистыми породами, в $1,5\text{—}2$ раза ниже, чем соответствующий сток рядом расположенной р. Утрон, в бассейне которой распространены рыхлые породы. Именно подобные причины вызывают необходимость районирования территорий при производстве обобщений различных характеристик низкого стока малых рек.

Уменьшение трещиноватости кристаллических пород ведет к снижению их обводненности и уменьшению величины подземного стока. Так происходит, например, в междуречье Случь—Тетерев, где бассейны верховьев рек Тетерева, Уборти, Ирши и Случи сложены метаморфическими и интрузивными породами архейского возраста, характеризующимися малой водностью вследствие слабой трещиноватости пород. Величина подземного стока, так же как и минимального речного, на $50\text{—}60\%$ меньше, чем на прилегающей территории.

В районе многолетней мерзлоты роль плотных слабопроницаемых пород играет мерзлый грунт. Поэтому величина подземного стока в Восточной Сибири и на Северо-Востоке СССР весьма небольшая и колеблется для большей части территории от $0,5$ до $1,0 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$. О. В. Попов [129] отмечает, что в результате влияния многолетне-мерзлых пород величина подземного стока в бассейне р. Лены в зимний сезон уменьшается от верховьев ($3 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$), где наблюдается лишь островная мерзлота, к низовьям бассейна ($0,5 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$) в соответствии с превращением островной мерзлоты в сплошную и увеличением мощности мерзлых пород.

В районах распространения наиболее мощных многолетне-мерзлых пород отмечается и наименьшая величина минимального стока рек. Например, в области Вилюйской синеклизы мощность этих пород достигает 600 м , поэтому минимальный месячный сток в зимний сезон на реках этого района, имеющих площадь бассейна до 5000 км^2 , практически не наблюдается, а для больших рек его величина находится в пределах $0\text{—}0,1 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$. Влияние мерзлоты сказывается и в летний сезон, когда сравнительно небольшая величина оттаявшего слоя почвогрунта не может обеспечить большого подземного питания рек и минимальный месячный сток рек этого района не превышает $0,1\text{—}0,3 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$, хотя на соседних территориях его величина более $2,0 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$.

Естественно, что не следует относить подобные различия в величинах стока рек только на счет одного фактора, в данном случае — многолетнемерзлых пород, поскольку речной сток формируется под влиянием большого числа физико-географических факторов, однако учитывать указанный фактор необходимо.

В отдельных районах большое значение для формирования речного стока имеют карстующиеся породы. Их влияние на режим и величину низкого стока может быть определяющим по сравнению с влиянием любых других факторов и проявляться как положительно, так и отрицательно. Основное влияние карстующиеся породы оказывают на сток малых рек. Чем больше водопоглощательная способность карстовых пород и медленнее их водоотдача, тем значительнее их влияние.

В районах интенсивного развития карста речная сеть может вообще отсутствовать, однако сформировавшиеся там подземные воды обычно принимают деятельное участие в формировании речного стока и даже не одной, а нескольких речных систем. Так, по данным А. Г. Каска [80], на Пандиверской возвышенности какая-либо речная сеть отсутствует на площади 1000 км^2 , а поглощаемые на этой территории осадки выходят на дневную поверхность у подошвы возвышенности в виде родников (около 200), образующих истоки ряда рек. В подобном случае чрезвычайно трудно определить границу поверхностного водосбора рек.

Влияние карстующихся пород на речной сток снижается по мере возрастания размеров бассейна, поскольку уменьшается удельный вес участков с интенсивным развитием карста в общем размере бассейна. Так, О. В. Маркова [111] считает, что для рек с площадью бассейна свыше 2000 км^2 влияние карста на минимальный сток уже не прослеживается. В. А. Балков [18] увеличивает этот предел до $3000\text{—}10\,000 \text{ км}^2$ (в зависимости от района), одновременно полагая, что влияние карста на минимальный сток возрастает по мере уменьшения общей увлажненности речных водосборов.

В силу своих гидрогеологических особенностей карстующиеся породы могут способствовать увеличению низкого стока рек по сравнению с соседними, но незакарстованными бассейнами, или же уменьшать его величину. В первом случае увеличение стока происходит как за счет большой аккумулирующей способности карстовых пород, о чем уже говорилось, так и за счет дополнительного притока подземных вод, перетекающих с соседних речных бассейнов или с бессточных территорий (положительный водообмен). Во втором случае сток рек уменьшается в результате оттока части подземных вод за пределы бассейна (отрицательный водообмен). Такой водообмен может быть неустойчивым во времени и изменяться с увеличением или уменьшением водности данного сезона. Следует отметить, что уменьшение стока на отдельных участках русла реки может происходить за счет

потерь воды в карстовые породы или перевода руслового стока в подрусловый. Однако в последующем этот сток может опять выклиниваться в русло реки, и, следовательно, в этом случае говорить об отрицательном водообмене можно лишь применительно к локальным участкам русла.

По степени влияния карстующихся пород на низкий сток рек могут быть выделены: районы с резким влиянием карста, что характерно для относительно небольших территорий; районы с заметным влиянием карста на сток малых рек (в основном на экстремные характеристики стока); районы со слабым влиянием карста, проявляющимся лишь для очень малых речных бассейнов, особенно в маловодные годы.

Приведенные сведения о характере влияния гидрогеологических факторов на режим и величину низкого стока рек не могут претендовать на большую полноту, но позволяют получить достаточное представление о важности этих факторов в общем комплексе физико-географических условий, определяющих низкий сток рек. Влияние отдельных гидрогеологических факторов на особенности распределения по территории СССР величины подземного стока довольно подробно рассмотрено в работах О. В. Попова [129] и Б. И. Куделина [127]. Эти исследования могут быть в полной мере использованы при региональных оценках условий формирования низкого стока рек.

Самым непосредственным образом гидрогеологические условия учитываются при выделении районов со сходными условиями формирования низкого стока рек. При этом в комплексе оцениваются как гидрологические и геологические условия, так и величина подземных вод, способных питать реки.

Гидрологические условия характеризуют способности подземного бассейна рек к аккумуляции и последующей сработки запасов воды. Однако не меньшее значение для отдельных речных бассейнов могут иметь такие наземные аккумуляторы стока, как озера и болота.

Влияние озер на режим и величину речного стока обычно оценивается как положительное, т. е. чем больше озер на водосборе реки и чем они крупнее, тем более равномерно в течение года распределен сток и тем выше величина меженного и минимального стока. В табл. 3 приводятся сведения о минимальном стоке озерных и практически безозерных рек, находящихся в сходных физико-географических условиях. Существенное различие величин стока (в 1,5—2 раза) озерных рек позволяет сделать вывод о заметной роли озер в питании рек. Это же подтверждается и анализом гидрографов озерных и безозерных рек. Гидрограф первых более сглажен, а интенсивность источника речного стока в меженный период у них намного меньше, чем у вторых (рис. 6).

Озерность водосбора реки оценивается чаще всего величиной отношения площади зеркала озера к площади всего бассейна

Таблица 3

Сравнение величин минимального 30-дневного стока для рек с различной озерностью водосбора

№ пары	Река — пункт	Площадь бассейна, км ²	Озерность, %		Заболоченность, %	Залесенность, %	Средний за период наблюдений модуль стока, л/(с·км ²)	
			по водной площади	взвешенная			зимний	летний
1	Панкан-оя — п. Дружноселье	15,3	3	1,6	3	78	1,30	1,76
	Райя-оя — п. Дружноселье	17,1	3	0	0	81	0,86	0,91
2	Черная — д. Семашко	293	9	3,5	2	70	6,96	4,56
	Сестра — ст. Белоостров	390	1	0	6	78	4,08	3,46
3	Мяделка — с. Русаки	462	6	0,98	11	14	2,95	2,01
	Березовка — с. Саутки	554	1	0,07	6	14	0,97	0,85

реки. Однако лучшей характеристикой озерности является величина средневзвешенной озерности, т. е. когда учитываются размеры озера и его водосбора по отношению к площади всего

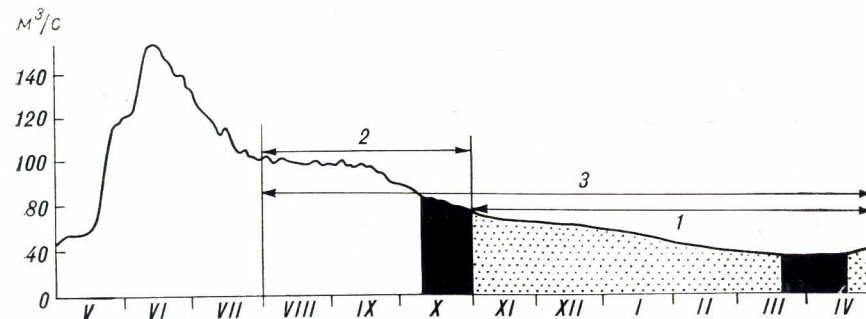


Рис. 6. Гидрограф озерной реки (р. Умба — исток, озерность водосбора 18%).

Условные обозначения см. рис. 1.

речного водосбора. Эта величина более полно отражает роль озера в формировании низкого стока реки. Так, в табл. 3 первая пара рек имеет одинаковую среднюю озерность водосборов, но резко отличную средневзвешенную озерность и соответствующее большое различие в стоке. Такое же и большее различие во взвешенной озерности наблюдается для других рек. Например, общая озерность водосбора р. Мяделки в 6 раз больше, чем

р. Березовки, а средневзвешенная — в 14 раз, что сказывается и на величине минимального стока.

Помимо факта наличия озер на водосборе реки, определенное значение имеют их величина и расположение по отношению к замыкающему створу данной реки. Чем ближе озеро к замыкающему створу, тем значительнее его влияние. Естественно, что при этом большую роль играют размеры озера, точнее объем его сливной призмы, определяющий аккумулирующую способность озера. В табл. 4 приведены данные по минимальному стоку рек с различным расположением озер на их водосборе. На реках Дисне и Полисти ясно прослеживается уменьшение стока с удалением замыкающего створа от озерного района, находящегося в основном в верховьях. У рек юга Карелии (пара 3) имеется четкое различие в положении озер на водосборе: на р. Воньге, у которой озера расположены в верхней части водосбора, наблюдается наименьшая величина стока; у р. Янис-йоки, имеющей озера в нижней части водосбора, значения минимального стока наибольшие; промежуточное положение по величине стока занимает р. Сума, на водосборе которой озера расположены в основном в средней и частично в верхней частях.

В зимний сезон зональные величины минимального 30-дневного стока для юга Карелии составляют 2—2,5 л/(с·км²), а в летний 3—3,5 л/(с·км²). Как следует из данных таблицы, в зимний сезон сток р. Воньги равен зональному, а в летний заметно превышает его; следовательно, озера этого бассейна

Таблица 4

Величины минимального 30-дневного стока рек с различным расположением озер на водосборе

№ пары	Река — пункт	Площадь бассейна, км ²	Озерность, %		Заболоченность, %	Залесенность, %	Средний за период наблюдений модуль минимального стока, л/(с·км ²)	
			по водной площади	взвешенная			зимний	летний
1	Дисна — с. Козяны	1720	11	1,94	9	19	3,48	2,02
	Дисна — п. Шарковщина	4540	5	0,31	15	24	2,31	1,45
2	Полисть — д. Коробинец	1160	5	1,80	26	46	2,36	2,68
	Полисть — д. Подтополье	2150	3	0,50	21	39	1,61	1,72
3	Воньга — ж.-д. мост	1190	12	—	26	—	2,20	4,80
	Янис-йоки — п. Хямекоски	3650	10	—	5	85	7,90	8,40
	Сума — с. Лаппино	1730	14	—	20	66	4,1	6,5

имеют значение для питания рек лишь в летний сезон, когда происходит сработка запасов весенних вод, накопленных озерами. В формировании минимального стока р. Янис-йоки озера, наоборот, играют основную роль по сравнению с другими источниками, причем их влияние сказывается в оба сезона, поскольку величина минимального стока этой реки превышает зональный в 4 раза зимой и в 2,5 раза летом.

Озера, расположенные на притоках, оказывают меньшее регулирующее влияние на речной сток, чем озера, находящиеся в русле главной реки.

При наличии на водосборе реки значительного количества бессточных озер последние, аккумулируя поверхностные и подземные воды, расходуют поступающий в них сток только на испарение (летом) или ледообразование (зимой). Поэтому в подобных условиях озера могут иметь отрицательное значение в питании рек. Чаще всего такие случаи встречаются на территории с плоским слаборасчлененным рельефом (например, степные районы Западной Сибири).

Необходимо отметить, что основное количество составляют озера с площадью поверхности менее 1 км². Например, в Карелии такие озера составляют 97% общего числа озер, такая же картина наблюдается в Эстонии, Белоруссии. При этом общая площадь малых озер составляет обычно лишь небольшую долю площади озер, например в Эстонии всего 5%. Следовательно, рассматривать влияние малых озер на сток рек целесообразно в их совокупности, в то время как большие озера необходимо исследовать как самостоятельные объекты.

Таким образом, при оценке роли озер в формировании низкого стока рек необходимо учитывать морфологические и климатические условия рассматриваемых территорий, осуществляя дифференциацию озер по их величине и расположению на водосборе.

Влияние болот на режим и величину низкого стока рек неоднозначно и определяется типом болот, а также климатическими и гидрогеологическими условиями, в которых они существуют.

Сток с естественных болотных массивов происходит только до тех пор, пока не истощатся запасы свободной влаги в пределах активного слоя болота. При понижении уровней болотных вод до инертного горизонта и ниже сток с болотного массива практически прекращается. В этом случае выпадающие на водосбор болота осадки идут на пополнение запасов инертного, а затем активного горизонтов болота, т. е. определенная часть стока не попадает в речную сеть.

Большое влияние на сток с болот оказывает испарение с их поверхности. В зоне избыточного увлажнения, где испарение с болот незначительно выше испарения с суши, болота можно рассматривать как верхний водоносный горизонт, питающий реки

в период низкого стока. В зоне недостаточного увлажнения испарения с болот, как и с водной поверхности, больше, чем с суши. Поэтому в период межени питание из болот прекращается довольно быстро, и сток заболоченных рек в это время равен или меньше стока незаболоченных рек. В зимний сезон значительные запасы болотных вод уходят на ледообразование, а в зоне многолетней мерзлоты — вплоть до полного промерзания, что тоже снижает роль болот как источников питания рек.

В зоне многолетней мерзлоты болота в меньшей степени регулируют сток, чем в других физико-географических районах, вследствие небольшой мощности ежегодно оттаивающего торфяно-грунтового слоя и малых уклонов, способствующих задержанию выпадающих осадков и дальнейшему их испарению. Поэтому здесь сток с заболоченных водосборов практически не отличается от стока с незаболоченных водосборов.

Таким образом, значительная заболоченность водосбора может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на низкий сток рек. Однако нередко это влияние выявить трудно, тем более что зачастую на водосборах развиваются различные типы болот с разнообразной растительностью (мхи, травы, кустарники), с неодинаковой мощностью активного слоя. Так, при региональном описании Северного края [136] не выявлено какой-либо зависимости величины минимального 30-дневного стока от заболоченности водосбора.

Отрицательное влияние заболоченности водосбора, выражающееся в снижении величины меженного стока заболоченных рек по сравнению с соседними незаболоченными бассейнами, отмечается на территории Карелии и Северо-Запада ЕТС [135], в Белоруссии [60]. На Мещерской низменности меженный сток рек с сильно заболоченными водосборами при распространении верховых болот водораздельно-склонового плоского залегания значительно ниже, чем у рек с незаболоченными водосборами. Однако севернее, в бассейнах рек Мологи и Суды, наблюдается увеличение минимального стока с ростом заболоченности водосборов. Так, минимальный сток р. Ворон с площадью бассейна 248 км² и заболоченностью 72% в 4—5 раз больше, чем у р. Ягорбы с площадью бассейна 374 км² и заболоченностью 1%. Правда, столь значительное различие наблюдается довольно редко. Чаще же, как уже говорилось, заболоченность водосбора не оказывает существенного влияния на низкий сток, особенно в случае расположения болот в верхней и средней частях водосбора.

Однако нарушение естественного состояния болот в результате их осушения вызывает резкое увеличение минимального стока. Как отмечается в работе [58], при интенсивном осушении болотного массива величина среднего модуля минимального стока с него возрастает в 3,5—4 раза, а в случае осушения редкой сетью — в 2—3 раза по сравнению с неосушенным болотом.

При этом роль мелиорируемых болот в питании рек в меженный период тем значительнее, чем больше площадь осушения.

Роль леса в формировании речного стока посвящена довольно обширная литература, но применительно к низкому стоку таких исследований сравнительно мало. Известно, что лес способствует переводу поверхностных вод в подземные, повышая таким образом величину речного стока в период, когда реки питаются преимущественно подземными водами. Выделить в чистом виде влияние леса на величину меженного стока представляется очень сложным, тем более в одной климатической зоне, поскольку в лесной зоне на территории с отсутствием леса сохраняются лесные почвы и, следовательно, пополнение подземных вод и сток их здесь происходят в сходных с облесенными водосборами условиях.

Наиболее заметным влияние леса на низкий сток рек может быть, очевидно, в лесостепной зоне, поскольку разница в процессах инфильтрации воды в лесных и степных почвах весьма существенна. Коэффициент весеннего стока (период наибольшего пополнения подземных вод) с облесенного водосбора лесостепной зоны может быть очень близок к нулю, а с необлесенного водосбора обычно составляет величину, существенно отличную от нуля (0,20—0,25 и более в зависимости от состояния поверхности водосбора).

В районах недостаточного увлажнения древесная растительность (кустарник, подлесок), распространенная в зоне высокого положения подземных вод (особенно в речной пойме и на террасах), может расходовать значительное количество влаги путем транспирации, и поэтому в случае ее уничтожения речной сток в меженный период может заметно увеличиться. В работе Джонсона [173] приводятся сведения о том, что уничтожение листового леса на юге Аппалачей значительно увеличило минимальный сток рек. Когда же на одном из малых водосборов были высажены сосны, минимальный сток уменьшился вследствие увеличения потерь воды на испарение. В Северной Каролине срубка нагорного, с твердой древесиной леса увеличила минимальный сток. Как только подлесок пошел, минимальный сток вновь уменьшился. На малом водосборе р. Огайо при возрасте сосны от 1 до 6 лет вода в реке наблюдалась в течение 90% всего времени; когда же сеянцы выросли до размеров дерева (13—18 лет), вода текла лишь 50% времени. Подобные результаты получены Риггсом для 10 речных водосборов в штате Виргиния [185], когда расчистка земель от растительности вдоль русел рек помогала поддерживать относительно высокие минимальные расходы воды. Однако в той же работе Джонсона [173] имеется указание на то, что изменение количества растительности в долине р. Теннесси не приводило к сколько-нибудь существенным изменениям минимального стока.

Рельеф водосбора оказывает определенное влияние на величину низкого стока рек. К характеристикам рельефа относятся такие факторы, как высотное положение водосбора, изменение высоты местности на водосборе, расчлененность территории. Рельеф водосбора реки как физико-географический фактор целесообразно учитывать в случае его значительного изменения, например при наличии возвышенностей на в общем равнинной территории, при переходе от низменности к возвышенной и горной территории. На обширных равнинах изменение относительных высот местности на 100—200 м приводит к увеличению общей увлажненности территории и, как следствие, к повышению величины речного стока. Так, на Русской равнине всем возвышенностям (Валдайская, Среднерусская, Приволжская и др.) соответствует весьма заметное увеличение минимального стока рек.

Изменение стока с увеличением высоты местности может быть весьма значительным. Например, на Енисейском кряже при изменении средней высоты водосбора с 200 до 800 м минимальный 30-дневный летний сток возрастает с 2,5 до 15 л/(с·км²). Естественно, что повышение местности не является единственной причиной. Так, немалое значение имеет общее положение территории по отношению к влагоносным ветрам. Годовое увлажнение примыкающей к Енисейскому кряжу с востока и северо-востока верхней и средней частей бассейна Подкаменной и Нижней Тунгусок в 1,5—2 раза меньше и в результате почти при тех же изменениях высот местности (300—800 м) величина указанного стока изменяется здесь лишь в 2,5 раза и не превышает 4,5 л/(с·км²).

В районах со значительным расчленением местности, хорошо развитой гидрографической сетью наблюдается относительно высокий минимальный сток рек. Чем обширнее территория (водосбор реки) и значительнее развитие речной сети, тем больше вероятность участия поверхностных вод, образованных дождями, в формировании низкого стока рек, хотя это и не всегда прослеживается на гидрографе, так как неравномерность выпадения осадков и длительность времени добегания сформированных ими вод до замыкающего створа приводит к значительному расплыванию паводков.

В отдельных случаях на величину низкого стока заметное влияние может оказывать хорошо развитая пойма реки. Заливаемые в весенний период обширные пространства пойм и первых террас задерживают воду в различного рода понижениях и способствуют их переводу в подземные аллювиальные воды, которые принимают затем непосредственное участие в питании реки в период низкого стока. В горных районах подобные картины наблюдаются в местах значительного развития конусов выноса. Последние сложены рыхлыми, хорошо водопроницаемыми породами и аккумулируют воду в периоды паводков.

Весьма важным косвенным фактором, оказывающим существенное влияние на режим и величину низкого стока рек, является испарение. Оно выступает основной отрицательной составляющей водного баланса, поэтому понятен характер его влияния на сток и важность его учета. Как фактор, в значительной мере определяющий речной сток, испарение проявляет свое

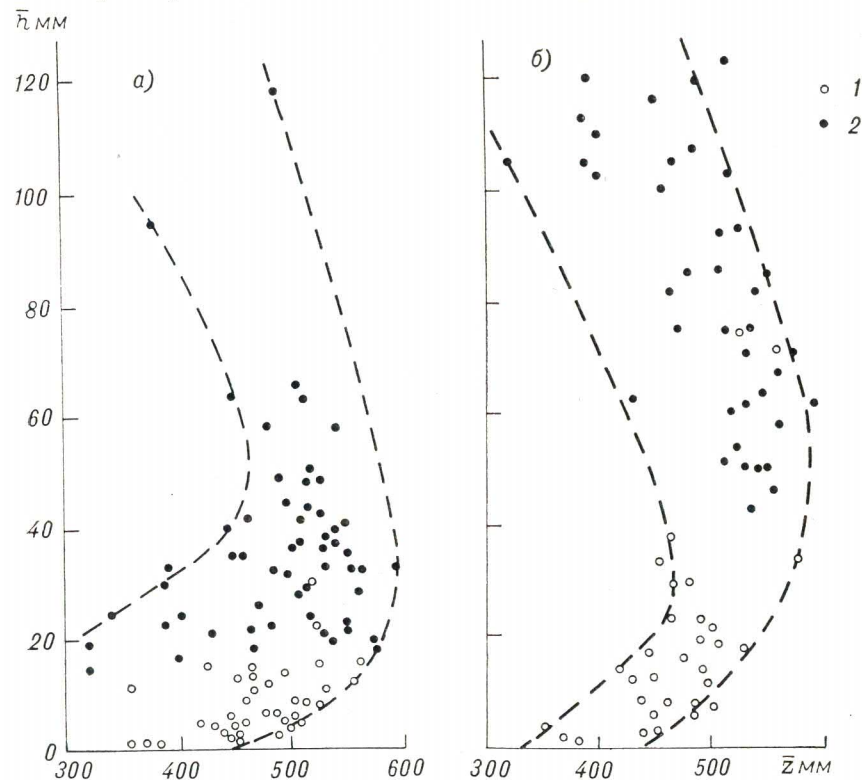


Рис. 7. Связь стока лимитирующего (а) и маловодного (б) сезонов с величиной годового испарения для ЕТС.

1 — для зоны недостаточного увлажнения, 2 — для зоны избыточного (достаточного) увлажнения.

влияние главным образом в летний сезон, поскольку именно тогда испаряется основная масса влаги. На рис. 7 показаны связи среднееголетнего сезонного стока (летне-осенний и зимний, соответствующие маловодному и лимитирующему сезонам) с величиной годового испарения для тех же речных бассейнов, которые были использованы при построении связей сезонного стока с осадками (см. рис. 2). Верхняя часть графика для летне-осеннего сезона (рис. 7б) соответствует зоне избыточного увлажнения, где величина испарения значительно меньше

выпадающих осадков в теплый сезон и основная их часть питает реки. По мере продвижения к югу испарение увеличивается, а выпадающие осадки уже не могут компенсировать возросшую разницу в испарении, что ведет к снижению речного стока, и точки на графике отклоняются вправо при одновременном приближении к оси абсцисс. Однако величина максимально возможного испарения продолжает резко увеличиваться по мере продвижения к югу, достигая наибольших значений в зоне недостаточного увлажнения при одновременном уменьшении количества атмосферных осадков. В результате величина физического испарения снижается при резком уменьшении речного стока, и поле точек, изгибаясь, уходит влево.

В холодный период, когда реки питаются главным образом за счет подземных вод, а испарение незначительно, общая закономерность изменения зимнего стока с уменьшением испарения сохраняется. В данном случае испарение имеет значение как фактор, уменьшающий предшествующие запасы влаги, накопленные в теплый период, когда в основном формируются подземные воды.

В зимний сезон непосредственное влияние на величину низкого стока может оказывать такой климатический фактор, как температура воздуха. Весьма низкие температуры воздуха, большая продолжительность времени, в течение которого они наблюдаются, обуславливает значительное промерзание почво-грунтов и большие потери воды на ледообразование, особенно в малоснежные зимы. Это характерно для территорий с резко континентальным климатом и в зоне развития многолетней мерзлоты. Глубокое промерзание земной поверхности приводит к прекращению питания рек из верхних водоносных горизонтов, а при смыкании зоны промерзания с многолетнемерзлыми грунтами вообще прекращается подземный сток в реки. Следует отметить, что в основном влияние низких температур воздуха сказывается на стоке малых рек, питающихся подземными водами, расположенными неглубоко от земной поверхности. Поэтому на обширных пространствах АТС в зимний сезон сток на малых реках не наблюдается.

Влияние температуры воздуха может быть столь значительным, что возможна корреляционная зависимость между этим фактором и величиной минимального стока. Подобные исследования осуществил А. М. Комлев [89] для территории Западной Сибири, установивший наличие связи зимнего стока некоторых рек этой территории с суммой отрицательных среднесуточных температур воздуха. Связь имела обратный характер.

В южных, юго-западных и западных районах ЕТС в зимний сезон температура воздуха довольно часто может быть положительной, создавая оттепели, приводящие к образованию зимних паводков на реках. Поэтому зимний меженный сток, например, в Прибалтике значительно выше летнего, а на реках

Западного Кавказа зимой почти отсутствуют устойчивые и достаточно длительные периоды низкого стока.

В теплый сезон температура воздуха имеет меньшее значение, чем в зимний, поскольку на первый план выступает величина испарения и связанный с ней дефицит влажности воздуха. С ростом последнего увеличивается испарение с земной поверхности. Это ведет к снижению размеров питания подземных вод и увеличению их расхода на испарение, что приводит к уменьшению меженного стока рек. Наибольшее значение дефицита влажности воздуха имеет в засушливых районах. Так, в районах со среднегодовым дефицитом влажности воздуха 4—5 мм наблюдается постоянное пересыхание малых рек [20].

Получив представление о физической роли фактора, оценку его количественного влияния целесообразно производить путем комплексного анализа влияния всех основных факторов, используя для этого методы регрессионного анализа, предназначенные для определения многофакторных связей. Однако могут быть выявлены характеристики, суммирующие в себе влияние основных факторов, т. е. являющиеся их интегральными показателями, и в этом случае задача может значительно облегчиться и свестись к отысканию зависимости лишь от одного или двух факторов.

2.4. УСЛОВНЫЕ ФАКТОРЫ

С позиций количественной оценки влияния физико-географических факторов на величину низкого стока рек наибольший интерес представляют условные факторы, которые можно определить значительно проще и точнее, чем стокообразующие и косвенные факторы.

Большинство исследователей при разработке методов расчета минимального стока рек оперируют площадью бассейна реки как одним из основных расчетных параметров. Такой выбор не случаен, так как давно подмечено наличие зависимости величины минимального стока рек от их площади бассейна [14, 118, 166 и др.]. Однако учитывая, что в период низкого стока рек питание большинства из них в значительной мере осуществляется подземными водами, правильнее было бы использовать объем водоносных горизонтов, участвующих в питании рек, или же объем всего подземного бассейна.

Но последний является величиной практически весьма трудно определяемой, особенно при широкомасштабных исследованиях, поскольку требуется наличие подробных гидрогеологических и геологических материалов, позволивших бы установить границы бассейнов, особенно в нижней части, тем более что принимаемые схемы о согласном залегании водоносных горизонтов по всему бассейну (горизонтальное, слабо наклонное) являются в большей мере условными и довольно часто не отражают истинного положения. Наклон пластов может меняться, что

ведет к изменению уклонов и, следовательно, скоростей стекания подземных вод. Меняется литологический состав пород, т. е. изменяется коэффициент фильтрации. Водоупорные горизонты, разделяющие водоносные пласты, могут не иметь сплошного пространства, в них возможно наличие окон или водонасыщенных линз. Граница водоупорного горизонта может быть вообще не известна. Так, даже при детальном гидрогеологическом исследовании, произведенном Куделиным в нижнем течении

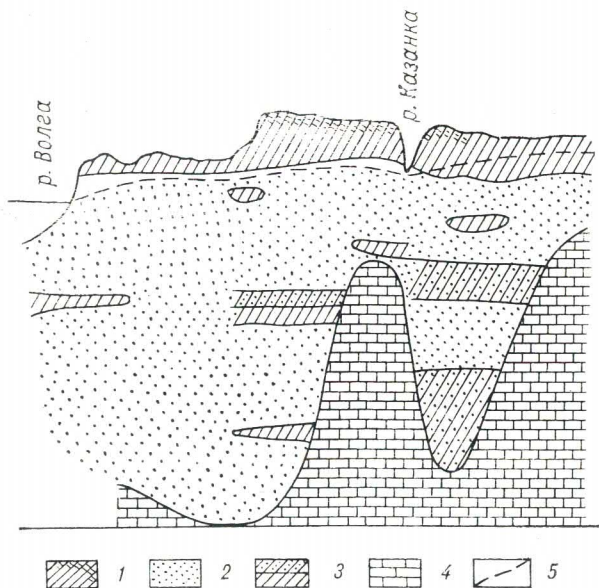


Рис. 8. Гидрогеологический профиль долины р. Казанки [98].

1 — культурный слой и суглинок тяжелый; 2 — пески разнородные; 3 — суглинок легкий и средний, иловатый; 4 — известняки мергелистые; 5 — уровень грунтовых вод.

р. Волги [98], не были установлены положения водоупоров для ряда водоносных горизонтов (на бахилевском и переволковском участках). Более того, для малых, а иногда и средних рек определить границы подземного бассейна даже при наличии необходимых данных бывает весьма затруднительно, поскольку единый мощный водоносный горизонт может питать сразу несколько рек и положение нижней границы частного бассейна остается неопределенным. Трудности, возникающие при определении подземного бассейна, в известной мере видны из рис. 8. На представленном гидрогеологическом разрезе описать подземный бассейн р. Казанки можно лишь условно.

При наличии гидравлической связи водоносных горизонтов с рекой выход подземных вод осуществляется через смоченный

периметр русла. Следовательно, чем он больше, тем больше воды получает река (в тех же гидрогеологических условиях). Увеличение смоченного периметра происходит при возрастании глубины эрозионного вреза русла в водоносные пласты. Одновременно рост последней по длине реки приводит к вскрытию дополнительных водоносных горизонтов: прорезав в верховьях один водоносный горизонт, ниже по течению река начинает дренировать еще один или несколько горизонтов подземных вод, увеличивая таким образом размеры подземного бассейна. Следовательно, глубина эрозионного вреза русла реки как показатель условий питания реки подземными водами, а таким образом, и величины меженного стока приобретают весьма большое значение, на что указывают и работы [26, 52, 118]. Конечно, при этом нужно учитывать водообильность дренируемых горизонтов, их связь с рекой и прочие, ранее изложенные гидрогеологические условия, определяющие величину подземного стока. Поэтому исследования связи величины меженного или минимального стока с глубиной эрозионного вреза необходимо осуществлять для водоносных горизонтов одинаковой или близкой водообильности. При этом литологический состав пород может и не играть решающей роли, так как ранее было показано, что породы различного состава могут иметь сходную обводненность.

Однако увеличение глубины вреза русла не всегда ведет к соответствующему увеличению речного стока. При смене вниз по течению реки водообильных горизонтов на слабо обводненные величина подземного стока в реку сокращается и модуль стока уменьшается.

Таким образом, для целей изучения низкого стока, формирующегося в основном подземными водами, глубина вреза русла в водоносные горизонты, питающие реку, имеет очень большое значение. Определение этой характеристики связано с необходимостью установления соотношения между отметкой вреза русла и отметками водоносных горизонтов, участвующими в питании реки по всей ее длине до замыкающего створа, поскольку глубина вреза меняется с увеличением мощности реки.

На практике определение глубины эрозионного вреза русла сопряжено со значительными трудностями. Глубина эрозионного вреза русла в данном створе реки не может отражать действительной картины условий дренирования рекой водоносных горизонтов по всему бассейну или хотя бы по главному стволу реки. Необходимо иметь средневзвешенную или в крайнем случае просто среднюю величину глубины эрозионного вреза русловой сети данного бассейна. Однако методика определения такой характеристики разработана весьма слабо.

Имеются попытки заменить глубину вреза отметкой вреза, т. е. абсолютной отметкой дна русла водотока [26, 108]. Но в этом случае при одинаковой абсолютной отметке вреза и различном высотном положении дренируемых водоносных пластов

степень их дренирования будет неодинаковой и, следовательно, разными будут величины подземного стока в реки. Поэтому при практическом использовании связи величины минимального стока с отметкой вреза русла достаточно тесные зависимости наблюдаются лишь для отдельных, однородных по гидрогеологическим условиям и высотному положению районов [108].

Глубина эрозионного вреза может увеличиваться только до определенного предела — местного базиса эрозии. Следовательно, глубина эрозионного вреза как характеристика условий дренирования рекой водоносных горизонтов имеет значение лишь для определенного диапазона рек и в этом смысле не является универсальным фактором, который был бы пригоден для исследований низкого стока любых по размеру рек.

Существует определенная связь между площадью бассейна реки и глубиной ее эрозионного вреза [52, 118]. Чем больше первая, тем значительнее вторая. Эта связь должна иметь криволинейный характер и затухать при определенных размерах площади бассейна.

Водосбор является приемником выпадающих осадков и чем больше его площадь, тем большая величина осадков проникает под землю, конечно, при сходном строении территории. Следовательно, размеры водосбора в определенной мере влияют на условия питания подземных вод, особенно верхних водоносных горизонтов почвенно-грунтовой толщи.

Развитие подземного бассейна по площади связано непосредственно с ростом площади поверхностного водосбора, что вполне понятно. Границы поверхностного и подземного водоразделов в большинстве случаев совпадают. Исключение составляют карстовые районы, районы с наличием артезианского питания и другими аномальными явлениями.

Таким образом, площадь бассейна реки непосредственно связана с рядом важнейших характеристик, влияющих на величину поверхностного и подземного стока, а в конечном счете и на величину низкого стока рек. Она может рассматриваться как параметр, являющийся интегральным показателем гидрогеологических, морфологических и гидрометеорологических условий формирования низкого стока рек. Естественно, что не во всех случаях эта характеристика может в достаточной мере отражать влияние указанных факторов, но, как показывают осуществленные автором исследования в масштабах всей территории СССР [40], для основной части территории, особенно равнинной, величина площади бассейна реки вполне удовлетворительно отражает влияние основных физико-географических факторов, определяющих величину низкого стока рек. Это подтверждается и рядом позднейших исследований [62, 137].

Как уже отмечалось, увлажненность местности в значительной мере зависит от ее высотного положения относительно соседних районов: чем выше расположен водосбор (но

до определенных пределов), тем большее количество осадков выпадает на его поверхность, создавая более благоприятные условия для пополнения запасов подземных вод. Наиболее ярко это различие проявляется в горной местности. По мере увеличения высоты водосбора быстро растет количество выпадающих осадков. При достижении больших высот (2500—3000 м) эти осадки выпадают чаще в виде снега и аккумулируются в снежниках и ледниках, обеспечивающих дополнительное питание рек в теплый сезон.

В наиболее высокогорной зоне осадков выпадает меньше, площади бассейнов рек тоже небольшие (верховья рек), условия для аккумуляции подземных вод обычно неблагоприятные (плотные скальные породы), поэтому величина низкого стока, особенно в зимний сезон, может быть значительно меньше (вплоть до полного исчезновения), чем в более низко расположенных бассейнах рек. Таким образом, высота водосбора в большинстве случаев выступает как положительный фактор, но при определенных условиях может быть и отрицательным. Количественным ее выражением обычно является величина средней высоты водосбора. Однако в горных районах при резкой смене местных высот правильнее использовать средневзвешенную величину высоты водосбора реки.

Высота водосбора как расчетный параметр отражает влияние лишь климатических факторов (осадки, испарение), поэтому ее роль в наиболее ярком виде проявляется в районах с интенсивным развитием в прошлом горообразовательных процессов (Кавказ, Памир, Тянь-Шань и др.). В возвышенных районах со сглаженными и облесенными формами рельефа значение высоты снижается, хотя в общем ее роль как показателя увлажненности продолжает сохраняться. Но в таких районах не меньшее, а часто и большее значение приобретает площадь бассейна реки как более общий показатель условий формирования низкого стока рек. Например, анализ зависимости минимальных 30-дневных расходов воды и модулей стока в летне-осенний сезон от площади бассейна и средней высоты водосбора для рек Центрального Алтая свидетельствует о наличии значительно более тесной зависимости при корреляции по площади бассейна реки [40]. Влияние морфологических факторов, растительности и мощности почвенного слоя особенно сказывается в горных районах, имеющих относительно низкие высоты (Карпаты, Урал, Саяны и др.). Поэтому в таких районах влияние площади бассейна как фактора, суммирующего влияние различных физико-географических характеристик на формирование меженного и минимального стока, будет большим, чем влияние средней высоты водосбора.

Определенное значение имеет уклон водосбора и ориентирование водосбора по отношению к влагоносным ветрам. На равнинной территории эти факторы имеют меньшее значение,

чем в горах. Уклон водосбора определяет скорость стекания поверхностных вод. Применительно к низкому стоку скорость поверхностного стекания представляет интерес как характеристика, показывающая инфильтрационные способности водосбора при одинаковых почво-грунтах, слагающих его. Чем больше уклон водосбора, тем быстрее происходит сток воды с него и тем меньше времени остается на процессы просачивания воды в почву, что уменьшает величину питания подземных вод. Для количественной оценки влияния уклона на величину низкого стока рек целесообразно пользоваться его средневзвешенной величиной, поскольку изменения уклона на водосборе могут происходить довольно резко на небольших участках.

Ориентирование водосбора по отношению к влагоносным ветрам, преобладающим в данном районе, имеет наибольшее значение в горных областях. Ярким примером этого являются Уральские горы. Наиболее увлажненные массы воздуха поступают с запада — северо-запада, поэтому на западных склонах Урала выпадает значительно большее количество осадков и сток рек на этом склоне заметно выше, чем на восточном. К тому же на последнем наблюдается очень резкое уменьшение величины стока с падением высоты. Так, в зимний сезон минимальный сток уменьшается на восточных склонах от 4 до 0,5 л/(с·км²), а на западных — от 4 до 1,5 л/(с·км²).

Разница в увлажненности склонов может быть столь значительной, что величина низкого стока рек одного склона становится практически не сопоставимой со стоком противоположного склона, особенно в средней и высокогорной зонах. Например, увлажненность северных склонов Главного Кавказского хребта значительно меньше, чем южных, и величина минимального стока рек высокогорной зоны Большого Кавказа на северных склонах в 2—3 раза меньше, чем на южных. Этот важный факт необходимо учитывать при осуществлении обобщений низкого стока рек.

Большое количество факторов (климатических и подстилающей поверхности), влияющих на режим и величину низкого стока, их различная взаимосвязь обуславливают случайность появления той или иной величины низкого стока. Существенная роль азональных факторов в формировании низкого стока вызывает необходимость широкого использования региональных методов обобщения, основанных на учете связи характеристик низкого стока рек с основными стокоформирующими факторами или обобщающими их влияние показателями. В этом плане иногда используется величина годового стока рек или коэффициент естественной зарегулированности стока. Как количественные характеристики они весьма удобны, но, являясь параметрами стока, находятся под влиянием всего комплекса физико-географических факторов и, следовательно, не могут характеризовать частное влияние фактора.

Более того, одновременное использование при обобщении этих или подобных стоковых характеристик наравне с основными физико-географическими факторами (например, при применении метода множественной корреляции) приводит к тому, что стоковые характеристики подавляют своим весом (вкладом) остальные факторы, не позволяя, таким образом, вскрыть истинную картину условий формирования низкого стока данной территории. Примеры этого были уже показаны в главе 1.

Понятно, что чем большую долю годового стока составляет низкий сток, тем лучше связь между ними. В этом отношении характеристики сезонного стока будут более связаны с годовым стоком, чем характеристики минимального стока, так как в формировании сезонного стока поверхностные воды принимают большое участие и по величине стока он становится близок к годовому. В некоторых районах и величина минимального стока почти не отличается от годового. Например, в летний сезон на Среднем и Северном Урале в формировании минимального 30-дневного стока значительное участие принимают осадки, в результате чего его величина составляет до 15 л/(с·км²) на Среднем Урале и до 25 л/(с·км²) на Северном Урале, при этом величина годового стока соответственно равна 15 и 20 л/(с·км²), т. е. на Северном Урале годовой сток даже ниже минимального летнего, поскольку на величину годового стока большое влияние оказывает очень длительный и весьма маловодный зимний период. На территории Западной Сибири летний минимальный 30-дневный сток в значительной мере формируется водами верховодки, т. е. осадками данного сезона, и имеет такую же величину или даже несколько большую, чем среднегодовое годовое стока. Подобная же картина, особенно в летний сезон, наблюдается и на ряде других территорий. Поэтому ясно, что связь низкого и годового стока в таких районах будет заведомо тесной. Но при практическом использовании подобных зависимостей возникает вопрос об определении аргумента для неизученных рек и точности этого определения.

Глава 3

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАЛОВОДНОГО ПЕРИОДА

3.1. ПРИНЦИПЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ МАЛОВОДНОГО ПЕРИОДА

Сведения о продолжительности того или иного периода низкого стока необходимы при разработке проектов орошения и осушения, водоснабжения, энергетики, оценки качества воды и пр.

Вопрос выделения различных периодов низкого стока тесно сопрягается с исследованиями, посвященными разделению года на гидрологические сезоны. Подобные работы уже неоднократно выполнялись гидрологами. К наиболее существенным исследованиям можно отнести работы М. И. Львовича [109], Б. Д. Зайкова [72], Д. Л. Соколовского [149], П. С. Кузина [99] и В. Г. Андреянова [9, 13]. Выделение гидрологических сезонов осуществлялось ими в основном в аспекте внутригодового распределения стока [72, 9, 149] или при производстве гидрологического районирования СССР [99, 109]. Так, Андреянов произвел схематическое районирование территории СССР по срокам начала и окончания основных гидрологических сезонов [13] с учетом водного режима рек, но применительно к условиям расчета внутригодового распределения стока рек. Для водохозяйственного года, т. е. года, начинающегося в момент начала весеннего половодья и заканчивающегося по окончании зимнего сезона следующего календарного года, им выделено восемь сезонов, из которых четыре могут быть отнесены к разряду основных — весенний, летний, осенний и зимний. Еще четыре образованы в результате объединения двух смежных сезонов — зимне-весенний, весенне-летний, летне-осенний, осенне-зимний. Это сделано с учетом особенностей водного режима рек отдельных районов, например Крыма, Кавказа, Средней Азии.

Сроки начала и окончания сезона приняты постоянными для данного района и отнесены к началу или соответственно концу календарного месяца. Так, для крайнего севера ЕТС (севернее 64° с. ш.) за летне-осенний принят период с августа по ноябрь, а за зимний — с декабря по апрель. Для лесной зоны (севернее 56° с. ш. и восточнее 30° в. д.) летне-осенний сезон начинается в июле, а заканчивается в ноябре; зимний сезон длится с декабря по март.

Следует отметить, что объединение в один сезон с зимним весеннего или осеннего сезонов представляется недостаточно обоснованным с генетической точки зрения, хотя, возможно, и оправдано с практических позиций, если рассматривать эти сезоны как сезоны ограниченной или, наоборот, большой водности. Например, в горных районах Крыма Андреяновым выделяется в качестве самого многоводного зимне-весенний сезон (декабрь—май), хотя условия формирования стока рек значительно различаются в декабре—январе и апреле—мае как по характеру стокоформирующих осадков, так и по состоянию поверхности водосборов (температурный режим почв, испарение и пр.).

Существует два направления в определении гидрологических сезонов: выделение сезонов в аспекте внутригодового распределения стока, необходимое для удовлетворения практических запросов, главным образом энергетики, т. е. в основном прикладное направление при недостаточном учете генетических условий формирования стока; и выделение сезонов на строго генетической основе с учетом типа питания водотоков, их режима и климатического сезона года, однако довольно трудоемкое при практическом использовании.

П. С. Кузин [99] предложил выделять гидрологические сезоны для весны, лета, осени и зимы с учетом основных фаз водного режима рек (половодье, паводки, межень), характера их происхождения и времени наступления в основных географических зонах Советского Союза (тундра, лес, степь, полупустыня и пустыня). При этом под гидрологическим сезоном им понимался период, характеризующийся однотипным ходом климатических и гидрологических явлений и процессов. Таким образом, в этом случае выделение гидрологических сезонов сводится к определению периода половодья, а также паводочных и межениных периодов. Этот второй путь выделения гидрологических сезонов, являющийся более обоснованным с генетических позиций, позволяет глубже изучить физические процессы гидрологических явлений.

Учитывая практические запросы, Андреянов предложил выделять в водохозяйственном году на базе гидрологических сезонов лимитирующий период и лимитирующий сезон, т. е. время, в течение которого различные отрасли народного хозяйства могут испытывать наибольшие ограничения в воде. При этом, как уже указывалось, к лимитирующему сезону обычно относится наиболее маловодный гидрологический сезон (зимний или летний, летне-осенний), а лимитирующий период составляет из двух смежных непрерывных сезонов, имеющих наименьшую в году водность. Например, к лимитирующему периоду могут относиться летне-осенний и зимний сезоны, или осенний и зимний, т. е. сток лимитирующего периода формируется в различных климатических условиях. Поэтому исследования стока лимитирующего периода необходимо осуществлять отдельно по

составляющим его сезонам — лимитирующему и нелимитирующему. Последний целесообразно называть маловодным сезоном, тогда в водном режиме рек за водохозяйственный год можно будет выделить три сезона: многоводный, маловодный и лимитирующий. При этом маловодный и лимитирующий сезоны составляют лимитирующий период. На рис. 9 показан пример выделения названных сезонов. При таком выделении сезонов соблюдается требование о генетическом сходстве исследуемых характеристик, что необходимо при осуществлении гидрологических обобщений с целью разработки расчетных методов определения сезонного стока неизученных рек.

Автором были осуществлены исследования по определению времени появления на реках СССР минимальных 30-дневных и

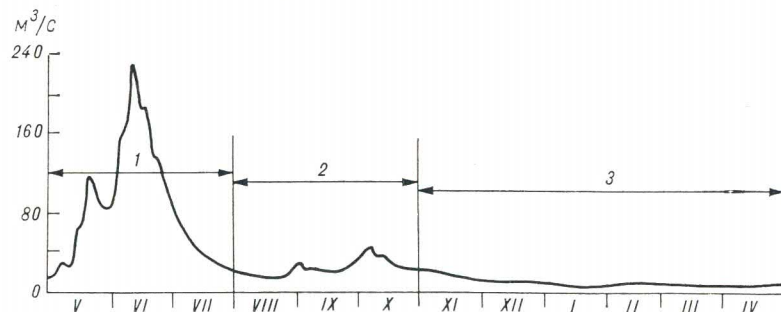


Рис. 9. Выделение на гидрографе многоводного (1), маловодного (2) и лимитирующего (3) сезонов (р. Кола — 1429-й км ж. д., площадь бассейна 3780 км²).

меженных расходов воды для холодного и теплого периодов, а также расходов воды лимитирующего и маловодного сезонов и лимитирующего периода. Время появления и продолжительность каждой из указанных характеристик устанавливались на основании разработанной автором методики с использованием большого числа гидрографов рек СССР, а также сведений о климатических и гидрогеологических условиях различных районов. При этом в полной мере учитывались работы, осуществленные в этом направлении Андреевым [9, 11, 13], Кузиным [99], и материалы справочников «Ресурсы поверхностных вод СССР». Все это позволило выделить на территории СССР районы с различными сроками наступления и окончания указанных выше периодов и определить основные виды питания рек в эти периоды.

Гидрологические сезоны весьма тесно связаны с климатическими. Их сроки и продолжительность находятся в непосредственной зависимости от хода основных метеорологических элементов и начала и окончания климатических сезонов. Так, зимний период на реках наступает с появлением устойчивых отрицательных температур воздуха, что ведет к образованию льда на реках

и прекращению поверхностного стока на их водосборах. Летний сезон обычно совпадает с окончанием весеннего половодья и началом меженного периода. Все это связано с географической широтой местности и характером атмосферной циркуляции, что обуславливает наличие географической зональности в распределении основных гидрометеорологических характеристик по территории. Однако особенности циркуляции атмосферы, орография местности (формы рельефа, высоты, экспозиция склонов) и удаленность от морей и океанов вносят значительные изменения в характер и продолжительность сезонов.

В отдельные годы начало и конец гидрологических сезонов могут не совпасть с соответствующими характеристиками климатических сезонов. Например, летне-осенний меженный период может начаться в мае, а закончиться в ноябре—декабре, поскольку время его наличия в большой степени определяется характером водного режима водотока. Поэтому, например, весеннее половодье, закончившись в первой декаде мая, обусловит начало летней межени в это же время, хотя по климатическим условиям это будет еще весенний период для данной территории. Следует отметить, что назначение дат климатических сезонов является в известной мере условным, поскольку на самом деле процесс смены сезонов занимает некоторый промежуток времени, в течение которого совершаются существенные изменения в климатических процессах и водном режиме территорий.

Целесообразно рассмотреть временные характеристики маловодного периода, разделив их на две группы: периоды, сроки которых определяются водным режимом рек, — меженный и минимальный периоды; периоды, сроки которых принимаются постоянными во времени и пространстве без должного учета водного режима рек, — лимитирующий и нелимитирующий сезоны.

3.2. МЕЖЕННЫЙ И МИНИМАЛЬНЫЙ ПЕРИОДЫ

Меженный период наблюдается на реках СССР в зимний и летний или летне-осенний сезоны. В зимний сезон он начинается с момента появления ледяных образований на реках, а при их отсутствии — с даты устойчивого перехода температуры воздуха к отрицательным значениям, с учетом окончания осенних паводков, если таковые наблюдались. Окончание зимнего меженного периода совпадает с моментом начала резкого увеличения расходов воды в русле реки в результате начала весеннего снеготаяния. В отдельные годы в некоторых районах зимние паводки, образующиеся при оттепелях, могут переходить непосредственно в весеннее половодье. В этом случае начало таких паводков принимается за окончание зимней межени.

Летний меженный период начинается с даты окончания весеннего или весенне-летнего половодья и заканчивается при

начале осенних паводков или начале зимнего периода в случае отсутствия этих паводков. Последнее приводит к образованию летне-осенней межени.

Обильные летние осадки могут создавать паводочную волну в летний сезон, вследствие чего меженный период может наблюдаться лишь осенью.

Достаточно подробное описание способов выделения меженных периодов при различном водном режиме рек, разработанных автором, приводится в работе [40].

Период, имеющий продолжительность меньше 10 суток, нецелесообразно принимать за меженный, поскольку время добегания паводочных вод до замыкающего створа на средних реках обычно находится в этих пределах, и это следует учитывать, чтобы избежать включения в меженный период значительных паводков. Естественно, что полностью избежать включения поверхностных вод в формирование меженного стока далеко не всегда возможно. В меженный период попадают небольшие паводки или их части, особенно в многоводные годы или в районах с частыми дождями летом или оттепелями зимой. Подобное же происходит на реках со значительной регулирующей способностью водосбора, а также на горных реках с разными сроками наступления межени в верхней и нижней частях бассейна.

В связи с ограничением меженного периода по наименьшей длительности и генезису не представляется возможным выделить этот период на реках, имеющих паводочный режим в течение всего климатического сезона. Например, реки Крыма и Западного Кавказа в зимний сезон, реки бассейна Охотского моря в летний сезон имеют ярко выраженный паводочный режим, особенно в многоводные годы.

Начало и конец меженного периода определяются не только климатическими факторами (осадки, температура воздуха и пр.), в значительной мере, они зависят от типа реки — равнинная, горная или озерная, размеров водосбора и длины реки, густоты речной сети. Чем больше река и гуще речная сеть на водосборе, тем большая разница будет наблюдаться в датах начала и конца межени на главной реке и ее притоках. В замыкающем створе главной реки длительность меженного периода в определенной мере зависит от продолжительности и величины паводков на притоках и степени их распластывания за время добегания к замыкающему створу. Вместе с тем увеличение размеров водосбора ведет к росту возможности одновременного выпадения дождей на него, а при длительном времени добегания вод к замыкающему створу происходит наложение паводков притоков в русле главной реки, образующих паводочную волну. Поэтому, а также вследствие увеличения регулирующей способности водосбора (с увеличением размеров водосбора увеличивается число различного рода понижений, развивается пойма и пр.)

в летний сезон на больших по величине реках наблюдается запаздывание начала меженного периода и продолжительность межени на средних реках обычно меньше, чем на малых.

Малые реки наиболее чувствительны к изменению метеорологических условий. Их водосборы не обладают такой аккумуляющей способностью, как средние, а тем более большие реки. Формирующиеся на них паводки четко выражены и следуют непосредственно за выпавшим дождем. Граница между паводками и меженью прослеживается обычно достаточно ясно.

При отсутствии паводков меженный период на малых реках начинается раньше, чем на средних, а тем более на больших. Дата его начала для конкретной реки определяется длительностью периода половодья. На малых реках оно заканчивается раньше, чем на средних, вследствие малой регулирующей способности бассейна и небольшого времени добегания поверхностных вод до русла реки. По мере увеличения реки возрастают и указанные характеристики, что приводит к увеличению длительности половодья. Естественно, что на это влияют еще такие важные факторы, как дружность снеготаяния данного года, состав почво-грунтов бассейна, степень промерзания почв и пр.

Зимний меженный период начинается тем позднее, чем медленнее происходит спад осеннего паводка, а поскольку на малых реках этот спад происходит быстрее, чем на средних, то и зимняя межень начинается на малых реках раньше (при равных климатических условиях).

Неравномерное выпадение на водосбор реки дождей, образующих паводки, обуславливает различие в продолжительности меженного периода на ее отдельных притоках. Этому же способствует разница в характере подстилающей поверхности. Облесенные участки или участки, сложенные хорошо проницаемыми почво-грунтами, будут поглощать основную (или всю) часть выпавших осадков, не формируя паводков. Слабо проницаемые породы и значительные уклоны местности, наоборот, способствуют формированию паводков. Поэтому в бассейнах рек с различной орографией местности будет наблюдаться заметная разница в датах начала и конца меженного периода на притоках, протекающих по равнинной и возвышенной, облесенной и безлесной местности и т. п. Особенно большое различие наблюдается в крупных речных бассейнах. Правда, для них добавляется еще влияние географической широты местности, т. е. влияние зональности климата. Большая река, текущая в меридиональном направлении, имеет различные сроки наступления меженного периода в верховьях, среднем и нижнем течении определяющиеся местными климатическими условиями. Однако впадение крупных притоков, протекающих в широтном направлении и имеющих по бассейну иные физико-географические условия, может вносить заметные коррективы в сроки начала и конца межени.

В западных и юго-западных районах СССР в зимний сезон довольно часто наблюдаются оттепели, в результате чего на реках формируются различной величины паводки. Но поскольку температурные изменения охватывают большие площади, то разница в продолжительности периодов межени будет наблюдаться главным образом на средних и больших реках, имеющих заметное различие во времени добегания поверхностных вод до замыкающего створа.

Неодновременность наступления меженных периодов на реках одного района и зависимость дат начала и конца межени от размеров реки довольно ясно прослеживается по данным табл. 5.

Бассейны озерных рек имеют наибольшую регулируемую способность, поэтому либо начало меженного периода на озерных реках значительно задерживается, либо меженный период вообще не выделяется в летне-осенний сезон. В табл. 6 приведены сведения о среднемноголетней продолжительности межени для двух пар рек севера ЕТС, находящихся в одних климатических условиях. Отчетливо видна разница в начале и окончании меженного периода озерной и неозерной рек. Начало летней межени на озерной реке наблюдается всегда позже, чем на неозерной, в силу вышеуказанных причин. При этом чем ближе замыкающий створ к озеру, тем длительнее задержка в дате начала межени. Продолжительность этой задержки определяется регулирующей емкостью озера при сходстве физико-географических условий бассейнов и их размеров. Окончание летней межени на озерных реках происходит значительно позже, так как поверхностный сток от выпадающих осадков задерживается озером (или озерами). Поэтому в целом продолжительность летней (летне-осенней) межени может быть близка по величине к продолжительности меженного периода неозерной реки.

В зимний сезон при наличии осенних паводков может наблюдаться обратная картина — межень на озерной реке начинается раньше, чем на неозерной, так как осенние паводки задерживаются озером (озерами). При отсутствии осенних паводков разница в начале меженного периода озерной и неозерной рек будет незначительной. Конец зимней межени на той и другой реке наступает в весьма близкие сроки, так как к концу зимы регулирующее влияние озера значительно снижается. В районах с оттепелями в зимний сезон может наблюдаться большое различие в сроках окончания зимней межени озерных и неозерных рек.

Интенсивное развитие карста на значительных участках территории речного бассейна, имеющего хорошую водопоглотительную способность, обуславливает более раннее окончание половодья и паводков, а следовательно, раннее по сравнению с соседними некарстовыми реками начало меженного периода. Конец летне-осенней межени на карстовых реках при наличии осенних

Таблица 5

Продолжительность меженных периодов на реках Северо-Запада ЕТС

Река—пункт	Площадь бассейна, км ²	Летне-осенний меженный период			Зимний меженный период		
		начало	конец	продолжительность, дни	начало	конец	продолжительность, дни
Бассейн р. Мсты							
Мста — д. Березовый Рядок	5 180	24/VI	18/X	111	24/XI	31/III	125
Мста — п. Потерпелы	13 200	29/VI	16/X	97	29/XI	28/III	115
Мста — с. Бор	16 900	1/VII	11/X	88	4/XII	27/III	109
Мста — д. Девкино	22 500	3/VII	7/X	77	5/XII	27/III	106
Мста — д. Бахариха	550	7/VI	10/X	113	7/XII	4/IV	115
Хуба — д. Ольховец	323	30/V	18/X	122	26/XI	1/IV	92
Бассейн р. Ловати							
Ловать — д. Узкое	398	9/VI	27/X	133	1/XII	31/III	123
Ловать — г. Великие Луки	3 270	13/VI	29/X	135	7/XII	26/III	112
Ловать — д. Сельцо	8 230	20/VI	20/X	117	12/XII	28/III	103
Ловать — г. Холм	14 700	20/VI	16/X	107	12/XII	25/III	97
Локня — д. Бородино	398	9/VI	24/X	132	28/XI	30/III	117
Ока — д. Борок	310	1/VI	18/X	116	5/XII	3/IV	115
Редья — д. Чернышево	469	4/VI	19/X	126	9/XII	30/III	109
Большой Тудер — д. Бабяхино	871	3/VI	15/X	113	12/XII	30/III	106

Таблица 6

Влияние озерности водосбора реки на продолжительность меженного периода

Река — пункт	Площадь бассейна, км ²	Озерность, %	Летне-осенний меженный период			Зимний меженный период		
			начало	конец	продолжительность, дни	начало	конец	продолжительность, дни
Ухта — д. Еремино	865	1	16/VI	24/IX	70	4/XII	13/IV	131
Ленина — с. Лядины	321	18	22/VI	10/X	88	6/XI	17/IV	163
Волошка — д. Тороповская	7 040	1	11/VII	18/IX	57	7/XII	11/IV	126
Онега — д. Надпорожский Погост	12 800	7	5/VIII	14/X	68	26/XI	13/IV	139
Онега — д. Череповская	29 500	4	30/VII	28/IX	57	3/XII	16/IV	135
Онега — с. Порог	55 700	3	1/VIII	26/IX	53	10/XII	17/IV	124

паводков наблюдается обычно позже, чем на некарстовых, так как значительное количество выпадающих осадков поглощается карстом и осенний паводок формируется с опозданием. Зимняя межень на карстовых реках начинается раньше по той же причине, что и летняя, а заканчивается приблизительно в те же сроки, что и на некарстовых реках, поскольку процессы, формирующие весеннее половодье, протекают весьма интенсивно и охватывают большие территории. Правда, при медленном развитии половодья может наблюдаться запаздывание его начала на карстовых реках, что ведет к удлинению зимнего меженного периода.

В горных районах, особенно со значительными отметками высот (выше 1500 м), развитие меженного периода происходит иначе, чем на равнине; наиболее заметно это в теплый сезон. С увеличением высоты водосбора возрастает количество выпадающих осадков, удлиняется период паводков, а в увлажненных областях, особенно находящихся под влиянием муссонного климата, паводочный период продолжается почти все лето. Поэтому в горной части речного бассейна межень приходится чаще всего на конец лета и осень, когда резко уменьшается количество выпадающих осадков и прекращается таяние снежников и ледников. Последние, например в высокогорных районах Средней Азии, создают на реках столь высокий сток, что выделить меженный период часто не представляется возможным.

Таким образом, реки полугорного типа, начинающиеся в горах и заканчивающие свое течение в предгорье или на равнинной местности (реки Северного Кавказа, Средней Азии, Саян и др.) имеют меженный период в верхней части бассейна в конце

летне-осеннего сезона, а в нижней (равнинной или относительно равнинной) части бассейна этот период наступает обычно раньше, так как дождей здесь выпадает значительно меньше, а формирующиеся в горах паводки по мере добегания до равнины сильно распластываются и становятся мало заметными. Исключение составляют реки, получающие основное питание в летний сезон от ледников.

По мере увеличения высоты местности длительность летне-осеннего меженного периода сокращается за счет отодвигания сроков начала межени ближе к осеннему сезону. В отдельные годы сроки появления летнего меженного периода на реках, протекающих по горной и примыкающей равнинной части, могут вообще не совпадать. Например, в верховьях рек маловодье может наблюдаться в начале лета, а в низовьях — лишь в его конце, когда на большей части водосбора не выпадает осадков. Формирующиеся в этом случае в верховьях рек дождевые паводки являются небольшими и по мере добегания к главной реке значительно или полностью распластываются. Чаще всего такая картина наблюдается на средних и больших реках (Кубань, Терек и др.).

В зимний сезон в горных районах (в зоне холодного климата) устойчивые отрицательные температуры воздуха наступают раньше и поэтому зимний меженный период также начинается несколько раньше, чем на равнине.

На основе методики выделения меженных периодов, разработанной автором в 1962 г., были определены сроки меженных периодов на реках СССР и автором составлены карты районов со средними сроками начала и конца межени. Как уже отмечалось, даты начала и конца межени несколько колеблются по данной территории, поэтому средние сроки по району округлялись до декады. Продолжительность меженного периода для каждого пункта определялась от даты начала до даты конца межени. Если межень была прерывистой, то длительность отдельных частей суммировалась. В последующем эти данные осреднялись по району.

При определении наиболее вероятных сроков начала и конца меженных периодов на реках конкретного района основное внимание обращалось на данные средних рек. За осредненное по району начало межени принималась наиболее часто встречающаяся декада месяца или весь месяц, если начало межени изменялось сравнительно равномерно в течение месяца. Подобным образом устанавливался и конец межени. Районы с различными сроками начала и конца меженного периода являются довольно обширными, поскольку основное влияние на ход межени и ее продолжительность оказывают климатические факторы (осадки, испарение, температура воздуха), а также и гидрогеологические условия территории. При отсутствии осадков величина меженного стока определяется величиной подземного питания рек. Поэтому

чем она меньше, т. е. чем неблагоприятнее гидрогеологические условия, тем быстрее наступит полное истощение стока в реке и будет наблюдаться пересыхание или перемерзание реки. В случае выпадения осадков летом или осенью или повышения температуры воздуха до оттепельной зимой возникают паводки, прерывающие меженный период, поскольку в него, согласно существующим рекомендациям [40], не включаются паводки, если объем каждого из них превышает 10—15% величины объема стока за меженный период, предшествующий этому паводку или следующий за ним. Таким образом, при наличии значительных паводков на гидрографе реки меженный период становится прерывистым. Если же продолжительность меженного периода находится в пределах 10—30 дней, то он к тому же считается коротким.

Учитывая изложенное, не следует ожидать совпадения фактической продолжительности меженного периода с календарной, т. е. с той продолжительностью, которая заключается между принятым началом и концом меженного периода без учета его прерывистости. Последняя обычно отмечается при описании характера межени. Например, в летний сезон в Забайкалье наблюдаются короткие или прерывистые меженные периоды, причем в различные месяцы. Поэтому за начало межени принимается месяц, в который эти периоды чаще всего начинаются, а за конец — месяц, когда они в основном заканчиваются.

Получается, что летний меженный период на реках Забайкалья начинается в июне и заканчивается в августе, но фактическая его продолжительность не три месяца, а в среднем всего 35—40 дней. В связи с этим необходимо рассмотреть изменение характера меженного периода по территории в летне-осенний и зимний сезоны.

Летне-осенний меженный период. В летне-осенний сезон начало меженного периода на реках СССР закономерно смещается с юга на север. Наиболее раннее начало межени (по средним данным) наблюдается в апреле на юге ЕТС и Западной Сибири, а самое позднее — в августе на севере АТС и даже в сентябре в Саянах, где сказывается уже влияние вертикальной зональности. Время окончания межени изменяется по территории значительно слабее, причем в обратном порядке. Наиболее раннее из средних окончание межени наблюдается на севере ЕТС в октябре, а позднее — на юге в ноябре. Такая же картина свойственна и АТС, исключая горные районы.

Подобное распределение по территории сроков начала и окончания летне-осеннего меженного периода в целом совпадает с распределением климатических сезонов [106]. Летний сезон на юге ЕТС наступает в середине мая, а на севере — в начале июля. Осень заканчивается на севере в октябре, на юге — в декабре. Причем сроки климатических сезонов довольно плавно изменяются по территории. Естественно, что речь идет о средних сро-

ках, поскольку в отдельные годы они будут отличаться не только по времени, но и в распределении по территории для отдельных районов.

Границы, разделяющие районы на рис. 10, в известной мере условны, так как сроки меженного периода зависят, как уже указывалось, от климатических факторов, особенно для средних рек, и поэтому изменяются по территории довольно плавно. В табл. 7 приводятся сведения об основных характеристиках меженных периодов для средних рек в различные по климатическим условиям года.

В экстремные годы (маловодные или многоводные) наблюдается существенное отличие временных характеристик межени от их средних величин. К тому же в каждом районе имеются свои особенности. Поэтому необходимо подробнее рассмотреть изменение основных меженных характеристик во времени и по территории для каждого района.

Сведения, приведенные в табл. 7, могут быть использованы для предварительной оценки сроков и продолжительности летне-осеннего меженного периода в различных районах СССР. Используя данные таблицы, следует помнить, что время, показывающее начало и конец для ранних и поздних сроков межени, является самостоятельным, невзаимосвязанным в каждом случае, т. е. при раннем начале межени может быть поздний ее конец, а при позднем начале — ранний конец. Последнее свойственно многоводным летне-осенним сезонам, а первое — маловодным, засушливым сезонам. Эти сроки, так же как и экстремная продолжительность, определены как средние из крайних, наблюдающихся для данного района.

В районе 1, занимающем самый юг ЕТС и часть Казахстана, отмечается наиболее раннее в Советском Союзе начало летней межени. На притоках Днестра меженный период обычно начинается в середине — конце апреля. Весна на этой территории наступает в конце февраля — начале марта. В середине марта снежный покров полностью сходит, а к середине апреля заканчивается весеннее половодье. В маловодные весенние сезоны начало летней межени сдвигается на начало апреля и даже конец марта, т. е. она становится весенне-летней. На малых реках межень чаще всего начинается в конце марта — начале апреля. При больших снегозапасах, растянутом половодье и выпадении значительных дождей межень может наступить лишь в середине — конце июня.

В бассейнах рек Южного Буга, Днестра (низовья) и на реках Приазовья весна наступает несколько позже — в начале марта. Правда, снеготаяние начинается здесь еще в феврале и заканчивается обычно в середине — конце марта. Половодье длится 1,5—2 месяца, поэтому меженный период чаще всего начинается в конце апреля — начале мая. Позднее его начало нередко приходится на конец июня — начало июля.

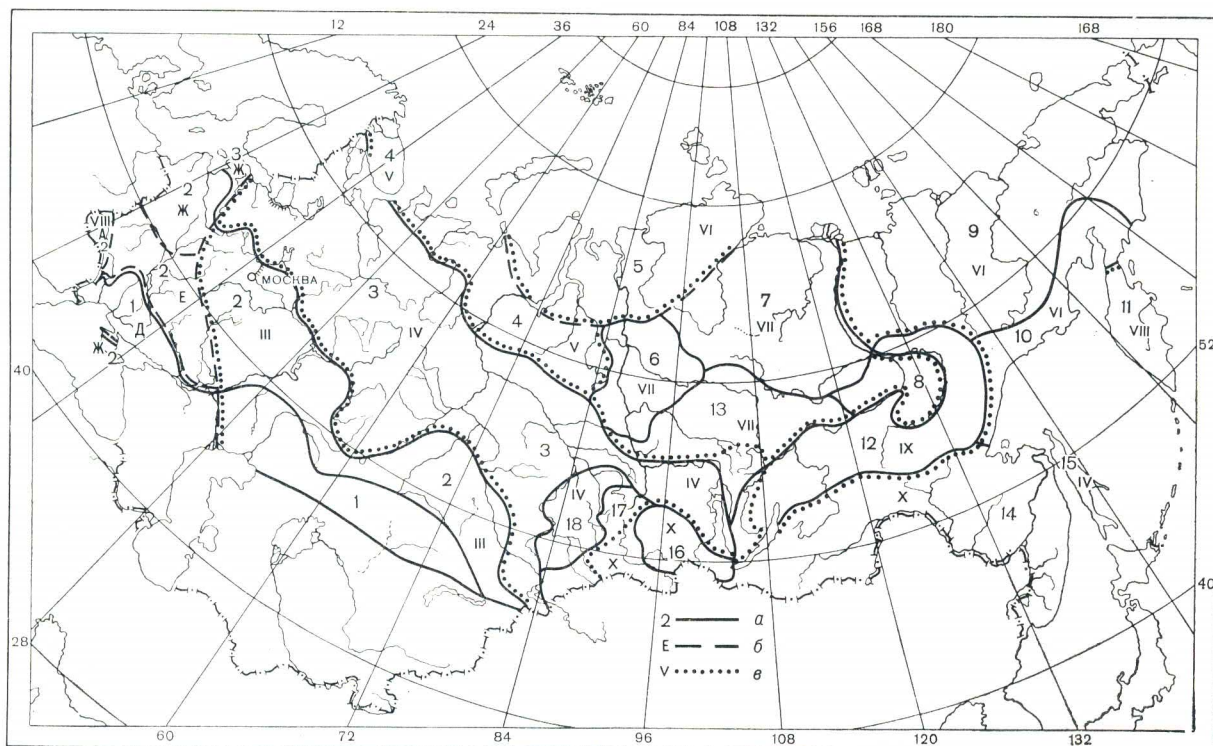


Рис. 10. Сроки основных характеристик маловодного периода в теплый сезон.

a — граница и номер района с близкими сроками меженного периода; *б* — граница и номер района с одинаковыми сроками лимитирующего сезона; *в* — граница и номер района с одинаковыми сроками нелимитирующего (маловодного) сезона.

Таблица 7
Характеристика летне-осенних меженных периодов

Район	Сроки меженного периода (месяц и декада)						Продолжительность меженного периода, дни			Среднее время появления минимального 30-дневного стока
	средний		ранний		поздний		средняя	наименьшая	наибольшая	
	начало	конец	начало	конец	начало	конец				
1	IV _{II, III} —V _I	XI _{III} —XII _I	IV _{I, II}	X	VI _{II} —VII _{II}	XII _{II}	100—140	60	230	VIII—IX
2	V _{II, III} —VI _{II}	X—XI	IV _{III} —V _I	VIII	VII _{II} —VIII	XII _{II}	80—120	10—30	200—220	VIII—IX
3	VI _{II} —VII _{II}	IX _{III} —X	V _{II} —VI _I	VIII—IX	VII _{II, III} —VIII _I	XI	60—90	10—20	160—180	VIII—IX
4	VII _{II, III} —VIII _{II}	IX _{II} —X _I	V _{III} —VI _I	VII	VIII—IX	X _{III} —XI _I	50—70	15	160	VII—VIII
5	VIII	IX _{I, II}	VII _{III}	VIII _{III}	IX	X _I	30—50	10	60	VIII
6	VII	VIII	VII _I	VIII _I	IX _I	IX _{III} —X	20—30	10	60—70	VIII
7	VII	IX	VII _I	VIII	IX	X	40—50	10	70	VIII—IX
8	VII	IX	VI _{III}	VIII	IX	X	80—90	20	100	VIII—IX
9	VIII	IX	VIII _I	VIII _{III}	IX _I	X _I	20—30	10	45	VIII—IX
10	VIII	IX _{II} —X _I	VII _{II}	VIII	IX _I	X _{II}	40—50	10	75	VIII—IX
11	VII _{II} —VIII _{II}	X—XI _I	VI _{II}	VIII _{III}	VIII _I	XI _{II}	50—70	30	115	VIII—IX
12	VII—VIII	VIII—IX	VI	VIII	IX _I	X _{III}	35—45	10	50	VIII—IX
13	VII	X _I	VI	VIII	IX	X _{III}	70—90	10	100	VIII—IX
14	VI	X _{II}	V	VIII	IX	XI _I	20—30	0	40	V—VII, X
15	VI _{III} —VII _{II}	IX	VI _I	VIII	VIII—IX	X	30—40	0	130	VII—VIII
16	IX	X	VIII _{III}	IX _{III}	IX _{II}	X _I	25—35	0	45	X
17	VIII	X	VII _{III}	IX _{II}	VIII _{III}	XI	40—60	10	80	VIII—IX
18	VII	X	VI _{III}	VIII _{II}	VIII _{II}	XI _I	60—70	10	100	VIII—IX

На реках Казахстана, относящихся к району 1, начало летней межени наблюдается в среднем в конце апреля — середине мая. Весна на этой территории наступает в конце марта — начале апреля и имеет несколько меньшую продолжительность, чем на реках Причерноморья.

Окончание меженного периода на реках района 1 происходит довольно дружно и относится к концу ноября — началу декабря.

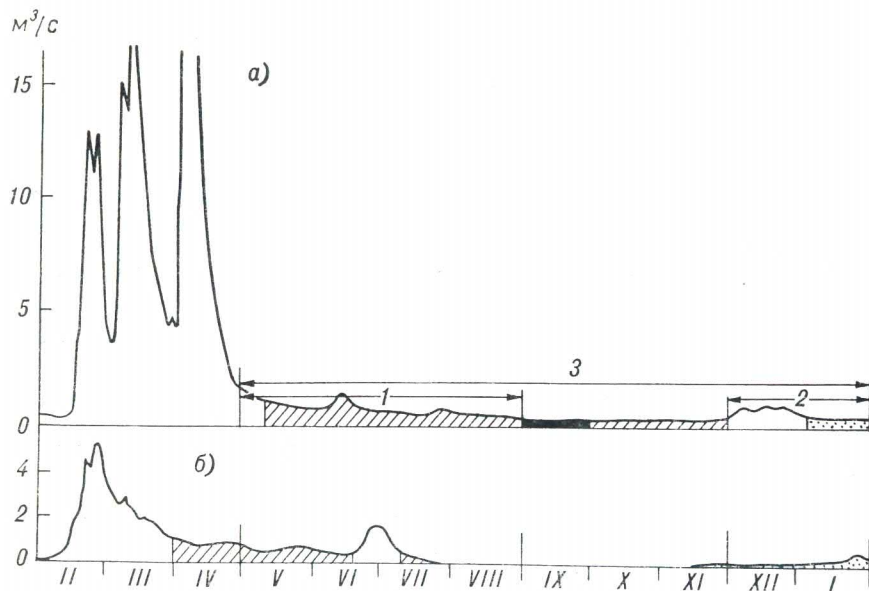


Рис. 11. Гидрограф р. Кодымы у с. Катеринки в многоводный (а) и мало-водный (б) годы.

Условные обозначения см. рис. 1.

Более позднее окончание характерно для рек Причерноморской низменности.

Таким образом, на реках рассматриваемого района наблюдается длительная летне-осенняя межень. Ее продолжительность составляет в среднем 100—120 дней в бассейнах рек Днестра и Южного Буга. Для рек низовий Днепра (Ингулец, Самара и др.) средняя продолжительность увеличивается до 140—170 дней, а на реках Приазовья — до 160—190 дней. Наибольшая продолжительность летне-осенней межени отмечается в маловодные засушливые годы, когда она может длиться 200—220 дней, увеличиваясь до 230 дней на малых реках. В многоводные годы часто выпадают дожди и меженный период становится прерывистым и значительно сокращается — до 80—60 дней для многих рек района 1. На рис. 11 показаны примеры летне-осеннего

меженного периода, характерные для рек района 1 в различные по водности годы.

Следует отметить, что применительно к низкому стоку понятия «многоводный», «маловодный» или «средний по водности год» в случае оценки их по величине среднего за год расхода воды не всегда приемлемы. Для условий формирования, например, меженного стока основное значение имеет величина соотношения поверхностных и подземных вод, участвующих в питании рек в этот период. Чем чаще и продолжительнее выпадают дожди, тем значительно нарушается меженный период (становится прерывистым, сокращается). При этом величина меженного стока в такой год, как правило, очень большая, т. е. в отношении летне-осеннего меженного стока год является многоводным. Однако водность года в целом определяется в основном объемом весеннего или весенне-летнего половодья: чем оно больше, тем год многоводнее. Поэтому в средний по водности год, определяющийся половодьем, летне-осенняя межень может быть многоводной и, следовательно, в таком случае понятие «многоводный год» характеризует водность не года в целом, а лишь рассматриваемого сезона. Так, гидрограф р. Кодымы (рис. 11) для среднего по водности года в летне-осенний сезон имеет водность, значительно превышающую среднюю водность межени.

Как уже отмечалось, на продолжительность меженного периода большое влияние может оказать хозяйственная деятельность человека. Например, сброс в реки Кальмиус и Миус шахтных и промышленных вод отодвигает начало летней межени с мая на август, сокращая почти вдвое продолжительность межени. Естественно, что при осуществлении обобщений учитывать подобные данные нельзя.

Водность рек в период летне-осенней межени в районе 1 весьма незначительная. Большинство малых рек пересыхает на длительное время вследствие того, что их питание в рассматриваемый период осуществляется преимущественно подземными водами. Обводненность водоносных горизонтов невелика, глубина залегания большая, и поэтому они могут дренироваться лишь достаточно большими реками. Относительно высокий сток имеют реки, стекающие с Донецкого кряжа, питание которых осуществляется трещинными водами, заключенными в известняках карбона.

Период наименьшего стока продолжительностью 30 дней, т. е. минимальный 30-дневный сток, на реках рассматриваемого района наступает, как правило, в августе, иногда сдвигаясь на середину — конец месяца и захватывая, таким образом, и сентябрь. В этот период наступает наибольшее истощение речного стока, в результате чего наблюдается максимальное количество пересыхающих рек. Тогда же наблюдается и минимальный суточный сток. Однако в целом за многолетие минимальные

30-дневные и суточные расходы воды могут наступать в различные месяцы летне-осенней межени (с июня по октябрь), что определяется водностью теплого сезона и сроками выпадения дождей, формирующих сток. Если дожди выпадают преимущественно в первой половине лета, то наибольшее истощение речного стока происходит в конце лета — начале осени. Выпадающие осенью осадки увеличивают речной сток, даже не создавая паводков, поэтому в конце осени его величина обычно больше, чем в начале.

Обратная картина наблюдается, если дожди идут преимущественно во второй половине лета. Правда, в этом случае, особенно при позднем окончании половодья, речной сток не успевает истощиться в большой мере и величина минимального 30-дневного стока бывает относительно большой. Понятно, что наименьшие значения она имеет при продолжительной и устойчивой межени, когда питание рек осуществляется только за счет глубоких грунтовых вод.

По мере продвижения к северу от района 1 отмечается все более позднее начало летней межени, что соответствует ходу смены климатических сезонов. Объединяя реки с разницей в сроках начала меженного периода в пределах одного месяца (по продолжительности, но не по календарю) в один район, получаем район 2.

Район 2 расположен севернее района 1 и вытянут в широтном направлении. Его северная граница проходит по естественным природным рубежам: вначале идет по водоразделу между бассейнами Финского залива и р. Западной Двины, затем огибает с севера наиболее высокую часть Валдайской возвышенности и далее по левобережью рек Волги, Камы и Уфы с юга огибает Уральские горы, поднимается на северо-восток по правобережью р. Тобола и, поворачивая на восток, уходит в юго-восточном направлении к Алтаю, оконтуривая лесостепную зону. Таким образом, если в район 1 включена в основном степная и полупустынная зоны, то в район 2 попадают лесная (зона широколиственных лесов) и лесостепная зоны. Направление границы района 2 совпадает с изолиниями дат наступления летнего климатического сезона [106], приходящихся на конец мая.

В южной части района 2 (бассейны р. Северского Донца и средней части р. Днепра) летняя межень наступает в середине мая, однако наиболее ранние даты ее появления отмечались в начале мая и даже в конце апреля (на малых реках). В западной части района (бассейн р. Западной Двины, верховья р. Днепра, Припяти) летняя межень начинается в конце мая — начале июня, но при дружном половодье отмечается уже в начале мая. В восточной части района (Западная Сибирь) летняя межень, как правило, начинается в конце мая — начале июня. При затяжном половодье и частых дождях меженный период начинается в августе и даже начале сентября. Поэтому на реках этой части

района в зависимости от режима осадков в теплый сезон может наблюдаться либо только летняя, либо только осенняя межень. В целом рекам этой территории свойственна летне-осенняя межень со значительным истощением стока и преобладанием подземного питания рек над поверхностным.

Сходство во времени наступления меженного периода еще не свидетельствует об единообразии условий формирования меженного стока на реках данного района. По виду питания рек в меженный период западная часть района несколько отличается от восточной. Для последней характерна продолжительная и устойчивая межень (особенно в бассейне р. Волги), а на западе она нередко прерывается летними паводками и состоит из двух-трех частей. Наиболее часто такая межень наблюдается на реках, стекающих с Минской, Оршанской и Витебской возвышенностей. В многоводные годы при частом выпадении дождей меженный период становится прерывистым и коротким также и на реках бассейна Западной Двины, особенно на малых реках. Характерные гидрографы рек этой части района показаны на рис. 12а.

На реках горной части района (Карпаты) наблюдаются частые дождевые паводки, обуславливающие повышение летне-осеннего меженного стока и участие в его формировании поверхностных вод. Меженный период в 80% случаев прерывается паводками, причем в 20% случаев паводков бывает от 3 до 6, поэтому отдельные периоды межени непродолжительны, но в сумме они составляют 110—160 дней на реках бассейнов Вислы и Дуная и 60—100 дней в бассейне Днестра. Начало меженного периода значительно изменяется по годам и по территории — от конца апреля до конца августа и даже начала сентября (в дождливые летние сезоны). В среднем в верховьях Днестра межень начинается в апреле—мае, а в бассейне Тисы и Прута — в июне—июле. Окончание межени по всей территории отмечается в ноябре. На рис. 12б показаны характерные гидрографы рек района 2 для различных по водности сезонов.

На реках горной части Крыма меженный период обычно начинается в конце июня — июле после прохождения весенне-летнего половодья, воды которого в значительной степени задерживаются карстом, и поэтому оно растягивается во времени. В маловодные годы межень может начаться в мае и даже конце апреля. Окончание летне-осенней межени чаще всего приходится на ноябрь—декабрь. Нередко она непосредственно переходит в зимнюю межень. В летний и осенний сезоны бывают паводки, прерывающие меженный период. Общая продолжительность межени колеблется от 100 до 180 и даже 200 дней для очень малых рек.

Большей части территории, занимаемой районом 2, свойственно наличие на реках длительного меженного периода, лишь иногда прерываемого паводками. Примеры гидрографов для

различных частей района показаны на рис. 13. Окончание меженного периода обычно наблюдается осенью в октябре, если выпадают значительные дожди, или в конце ноября при их отсутствии. В южной и западной частях района межень может

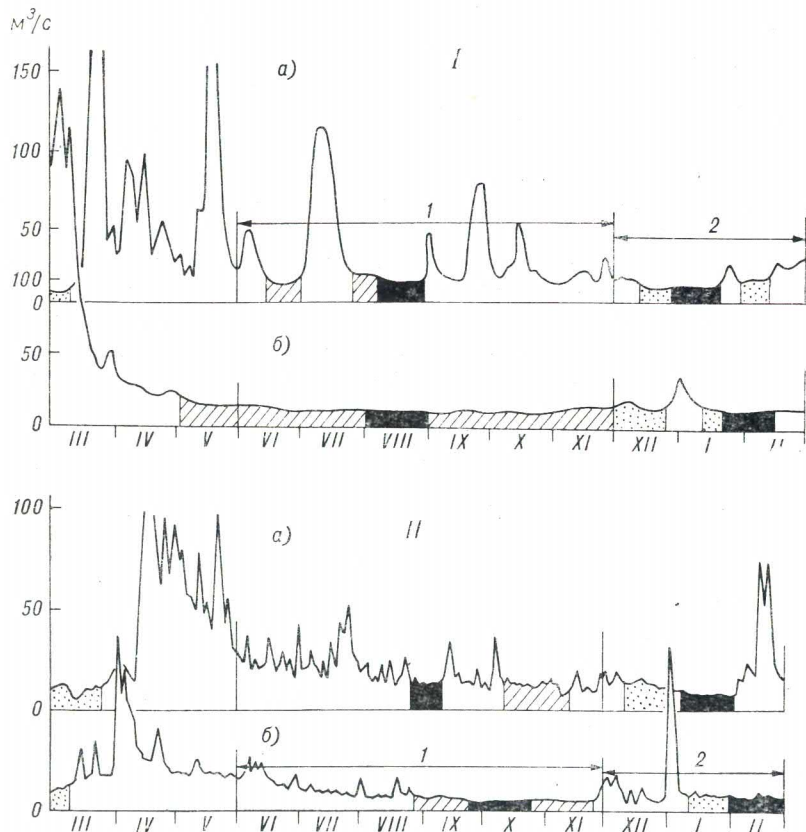


Рис. 12. Гидрографы р. Мусы у г. Бауска (I) и р. Тисы у г. Рахова (II) в многоводные (a) и маловодные (б) годы.

Условные обозначения см. рис. 1.

заканчиваться даже в середине декабря, когда появляются ледяные образования на реках.

Продолжительность меженного периода значительно изменяется как во времени, так и по территории. На западе района вследствие наблюдающегося нарушения меженного периода дождевыми паводками, следующими иногда непосредственно друг за другом, в многоводные годы межень становится весьма короткой — 30—40 дней. Однако в маловодные годы она продолжительная, устойчивая и длится до 120—140 дней. В отдельных

случаях наименьшая продолжительность меженного периода может быть 10 дней, а наибольшая — 220 дней.

На юге и востоке района 2 межень длится в среднем несколько больше, чем на западе, — до 140—160 дней при наибольшей продолжительности 200—210 дней. На малых реках меженный период длиннее, а в случае отсутствия осенних паводков

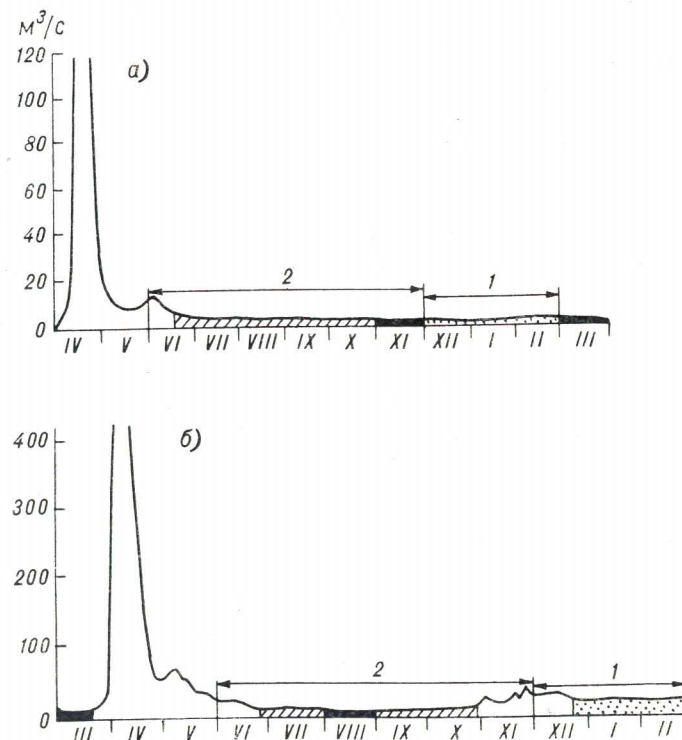


Рис. 13. Гидрографы р. Утвы у с. Григорьевки (a) и р. Цны у с. Княжево (б) в средние по водности годы.

Условные обозначения см. рис. 1.

летне-осенняя межень смыкается с зимней. В многоводные годы меженный период сокращается до 30 дней. В среднем же по территории продолжительность меженного периода в средний по водности год изменяется от 120 дней на юге и востоке до 80 дней на западе. На больших реках межень обычно короче, чем на средних, на 10—20 дней.

Питание рек на основной части рассматриваемой территории происходит за счет подземных вод, поэтому доля меженного стока в годовом невелика и составляет 5—10%, однако на реках западной части района и в многоводные летне-осенние сезоны во всем районе эта доля повышается до 15—20%. Наибольшую

величину меженного стока имеют реки, стекающие с Белорусской гряды, и реки Карпат.

Период минимального 30-дневного стока на основной части рек района наблюдается в августе — начале сентября, лишь в северо-западной части района (верховья Днепра, бассейн Западной Двины) он бывает несколько раньше — в июле — августе. Когда меженный период приходится на осень, минимальный 30-дневный сток отмечается в сентябре и даже октябре, особенно в горной части Карпат.

Р а й о н 3 занимает лесную зону ЕТС. На АТС он опускается несколько к югу, упираясь в Саянские горы. Имеет общее широтное простираие. Северная граница района в основном совпадает с границей распространения многолетнемерзлых пород. Начало меженного периода чаще всего наблюдается во второй половине июня — первой половине июля. Рекам западной и южной частей района свойственно более раннее начало меженного периода, как правило в середине июня, а в северной и восточной частях оно сдвигается на середину июля. На реках Среднего Урала и Зауралья начало межени отмечается в июле и даже первой половине августа (на реках правобережья р. Оби). Это связано с частым выпадением дождей в первой половине лета, создающих значительные паводки на реках.

Окончание меженного периода изменяется по территории значительно меньше, чем его начало, и приурочено обычно к концу сентября — первой половине октября, когда начинаются осенние паводки. Частые осенние дожди на западе района и более раннее наступление зимы в северной и восточной частях района обуславливают несколько более раннее окончание меженного периода, чем в центральной части (бассейны Волги, Камы). В маловодные засушливые годы летне-осенняя межень переходит непосредственно в зимнюю и поэтому ее окончание приходится на ноябрь и даже начало декабря.

В годы с дружным половодьем на больших пространствах и отсутствием дождевых паводков в весенний период начало летней межени наблюдается уже в середине мая (на малых реках). При выпадении обильных осадков в весенне-летний сезон ее начало отодвигается на август. На реках, находящихся под влиянием регулирующей деятельности озер, начало межени запаздывает и тем больше, чем выше регулирующая способность озера. Так, в бассейне р. Онеги летняя межень иногда начинается на 1—1,5 месяца позже, чем на соседних реках, не имеющих на водосборе озер. На озерной реке Суур-Эмайыги межень начинается в июле и даже августе, хотя для рек всего района характерно ее начало в июне.

Карстовым рекам свойственна обратная картина. Начало межени, как правило, отмечается на 10—15 дней и более раньше, чем на соседних некарстовых реках. Например, на реках Осе, Унге, Залари (бассейн Ангара) межень начинается в конце мая,

хотя на остальных реках этого района она чаще всего бывает в июне — июле.

Окончание меженного периода как на озерных, так и на карстовых реках происходит в среднем на 10—20 дней позже, чем на соседних реках, не имеющих на водосборе значительных озер или закарстованных участков. Все это связано с повышенной регулирующей способностью таких водосборов.

Район 3 расположен в основном в зоне избыточного увлажнения. Поэтому здесь наблюдаются годы с очень дождливым летне-осенним сезоном, когда относительно маловодные периоды бывают весьма короткими, так что начало и конец межени могут быть в одном месяце. Наиболее раннее окончание межени в такой год бывает в июле в центральной части района или июне на западе, особенно в Прибалтике.

На больших реках европейской части района межень начинается в начале — середине июля, а на азиатской части (реки Обь, Васюган, Кеть и др.) — в конце августа — начале сентября.

Меженный период на реках района 3 довольно часто является прерывистым и состоит из 2—3 частей и более, особенно в многоводные годы (сезоны). В такие годы его длительность весьма незначительна, а в особо многоводные летне-осенние сезоны выделить меженный период в принятом понимании становится практически невозможно.

Таким образом, при средней продолжительности меженного периода 60—70 дней для рек западной и центральной частей района и 80—90 дней для рек южной и восточной частей в отдельные годы меженный период может иметь продолжительность от 10 дней (многоводный год) до 120—150 дней на северо-западе и 180—190 дней на юго-востоке района (в маловодные годы). На рис. 14 показаны примеры гидрографов в различные по водности годы в западной (реки Великая и Колпь) и восточной (р. Бакса) частях района 3.

На реках Урала продолжительность меженного периода сокращается в среднем до 30—45 дней вследствие частого выпадения дождей. На этих реках отмечается в среднем до 3 паводков в сезон, а в многоводные годы — до 4—6 паводков.

В районах распространения развитого карста меженный период наиболее длительный. На севере района в бассейне р. Северной Двины его продолжительность составляет до 100 дней, на юге в бассейне р. Ай — до 150 дней для средних рек, а малые реки нередко пересыхают на весь летне-осенний сезон.

На реках района 3 меженный сток в летне-осенний сезон формируется главным образом подземными водами, лишь в отдельные многоводные летне-осенние сезоны в его формировании принимают участие и поверхностные воды за счет включения в меженный период небольших паводков или их частей. Доля меженного стока в годовом составляет для большинства рек 5—15%, в отдельные годы до 30%. Для озерных и карстовых рек

она равна в основном 20—35%. Большая доля меженного стока в годовом отмечается на реках северной части района и в воз-

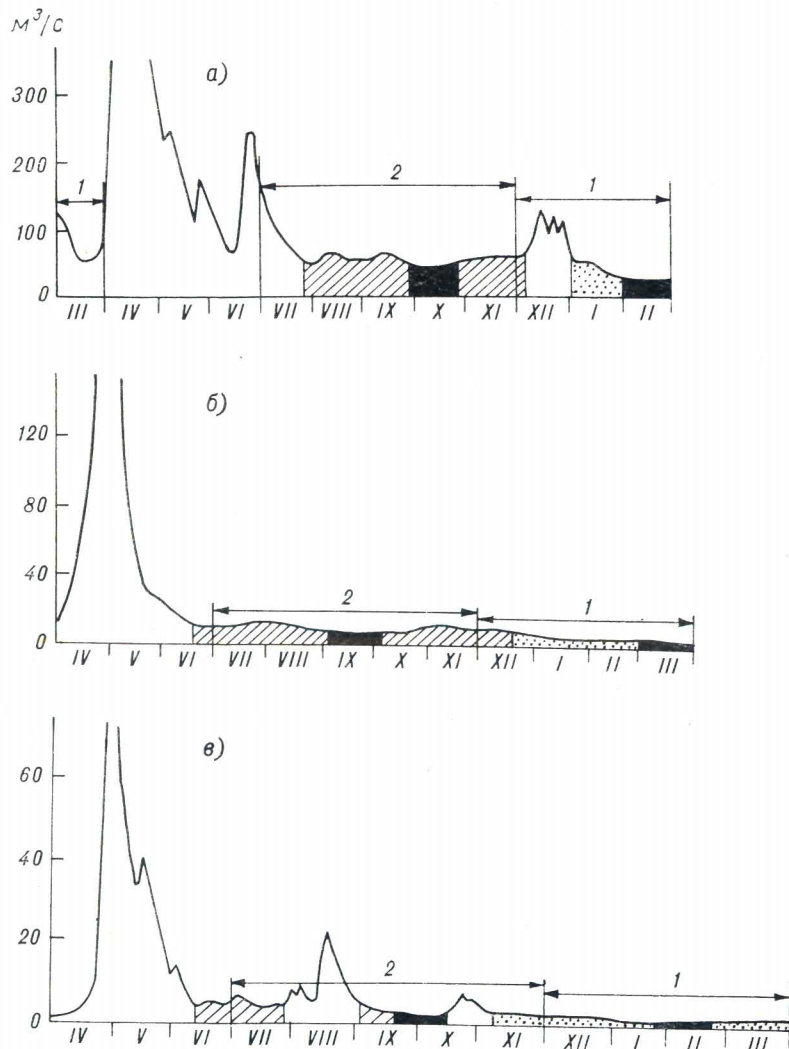


Рис. 14. Гидрографы рек Великой у д. Пятоново (а), Баксы у д. Пиховки (б) в средние по водности годы, р. Колпи у д. Верхний Двор (в) в маловодный год.

Условные обозначения см. рис. 1.

вышенных и горных областях, а также на больших реках. Наибольшую величину летне-осенний меженный сток имеет на реках Урала, на карстовых и озерных реках. В целом водность рек уменьшается с севера и северо-запада на юг.

Наибольшее истощение стока на реках района 3 происходит, как правило, в конце лета — начале осени, т. е. в августе—сентябре, поэтому и минимальный 30-дневный сток наблюдается в это же время. Только в многоводные годы эти сроки могут измениться. На малых реках период минимального 30-дневного стока нередко отмечается раньше — в июле—августе.

Район 4 расположен на севере Европейской территории СССР и частично Западной Сибири. Основная его территория занята тундрой и лесотундрой. Климатические условия этого района весьма суровые. Летний сезон наступает в последней декаде июня, а уже в середине — конце октября приходит зима. Поэтому летне-осенняя межень на реках района наблюдается

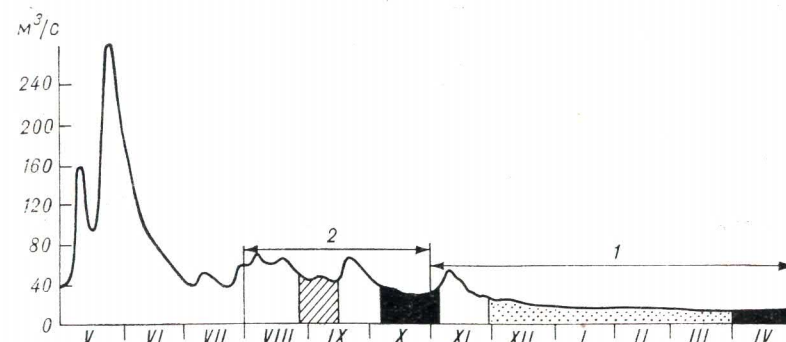


Рис. 15. Гидрограф р. Колы у 1429-го км ж. д. в средний по водности год.

Условные обозначения см. рис. 1.

в середине июля — начале августа. Однако при ранней весне и дружном прохождении половодья ее начало может быть и раньше — в июне, а на малых реках — даже в конце мая. Заканчивается межень обычно в сентябре — начале октября. В отдельные годы при задержке наступления зимнего сезона летне-осенняя межень заканчивается в конце октября — начале ноября, переходя непосредственно в зимнюю межень.

Летне-осенний меженный период, как правило, прерывистый и состоит из двух-трех периодов. Даже в маловодные годы на реках могут наблюдаться 1—2 паводка, прерывающие межень. В зависимости от водности летне-осеннего сезона, количества и объема паводков на реках рассматриваемого района может наблюдаться либо летняя, либо только осенняя межень. В последнем случае ее начало может быть очень поздним — в сентябре. Летняя межень заканчивается в августе и даже июле. На рис. 6 и 15 показаны характерные гидрографы в различные по водности годы для рек с относительно малой (р. Кола, средневзвешенная озерность 0,4%) и большой озерностью бассейна (р. Умба,

средневзвешенная озерность бассейна 11,8%). На озерных реках меженный период наступает, как правило, в конце сезона — в сентябре—октябре. В многоводные годы на таких реках меженный период бывает очень коротким или не выделяется совсем.

Продолжительность летне-осеннего меженного периода на реках района 4 несколько меньше, чем на южнее расположенных реках, и составляет в среднем 50—70 дней. При этом на реках юго-восточной части Кольского полуострова она уменьшается до 35—45 дней, а на реках Северного Урала длится обычно 40—45 дней. В многоводные годы межень сокращается до 10—15 дней, на некоторых реках не выделяется совсем. В засушливые годы продолжительность межени заметно увеличивается — до 70—90 дней на Кольском полуострове и Урале и 100—110 дней на равнинных реках.

Водность межени на реках рассматриваемого района довольно высокая, хотя в целом по району и уступает водности рек района 3. Исключение составляют реки Кольского полуострова, имеющие весьма большую величину стока в меженный период, что связано как с большим количеством выпадающих осадков, так и с наличием значительной доли озерных вод в речном стоке. Поэтому доля меженного стока в годовом составляет 5—20%. Чем большее участие в питании рек принимают воды озер, тем выше доля меженного стока в годовом. В целом по району 4 питание рек в меженный период в основном осуществляется подземными водами, хотя их доля снижается по сравнению с районом 3 вследствие участия вод озер и включения паводочного стока, особенно в многоводные годы.

30-дневный период минимального стока наблюдается обычно в конце июля — августе. На озерных реках или в случае лишь осенней межени этот период бывает в сентябре—октябре.

Район 5 занимает Крайний Север СССР (полуострова Ямал и Таймыр), отличается наиболее суровыми климатическими условиями. Летний сезон наступает в начале — середине июля, а зимний — уже в середине — конце сентября. В гидрологическом отношении этот район почти не изучен, поэтому можно лишь ориентировочно указать, что летне-осенняя межень на реках района начинается в августе и заканчивается в начале сентября. Межень часто прерывается летними паводками от дождей и состоит из нескольких периодов продолжительностью 10—20 дней. Поэтому суммарная ее продолжительность небольшая, в среднем 30—50 дней. На озерных реках меженный период заканчивается значительно позднее — в конце сентября — начале октября и длится до 60 дней. Период минимального 30-дневного стока наступает в основном во второй половине августа.

Расположенный южнее район 6 занимает самую возвышенную часть Среднесибирского плоскогорья и наиболее возвышенную часть Западно-Сибирской низменности. Это отражается на режиме осадков и речного стока. Частое выпадение дождей

сокращает меженный период и делает его прерывистым (рис. 16). Наиболее часто межень наблюдается в июле—августе и продолжается 20—30 дней. Однако в отдельные годы она увеличивается до 60—70 дней и ее конец приходится на сентябрь — начало октября. Наименьшие расходы воды чаще всего бывают в августе.

Север и северо-восток АТС наименее изучены в гидрологическом отношении. Недостаточное число пунктов наблюдения за стоком рек не позволяет осуществить подробное районирование этой территории, поэтому границы выделенных районов в известной мере проведены условно. Для всей этой территории (районы 5, 7, 9) характерна небольшая продолжительность летне-осеннего сезона, частое выпадение дождей, образующих паводки на реках, и, как следствие этого, короткая и прерывистая межень. В формировании меженного стока рек этой терри-

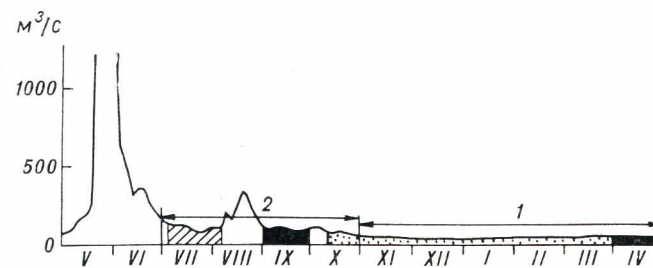


Рис. 16. Гидрограф р. Елогуй у факт. Келлог.

Условные обозначения см. рис. 1.

тории обычно принимают участие поверхностные воды, имеющие, однако, подчиненное значение.

Рассматриваемая территория находится в зоне развитой многолетней мерзлоты, имеющей сплошное распространение. Питание рек в летне-осенний меженный период осуществляется в основном из верхнего водоносного горизонта, заключенного в оттаивающем почвенно-грунтовой слое. Исключение составляют большие и частично средние реки, имеющие подрусловые таликовые участки, сообщающиеся с глубокими межмерзлотными и подмерзлотными водами.

Определенное значение в питании рек в летне-осеннюю межень имеют воды наледей, широко распространенных на Северо-Востоке СССР. Наибольший сток с наледей отмечается в июне—июле. К сентябрю он резко понижается, так как однолетние наледи к этому времени стают полностью. Роль наледных вод в питании рек в летне-осеннюю межень изменяется по годам, завися от времени появления межени (чем раньше, тем большая доля в меженном стоке приходится на наледные воды), от водности года (чем больше осадков, тем меньшее значение имеют наледные воды), от размеров наледей и их количества

(многолетние наледи в большей мере участвуют в питании рек). В целом доля наледного стока в меженном может достигать 10—20%, хотя чаще она колеблется в пределах 3—5% для рек с развитием наледных процессов в бассейне. Естественно, что по своему происхождению наледные воды должны относиться к подземным, поскольку их формирование происходит в зимний сезон за счет подземных вод.

Район 7 располагается в северной и восточной частях Среднесибирского плоскогорья. Начало летней межени в общем по району наблюдается чаще всего в июле — первой декаде августа, а конец — в сентябре. В северной половине района (бассейны рек Анабар, Оленек и др.) меженный период наиболее короткий и длится около 30—40 дней. Это связано с поздним началом межени и ранним ее концом, а также с наличием дождевых паводков. Снежный покров в этой части района сходит лишь в июне, а его образование, имеющее устойчивый характер, отмечается уже в конце сентября, в то время как в бассейне р. Вилюя соответствующие процессы происходят на 20—25 дней раньше (сход снежного покрова) и на 5—10 дней позже (образование устойчивого снежного покрова). Поэтому продолжительность межени в южной части района увеличивается до 50—60 дней. Этому же способствует и то, что наибольшее количество осадков на юге района выпадает в июне—июле, т. е. в весенне-летний сезон, а на севере — в июле—августе. Следовательно, в южной части района период, когда межень нарушается паводками, меньше, чем на севере. На больших реках, например Вилюе, происходит распластывание паводков, так что образуется довольно длительный меженный период, в который дождевые паводки не выражены (рис. 17).

В питании рек района 7 в меженный период, особенно в многоводные годы, значительное участие принимают поверхностные воды. Правда, в низовьях Вилюя их доля заметно уменьшается и основное питание реки получают от подземных вод, вследствие чего меженный сток снижается. Минимальный 30-дневный сток бывает обычно в августе—сентябре.

Район 8 занимает Приленское плато Центральной Якутии. Здесь отмечается наименьшая увлажненность, дожди выпадают в летне-осенний сезон значительно реже, чем в районе 7. Поэтому при сходном с этим районом времени начала и конца летне-осенней межени (июль—сентябрь) ее продолжительность в районе 8 намного больше, в среднем 80—90 дней. В маловодные годы при раннем окончании половодья и позднем начале зимы межень может длиться 100—110 дней, начинаясь в конце июня и заканчиваясь в конце октября. В многоводные годы обычно наблюдается лишь осенний меженный период (сентябрь—октябрь), продолжительность 20—30 дней. На рис. 18 показаны гидрографы рек этого района в различные по водности годы.

В районе 9, занимающем обширную территорию Северо-Востока СССР, летний меженный период начинается позднее, чем в районе 7, в основном в августе, и заканчивается в сентябре — начале октября. В связи с частым выпадением дождей, а также таянием снега в горах в летний сезон здесь наблюдается несколько паводков или их волна. Поэтому продолжительность меженного периода всего 20—30 дней, нередко он приходится на осень, особенно при обильных летних осадках. На реках верхней части бассейна р. Колымы меженный период может

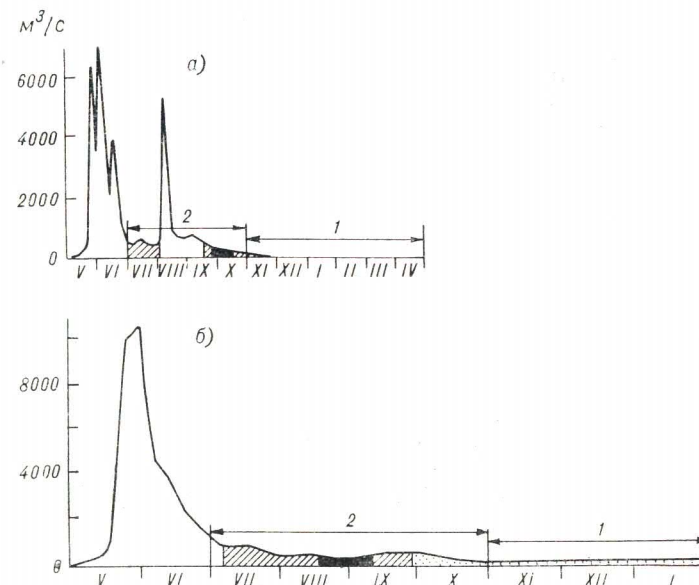


Рис. 17. Гидрографы рек Оленек у с. Оленек (а) и Вилюй у с. Сунтар (б) в средние по водности годы.

Условные обозначения см. рис. 1.

наблюдаться практически одинаково как в летний, так и в осенний и летне-осенний сезоны. Летне-осенний меженный период характерен для относительно засушливых лет, когда отсутствуют осенние паводки. Его продолжительность увеличивается до 35—45 дней. В северной части района продолжительность этого периода меньше, поскольку зимний сезон наступает там раньше на 5—10 дней. На рис. 19 показаны типичные гидрографы рек этого района. Величина летне-осеннего меженного стока небольшая и в среднем не превышает 5% годового стока. Питание рек в межень осуществляется за счет вод, заключенных в сезонно оттаивающем слое почво-грунтов (деятельный слой) и в аллювиальных отложениях под руслами рек, а также подмерзлотных вод (в основном на больших реках) и таяния

наледей. Последние распространены в основном в горных районах.

Период минимального 30-дневного стока наблюдается во второй половине августа — первой половине сентября. Однако в дождливые годы выделить 30-дневный период, в котором отсутствовали бы значительные паводки, практически невозможно.

Реки северной части побережья Охотского моря объединены в район 10. В летне-осенний сезон режим их стока сходен

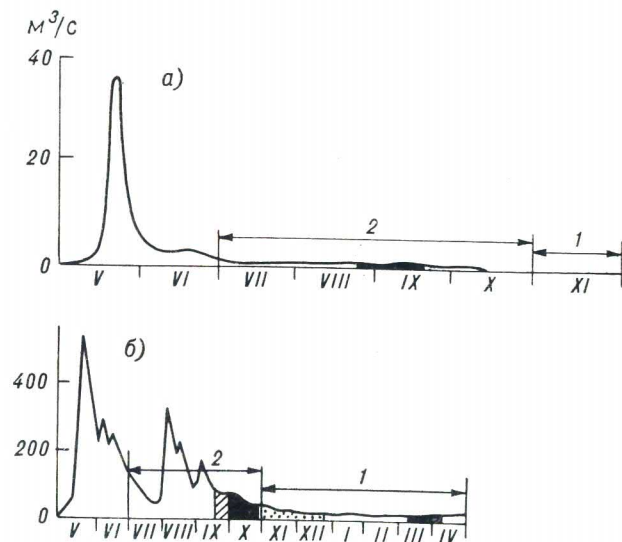


Рис. 18. Гидрографы рек Тамма у м. Ытыраха (а) и Синей у м. Песчаного (б).

Условные обозначения см. рис. 1.

с режимом рек района 9, но продолжительность бездождных периодов в районе 10 несколько больше. Межень начинается в начале — середине августа, а заканчивается в сентябре — начале октября, неоднократно прерываясь дождевыми паводками. Продолжительность ее колеблется от 40 до 75 дней. Чаще всего на реках наблюдается летняя межень, значительно реже — осенняя.

Следует отметить, что сток рек районов 9 и 10 изучен весьма слабо и приводимые сведения, как и границы районов, нуждаются в уточнении по мере накопления данных.

К району 11 отнесены реки Камчатки. Летне-осенний межженный период в среднем по району начинается во второй половине июля — середине августа, а заканчивается в октябре — начале ноября, прерываясь летними паводками. Наибольшую продолжительность межжень имеет на реках севера Камчатки —

до 100—115 дней в засушливые годы, наименьшую — в центре полуострова и на южных реках. В бассейне р. Камчатки межженный период длится 30—40 дней, уменьшаясь в дождливые сезоны до 10—20 дней и увеличиваясь в засушливые до 70—80 дней. Минимальный 30-дневный сток чаще всего бывает с середины августа до середины сентября. Питание рек осуществляется как за счет подземных вод, так и в значительной мере за

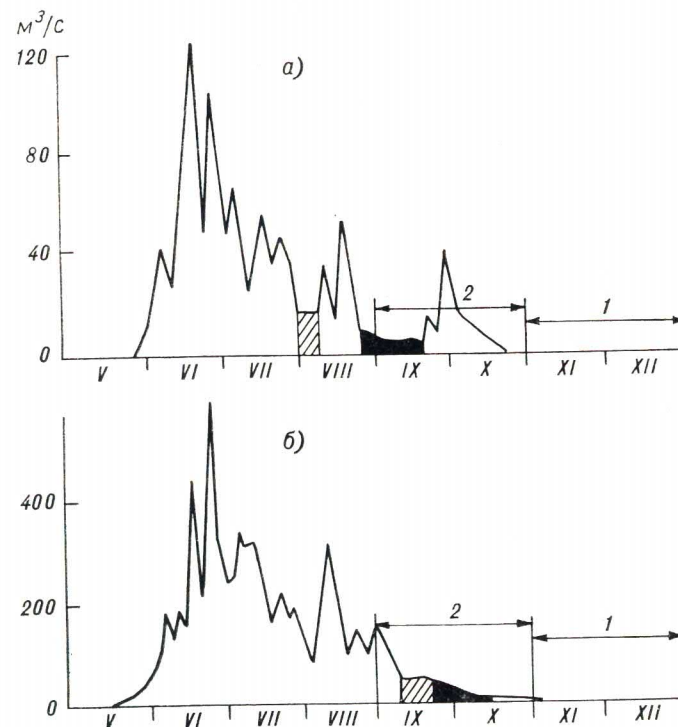


Рис. 19. Гидрографы рек Эбितिэм у м. Эбитем (а) и Чаркы в 3,5 км от устья (б).

Условные обозначения см. рис. 1.

счет поверхностных вследствие включения в межженный период небольших, но частых паводков.

В район 12 выделены Байкальско-Становая горная область и южная часть Верхоянского хребта. Для водного режима рек этого района в летне-осенний сезон характерны частые дождевые паводки, нередко образующие паводочную волну. Межпаводочные периоды непродолжительны и наблюдаются в разное время. В западной части района (реки Лена, Витим, Чара) межженный период чаще всего бывает в августе — сентябре, а в восточной — в июле — августе. Продолжительность его

в среднем 30—40 дней в западной части района и 40—50 дней в восточной. На рис. 20 приведены гидрографы рек, расположенных в верховьях Лены (р. Манзурка) и Алдана (р. Тимптон). В питании рек, помимо подземных, участвуют и поверхностные воды. Особенно заметное участие последние принимают в формировании минимального 30-дневного стока в многовод-

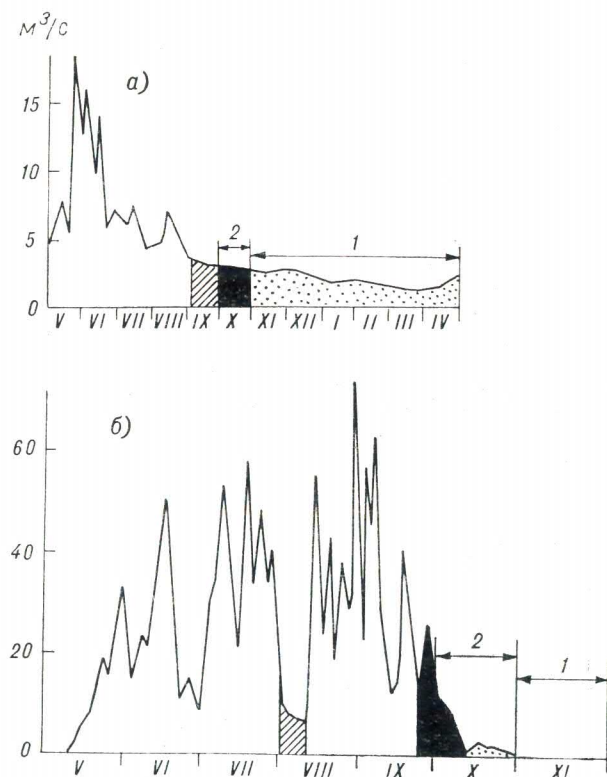


Рис. 20. Гидрографы рек Манзурки у с. Зуева (а) и Тимптон у п. Нагорного (б).
Условные обозначения см. рис. 1.

ные годы. Период этого стока бывает в августе—сентябре и в такие годы сокращается до 25—23 дней.

В районе 13, расположенном в южной части Среднесибирского плоскогорья, меженный период в летне-осенний сезон более длителен и устойчив, чем в районах 7 и 12. Наблюдается с июля по начало октября, хотя в отдельные годы может начинаться как в июне, так и в сентябре, т. е. становится только осенним меженным периодом, а заканчиваться в конце сентября или конце октября. Продолжительность летне-осенней межени

70—90 дней, однако в дождливые сезоны межень нередко прерывается паводками и бывает весьма короткой. Период минимального стока отмечается в августе—сентябре. В многоводные годы в питании рек, наряду с подземными, участвуют и дождевые воды.

В район 14 входит Забайкалье и бассейн Амура. В этом районе наиболее трудно выделить меженный период в летне-осенний сезон, поскольку на реках наблюдается длительный паводочный период. Он начинается во второй половине мая (южная, относительно равнинная часть района) или начале — середине июня (горная часть района) и заканчивается в начале октября (горные районы) или в конце октября (южные территории). В этот период на реках проходят частые паводки (до 5—6 паводков), вызванные муссонными дождями. Наибольшее количество дождей выпадает в июле—августе. Паводки разделяются кратковременными периодами с относительно небольшим стоком (рис. 21 а, б). Меженный период может наблюдаться в любой из летне-осенних месяцев. Чаше он случается в октябре, реже — в августе—сентябре или вообще отсутствует, особенно на средних и больших реках. Межень становится блуждающей во времени. Продолжительность меженного периода на реках этого района небольшая и в сумме составляет в среднем 20—30 дней, увеличиваясь в отдельные годы до 40—50 дней. В междуречье Шилка—Аргунь и других степных районах вдоль Амура (в низовьях Зеи, Буреи, Уссури) меженный период более продолжителен и в засушливые годы достигает 90—100 дней.

Наименьший сток на реках чаще всего наблюдается в июне—июле или октябре, хотя в годы с малоснежными зимами, когда весеннее половодье бывает очень незначительным и быстро проходит, маловодный период наступает весной (в мае) еще до начала летних паводков (рис. 21 в).

Величина меженного стока в летне-осенний сезон очень небольшая и составляет 1—3% годового. В питании рек, помимо подземных, значительное участие принимают поверхностные воды.

Похожий режим стока наблюдается на реках о. Сахалин (район 15). Однако меженные периоды там несколько длиннее и приходятся в основном на июнь—август. Межень прерывистая и состоит из 2—3 периодов и более. В маловодные годы она бывает устойчивой и продолжительной. На малых реках с площадью бассейна до 100—150 км² наибольшая длительность межени 30—60 дней, иногда до 130 дней. На реках с площадью бассейна 200—1000 км² межень обычно длится 20—30 дней и лишь 10—20 дней на реках с большей площадью. Это происходит потому, что на больших по размеру реках отдельные паводки притоков сливаются и образуют различной величины паводочную волну. Осенью наблюдаются значительные паводки, длящиеся до середины октября—начала ноября, поэтому

межень на реках Сахалина в основном летняя. В южной части острова летние и осенние паводки бывают чаще, чем в северной, а межень короче.

Районы 16—18 охватывают горную систему Саян и Алтая. Для этой территории характерно выпадение обильных дождей

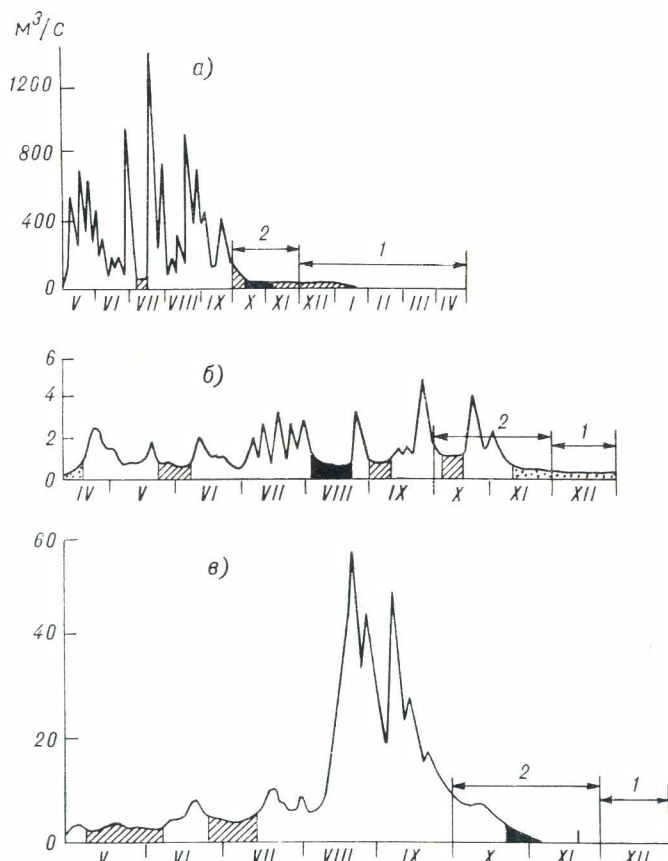


Рис. 21. Гидрографы рек Калакан у с. Калакан (а), Кичмари у ст. Малмыж (б) и Засы у с. Усть-Заза (в).

Усл. обозначения см. рис. 1.

в летне-осенний сезон и пополнение рек водами тающих ледников и снежников. Водный режим рек в большой мере зависит от вертикальной климатической зональности. Наиболее часто дожди выпадают в районе 16, образуя волну летнего паводка (рис. 22 б). С мая по сентябрь выпадает 60—75% годовой суммы осадков. Меженный период на реках этого района обычно наблюдается лишь в конце теплого сезона, в сентябре—октябре, когда резко уменьшается количество дождей. В многоводные

годы межень практически не выделяется. Продолжительность меженного периода невелика, в среднем 25—35 дней, в отдельные годы увеличивается до 40—45 дней. Наименьший сток наблюдается в конце осеннего сезона.

В районе 17 отмечается более раннее, чем в районе 16, окончание летних дождей, поскольку влияние летних муссонов про-

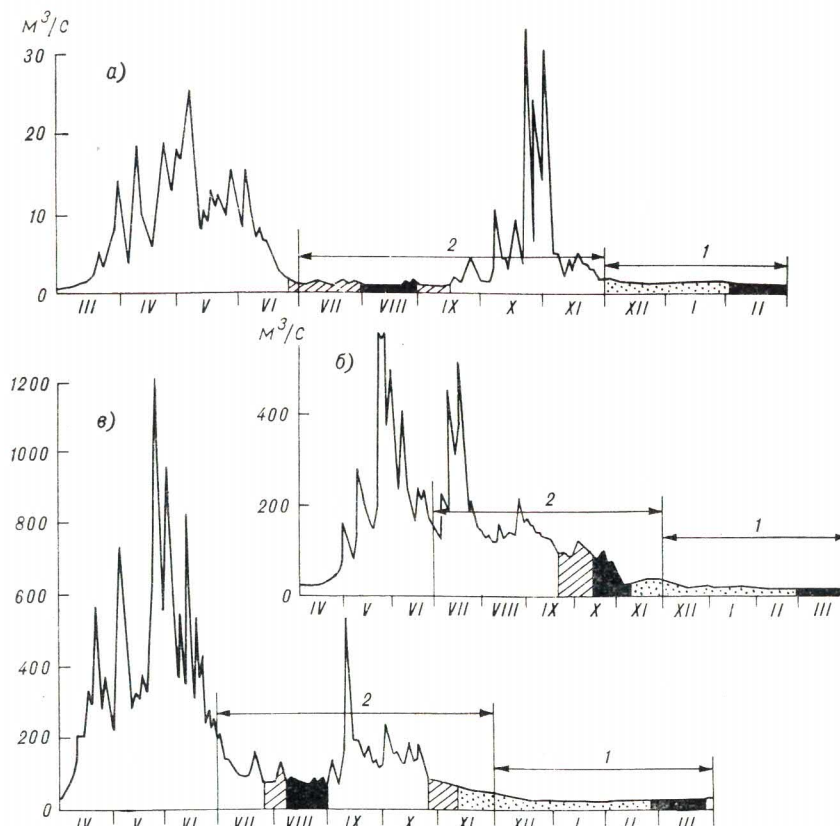


Рис. 22. Гидрографы рек Сержихи у с. Сержиха (а), Тагула у д. Георгиевки (б) и Усы у г. Междуреченска (в).

Условные обозначения см. рис. 1.

является здесь значительно слабее. Межень чаще начинается в августе, однако наименьшие расходы 30-дневной продолжительности, в основном так же, как и в районе 16, бывают в октябре. Средняя продолжительность межени увеличивается до 40—60 дней. Меженный период обычно прерывистый и нередко заканчивается осенью из-за начала осенних паводков. На малых реках межень может начаться в июне и закончиться в сентябре.

Раннее начало межени связано с более быстрым, чем на средних реках, прохождением весенне-летнего половодья, а раннее окончание определяется большей чувствительностью малых рек к дождям. Осадки, не вызывающие заметного увеличения расходов воды на средних реках, образуют паводки на малых (рис. 22 а). К тому же, на водосборы малых рек, расположенные в наиболее возвышенной части района, выпадает большее количество осадков.

В районе 18, занимающем менее возвышенную территорию, чем районы 16 и 17, межень начинается в июле или конце июня и заканчивается в сентябре—октябре перед началом осенних паводков. В многоводные годы она непродолжительна или прерывается паводками (рис. 22 в). Поскольку в этом районе межень является уже летне-осенней, то наибольшее истощение стока происходит в августе—сентябре, когда и наблюдается 30-дневный период минимального стока.

На больших реках, начинающихся в Восточных Саянах (реки Иркут, Ока, Ия, Уда и др.), меженный период наблюдается в основном осенью, в сентябре—октябре, поскольку обильные дожди в горной части их бассейнов поддерживают паводочный режим на протяжении всей реки в течение летнего сезона, хотя в среднем и нижнем течении этих рек количество осадков резко уменьшается вследствие снижения высоты местности. На притоках этих рек, протекающих на территории Приангарья (район 3 на рис. 10), меженный период наступает значительно раньше и имеет большую продолжительность.

Следует отметить, что реки, пересекающие несколько районов, имеют тот характер меженного периода, который формируется на основной части бассейна или же в той его части, которая находится под наибольшим воздействием осадков. Однако озерные и карстовые реки могут не подчиняться этой закономерности.

Зимний меженный период. Для территории СССР характерна плавная смена длительности зимней межени в широтном направлении. Наименьшая по продолжительности зимняя межень наблюдается на юге ЕТС (около 2 месяцев), а наибольшая — на севере СССР (в среднем 7—8 месяцев). В зимний сезон влияние климатических факторов на режим речного стока проявляется значительно меньше, чем в летне-осенний сезон, поэтому различие в сроках и характере меженного периода становится заметно только на больших пространствах. Вследствие этого на территории СССР в зимний сезон выделяется в два раза меньше районов, чем в летне-осенний сезон. Основные характеристики зимнего меженного периода приводятся в табл. 8, границы соответствующих районов показаны на рис. 23.

Район 1 расположен на крайнем юге ЕТС. Зима на этой территории начинается в декабре и длится по февраль включительно. В зимний сезон нередко оттепели, в результате которых

Таблица 8

Характеристика зимних меженных периодов

Район	Сроки меженного периода (месяц и декада)						Продолжительность меженного периода, дни			Среднее время появления минимального 30-дневного стока
	средний		ранний		поздний		средняя	наибольшая	наименьшая	
	начало	конец	начало	конец	начало	конец				
1	XI _{III} —XII _{II}	II _{I, II}	X _{III} —XI _I	I	XII _{III} —I _I	IV _I	60—70	10—15	130	I
2	XI _{II} —XII _{I, II}	III _{II, III}	X _{III}	II	I	IV	80—100	40—50	160	II—III
3	XII	III	XI _{III}	II	I	IV	40—60	20	90	III—II
4	XII _{III} —I _I	III	XI _I	II _{III}	II—III	IV _{II}	60—80	15	100	II—III
5	XI _{III} —XII _I	III—IV _I	X _{III}	III _I	XII _{III}	IV _{II}	120—140	60	180	II—III
6	XI	IV	X _{III}	III	XII	IV—V _I	140—160	60	200	III—II
7	X _{II, III}	IV _{III} —V _{I, II}	IX _{III}	III _{III} —IV _I	XI _{III}	VI _I	190—210	150	250	III—IV
8	X	III _{III} —IV _{II}	X _I	III	XI	V	170—190	150	210	III—IV
9	X _{III} —XI _{II}	III _{III} —IV _{III}	IX _{III}	III _{III}	XII _{II}	V	140—160	120	200	II—III
10	XI _{II} —XII _I	III _{II} —IV _I	X	III _{II}	I _I	IV _{III}	120	80	180	II—III
11	X _{III} —XI _{II}	IV _{II} —V _I	X _{II}	IV _I	XII _I	V _{II}	160—180	150	190	III—II

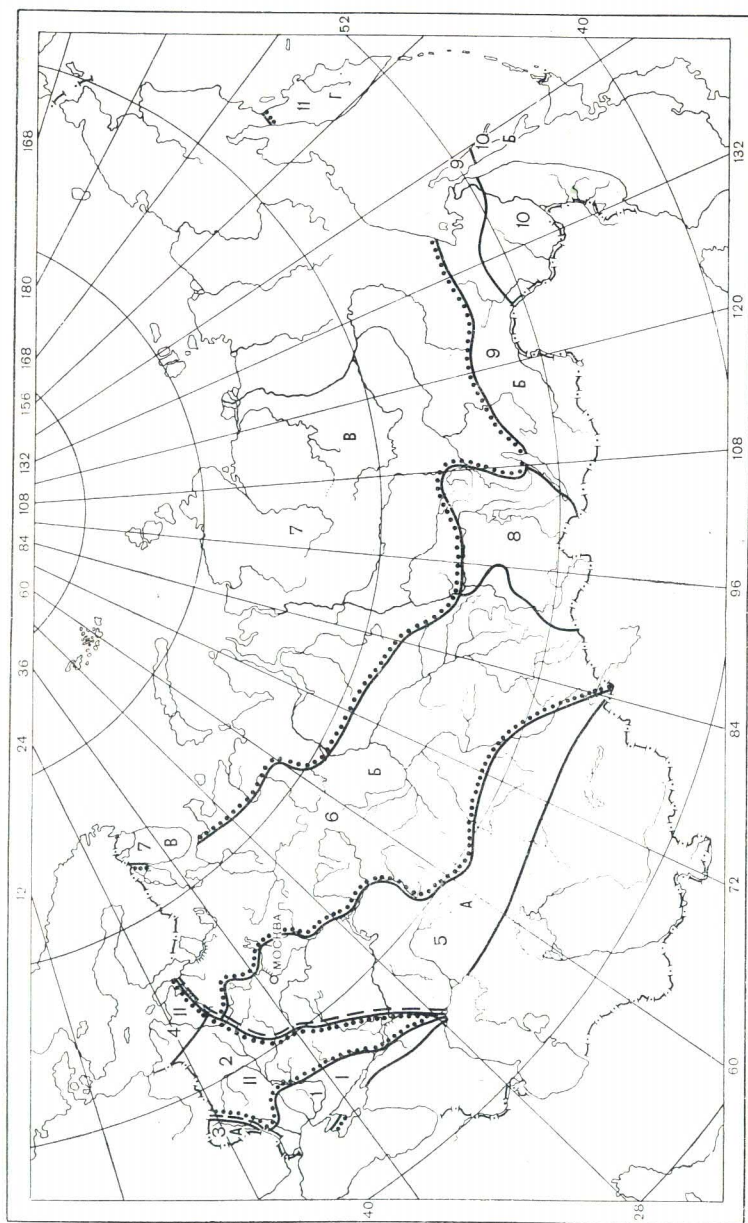


Рис. 23. Районы с одинаковыми сроками основных характеристик маловодного периода в холодный сезон. Условные обозначения см. рис. 10.

на реках формируются различной величины паводки. В маловодные годы, когда отсутствуют осенние паводки, летне-осенняя межень непосредственно переходит в зимнюю. Начало зимней межени наблюдается в конце ноября — середине декабря, хотя в отдельные суровые годы оно смещается на конец октября, а в теплые и дождливые — на конец декабря — начало января. Чем больше выпадает зимних осадков и выше температура воздуха, тем многоводнее меженный период и раньше его окончание. В среднем по району продолжительность межени 60—70 дней, но на реках Приазовья и в Крыму она длится всего 20—50 дней, так как часто бывает прерывистой и рано заканчивается — в конце января — начале февраля. На рис. 11 показаны примеры зимней межени на реках района 1.

Питание рек этого района в зимнюю межень осуществляется за счет подземных и частично поверхностных вод, образующихся в периоды оттепелей. Водность рек в зимнюю межень значительно выше, чем в летне-осеннюю. Минимальный 30-дневный сток обычно наблюдается в январе, хотя может быть и в феврале или декабре, если межень короткая.

Район 2 занимает юго-западную часть ЕТС, в основном бассейны рек Днепра и Северского Донца. Начало зимней межени на большей части рек отмечается во второй половине ноября — начале декабря, а окончание приходится на март. В зимний сезон на территории района иногда происходят оттепели, вызывающие образование 1—2 паводков, поэтому межень в эти годы бывает прерывистой и состоит из 2—3 периодов небольшой продолжительности. Наиболее часто подобные случаи отмечаются в западной и северо-западной частях района. Средняя продолжительность межени здесь наименьшая и составляет 50—80 дней. Наибольшую продолжительность межень имеет в восточной половине района (бассейны рек Десны, Сейма, Оскола) — в среднем 80—120 дней при максимальной 160 дней.

Водность зимней межени, как правило, выше летне-осенней, хотя в целом она составляет всего 5—15% среднегодовой величины. В маловодные годы при отсутствии осенних паводков зимняя межень начинается непосредственно за осенней. В такие годы, особенно если не случаются зимние паводки, сток зимней межени бывает меньше стока летне-осенней межени, поскольку подземные воды осенью не пополняются и их истощение достигает зимой наибольших пределов. Чем ближе к северной границе района, тем меньше разница между величиной стока в зимнюю и летне-осеннюю межень.

Питание рек района 2 в зимнюю межень осуществляется в основном подземными водами при некотором участии поверхностных в теплые и многоводные годы. Минимальный 30-дневный сток наблюдается в конце зимы, когда наступает наибольшее истощение речного стока. Как правило, это происходит в конце февраля — середине марта.

Зимняя межень рек Карпат (район 3) нередко нарушается прохождением паводков при оттепелях, что ведет к сокращению продолжительности меженного периода. Начало межени чаще всего в этом районе приходится на декабрь, хотя в годы со значительными осенними паводками оно может сместиться и на январь. Окончание меженного периода отмечается в марте, реже в феврале. Зимняя межень, несмотря на нарушения ее паводками, более устойчива, чем летне-осенняя, и имеет меньшую водность. На рис. 12 б показаны характерные гидрографы рек района 3. Поверхностные воды, образующиеся от таяния снега и выпадения дождей, могут составлять значительную долю в питании рек района 3 в период зимней межени.

Реки Прибалтики выделены в район 4, поскольку на этой территории часто наблюдаются мягкие зимы с длительными оттепелями, что обусловлено вторжением теплых и влажных воздушных масс со стороны Атлантического океана. В такие годы межень бывает прерывистой и состоит из 2—3 периодов небольшой продолжительности. Осенью обычно проходят затяжные дождевые паводки, поэтому зимняя межень начинается поздно — в конце декабря—начале января. В очень теплые зимы с обильными осадками начало меженного периода задерживается даже до марта. Оканчивается межень довольно дружно на всей территории в конце марта, лишь в отдельные годы ее конец приходится на февраль или апрель.

Средняя продолжительность межени составляет 60—80 дней для всех рек, однако крайние значения существенно различаются. Наиболее длительная межень отмечается на реках восточной части района (до 100 дней), а самый короткий меженный период чаще всего бывает на западных и юго-западных реках (15—20 дней). На рис. 12 а показан гидрограф р. Муса в многоводный и маловодный годы.

По водности зимняя межень на западе района значительно превосходит летне-осеннюю, на востоке равна ей. Минимальный 30-дневный период бывает, как правило, в феврале—марте. В многоводные годы, когда межень короткая, период минимального стока совпадает с меженным.

В районе 5, занимающем центральную часть ЕТС и Казахстан, зимняя межень длится с конца ноября до начала апреля. Средняя продолжительность межени уменьшается с севера (130—150 дней) на юг (90—100 дней). Меженный период продолжительный и устойчивый, но в годы с мягкой зимой межень может прерываться паводками. Сток рек в зимний сезон меньше, чем в летне-осенний, правда, чем ближе к южной границе района, тем меньше разница в водности сезонов. Питание рек осуществляется за счет подземных вод. К концу периода наступает наибольшее истощение речного стока.

На западе района 6, расположенного в лесной зоне ЕТС и Западной Сибири, зимний меженный период начинается в се-

редине ноября—начале декабря, но чем далее на восток, тем раньше его начало. На Урале этот период начинается в середине ноября, а на правобережных притоках среднего течения р. Оби (Тым, Вах, Аган)—в начале ноября и даже в конце октября. Время окончания изменяется по району в том же направлении, на западе—в конце марта—начале апреля, а чем восточнее и севернее, тем ближе к концу апреля. Вблизи южной границы района начало межени наблюдается чаще всего в середине—конце ноября, а конец—в начале апреля.

Наименьшая средняя продолжительность меженного периода отмечается на реках юго-западной части района (Северо-Запад ЕТС) и составляет 85—115 дней, в Карелии межень длится уже 130—150 дней, в бассейне Северной Двины 140 дней, на Урале 150—160 дней, а на правобережных притоках Оби до 170 дней. На реках Алтая на сроки меженного периода определенное влияние оказывает вертикальная зональность климатических условий. В предгорных и среднегорных районах межень на реках начинается в середине—конце ноября, а в высокогорной зоне—в начале ноября. Окончание межени также изменяется в зависимости от высоты водосбора и отмечается соответственно в конце марта—начале апреля и начале—середине апреля, а для водосборов, расположенных выше 2500 м, конец межени задерживается до начала мая. Продолжительность меженного периода колеблется от 100 до 200 дней при средней величине 140 дней. Водность рек Алтая в этот период довольно большая—до 10—11 л/(с·км²). Реки питаются только подземными водами.

На озерных реках западной части района начало меженного периода задерживается до середины, а иногда конца декабря вследствие регулирующего влияния озер. По этой же причине и окончание межени отмечается лишь в середине—конце апреля, а на такой озерной реке, как Ковда (озерность 25—30%), межень заканчивается даже в мае. Продолжительность меженного периода на озерных реках почти такая же, как и на неозерных реках, так как позднее окончание межени компенсируется поздним ее началом.

На карстовых реках зимняя межень заканчивается на несколько дней позднее, чем на соседних реках, не имеющих карстующихся пород в бассейне. Так, на реках Емце и Шелексе, протекающих в карстующихся породах, межень заканчивается в среднем на 5—10 дней позже.

Меженный период продолжительный и устойчивый почти на всей территории района. Лишь на реках юго-западной его части в мягкие зимы межень может прерываться паводком или позже начинаться и раньше заканчиваться, поэтому на этой территории наблюдается наименьшая продолжительность меженного периода. В течение зимы реки питаются подземными водами, причем к концу сезона они обычно переходят на питание

из наиболее глубоких водоносных горизонтов. Поэтому период минимального 30-дневного стока приходится на середину февраля — середину марта, а в северной и восточной частях района — в основном на март.

Наибольшую территорию занимает район 7, правда, на ЕТС к нему относится лишь крайний север, но зато вся основная территория азиатской части СССР занята этим районом. Почти весь он находится в зоне развитой многолетней мерзлоты. Это, конечно, отражается на водном режиме рек, тем более в зимний сезон, который отличается большой длительностью и низкими температурами воздуха в течение почти всего сезона. Поэтому зимний меженный период на реках района 7 очень длительный и устойчивый. Он начинается во второй половине октября и заканчивается в первой половине мая. Однако обширность территории обуславливает некоторую разницу во времени начала и конца межени. На Кольском полуострове, имеющем более мягкий климат, межень чаще начинается только в конце октября — начале ноября (в отдельные годы в начале октября или начале декабря) и заканчивается в конце апреля — начале мая (иногда в конце марта или начале июня). Такие же сроки отмечаются на самом юге района в бассейне рек Витима, Чары, Алдана.

Продолжительность меженного периода в районе 7 наибольшая для рек СССР. На Кольском полуострове она составляет 160—190 дней, на севере ЕТС — 180 дней, в Западной Сибири — 200 дней, а в Восточной Сибири — до 220—230 дней. Самая длительная межень наблюдается на реках крайнего севера АТС (р. Анабар, низовья бассейна р. Оленек, а также на реках Яне и Индигирке), где меженный период начинается уже в сентябре, а заканчивается нередко только в июне. Поэтому межень длится здесь 240—250 дней. К сожалению, слабая изученность рек не позволяет произвести достаточно надежные обобщения. На юге района в бассейнах рек Витима, Чары, Алдана меженный период длится обычно 200 дней. В отдельные годы продолжительность межени может отличаться от средней величины на 15—20 дней. Меженный период больших рек короче на 10—15 дней.

Питание рек происходит исключительно за счет подземных вод. В зоне многолетней мерзлоты реки питаются главным образом водами, заключенными в мощных аллювиальных и делювиальных отложениях, поскольку оттаивающий за лето почвенно-грунтовый слой промерзает в первые два месяца зимы. В это же время происходит наиболее интенсивное уменьшение речного стока, он сокращается на 70—80%, а на малых реках истощается полностью. По мере промерзания рыхлых отложений, содержащих запасы подземных вод, питание рек сокращается вплоть до полного прекращения стока. Лишь под руслами больших рек сохраняются таликовые воды, питающие реки в течение

всей зимы. В отдельных районах, например в верховьях р. Колымы, наблюдаются локальные выходы трещинных подмерзлотных вод, иногда имеющих высокую температуру и питающих реки в течение всего зимнего периода.

Большая часть речного стока (70—80%, а на малых реках до 100%) уходит на образование наледей, имеющих широкое распространение в центральной и восточной части района, особенно в бассейнах рек Лены, Индигирки, Колымы. Нередко они являются причиной раннего прекращения стока в русле реки ниже места образования наледи.

Период наибольшего истощения стока на неперемежающихся реках приходится на март—апрель. Водность зимней межени в целом по территории очень мала, в 5—10 раз меньше, чем летне-осенней межени (сравниваются, конечно, неперемежающиеся реки). Лишь на реках Кольского полуострова она относительно большая и меньше летне-осенней всего в 3—4 раза.

Район 8 занимает бассейн р. Ангара и верхнюю часть бассейна р. Енисея, отличается значительными высотами местности, особенно в южной половине, где расположены Саянские горы. На временные характеристики межени определенное влияние здесь оказывает вертикальная климатическая зональность. Поэтому несмотря на столь южное расположение реки района имеют весьма длительную и устойчивую зимнюю межень, по срокам лишь немного отличающуюся от межени на реках района 7. Начало зимней межени отмечается на севере района в первой половине октября, а на юге в конце октября — начале ноября. Окончание также изменяется с севера на юг от конца апреля до середины апреля — конца марта. Ранний конец межени свойствен рекам верховьев Енисея. Продолжительность меженного периода на севере района составляет 190—210 дней, в Саянах 170—180 дней. На юго-востоке в районе южного Прибайкалья межень имеет наименьшую продолжительность порядка 150—170 дней.

Питание рек осуществляется за счет подземных вод. Истощение запасов подземных вод происходит в марте—апреле, тогда же на реках наблюдается период минимального 30-дневного стока.

Район 9 расположен в горной местности (Яблонево, Становой хребты) в зоне влияния летних тихоокеанских муссонов, которые формируют высокий летне-осенний сток и смягчают климат осени по сравнению с северными районами, несколько удлиняя летне-осенний сезон. Поэтому зимний меженный период на реках района 9 начинается в конце октября — начале ноября и длится до конца марта — середины апреля. Межень устойчивая. В северном и западном направлениях наблюдается увеличение продолжительности меженного периода до 200 дней (бассейны рек Витима, Олекмы, Уды) против 120—130 дней в районах вблизи южной границы. На больших реках межень

наступает на 15—20 дней позже, чем на малых. Последние (с площадью бассейна 1000—2000 и до 5000 км² в западной части) перемерзают через месяц или два после начала межени, так как резко сокращается величина подземного питания.

К этому же району отнесена северная половина о. Сахалин. Зимняя межень наступает здесь в первой—второй декаде ноября (чем южнее, тем позже начало) и длится до третьей декады апреля (чем севернее, тем позже конец). Средняя продолжительность межени изменяется от 150 до 180 дней, она меньше на юге и больше на севере. Наименьший срок на неперемежающихся реках района 9 отмечается чаще всего в феврале — марте.

На реках бассейна Нижнего Амура и в Приморье наблюдается меньшая, чем в районе 9, продолжительность зимнего меженного периода, поэтому эта территория выделена в район 10. Межень начинается обычно в ноябре, а в отдельные теплые годы — даже в начале января и заканчивается во второй половине марта — начале апреля. На реках, расположенных в южной и восточной частях района, межень начинается позже и заканчивается раньше, поскольку в этом направлении уменьшается суровость климатических условий.

К этому же району отнесена южная половина о. Сахалин. Зимняя межень на реках начинается здесь, как правило, в последней декаде ноября и заканчивается в первой половине апреля. Межень устойчивая и длительная, до 125—150 дней. Чем севернее, тем длительнее период, так как в этом же направлении смещается начало (на более раннее) и конец (на более поздний) межени. На примере Сахалина можно довольно ясно видеть, насколько тесно временные характеристики межени соответствуют широтному изменению климатических условий.

Водность рек районов 9 и 10 в зимнюю межень очень небольшая и резко отличается от водности летне-осенней межени. Величина минимального 30-дневного стока зимой в 50—100 раз меньше, чем летом. На малых реках это соотношение увеличивается до 150 раз и более, а на больших реках уменьшается до 10—20 раз вследствие общей высокой водности таких рек значительной величины получаемого ими подземного питания.

Район 11 занимает п-ов Камчатку. Зимняя межень начинается здесь на севере в последней декаде октября, а на юге — в середине ноября. Заканчивается она в обратном порядке: в середине апреля на юге и в первой половине мая на севере. Соответственно изменяется и продолжительность межени — 180—190 дней на севере и 150—160 дней на юге. В годы с интенсивными осенними дождями, образующими значительные паводки, начало меженного периода задерживается до конца декабря.

Водность зимней межени довольно высокая, хотя и меньше летне-осенней в 2—3 раза. Минимальный 30-дневный сток отмечается обычно со второй половины февраля — начала марта

Реки питаются подземными водами, лишь в первый месяц межени некоторое участие в ее формировании могут принимать и поверхностные воды — остатки осенних паводков.

Таким образом, на реках АТС и северо-восточной части ЕТС зимний меженный период начинается вскоре после установления на реках ледостава и продолжается без перерыва весь зимний сезон вплоть до начала весеннего подъема уровней и резкого увеличения расходов воды в русле рек, т. е. меженный период длителен и устойчив. Питание рек осуществляется лишь водами глубоких водоносных горизонтов, поэтому величина стока на реках значительно меньше, чем в летне-осенний меженный период. На большой территории, в основном на АТС, сток малых рек вообще прекращается в зимний меженный период вследствие быстрого истощения водоносных горизонтов, питающих реки, или промерзания водовмещающей толщи почвогрунтов. Следовательно, с точки зрения народнохозяйственного использования рек зимний сезон на основной части территории СССР является наиболее напряженным по водности, т. е. лимитирующим сезоном.

3.3. ЛИМИТИРУЮЩИЙ ПЕРИОД

Лимитирующий период состоит, как уже указывалось, из двух сезонов — лимитирующего и нелимитирующего (маловодного). Поэтому его временные характеристики определяются сроками начала лимитирующего сезона и окончания маловодного сезона и их суммарной продолжительностью.

Время начала и окончания лимитирующего сезона назначается в зависимости от водного режима рек и характера водопотребления в данном районе, точнее преобладания определенного вида использования или потребления речного стока, например для целей промышленного или бытового водоснабжения, орошения, энергетики.

При расчетах внутригодового распределения стока выделение сезонов осуществляется по календарным датам с округлением до целого месяца, т. е. за начало сезона принимается первый день начального месяца, включаемого в данный сезон, а за конец — последний день завершающего сезон месяца. Начало и конец лимитирующего сезона устанавливаются едиными для всех лет наблюдения за стоком, а также по территории со сходным режимом стока рек в данном сезоне. Поэтому понятно то существенное различие, которое может возникать в отдельных районах между сроками и продолжительностью лимитирующего сезона и соответствующего меженного периода. Так, продолжительность зимней межени в районе 6 (рис. 23) в среднем составляет 140—160 дней, изменяясь в отдельные годы от 60 до 200 дней, а продолжительность лимитирующего сезона принимается всегда постоянной и равной 120 дням. Соответственно

появляются большие различия в величине стока в многоводные и маловодные годы.

При назначении лимитирующих сезонов по территории СССР в первую очередь учитывались временные характеристики меженного периода и его водность в различные сезоны. Одновременно в полной мере были использованы рекомендации В. Г. Андреянова [13] и материалы, опубликованные в справочниках «Ресурсы поверхностных вод СССР», в отношении назначения сроков лимитирующих сезонов.

В лимитирующий сезон включались все целые месяцы, относящиеся в большинстве случаев к одному сезону, хотя в отдельные годы первый или последний месяцы могли включать сток другого сезона, например часть стока последнего осеннего месяца относилась к зимнему сезону. Однако существенного значения это не имеет, поскольку подобные включения имеют весьма малый вес в целом сезоне, а тем более в многолетнем разрезе.

Как уже указывалось, наименьшей водностью на большинстве рек СССР обладает зимний сезон, поэтому он принят за лимитирующий. Сроки лимитирующего сезона изменяются по территории СССР в соответствии со сменой сроков меженного периода, хотя и в значительно меньшей степени. На рис. 23 показаны границы лимитирующего сезона, наблюдающегося зимой, а в табл. 9 приведены его сроки. Анализ сроков наступления и окончания лимитирующего сезона показывает необходимость смены на Европейской территории СССР зимнего сезона на летне-осенний, поскольку, как уже отмечалось, величина зимнего меженного стока на реках юго-западной части ЕТС в 1,5—2 раза превышает летний меженный сток. Зона смены зимнего периода на летне-осенний проходит от Чудского озера (г. Псков) через среднее течение р. Западной Двины (г. Витебск), верховья р. Днепра (г. Могилев), среднее течение р. Дона (г. Воронеж) к низовьям р. Волги (города Волгоград, Астрахань) (рис. 10, 23). Поэтому границы лимитирующего сезона, приходящегося на летне-осенний период, показаны на рис. 10, а соответствующие сроки сезона приводятся в табл. 9.

Границы районов как лимитирующего сезона, так и меженного периода проводились по границам резкой смены рельефа (равнинный на возвышенный или на горный), или по границам климатических зон. Границы лимитирующего сезона и меженного периода совпадают, поскольку сток рек в эти сезоны весьма близок по генезису. Количество районов с различными сроками лимитирующего сезона несколько меньше, чем для меженного периода, поскольку по условиям назначения сроков последнего его временные характеристики устанавливаются более дифференцированно по территории и в большей мере зависят от смены климатических и других условий. Всего на территории СССР выделено семь районов с различными сроками начала и конца лимитирующего сезона (табл. 9).

Таблица 9

Сроки лимитирующего сезона на реках СССР

Район ¹	Начало (месяц)	Конец (месяц)	Продолжительность, дни
А	XII	II	90
Б	XII	III	120
В	XI	IV	180
Г	XII	IV	150
Д	V	VIII	120
Е	VI	VIII	90
Ж	VI	XI	180

¹ Районы от А до Г показаны на рис. 23, а остальные — на рис. 10.

Начало зимнего лимитирующего сезона приходится на декабрь на большей части ЕТС и в Западной Сибири (районы А и Б). На реках севера, в центральных и восточных областях Сибири зимний период наступает раньше и соответственно за начало лимитирующего сезона принят ноябрь. Лишь в южных районах АТС, включая о. Сахалин и п-ов Камчатку, за начало этого сезона принят декабрь. Можно отметить, что зимний меженный период в районах А и Б, как правило, начинается в октябре—ноябре и даже наиболее позднее его начало чаще всего приходится лишь на начало декабря.

Сроки окончания лимитирующего сезона изменяются по территории в большей степени: с февраля на юге до апреля на севере и северо-востоке страны. Конец зимнего меженного периода отмечается в среднем на 3—4 недели позже по всей территории, а наиболее раннее его окончание либо совпадает с концом лимитирующего сезона, либо происходит на неделю позже. Примеры выделения лимитирующего сезона показаны на рис. 11—22.

Таким образом, в зимний период на основной части территории СССР лимитирующий сезон и меженный период наблюдаются в общем в одно и то же время. Продолжительность лимитирующего сезона в среднем на 20—45 дней меньше, чем меженного. Однако в многоводные годы, когда межень имеет наименьшую длительность, продолжительность лимитирующего сезона выше, чем меженного, на 30—60 дней, поскольку в сезонный сток включаются паводки или части паводков и половодья и, следовательно, его водность будет выше, чем водность межени. Исключение составляют реки бассейна Верхнего Енисея и Ангары, где даже наименьший меженный период длиннее лимитирующего сезона на 20—30 дней, и реки бассейна Нижнего Амура и Камчатки, на которых эти периоды совпадают.

На реках Карпат, имеющих, как уже указывалось, паводочный режим не только в теплый, но и в холодный сезон, период наименьшего стока наблюдается обычно зимой. За лимитирующий сезон принят декабрь—февраль, что близко к срокам меженного периода (декабрь—март). Однако и в это время на реках нередко проходят паводки из-за оттепелей, поэтому меженный период на них прерывистый и короче лимитирующего сезона на 30—50 дней, а в многоводные годы — на 70 дней. Только в наиболее маловодные годы эти периоды совпадают. В связи с этим лимитирующий и меженный сток могут быть в значительной мере неоднородными в отдельные, особенно многоводные годы.

Поскольку на большинстве рек СССР к лимитирующему сезону относится зимний период, когда межень устойчивая и длительная, превышающая в целом продолжительность лимитирующего сезона, то можно сделать вывод об их генетической однородности (за исключением отдельных лет для рек некоторых районов, о которых было сказано выше). Следовательно, разница в величине лимитирующего и меженного стока в средние и маловодные годы должна быть незначительной. Это позволяет для неизученных рек определять одну из указанных характеристик через переходный коэффициент от другой.

В летне-осенний период лимитирующий сезон наблюдается только в западной и южной частях ЕТС. В годовом цикле стока рек этой территории летне-осенний период имеет наименьшую водность. На реках Причерноморья и Приазовья (район Д на рис. 10) летний меженный период, как уже отмечалось, наступает в основном в апреле — начале мая, хотя в особо многоводные годы с частыми дождями в весенне-летний сезон начало летнего меженного периода сдвигается на июнь и даже на середину июля. Заканчивается летне-осенняя межень, как правило, в конце ноября — начале декабря. Она очень длительна и устойчива. Поэтому за начало лимитирующего сезона принят май, а его концом можно было бы считать ноябрь. Однако наибольшая потребность в воде, особенно для целей орошения, на этой территории существует в летний сезон, сток которого составляет всего 10—15% годового. Следовательно, за лимитирующий сезон целесообразно принять летний, а за его конец — август, нередко являющийся к тому же самым маловодным в году месяцем.

На остальной территории за начало лимитирующего сезона принят июнь, поскольку летняя межень обычно начинается в июне, а его конец можно отнести к ноябрю. Но для района Е за конец принят август, по тем же соображениям, что и для района Д.

Для территории Белоруссии и Прибалтики, где потребности в воде на орошение резко снижаются по сравнению с южными районами, лимитирующим сезоном считается летне-осенний пе-

риод, длящийся с июня по ноябрь. Продолжительность его превышает продолжительность летне-осенней межени, так как последняя нередко прерывается двумя-тремя паводками и почти в два раза короче лимитирующего сезона. Следовательно, в формировании стока лимитирующего сезона большое участие, особенно в многоводные годы, принимают поверхностные воды, а величина сезонного стока значительно превышает величину меженного.

Нелимитирующий (маловодный) сезон является второй составляющей лимитирующего (маловодного) периода. По водности он превышает лимитирующий сезон. Его начало зависит от конца лимитирующего сезона, если последний отнесен к летне-осеннему периоду, или от преобладающего начала летне-осенней межени, если она совпадает с маловодным сезоном. В этом случае конец сезона определяется началом зимнего лимитирующего сезона. На территории СССР выделяется десять районов с различными сроками маловодного сезона (табл. 10).

Таблица 10
Сроки нелимитирующего сезона на реках СССР

Район ¹	Начало (месяц)	Конец (месяц)	Продолжительность, дни
I	XII	I	60
II	XII	II	90
III	VI	XI	180
IV	VII	XI	150
V	VIII	X	90
VI	IX	X	60
VII	VII	X	120
VIII	IX	XI	90
IX	X	X	30
X	X	XI	60

¹ Районы I и II показаны на рис. 23, остальные — на рис. 10.

Как уже указывалось, на юге и западе ЕТС зимний период является относительно многоводным по сравнению с летне-осенним и длится с ноября—декабря по февраль—март. Поэтому за начало маловодного сезона принят декабрь на всей юго-западной части ЕТС, а конец назначен в январе на юге ЕТС (район I на рис. 23), где зимняя межень заканчивается чаще всего в начале—середине февраля, и в феврале на остальной территории (район II на рис. 23). Границы других районов показаны на рис. 10. В маловодный сезон на реках нередко формируются паводки в результате оттепелей и выпадения дождей. Поэтому в многоводные годы данный сезон значительно превышает межень по продолжительности, а также по водности.

На основной части территории СССР (север и восток ЕТС и вся АТС) маловодный сезон приходится на летне-осенний или осенний период. Начало сезона закономерно смещается с юга (июнь) на север и северо-восток СССР (сентябрь), за исключением горных районов юга АТС и Приморья.

Рекам района III свойственно совпадение меженного периода и маловодного сезона по времени появления и продолжительности как в маловодные, так и в средние по водности годы. Лишь в многоводные годы меженный период значительно короче маловодного. Следовательно, по водности маловодный сезон будет близок к межени, но больше ее.

В районах IV—VIII маловодный сезон по времени почти совпадает с крайними сроками появления межени, но по продолжительности он в 2—4 раза длиннее. Это связано с тем, что меженный период в летне-осенний сезон на этой территории короткий и прерывистый из-за частого выпадения паводкообразующих осадков. Его средняя продолжительность изменяется от 20—30 до 80—90 дней, а длительность маловодного сезона меняется по районам от 60 дней (район VI) до 150 дней (район IV). Естественно, что в многоводные годы разница между продолжительностью сезонов увеличивается еще в большей мере. Поэтому водность маловодного сезона будет значительно превышать величину стока за межень, а сами величины не будут обладать полной генетической однородностью. Примеры выделения маловодных сезонов показаны на рис. 11—22.

На реках горных районов юга АТС, а также в Приморье (районы IX и X), где меженный период весьма короткий, а в некоторые годы вообще отсутствует, непрерывный относительно маловодный период наблюдается только осенью. Его продолжительность 30—60 дней, поэтому в маловодные годы, когда выпадает мало дождей, межень становится длиннее его в 1,5 раза. В остальное же время длительность маловодного сезона такая же или больше, а водность этого сезона всегда выше водности межени (рис. 20, 21).

Таким образом, сток рек в маловодный сезон формируется как подземными, так и поверхностными водами, причем последние составляют существенную часть питания рек в многоводные годы, а в некоторых районах, например VII—X, даже в средние по водности годы. Следовательно, имеется значительная разница между стоком за маловодный сезон и соответствующим меженным стоком как по величине, так и по происхождению. Поэтому сток за маловодный сезон в ряде районов должен определяться самостоятельными расчетными методами.

Лимитирующий (маловодный) период начинается всегда в летне-осенний (осенний) сезон, а заканчивается в зимний. Наличие на территории СССР различных климатических зон, а также большое разнообразие характера водного режима рек в различных районах обуславливает значительную

вариацию сроков начала лимитирующего периода по территории СССР. Окончание этого периода изменяется по территории в меньшем диапазоне. Всего выделяется десять районов с различным сроком начала лимитирующего периода и лишь пять районов с различным его концом. Районы, в которых для всех рек принят единый месяц начала и конца лимитирующего периода, показаны на рис. 24, а соответствующие сроки — в табл. 11.

Поскольку лимитирующий период для большей части территории представляет собой сумму двух соседних периодов, уже рассмотренных выше, то нет необходимости объяснять причины принятых сроков. Следует лишь отметить, что наиболее длительный лимитирующий период наблюдается в Восточной Сибири на Среднесибирском плоскогорье (район 6), где он начинается в середине лета, а оканчивается поздно, в апреле, в связи с длительной зимой. Наименьшая продолжительность отмечается в районах, где этот период состоит только из двух климатических сезонов — осени и зимы (районы 8 и 9) — при относительно раннем окончании последней. Лишь на реках Крыма (район 10) за лимитирующий период принят летне-осенний сезон, поскольку в зимний сезон происходит частое выпадение дождей.

Таким образом, в водном режиме рек СССР ежегодно наблюдается длительная маловодная фаза, во время которой сток рек резко уменьшается и составляет в среднем 30—5% многоводной фазы. В зависимости от района продолжительность этого маловодного периода может быть от 6 (южные районы) до 10 (Восточная Сибирь) месяцев. Правда, длительность общего меженного периода, когда питание рек осуществляется в основном подземными водами, несколько меньше и нередко он состоит из двух частей (зимней и летне-осенней), разобщенных осенними паводками. Общая продолжительность меженного периода составляет в среднем 3—9 месяцев, причем на большей части территории ее продолжительность 5—7 месяцев. При этом основная часть времени приходится на зимнюю межень — от 2 месяцев на юге ЕТС до 6—7 месяцев на АТС.

В многоводные годы, когда большая величина стока на реках наблюдается не только в весенний, но и в летне-осенний или зимний сезон, общая продолжительность меженного периода еще меньше (1—5 месяцев), хотя длительность лимитирующего периода, по условиям его выборки, остается прежней. В такие годы разность в водности фаз обычно наименьшая и для практических расчетов они не представляют интереса. В маловодные годы, т. е. когда в летне-осенне-зимний период питание рек осуществляется только подземными водами, общая длительность меженного периода часто превышает продолжительность лимитирующего периода, а разность в водности многоводной и маловодной фаз становится наибольшей. Такие годы представляют

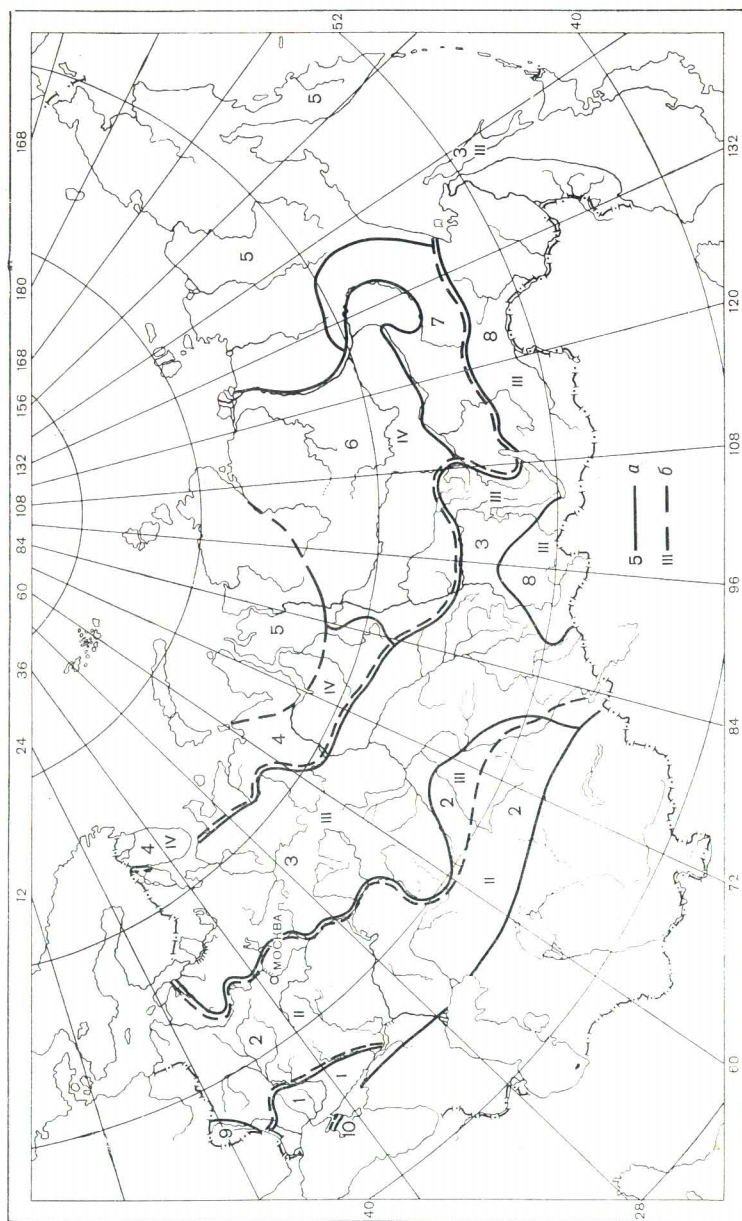


Рис. 24. Районы с одинаковыми сроками лимитирующего периода.

а — граница и номер района с одинаковым началом лимитирующего периода; б — граница и номер района с одинаковым концом лимитирующего периода.

Таблица 11

Сроки лимитирующего периода на реках СССР

Район	Начало (месяц)	Конец (месяц)	Продолжительность, дни
1	V	I	275
2	VI	II	270
3	VII	III	270
4	VIII	IV	270
5	IX	IV	240
6	VII	IV	300
7	X	IV	210
8	X	III	180
9	IX	II	180
10	VI	XI	180

основной интерес для практики. Следовательно, осуществлять расчеты продолжительности меженных периодов лишь для среднего по водности года совершенно недостаточно.

3.4. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ВЕЛИЧИН ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕЖЕННОГО ПЕРИОДА

Временными характеристиками маловодного периода являются даты начала и конца входящих в него сезонов и меженного и минимального периодов, а также их продолжительность (в днях). В соответствии с принятым способом определения даты начала и окончания лимитирующего и маловодного сезонов являются постоянными для больших территорий и не меняются по годам, следовательно, продолжительность этих сезонов тоже постоянна во времени и по территории. Период минимального стока также имеет заданную продолжительность — 30 дней (месяц), декада, сутки — и наблюдается практически в одно и то же время для больших территорий. Сроки меженного периода зависят от целого ряда физико-географических факторов, поэтому они изменяются по годам для данной реки и неодинаковы в разных природных районах. Таким образом, наибольшую изменчивость во времени и по территории имеют временные характеристики меженного периода.

При хозяйственном использовании рек меженный период является длительным периодом наиболее ограниченного использования водных ресурсов, и чем он продолжительнее, тем меньше его водность и тем ограниченнее возможность хозяйственного использования рек в этот период. При оценке ресурсов подземных вод величина меженного стока служит наиболее ярким показателем размеров их естественного стока и динамики

во времени. Поэтому необходимо иметь четкое представление о сроках и длительности меженного периода для соответствующих расчетных меженных расходов воды.

Как было показано в разделе 3.2, на сроки и продолжительность меженного периода оказывает влияние большое число природных факторов, действующих нередко в противоположном направлении. Поэтому при рассмотрении временных характеристик межени как статистических параметров их можно считать случайными и независимыми величинами. Это позволяет применить к ним законы вероятностно-статистического анализа.

В практике гидрологических расчетов обычно используется величина расхода воды различной обеспеченности. Представляется целесообразным определять сроки, а следовательно, и продолжительность меженных периодов для лет различной водности, т. е. для соответствующей обеспеченности меженного расхода воды. В этом случае будет получена комплексная характеристика межени: ее начало, конец, продолжительность и величина расхода воды одинаковой обеспеченности.

Существует вполне определенная зависимость между продолжительностью меженного периода и его водностью: чем он длительнее, тем меньше величина стока вследствие снижения питания рек и возрастания степени истощения стока в них. Следовательно, чем больше обеспеченность расчетной величины стока (т. е. меньше ее величина), тем длительнее меженный период. Правда, эта закономерность не является безусловной, поскольку на величину меженного стока влияет водность данного и предшествующего сезона и величина запасов подземных вод, аккумулярованных в бассейне. Поэтому на графиках связи величины расхода воды за межень с ее продолжительностью наблюдается значительный разброс точек (рис. 25). Однако использование равнообеспеченных величин резко уменьшает этот разброс, так что зависимость становится пригодной для практических расчетов.

Не менее важной является и другая закономерность: чем продолжительнее меженный период, тем раньше отмечается его начало и позже конец. Следовательно, меженному расходу воды большой обеспеченности соответствует большая продолжительность межени, более раннее ее начало и поздний конец. Это положение является весьма важным, поскольку определяет характер ранжирования рассматриваемых величин. На рис. 26 показаны примеры зависимости продолжительности меженного периода от сроков начала и конца этого периода. На тесноту связи существенное влияние оказывают климатические условия данного года и характер меженного периода. Если последний прерывистый, то связь заметно ухудшается, поскольку, несмотря на раннее начало межени и поздний ее конец, общая продолжительность меженного периода будет относительно небольшой. Построение графиков связи по равнообеспеченным величинам существенно улучшает тесноту связи.

Построение кривых обеспеченности сроков меженного периода не может осуществляться непосредственно по имеющимся датам его начала и конца. Необходимо произвести некоторые преобразования, превратив имеющиеся даты в числовой ряд. Для этого в конкретном ряду наблюдений за меженью определяется месяц с самой ранней датой начала и самой поздней датой конца меженного периода. Первое число этого раннего месяца и последнее число позднего принимаются за дату отсчета. Далее суммируется число дней, прошедших от даты отсчета

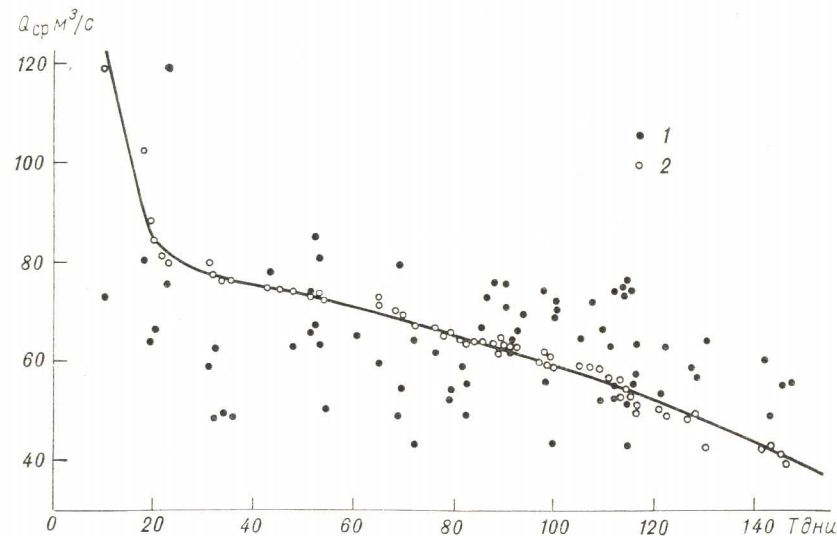


Рис. 25. Связь среднего за межень расхода воды $Q_{ср}$ с продолжительностью меженного периода T для зимнего сезона (р. Березина — г. Бобруйск). 1 — соответствующие характеристики данного года; 2 — равнообеспеченные характеристики.

до даты фактического начала межени в данном году, или суммирование производится в обратном порядке: от принятой даты отсчета до даты фактического окончания межени. При территориальных обобщениях за исходную принимается общая по данному району дата начала или конца межени.

Таким образом, для конкретного пункта составляется четыре ранжированных ряда: начало зимней и летне-осенней межени и соответственно их окончания. При этом значения, характеризующие начало и конец межени, располагаются, как обычно, в убывающем порядке. В этом случае наименьшие значения будут относиться к наиболее раннему началу или позднему концу меженного периода, т. е. они будут иметь наибольшую величину эмпирической обеспеченности.

При определении вероятностной величины продолжительности меженного периода имеющийся ряд фактических данных

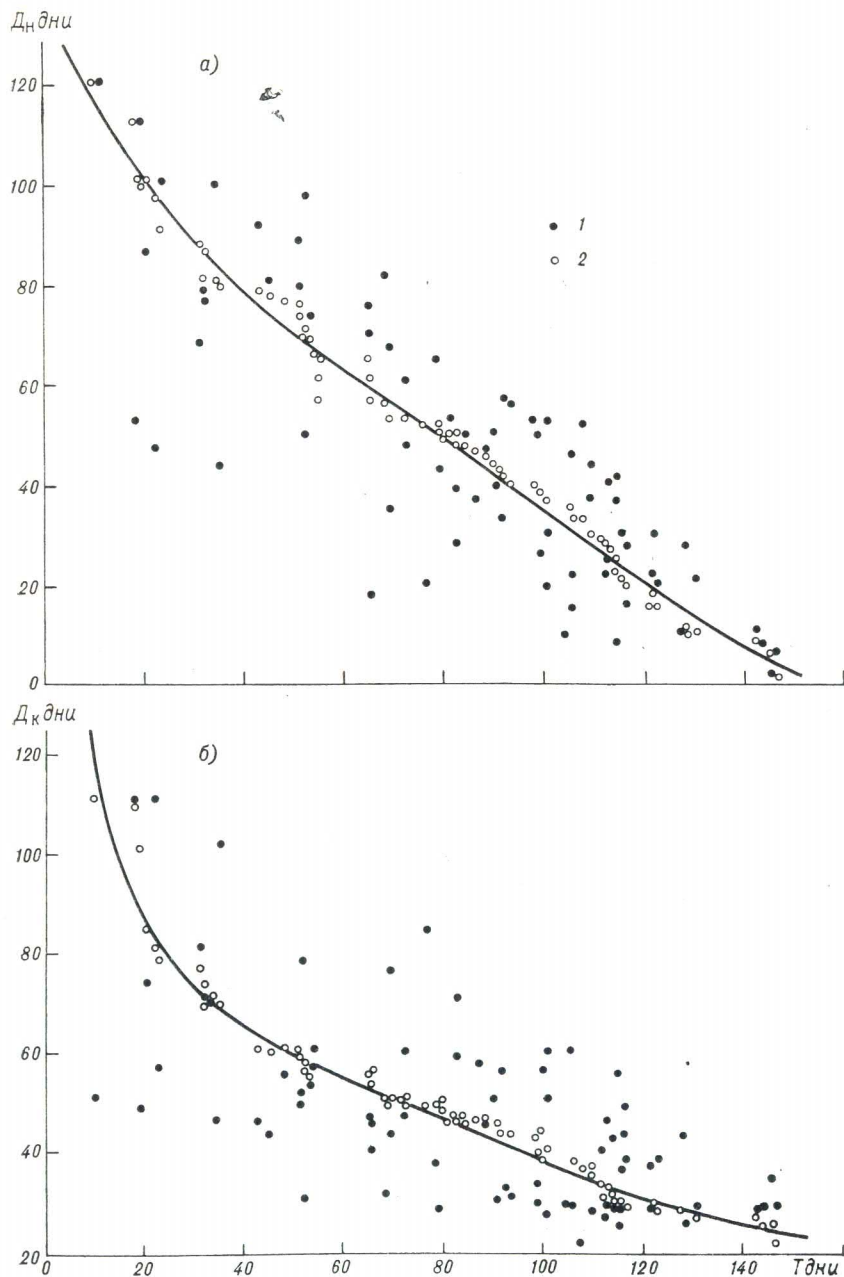


Рис. 26. Связь времени начала D_n (а) и окончания D_k (б) зимнего межени с его продолжительностью T (р. Березина — г. Бобруйск).

Условные обозначения см. рис. 25.

следует располагать не в убывающем порядке, как это принято при расчете расходов воды различной обеспеченности, а в возрастающем. Это делается для того, чтобы соблюсти физическое соответствие между величиной продолжительности межени и величиной стока за межень, заключающееся, как уже указывалось, в том, что наибольшему по продолжительности периоду межени соответствует наименьшая величина стока. Однако при построении эмпирических точек на клетчатке обеспеченности используется величина, обратная числу дней, показывающих продолжительность межени, чтобы сохранить привычный вид кривой обеспеченности. В случае большой длительности межени для удобства построения кривых обеспеченности при расчетах обратной величины вместо единицы используется 10 или 100.

Расчет значений эмпирической обеспеченности членов ранжированных рядов, характеризующих сроки и продолжительность межени, производится по формуле

$$P = \frac{m - 0,3}{n + 0,4} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где n — число членов ранжированного ряда наблюдений; m — порядковый номер члена ряда.

Определение обеспеченных величин временных характеристик межени при наличии наблюдений осуществляется следующим образом. Для данного пункта за каждый год наблюдений производится выделение межени в зимний и летне-осенний сезоны. При этом используется методика, изложенная автором в работе [40] и нашедшая широкое практическое применение. Затем, согласно вышесказанным принципам, строятся кривые обеспеченности отдельно для начала, конца и продолжительности межени. Примеры расчетов приводятся в приложении 1, а примеры эмпирических кривых обеспеченности — на рис. 27.

Параметры кривых обеспеченности устанавливаются графоаналитическим методом Г. А. Алексеева, изложенным в главе 4. Полученные по соответствующим кривым обеспеченности значения (имеющие ту же обеспеченность, что и расчетные межени расходы воды) переводятся в искомую величину одним из следующих способов: путем прибавления к принятой наиболее ранней дате начала межени снятого с соответствующей кривой значения; путем вычитания, т. е. обратный отсчет снятой с кривой обеспеченности величины времени окончания межени от принятой наиболее поздней даты конца межени; путем превращения обратного значения продолжительности межени периода в фактическую величину. Например, для р. Березины у г. Бобруйска (площадь бассейна 20 300 км²) летне-осенний межени расход воды 90%-ной обеспеченности равен 50 м³/с (определен по эмпирической кривой обеспеченности), а продол-

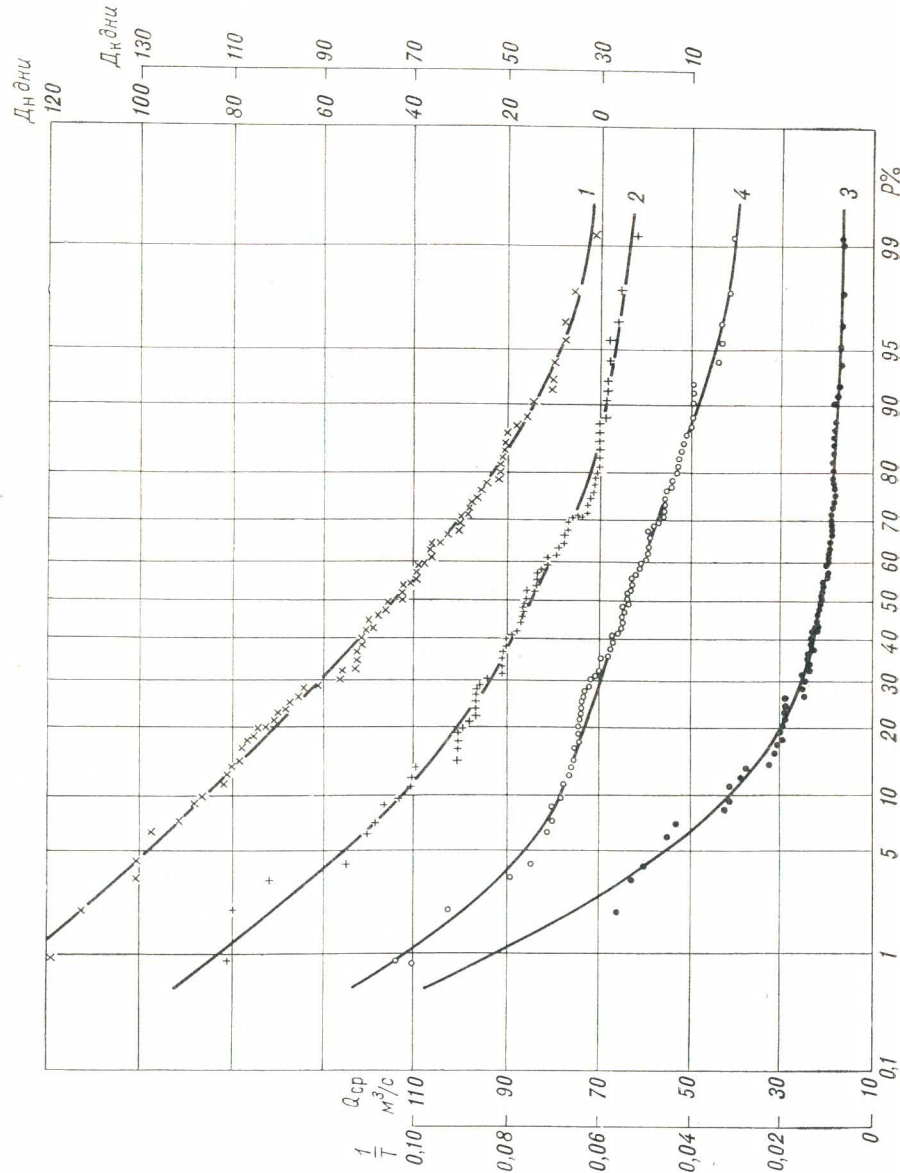


Рис. 27. Эмпирические кривые обеспеченности основных характеристик зимнего меженьного периода для р. Березины у г. Бобруйска.

1 — начало межени; 2 — конец межени; 3 — продолжительность межени; 4 — средний меженьный расход воды.

жительность летне-осеннего меженьного периода, соответствующая этой обеспеченности, снятая с кривой обеспеченности в относительном значении, равна 0,006, или в переводе на фактическое значение (1:0,006) — 167 дням. Начало летне-осеннего меженьного периода, соответствующего этой продолжительности и определенное по кривой обеспеченности времени начала межени, происходит на 21-й день от принятой даты отсчета. В данном случае за эту дату принято 1 мая. Следовательно, начало межени будет 22 мая. Конец межени, устанавливаемый по кривой обеспеченности времени окончания меженьного периода, происходит на 12 дней раньше принятой даты отсчета, т.е. 18 ноября, поскольку за эту дату принято 30 ноября. Сумма дней между датами начала и конца межени составляет 181. Таким образом, продолжительности меженьного периода, определенные по кривой обеспеченности и как сумма дней между установленными сроками межени практически, весьма близки. Разница между ними (167 и 181 день) может быть отнесена как на счет точности определения этой характеристики, так и на счет возможности появления паводка, прерывающего межень на несколько дней. Правильность полученных результатов подтверждается при определении указанных характеристик иным способом — по графикам связи равнообеспеченных значений этих величин. При продолжительности летне-осенней межени 167 дней (как это установлено по кривой для обеспеченности 90%) соответствующий расход воды, определяемый по графику связи стока и продолжительности межени, будет 51 м³/с, начало межени (по графику связи времени начала и продолжительности межени) происходит на 24-й день от 1 мая, а конец межени (по графику связи времени окончания и продолжительности межени) — за 12 дней до 30 ноября. Как можно видеть, данные, полученные двумя разными способами, различаются весьма незначительно. Для зимней межени такие расчеты позволяют сделать рисунки 27 и 25, 26.

Чем устойчивее меженьный период, тем лучше связь между характеристиками межени. Так, в бассейне р. Суры зимняя межень обычно продолжительная и устойчивая, поэтому определенные для р. Суры у г. Пензы (площадь бассейна 15 400 км²) характеристики имеют следующие значения: по кривым обеспеченности меженьный расход воды равен 12,3 м³/с, продолжительность межени составляет 159 дней, ее начало происходит на 30-й день, а окончание — на 22-й день от принятых сроков отсчета; по графикам связи характеристик межени с ее продолжительностью при величине последней 159 дней расход воды равен 11,2 м³/с, начало межени происходит тоже на 30-й день, а конец — на 24-й день. После установления дат начала и конца межени (начало отсчета соответственно 1 октября и 30 апреля) общая продолжительность этого периода получается равной 158 дням, т.е. практически такая же, как и по кривой обеспе-

ченности для продолжительности меженного периода при 90%-ной обеспеченности.

Определение равнообеспеченных значений временных и стоковых характеристик межи позволяет получить данные для наиболее неблагоприятного случая в отношении использования водотока в хозяйственных целях.

При построении кривых обеспеченности временных характеристик межи важное значение имеет длительность периода наблюдений, особенно наличие в рассматриваемом ряду лет с самыми маловодными сезонами, когда продолжительность меженного периода наибольшая, а величина стока наименьшая. Учитывая это, целесообразно рассмотреть вопрос о распределении по территории СССР лет с наиболее маловодными зимними и летне-осенними сезонами.

Водность сезонов определяется главным образом климатическими условиями, характером синоптических процессов, протекающих над данной территорией. Высокие температуры воздуха и продолжительное отсутствие осадков обуславливают в летне-осенний сезон появление длительного маловодного меженного периода. В зимний сезон подобная межень отмечается в годы с очень низкими температурами воздуха и небольшими снегозапасами, обуславливающими глубокое промерзание земной поверхности и значительное истощение речного стока.

Наличием районов с асинхронными колебаниями стока в различные сезоны можно объяснить тот факт, что маловодье охватывает лишь отдельные районы страны. В целом по территории СССР очень маловодные сезоны наблюдаются довольно часто в зимний или летне-осенний сезоны. Но для конкретных районов и сезонов это случается значительно реже. На реках Северо-Запада ЕТС наиболее маловодная летняя межень отмечалась в 1938, 1939, 1951, 1959, 1963, 1964 и 1972 гг., а на реках северной части ЕТС — в 1936—1938 и частично 1972 гг. В целом же в различных районах ЕТС за последние 50—80 лет самыми маловодными в летний сезон были 1938, 1939, 1941, 1945, 1946, 1951 и 1972 гг. При этом лишь в 1972 г. маловодьем была охвачена наиболее обширная территория ЕТС. Южная граница района, охваченного засухой, проходила от Финского залива через Чудское озеро, верховья Западной Двины, Днепра, Оки, Сейма, Северского Донца, низовья Волги; северная граница шла от Ладожского озера на восток через среднее течение р. Онеги до р. Северной Двины, опускалась по ней до слияния рек Сухоны и Вычегды и далее по водоразделу рек Вятки и Ветлуги достигала Волги, затем по Волге доходила до г. Куйбышева, где поворачивала на восток, обгибая Урал. Весьма большие районы северной половины ЕТС были охвачены маловодьем в летний сезон 1938 и 1939 гг.

На реках АТС самые маловодные сезоны были в 1943, 1949, 1954, 1957, 1958, 1967 гг., т. е. отмечается асинхронность в ко-

лебаниях водности рек ЕТС и АТС в маловодный период года. Правда, для некоторых районов бывают и совпадения. Так, в бассейне р. Лены, помимо указанных лет, маловодье наблюдалось в 1941 и 1963 гг., т. е. в те же годы, что и на реках некоторых районов ЕТС, но подобное совпадение может быть отнесено в разряд случайных.

Таким образом, можно отметить, что имеющиеся в настоящее время наблюдения Гидрометслужбы СССР за стоком рек, как правило, включают маловодные годы.

При производстве расчетов временных характеристик меженного периода приходится сталкиваться с отсутствием фактических данных, поэтому большое значение имеет вопрос расчета указанных характеристик.

Как уже было показано, сроки и продолжительность меженного периода зависят главным образом от климатических условий (осадки и температура воздуха), прочие факторы для большинства рек имеют подчиненное значение. Изменяются указанные характеристики по территории в соответствии с законом географической зональности, что позволяет строить карты изохрон сроков начала и конца меженных периодов. При построении карт необходимо учитывать существующее различие в сроках межи для малых и средних рек, а также местные особенности территории, искажающие общую картину хода сроков межи. Подобные карты целесообразно строить по данным о средних многолетних датах или по сведениям за годы с наиболее маловодными сезонами. Подобные обобщения осуществлены И. Н. Стеженской для рек Западно-Сибирской низменности [152]. Ею построены карты изохрон дат наступления зимней межи для малых (площадь бассейна до 10 000 км²) и средних (10 000—100 000 км²) рек в многоводные (обеспеченностью 20—25%), средние и маловодные (обеспеченностью 75—80%) годы. При этом даты начала межи были отнесены не к центрам речных бассейнов, а к гидрометрическим створам.

Построенные Стеженской карты показывают, что сроки начала зимней межи весьма закономерно и плавно меняются по территории с юга на север. Это подтверждает возможность построения карт изохрон сроков меженного периода. Правда, территория Западной Сибири в этом отношении является наиболее благоприятной из всех районов СССР, поскольку она имеет наиболее однообразный рельеф поверхности, а также довольно однообразное геологическое и гидрогеологическое строение. Кроме того, отмечается закономерная смена климатических условий по рассматриваемой территории. Не случайно именно на этой территории все гидрологические характеристики (минимальный, годовой, максимальный сток) имеют ярко выраженное зональное распределение (изолинии стока идут почти параллельно в широтном направлении). При построении карт изохрон для других районов СССР, особенно возвышенных, неизбежно

возникают значительные трудности в наведении изохрон вследствие более разнообразных физико-географических условий, как климатических, так и подстилающей поверхности, а также человеческой деятельности, которую далеко не всегда возможно учесть. Для ряда районов СССР, особенно в летне-осенний сезон, где меженный период часто бывает прерывистым и коротким и наблюдается в различные месяцы сезона (блуждающая межень, см. раздел 3.2) наведение изохрон представляется нецелесообразным, особенно для многоводных лет. Если же короткая и блуждающая межень на реках данного района отмечается только в многоводные годы (сезоны), то в подобных случаях обобщения следует осуществлять по группам лет с меженным периодом, наблюдающимся в начале — середине сезона и в середине — конце его. Тогда даты начала межени (в первом случае) или конца (во втором) будут соответствовать общим закономерностям, свойственным данной области в маловодные годы, а малая длительность межени будет учтена при производстве обобщений по продолжительности меженного периода, т. е. таким годам будут соответствовать самые короткие меженные периоды.

При невозможности построения карт изохрон обобщение можно производить с помощью графических методов, например графиков связи продолжительности межени с ее водностью, построенных для районов со сходными физико-географическими условиями, главным образом климатическими и гидрогеологическими.

Продолжительность межени определяется сроками ее начала и конца, зависящими в большей мере от климатических условий. Следовательно, в своем распределении по территории продолжительность меженного периода подчиняется закону географической зональности и может обобщаться в виде карт изохрон. Подобная карта продолжительности зимней межени построена Стеженской для рек Западно-Сибирской низменности [152]. При этом ею учтена существующая разница в продолжительности меженного периода на малых и средних реках и осуществлено построение двух соответствующих систем изохрон для разных по водности лет — маловодного, среднего и многоводного.

В зависимости от сезона (зимний или летне-осенний) и характера межени продолжительность меженного периода может изменяться по годам от небольшой до значительной (см. табл. 7 и 8). Поэтому построение карт изохрон можно производить по средним многолетним данным, если на достаточно обширных территориях продолжительность межени меняется во времени незначительно (например, зимняя межень на реках Сибири), или по обеспеченным величинам, характеризующим маловодные годы, если велики колебания длительности межени по годам. Для малых рек, где на продолжительность межени большое

влияние оказывают местные факторы, целесообразно использовать зависимость продолжительности меженного периода от величины площади бассейна реки или величины меженного стока.

Изложенные в этой главе способы оценки временных характеристик маловодного периода позволяют получить необходимые данные о сроках и продолжительности меженного периода и лимитирующего и маловодного сезонов для рек с наличием и отсутствием сведений об их водном режиме. Эти данные являются той основой, которая позволяет затем перейти к расчету количественных величин низкого стока, т. е. минимальных, меженных и лимитирующих-расходов воды.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТОКА РЕК В МАЛОВОДНЫЙ ПЕРИОД ПРИ НАЛИЧИИ ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

4.1. ОЦЕНКА РЕПРЕЗЕНТАТИВНОСТИ РЯДА НАБЛЮДЕНИЙ

Основное применение в практике строительного проектирования находят характеристики низкого стока большой обеспеченности, главным образом в диапазоне 75—97%, как гарантированные величины речного стока. Они определяются с помощью широко используемых в гидрологических расчетах вероятностно-статистических методов — расчет нормы стока, определение изменчивости искомых характеристик во времени с последующим подбором теоретической схемы распределения этих случайных величин. При этом на первый план выступает прежде всего оценка репрезентативности имеющихся стоковых материалов, т. е. в какой мере имеющийся ряд наблюдений за стоком включает в себя наиболее маловодные годы и сезоны, отмечавшиеся когда-либо на рассматриваемой территории.

Низкий сток рек отличается значительными колебаниями во времени, охватывающими не только отдельный год, но и группы лет. Чем полнее в имеющемся ряду наблюдений отражены многоводные и маловодные периоды, тем более достоверным будет результат расчетов при оценке той или иной характеристики низкого стока, ее средней и обеспеченной величины. Изучение закономерностей многолетних колебаний речного стока производилось главным образом в отношении его среднегодовой величины, очень слабо исследованы многолетние колебания стока за отдельные сезоны года.

Изучение многолетних колебаний стока, выделение маловодных и многоводных групп лет осуществляется с помощью разностных интегральных кривых, впервые использованных Б. Д. Зайковым при анализе колебаний годового стока рек верхней части бассейна р. Камы и наиболее полно обоснованных В. Г. Андреяновым [10]. Указанный метод отличается простотой и наглядностью, сущность его изложена в работах [8, 10].

Наличие и календарные сроки появления репрезентативного периода связаны с циклическими колебаниями речного стока во времени, определяющимися циклическими колебаниями климатических факторов, главным образом характером атмосферной циркуляции. Последняя распространяется на большие территории, поэтому возможно выделение районов с синхронными много-

летними колебаниями низкого стока рек. Так, Б. М. Доброумов [64] выделил районы синхронных колебаний минимального зимнего стока рек на ЕТС (рис. 28), которые могут быть использованы при определении репрезентативного ряда, в частности для оценки нормы минимального стока рек в зимний сезон. В основу районирования положено сходство разностных интегральных кривых по характеру появления многоводных и маловодных циклов. При этом за количественный критерий синхронности многолетних колебаний минимального стока, показывающий достоверность осуществленного районирования, принято наличие или отсутствие коррелятивной связи между стоком рек, расположенных вблизи границ районов, со стоком рек, находящихся на наибольшем удалении от них внутри района и вблизи них в соседнем районе. При коэффициенте корреляции более 0,50 связь считалась удовлетворительной и реки объединялись в один район. В пределах одного района с синхронными колебаниями минимального стока значения коэффициентов корреляции составляли 0,56—0,91, а при анализе связи с соседними районами их величина была меньше 0,50.

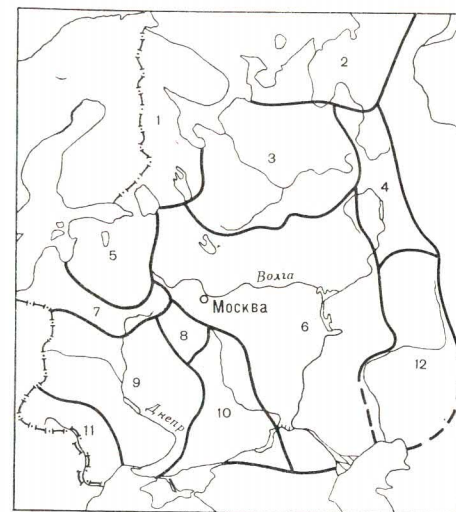


Рис. 28. Районы синхронных колебаний минимального стока в зимний период на ЕТС.

Следует отметить, что наличие даже длинного ряда наблюдений не может гарантировать от значительной ошибки в определении нормы низкого стока. Например, средний модульный коэффициент летне-осеннего минимального 30-дневного стока р. Северной Двины у с. Усть-Пинеги за период 1952—1962 гг. равен 0,99, а за 1943—1965 гг. — лишь 0,92, т. е. увеличение информационного ряда более чем в два раза снизило точность определения нормы стока. Но наибольшая ошибка, естественно, может быть при коротком периоде наблюдений, охватывающем лишь часть цикла.

Помимо установления циклов колебаний стока большое значение имеет вопрос определения вероятности включения в расчетный период самой маловодной группы лет и частота ее повторения в многолетнем периоде. В этом отношении определенный интерес представляет осуществление исследований

по изучению повторяемости и продолжительности групп лет разной водности. Подобные работы произведены для рядов годового стока путем моделирования длинных стоковых рядов методом статистических испытаний [74]. При этом предполагается, что распределение вероятностей случайных величин, свойственных короткому фактическому ряду, сохраняется и для более длинного ряда за пределами фактических наблюдений. Использование математической модели вместо фактической информации позволяет оперировать со сколь угодно большим рядом чисел, долженствующих отражать действительное распределение стока в многолетии.

Выяснение повторяемости и продолжительности группировок маловодных лет позволяет установить репрезентативность фактического ряда в отношении включения в него наиболее неблагоприятных по водности лет и подтвердить целесообразность приведения, если наиболее маловодная группировка лет отсутствует в имеющемся ряду наблюдений. Так, при моделировании 1000-летнего ряда для рек ЕТС [74] было получено, что период тридцатых годов (1933—1940) относится к разряду наиболее маловодных. Его повторяемость колеблется от одного до четырех раз в 1000 лет, что соответствует в целом обеспеченности 99,5—99,9%, определенной по наблюдаемым данным. Следовательно, при расчетах низкого стока рек необходимо стремиться к включению этого маловодного периода или отдельных маловодных лет в рассматриваемый информационный ряд, если они там отсутствуют, путем восстановления ряда.

Таким образом, вопрос восстановления имеющегося короткого или прерывистого ряда наблюдений за стоком приобретает существенное значение. Имеется несколько способов восстановления или удлинения рядов стока, но все они базируются на применении метода гидрологической аналогии и различаются только в технике их осуществления и в точности конечных результатов.

Применительно к расчетам характеристик низкого стока рек основное внимание при подборе бассейнов-аналогов необходимо обращать на сходство гидрогеологических условий сравниваемых бассейнов, степень дренирования реками водоносных горизонтов, что приближенно отражается размерами бассейна реки. Следовательно, у рассматриваемых рек не должно быть большого различия в величине площади бассейна. Немаловажное значение имеет сходство бассейнов по естественной зарегулированности стока. При этом, конечно, учитываются и другие требования, предъявляемые при применении метода гидрологической аналогии. Существенно важно отсутствие факторов, значительно искажающих речной сток в маловодный период в целом или в отдельные его отрезки, характеризующие сезонный или минимальный сток. Сюда относятся наличие в речной сети водохранилищ, озер, а также производство крупных водозаборов из русел рек

или подземных водоносных горизонтов, принимающих значительное участие в питании рек, сбросы промышленных вод или поступление вод в реки в результате откачки из шахт и карьеров.

Данные за отдельные пропущенные годы целесообразно восстанавливать по графикам связи стока исследуемого бассейна со стоком бассейна-аналога. Правда, использование метода парной корреляции далеко не всегда дает достаточно надежные результаты. Обычно чем большее участие в формировании той или иной характеристики низкого стока данного речного бассейна принимают местные (азональные) факторы, тем труднее подобрать к нему соответствующий речной бассейн-аналог. Как показывают исследования характера парной связи минимального 30-дневного стока рек с коротким и длительным периодом наблюдений, коэффициент корреляции такой связи нередко равен 0,6—0,7 и очень часто не превышает 0,7—0,8. Исключение составляют случаи, когда приводимый пункт и пункт-аналог расположены на одной реке, а на участке реки между этими пунктами отсутствуют какие-либо значительные искажения стока. В этом случае коэффициент корреляции повышается до 0,9—0,95.

Чем меньше гидрологически изучена территория, тем чаще возникают трудности в подборе бассейнов-аналогов. Поэтому большой интерес представляет применение метода множественной линейной корреляции для восстановления пропущенной группы лет наблюдений и особенно для ретроспективного удлинения информационного ряда при одновременном использовании нескольких бассейнов-аналогов.

Удлинение короткого фактического ряда (10—15 лет) по более длинному ряду-аналогу или по совокупности рядов-аналогов может быть осуществлено с использованием уравнения линейной регрессии (при линейной корреляционной связи между соответствующими членами короткого и длинного рядов).

При использовании одного аналога и наличии между рассматриваемыми рядами достаточно тесной линейной корреляционной зависимости ($r > 0,8$) удлинение ряда производится по уравнению линейной регрессии, которое для каждого восстанавливаемого года имеет вид

$$Q = \bar{Q} + r \frac{\sigma}{\sigma_a} (Q_a - \bar{Q}_a), \quad (2)$$

где Q и Q_a — расход воды (минимальный, меженный или сезонный) соответственно короткого ряда и ряда-аналога для восстанавливаемого года; $\bar{Q}$ и $\bar{Q}_a$ — средние многолетние (минимальные, меженные или сезонные) расходы воды соответственно короткого и длинного рядов, определенные за одновременный период наблюдений; r — коэффициент корреляции между

значениями низкого стока за период совместных наблюдений, рассчитываемый по уравнению

$$r = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (Q - \bar{Q})(Q_a - \bar{Q}_a)}{\sigma \sigma_a}, \quad (3)$$

где n — число лет совместных наблюдений; σ и σ_a — средние квадратические отклонения рассматриваемых характеристик низкого стока, определяемые по уравнениям

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (Q - \bar{Q})^2}{n-1}},$$

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{\sum (Q_a - \bar{Q}_a)^2}{n-1}}.$$

В отдельных случаях корреляционная связь между рассматриваемыми пунктами может иметь криволинейный вид. Такая связь свидетельствует прежде всего о недостаточном соответствии условий формирования стока в пунктах с коротким и длинным периодами наблюдений, например при несовпадении размеров поверхностного и подземного водосборов одного из них, причем главным образом это различие проявляется в многоводные годы, когда имеется наиболее значительный приток или отток вод с соседних бассейнов или в соседние бассейны. В маловодные годы, когда реки в период низкого стока переходят на глубокое подземное питание, может наблюдаться значительное несоответствие степени истощения подземных вод рассматриваемых бассейнов вследствие различной мощности питающих их горизонтов и отличий в характере гидравлической связи этих горизонтов с рекой.

Криволинейные связи могут наблюдаться и при некотором различии в синхронности водного режима рассматриваемых рек в данном сезоне, при неучете влияния хозяйственной деятельности человека на низкий сток одной из рек и по некоторым другим подобным причинам. Поэтому криволинейные зависимости целесообразно использовать лишь в случае отсутствия более подходящих аналогов, обеспечивающих линейные корреляционные связи.

При криволинейной зависимости для получения более надежных результатов Алексеев [6] рекомендует осуществлять нормализацию используемых переменных, т. е. заменять наблюдаемые значения x_j их эмпирическими вероятностями неперевышения, определенными по выражению

$$P = \frac{m - 0,25}{n + 0,5}, \quad (4)$$

где m — порядковый номер ранжированного ряда наблюдаемых данных; n — общее число лет наблюдений.

Полученные вероятности неперевышения преобразовываются в соответствующие им квантили $u = F[p]$ нормального нормированного распределения (соответствующие расчетные значения приводятся в приложениях I и III работы [6]). Нормализованные переменные связаны попарно уже линейной корреляцией. Используя кривые связи между исходными (u_0) и нормализованными (u_j) переменными и уравнение линейной регрессии, определенное по коэффициенту нормализованной корреляции вида

$$r_u = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_1^n u_0 u_j}{\sigma_u^2(n)}$$

между соответственными нормализованными членами рассматриваемых рядов, устанавливается кривая регрессии

$$\tilde{x}_0 = f_0[r_u u_j(x_j)],$$

позволяющая определить для наблюдаемых значений пункта-аналога за период, отсутствующий в коротком ряду, соответствующие регрессионные значения, которые присоединяются к короткому ряду как восстановленные данные.

Удлинение ряда по изложенной методике возможно при величине коэффициента нормализованной корреляции между коротким и длинным рядами, превышающей 0,9, а величина среднеквадратической ошибки должна быть меньше половины этого коэффициента.

При использовании двух аналогов и более, когда один аналог не удовлетворяет требованиям точности расчетов или для максимального увеличения точности, Алексеев рекомендует применять уравнение нормализованной линейной регрессии [6]. С помощью этого уравнения и кривых связи между исходными и нормализованными переменными определяется уравнение криволинейной регрессии, по которому в пунктах-аналогах для ряда лет, соответствующих восстанавливаемым, определяются регрессионные значения, являющиеся продолжением короткого ряда. Использование нескольких аналогов допускается при величине полного коэффициента нормализованной корреляции между коротким рядом и совокупностью рядов-аналогов, превышающей 0,9.

Восстановление одним из вышеизложенных методов ряды рассчитываемой характеристики низкого стока могут быть использованы как для выбора наиболее репрезентативного ряда, так и для определения расходов воды расчетной обеспеченности. Кривые обеспеченности характеризуются обычно тремя параметрами: нормой стока, коэффициентами изменчивости и асимметрии. Правда, норма той или иной характеристики низкого стока иногда используется в проектной практике как самостоятельная расчетная величина.

4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМЫ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОГО СТОКА

Под нормой той или иной характеристики низкого стока понимается ее среднеарифметическое значение за многолетний период. Продолжительность последнего должна быть такой, чтобы его дальнейшее увеличение практически не отражалось на значении нормы, т. е. имеющийся ряд наблюдений должен охватывать все возможные периоды времени с существенными колебаниями стока. Естественно, что его длительность должна быть весьма большой. Однако продолжительность наблюдений за стоком рек ограничена, имеющиеся ряды не превышают 50—80 лет, а в основном их длительность составляет 30—20 лет и менее. При этом больше трети (а на АТС около половины) всех пунктов наблюдения за стоком на реках СССР имеют продолжительность менее 10 лет. Поэтому имеющийся ряд может не включить наиболее экстремных характеристик. Применительно к низкому стоку весьма важно учесть необычайно маловодные годы или их группировки.

Продолжительность репрезентативного периода определяется величиной изменчивости низкого стока во времени. Поскольку он формируется в большей мере за счет подземных вод, изменяющихся во времени значительно слабее поверхностных, то величина изменчивости низкого стока обычно сравнительно небольшая (коэффициент изменчивости непересыхающих и непремензающих рек чаще всего находится в пределах 0,2—0,4). Поэтому особо большая длительность периодов наблюдения обычно не требуется. Правда, чем большее участие в формировании данной характеристики низкого стока принимают поверхностные воды, тем существеннее изменчивость этого стока во времени и тем продолжительнее должен быть период наблюдения. В этом отношении ряда наблюдений для расчета нормы минимального стока может быть меньше, чем для определения стока маловодного сезона, в формировании которого осадки принимают наибольшее участие (непосредственно или через верховодку).

Естественно, что понятие «норма» употребляется с известной долей условности, поскольку даже для наиболее длинных рядов средняя арифметическая величина стока лишь приближенно будет отвечать норме. Поэтому всегда оценивается величина отклонения рассчитанного значения от нормы по уравнению

$$\sigma_n = \pm \frac{C_v}{\sqrt{n}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где σ_n — средняя квадратическая ошибка рассчитанной средней величины ряда; C_v — коэффициент изменчивости рассматриваемых величин низкого стока; n — число членов ряда.

В зависимости от величины σ_n имеющийся ряд наблюдений считается достаточным или не удовлетворяющим необходимой точности. Применительно к минимальному стоку за предельно допустимую величину σ_n принято $\pm 15\%$, что обусловливается точностью исходных гидрометрических данных, как будет показано ниже. Нет оснований принимать меньшую величину σ_n и для других характеристик низкого стока, поскольку их изменчивость во времени является не меньшей, чем изменчивость минимального стока, а точность исходной информации в общем находится в тех же пределах. Чем сложнее условия формирования низкого стока и больше вероятность пересыхания или перемерзания рек, тем больший требуется период для расчета нормы характеристик низкого стока. Продолжительность этого периода легко устанавливается по формуле (5) при известном коэффициенте изменчивости и средней квадратической ошибке 15% . При незначительной изменчивости стока в многолетнем разрезе для оценки нормы с заданной точностью могут использоваться относительно короткие ряды наблюдений, если они характеризуют средний по водности период. Последнее устанавливается по продолжительным рядам наблюдений за стоком рек, находящихся в таких же физико-географических условиях.

Используемые для обобщений фактические данные имеют определенную ошибку, складывающуюся из погрешности полевого измерения расхода воды и ошибки расчета ежедневных расходов воды, обусловленной теснотой связи уровней и расходов воды в створе наблюдений, а также степенью освещения принятой расчетной кривой расходов воды данными натурных измерений и ее устойчивостью. Измерения расходов воды в межень обычно производятся при малых глубинах и наличии растительности в русле (на равнинных реках) или различного размера камней, создающих косоуструйность течения (на горных реках), а также ледяного покрова в зимний период. Это значительно влияет на точность измерения, особенно при небольшой величине расхода воды. Поэтому точность полевых измерений расходов воды в межень находится чаще всего в пределах 10—15%, хотя в отдельных случаях могут возникать и более существенные погрешности, особенно в зимний период. Известно, что чем меньше глубина реки, тем значительнее погрешность измерения. Так, на реках Поволжья при глубинах около 0,3 м погрешность измерений скорости течения с помощью вертушки составляла до 20% [103]. Но при достаточных глубинах и скоростях течения погрешность не превышает 10% [165].

Как правило, минимальные расходы воды не измеряются непосредственно гидрометрическим путем, а определяются по экстраполированной нижней части кривой расходов воды. Однако разброс точек в этой части кривой бывает весьма значительным — до 20—30% и более [165]. Поэтому при недостаточном числе измеренных расходов воды и невысокой точности

измерений ошибка определения минимального стока по экстраполированной части кривой становится наибольшей. Появление значительных ошибок более свойственно малым рекам, для которых гидрометрические условия измерения и расчетов расходов воды наиболее сложные. Этому же способствует и небольшая величина расхода воды в реке, сопоставимая по абсолютному значению с величиной ошибки.

На положение нижней части кривой расходов воды существенное влияние, особенно для малых рек, оказывает недостаточный учет зарастаемости русла водной растительностью летом или потерь воды на ледообразование зимой, а также использование многолетних кривых расходов воды и осредненных переходных коэффициентов для подсчета стока за отдельные годы. Систематическая или эпизодическая изменчивость русла обуславливает преуменьшение (при размыве) или преувеличение (при намыве) расходов воды.

Большое значение для оценки низкого стока имеет наличие на реках различного рода плотин, создающих водохранилища для регулирования стока и обеспечения водоснабжения. Регулирующие плотины обычно увеличивают низкий сток рек, но при значительном водопотреблении из водохранилищ его величина, наоборот, уменьшается. В наибольшей мере такие колебания сказываются на суточном стоке. Поэтому чем больше период осреднения (сутки, декада, месяц и т. д.), тем меньше при прочих равных условиях сказывается влияние гидротехнических сооружений.

Следует отметить, что увеличение периода осреднения величины расхода воды на любой реке ведет к повышению его точности при расчете по кривой расходов воды вследствие компенсации отклоняющихся в ту или иную сторону величин. Следовательно, потенциально наименее точно определяемыми являются суточные расходы воды, а более точно — средние за длительный период (месяц и более). Правда, это не исключает возможность использования данных о средних суточных величинах стока для производства разного рода обобщений.

Наличие ошибок можно выявить путем сопоставления имеющихся величин как по одной реке, так и по ряду соседних рек, находящихся в одинаковых физико-географических условиях. Полезно также сопоставить соответственные характеристики низкого стока (например, суточные и месячные, или меженные и сезонные) рек одного района, учитывая при этом генетическую однородность формирования этих характеристик.

Указанные погрешности фактических данных относятся к разряду гидрометрических. К ним добавляются ошибки, возникающие при расчете вероятностных характеристик низкого стока — его нормы и расходов воды расчетной обеспеченности.

Определение репрезентативного короткого периода позволяет использовать для расчетов и обобщений значительно больший

объем информации за счет коротких рядов, особенно, если этот период приходится на последние десятилетия, когда было открыто большое количество пунктов наблюдения за стоком, особенно на АТС. Для выбора периода применяются разностные интегральные кривые. Значение среднего модульного коэффициента за n лет устанавливается по выражению

$$K_{\text{ср}} = 1 + \frac{\sum (K-1)_k - \sum (K-1)_n}{n}, \quad (6)$$

где $K_{\text{ср}}$ — средний модульный коэффициент; n — продолжительность выделенного периода; $\sum (K-1)_k$ и $\sum (K-1)_n$ — конечная и начальная ординаты интегральной кривой для данной характеристики стока.

Величина среднего модульного коэффициента показывает степень отклонения водности данного короткого периода от нормы.

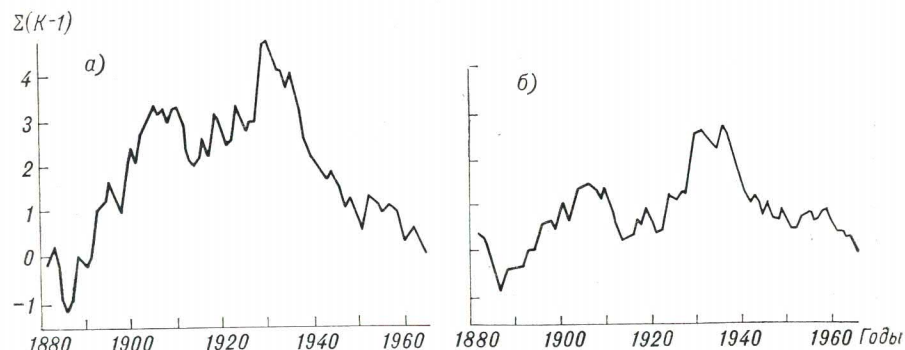


Рис. 29. Разностные интегральные кривые минимального 30-дневного стока за летне-осенний (а) и зимний (б) периоды для р. Северной Двины у с. Усть-Пинеги.

Чем ближе значение $K_{\text{ср}}$ к единице (норма), тем репрезентативнее короткий период. На рис. 29 показаны разностные интегральные кривые минимального 30-дневного стока для р. Северной Двины за летне-осенний и зимний сезоны, построенные за период 1882—1965 гг. (84 года). Анализ кривых показывает, что за последние 20—25 лет наиболее репрезентативным для этого района при оценке нормы зимнего минимального 30-дневного стока является 10-летний период с 1951 по 1961 г., а для соответствующего летне-осеннего — 1952—1962 гг. Рассчитанные за эти периоды модульные коэффициенты равны 0,99. Репрезентативность подтверждается и совпадением периодов для зимнего и летне-осеннего минимального стока. Сдвигка на год одного сезона по отношению к другому естественна, так как зимний сток определяется за сезон, начинающийся в предыдущем году.

Определение нормы низкого стока при коротком и нерепрезентативном периоде наблюдений осуществляется с использова-

нием метода гидрологической аналогии. Приведение к многолетнему периоду характеристик низкого стока целесообразно производить по графикам связи, как это рекомендуется для минимального стока [40]. Использование аналитического способа приведения имеет смысл в основном для рек, имеющих близкие размеры бассейна (при однородности прочих условий), и в тех случаях, когда графические зависимости невозможно использовать из-за слишком малого числа лет наблюдений на приводимом пункте.

Если в процессе исследований производилось восстановление короткого или прерывистого ряда наблюдений, то в расчетах используются параметры, характеризующие вновь полученный информационный ряд.

4.3. РАСЧЕТ РАСХОДОВ ВОДЫ РАЗЛИЧНОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ В МАЛОВОДНЫЙ ПЕРИОД

Рассмотренные выше приемы и методы восстановления отдельных лет или групп лет, отсутствующих в имеющемся ряду наблюдений за низким стоком рек, позволяют получать достаточно надежную информацию, необходимую для определения той или иной расчетной характеристики низкого стока.

Построение эмпирических кривых обеспеченности низкого стока производится с использованием формулы (1). Имеющийся ряд наблюдений, как правило, представляет собою лишь выборку различной продолжительности из генеральной совокупности. Поэтому величина обеспеченности каждого члена рассматриваемого статистического ряда является условной, зависящей от количества членов ряда. Применительно к низкому стоку основное значение имеет величина обеспеченности последних членов ряда, показывающих наиболее напряженные по водности условия. Она может существенно изменяться при различной длительности периода наблюдения за стоком. Так, при 10-летнем периоде наблюдений за стоком обеспеченность десятого члена ряда составляет 93,2%, а при периоде 50 лет величина обеспеченности последнего члена равна уже 98,5%. Поэтому положение точек в самой нижней части эмпирического ряда обеспеченности должно быть наиболее обоснованным.

При коротком периоде наблюдений возникают некоторые трудности в определении расходов воды большой обеспеченности (97—99%) вследствие необходимости экстраполяции эмпирической кривой. При графической экстраполяции такой кривой не исключена возможность субъективной оценки ее направления. Поэтому для исключения или уменьшения этих недостатков обычно к эмпирическим точкам подбирается теоретическая кривая распределения или применяются специальные клетчатка

обеспеченности с закрепленными соотношениями коэффициентов изменчивости и асимметрии (клетчатка А. И. Чеботарева и А. В. Рождественского, клетчатка Г. Н. Бровковича), спрямляющие кривые обеспеченности при соответствующих соотношениях указанных коэффициентов. Когда примененная клетчатка совпадает с фактическим соотношением коэффициентов, эмпирические кривые обеспеченности спрямляются и осуществление необходимой экстраполяции не вызывает затруднений.

Величина коэффициента изменчивости, необходимого для построения теоретической кривой обеспеченности, определяется по имеющемуся фактическому ряду наблюдений или восстановленному ряду с применением формулы моментов или метода наибольшего правдоподобия, использование которых для расчетов минимального стока достаточно полно изложено в работе [40].

Для расчета коэффициента асимметрии требуется, как известно, ряд наблюдений за стоком весьма большой продолжительности, какого обычно не имеется. Поэтому в большинстве случаев величина этого коэффициента устанавливается путем подбора до наилучшего соответствия теоретической кривой эмпирическим точкам. Для того чтобы получить представление о колебаниях коэффициента асимметрии по территории (что позволяет более надежно начинать подбор его значений), широко используется его относительная величина, показывающая соотношение коэффициентов асимметрии и изменчивости. Многочисленные примеры определения этого соотношения для основных характеристик низкого стока показывают, что его величина находится главным образом в пределах $(1,0 \div 3,0) C_v$ при наиболее часто встречающемся случае $C_s = 2C_v$.

Г. А. Алексеев [4, 5] предложил графоаналитический метод, позволяющий с помощью сглаженной кривой, осредняющей эмпирические точки, по трем ее ординатам ($Q_{5\%}$, $Q_{50\%}$, $Q_{95\%}$) определить все три параметра и получить таким образом расчетную кривую обеспеченности, характеризующую с достаточной точностью зоны обеспеченности, не освещенные или частично освещенные данными наблюдений. Сущность этого метода заключается в использовании трех опорных ординат: $Q_{5\%}$, $Q_{50\%}$ и $Q_{95\%}$, снятых со сглаженной эмпирической кривой обеспеченности для расчета ее коэффициента скошенности S

$$S = \frac{Q_{5\%} + Q_{95\%} - 2Q_{50\%}}{Q_{5\%} - Q_{95\%}}.$$

Наличие однозначной функциональной зависимости между коэффициентом асимметрии C_s и коэффициентом скошенности S позволяет по известному значению последнего определить значение C_s .

Другие стандартные параметры рассчитываются по следующим формулам:

для биномиальной кривой обеспеченности

$$\sigma_Q = \frac{Q_{5\%} - Q_{95\%}}{\Phi_{5\%} - \Phi_{95\%}},$$

$$\bar{Q} = Q_{50\%} - \sigma_Q \Phi_{50\%};$$

для логарифмически-нормальной кривой обеспеченности

$$\sigma'_Q = \frac{Q_{5\%} - Q_{95\%}}{\psi_{5\%} - \psi_{95\%}},$$

$$\bar{Q} = Q_{50\%} - \sigma'_Q \psi_{50\%},$$

где Φ — относительные отклонения соответствующих ординат биномиальной кривой обеспеченности от середины при $C_v = 1,0$ и определенном выше коэффициенте C_s ; ψ — нормированные отклонения соответствующей обеспеченности (5, 50 и 95%) от среднего значения Q опорных ординат кривой обеспеченности при рассматриваемом значении коэффициента C_s .

В приложении 2 приведены относительные отклонения ординат биномиальной кривой от середины Φ и нормированные отклонения от среднего значения логарифмически нормальной кривой обеспеченности ψ при разных значениях обеспеченности $P\%$, соответствующих величинах коэффициента скошенности S и отвечающих ему значениях коэффициента асимметрии C_s . Вид кривой обеспеченности устанавливается по лучшему соответствию теоретической кривой, построенной по рассчитанным графоаналитическим методом параметрам, эмпирическим точкам, особенно в нижней части кривой. Логарифмически-нормальная кривая обеспеченности дает несколько меньшие величины ординат большой обеспеченности (при 95% и более).

Величина коэффициента изменчивости устанавливается обычным способом по соотношению среднеквадратического отклонения σ_Q и нормы низкого стока $\bar{Q}$

$$C_v = \frac{\sigma_Q}{\bar{Q}}.$$

Особенностью рядов наблюдений за низким стоком является наличие в некоторых из них нулевых значений. Это характерно для рек, протекающих в районах, где в маловодные годы (сезоны) резко сокращается питание рек вплоть до полного прекращения подземного стока в русло. В таких случаях отмечается пересыхание или перемерзание реки на различный, иногда весьма длительный период. Наиболее вероятно появление нулевых значений в ряду наблюдений при расчетах минимального суточного и 30-дневного стока, а в зонах недостаточного увлаж-

нения и распространения многолетнемерзлых пород — даже и межженного, особенно на малых реках. В этих случаях эмпирические кривые обеспеченности в нижней части быстро приближаются к оси абсцисс и могут достичь нулевых значений намного ранее 100%. Параметры таких кривых целесообразно определять графоаналитическим методом Алексеева. В связи с возможностью ухода эмпирической кривой обеспеченности в ноль ранее достижения ею 95% предлагается использовать на концах кривой другие, чем указано выше, опорные ординаты, например 10 и 90 или 20 и 80%. Соответствующие значения коэффициентов S и C_s , рассчитанные автором, а также относительные отклонения ординат приведены в приложении 2.

Графоаналитический метод позволяет довольно быстро и достаточно надежно определять необходимые параметры, поэтому он нашел широкое применение в расчетной практике. Правда, точность определения этим методом параметров кривой обеспеченности в значительной степени зависит от обоснованности проведения сглаженной эмпирической кривой обеспеченности и характера направления ее концов (степень изгиба, соответствие положению кривой отдельных эмпирических точек или их групп), тем более что величина коэффициента асимметрии, являющегося довольно неустойчивым, принимается по общему положению кривой и может недостаточно учитывать отклонения точек на концах эмпирического ряда.

Сопоставление значений параметров кривых обеспеченности минимального 30-дневного стока за зимний и летне-осенний сезоны для 105 пунктов (т. е. 210 кривых) северной и северо-западной частей ЕТС, рассчитанных графоаналитическим методом и методом моментов, показало в целом весьма хорошую их сходимость. Разница в величинах среднего расхода воды и коэффициента изменчивости в подавляющем большинстве случаев не превышала 10—15%. Величина коэффициента C_s , определенного графоаналитическим методом, несколько чаще отличается от соответствующего коэффициента, установленного путем подбора теоретической кривой к эмпирическим точкам. Приблизительно в 25% случаев его величина была весьма высокой или, наоборот, заниженной и составляла от $4C_v$ до $8C_v$ или $(0 \div 1,0)C_v$, хотя эмпирическим точкам вполне соответствовала теоретическая кривая при $(2 \div 3)C_v$. Следует отметить, что подобные расхождения в величинах C_s не создавали значительной ошибки в определении расходов воды большой обеспеченности, так как величина коэффициента изменчивости составляла всего 0,20—0,35. Так, для р. Уфтьи у п. Ярухино для зимнего минимального 30-дневного стока соотношение коэффициентов C_s и C_v , рассчитанных графоаналитическим методом, составляет $8C_v$ при $C_v = 0,2$. Однако эмпирическим точкам вполне удовлетворительно соответствует теоретическая кривая при $C_s = 2C_v$, а величина расхода воды, например 97%-ной обеспеченности, при

таким соотношении отличается всего на 11%, что находится в пределах точности расчетов.

Величина ошибки параметров, рассчитанных одним из вышеуказанных методов, устанавливается соответственно по уравнениям

$$\sigma_Q = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \cdot 100\%; \quad (7)$$

$$\sigma_{C_v} = \sqrt{\frac{1 + C_v^2}{2n}} \cdot 100\%; \quad (8)$$

$$\sigma_{C_v} = \sqrt{\frac{3}{2n(3 + C_v^2)}} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Формула (8) используется при определении средней квадратической ошибки коэффициента изменчивости, рассчитанного методом моментов. Последний применяется при $C_v \leq 0,5$. Формула (9) употребляется при определении величины C_v методом наибольшего правдоподобия, когда $C_v > 0,5$.

Длина ряда наблюдений считается достаточной для определения нормы стока и коэффициента изменчивости, если величина средней квадратической ошибки рассчитанной нормы любой характеристики низкого стока не превышает 15%, а значение средней квадратической ошибки коэффициента изменчивости не больше 20% при использовании метода моментов и 15—10% в случае применения метода наибольшего правдоподобия (при $C_v = 0,51 \div 0,80$ $\sigma_{C_v} \leq 15\%$, при $C_v > 0,8$ $\sigma_{C_v} \leq 10\%$).

В случае превышения указанных значений средней квадратической ошибки осуществляется приведение короткого ряда к более длинному. О методах приведения нормы низкого стока говорилось ранее. Приведение коэффициента C_v осуществляется тоже методом гидрологической аналогии. Его величина может быть определена по восстановленному ряду или с использованием графоаналитического метода. В последнем случае с помощью графика связи рассматриваемых характеристик низкого стока, имеющих коэффициент корреляции больше 0,8, устанавливается бассейн-аналог, для которого строится эмпирическая кривая обеспеченности. По этой кривой определяются ординаты соответствующих обеспеченностей (5, 50, 95 или 10, 50, 90%). Используя полученные значения ординат и графики связи, находят соответствующие им значения для короткого ряда и по ним производят дальнейший расчет согласно графоаналитическому методу.

В связи с разнообразным режимом стока рек в маловодный период и наличием явлений отсутствия стока (пересыхание или перемерзание) на части рек эмпирические кривые обеспеченности сезонного, меженного и особенно минимального стока бывают весьма различной формы. Аналитическая (теоретическая)

кривая далеко не всегда совпадает со всеми участками эмпирических кривых. Особенно существенно для результатов расчета, если это несовпадение отмечается в нижней части кривой обеспеченности. Поэтому вопрос соответствия эмпирических и аналитических (теоретических) кривых обеспеченности имеет немало важное значение, особенно в случае отсутствия эмпирических точек в зоне наибольшей обеспеченности. Правда, для большей части рек зоны избыточного и достаточного увлажнения (при отсутствии нулевых значений в информационном ряду) наблюдается довольно равномерное истощение стока в меженный период и эмпирическим точкам обычно хорошо соответствует биномиальная кривая обеспеченности. Однако специфические условия формирования низкого стока в особо маловодные годы, точнее сезоны — за счет подземных вод глубоких водоносных горизонтов — обуславливают случаи резкого отклонения эмпирических точек вниз в зоне больших обеспеченностей (выше 90 или 95%), так что при экстраполяции кривой до обеспеченности 99,9% она стремится к нулю даже раньше этой обеспеченности. Наиболее часты подобные случаи для малых рек. Этим же рекам свойственно наличие явлений пересыхания или перемерзания в наиболее маловодные годы. В результате нижний конец эмпирической кривой уходит в ноль при обеспеченности 95, 90% и менее.

Наличие нулевых значений в информационном ряду в основном встречается при расчетах минимального стока, особенно суточного. При построении эмпирических кривых обеспеченности минимального суточного стока основное внимание следует уделять последней точке (наименьшему значению стока), для которой вероятность ошибочного определения величины стока или значения эмпирической обеспеченности вследствие недостаточности ряда является наибольшей. Поэтому в сомнительных случаях ее целесообразно не учитывать.

На рис. 30 показаны возможные типы эмпирических кривых обеспеченности, построенные по данным 30-дневных минимальных расходах воды для рек, находящихся в различных климатических зонах.

Наличие в отдельных случаях крутого изгиба сглаженной эмпирической кривой в ее нижней части вполне объясняется физическими причинами. В маловодные годы в зимний или летне-осенний сезон (вследствие недостаточного пополнения подземных вод в предшествующие сезоны или многолетие) основные питающие реку водоносные горизонты, находящиеся в относительной близости к поверхности, быстро истощаются в связи с их интенсивной эксплуатацией (сток в реки, потери на испарение или промерзание) и река переходит на питание из наиболее глубокого водоносного горизонта. При небольшой глубине дренирования этого горизонта, т. е. когда река вскрывает лишь его самую верхнюю часть, или при его малой обводненности

поступление воды в русло реки резко сокращается и происходит как бы отрицательный скачок в величине стока, отражающийся на эмпирической кривой обеспеченности. Подобная картина характерна главным образом для рек зоны недостаточного увлажнения. В таких случаях подобрать к эмпирическим точкам соот-

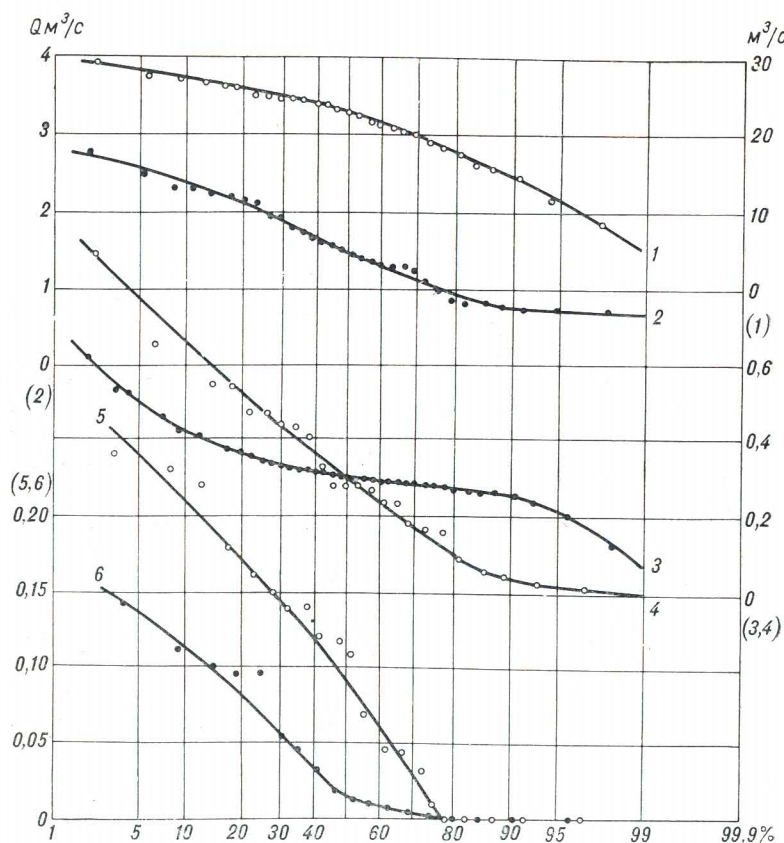


Рис. 30. Типы эмпирических кривых обеспеченности минимального 30-дневного стока.

1 — р. Большая Уссурка — с. Вострецово, площадь бассейна 18 500 км²; 2 — р. Аввакумовка — с. Ветка, 1740 км²; 3 — р. Ушка — д. Новлянская, 1140 км²; 4 — р. Кульдур — ст. Известковая, 1080 км²; 5 — р. Тамга — с. Талпа, 492 км²; 6 — р. Каменка — с. Каменка, 136 км².

ветствующую аналитическую кривую обычно не представляется возможным и в расчетах оперируют со сглаженной эмпирической кривой обеспеченности.

При построении кривых обеспеченности низкого стока встречаются случаи генетической неоднородности исходных величин стока, т. е. в многоводные годы низкий сток формируется в ос-

новном за счет поверхностных вод, а в средние и маловодные годы — подземными водами. Такое положение складывается чаще всего для сезонного стока. При назначении сроков лимитирующего и маловодного сезонов, как уже указывалось, слабо учитывается генетическая сторона вопроса и в результате в многоводные годы в эти сезоны включаются дождевые паводки (или паводки от снеготаяния). В зимний период это возможно на реках юга и запада ЕТС, а в летне-осенний — на более обширной территории.

Для межennaleго и особенно минимального стока вопрос неоднородности рядов наблюдения за стоком не имеет существенного значения, поскольку уже сама методика определения межennaleго и минимального периодов стока предусматривает выделение генетически однородных величин (см. главы 1 и 3). Осуществленный автором анализ 12 000 кривых обеспеченности, которые были использованы при подготовке фактических данных для обобщения минимального стока, показал, что неоднородные ряды минимального стока, если имеются в виду не отдельные значения, а группы лет, встречаются как исключение.

Если в продолжение всего сезона на реке проходят частые паводки, то соблюсти указанный ранее принцип выделения периодов низкого стока невозможно и неоднородность ряда наблюдений нарушается. Межennaleгий или сезонный сток в такие годы, как правило, наибольший. Его эмпирическая обеспеченность весьма мала, а соответствующие точки на клетчатке вероятностей отклоняются резко вверх от общего направления. Поэтому при наведении эмпирических кривых подобные, сильно отклоняющиеся точки учитывать нецелесообразно, тем более, что при расчетах низкого стока верхняя часть кривой обеспеченности не представляет практического интереса, поскольку отражает наиболее благоприятные случаи в отношении водообеспечения. Но значительно отклоняющиеся точки в нижней части кривой обеспеченности после проверки их надежности и с учетом длительности ряда наблюдений, необходимо полностью учитывать. В подобных случаях однородность ряда сохраняется, так как характер питания не меняется.

Одновременное построение эмпирических кривых обеспеченности для межennaleго, минимального 30-дневного и суточного стока позволяет сразу выявить случайные ошибки в фактических данных, особенно для нижней части кривой обеспеченности. Резкое отклонение эмпирической точки одной из характеристик, не подтвержденное другими генетически однородными характеристиками, свидетельствует о ее случайной (или ошибочной) величине.

В зоне больших обеспеченностей эмпирические кривые минимального и межennaleго стока имеют, как правило, весьма согласованное направление как генетически однородные характеристики, поскольку эта зона соответствует наиболее маловодным

годам, когда низкий сток формируется практически только подземными водами. Это позволяет осуществлять взаимную увязку положения кривых обеспеченности и надлежащим образом оценивать резко отклоняющиеся точки. В отдельных случаях, отличающихся своеобразием условий формирования минимального или меженного стока, проводящим к существенной разнице в величине, например, суточного и 30-дневного стока, может наблюдаться заметное расхождение в направлениях этих кривых.

При расчетах обеспеченного стока за лимитирующий или маловодный сезоны вероятность появления неоднородных рядов фактических данных значительно повышается, причем наиболее часто это может происходить для стока маловодного сезона. Лимитирующий сезон на большей части территории СССР наблюдается в зимний период, когда сток рек формируется подземными водами, и, следовательно, информационные ряды являются генетически однородными. Исключение могут составлять реки, находящиеся на границе смены зимнего лимитирующего сезона на летне-осенний, поскольку в этой области в зимний сезон в результате оттепелей в отдельные годы могут наблюдаться различной величины паводки. Летне-осенний лимитирующий сток в отдельные годы тоже может в известной мере формироваться паводочными водами, что отражается на однородности ряда наблюдений.

В маловодный сезон, имеющий наибольшую величину стока из разряда всех характеристик низкого стока и приходящийся на летне-осенний сезон для основной части территории СССР, участие поверхностных вод в формировании речного стока бывает наибольшим. При построении эмпирических кривых обеспеченности стока маловодного сезона отдельные точки или группы точек в зоне малых обеспеченностей существенно отклоняются от направления основной группы точек зоны больших обеспеченностей. Использование аналитических кривых обеспеченности для всего ряда в подобных случаях становится неправомерным.

Весьма наглядным показателем неоднородности ряда является характер гидрографа в рассматриваемый сезон для маловодных и многоводных лет. Наличие пиков дождевых паводков, например в летне-осенний маловодный сезон, в отдельные годы свидетельствует о существенной роли поверхностных вод в формировании стока маловодного сезона, и чем больше их доля, тем неоднороднее информационный ряд.

Таким образом, за критерий однородности ряда применительно к низкому стоку может быть принято соотношение величины поверхностного и подземного питания реки в рассматриваемый сезон. Имеющийся ряд считается однородным при преобладании одного из видов питания.

Известно несколько приемов подбора аналитической кривой обеспеченности к эмпирическим точкам неоднородного ряда. Основные из них — метод усеченных кривых и использование

составных кривых обеспеченности для построения суммарной кривой. Построение усеченной кривой для одной группы лет производилось в основном при расчетах максимального стока [5, 24]. В последние годы Л. М. Ковалев [86] применил эти кривые к определению низкого стока рек, в частности сезонного стока за маловодные годы. Он определял параметры аналитической кривой обеспеченности, которая соответствовала бы положению эмпирических точек в зоне больших обеспеченностей ($P > 50\%$), на основании установления связи параметров усеченной кривой и биномиальной кривой, принимавшейся за теоретическую кривую распределения полного ряда наблюдений (расчетная кривая).

В рассматриваемых Ковалевым случаях биномиальная кривая в зоне больших обеспеченностей проходила значительно ниже эмпирических точек (на 100—200% и более) вследствие наличия в ряду наблюдений многоводных лет, значительно завышающих коэффициент изменчивости всего ряда. Для построения усеченной кривой Ковалев рекомендует из имеющегося ряда ранжированных значений выделить нижнюю половину, эмпирическая обеспеченность которой превышает 50%, и для такого усеченного ряда определить среднюю арифметическую величину стока $\bar{Q}_{ус}$ и значение коэффициента изменчивости $C_{вус}$. Полученные параметры $\bar{Q}_{ус}$ и $C_{вус}$ эмпирического усеченного ряда графически связываются с такими же параметрами биномиальной кривой распределения и полученные переходные коэффициенты используются затем для расчета параметров теоретической кривой обеспеченности. Величина переходного коэффициента K от среднего значения стока усеченного ряда к среднему значению стока расчетной кривой устанавливается по табл. 12, так же как и значение коэффициента изменчивости C_v

Таблица 12

Расчетные коэффициенты для определения среднего значения стока по биномиальной кривой обеспеченности

$C_{вус}$	C_v	K
0,10	0,17	1,08
0,15	0,25	1,13
0,20	0,33	1,18
0,25	0,40	1,24
0,30	0,48	1,30
0,35	0,56	1,38
0,40	0,63	1,45
0,45	0,71	1,53
0,50	0,78	1,62
0,55	0,85	1,72
0,60	0,92	1,82

расчетного ряда. В качестве исходного значения используется величина коэффициента изменчивости C_{vyc} , рассчитанная по усеченному ряду методом моментов. Средняя арифметическая величина стока расчетного ряда определяется путем умножения переходного коэффициента на величину среднего стока усеченного ряда. Полученные значения $\bar{Q}$ и C_v используются для построения биномиальной кривой в зоне обеспеченностей более 50%.

Следует отметить, что применение усеченных кривых сокращает имеющуюся информацию о стоке в два раза, освещая при этом лишь одну сторону гидрологического цикла — период маловодья. В этом их существенный недостаток. В связи с этим особенно большое значение приобретает наличие в ряду наблюдений величин стока, отражающих самые маловодные годы (сезоны). Их отсутствие ведет к завышению расчетных значений стока и фиктивному снижению стандартных ошибок (коэффициент изменчивости становится меньше). При использовании усеченных рядов возрастает роль метода приведения как способ, позволяющего включить в имеющийся ряд наблюдений наиболее экстремные характеристики, если они в нем отсутствуют.

При положении эмпирических точек в зоне больших обеспеченностей, позволяющих провести осредняющую прямую линию на клетчатке логарифмически-нормального распределения, целесообразно использовать графоаналитический метод Алексеева для установления параметров усеченного ряда и расчета по ним характеристик низкого стока в зоне обеспеченности 90—99%.

Определенный интерес представляет графоаналитический метод построения суммарной кривой обеспеченности с использованием двух и более составных кривых обеспеченности, предложенный А. В. Рождественским [139]. Неоднородный ряд может быть представлен двумя или тремя однородными совокупностями. Каждый член имеющегося ряда принадлежит с некоторой вероятностью P_1 к одной однородной совокупности и с вероятностью P_2 — к другой (при двух однородных распределениях). Каждая из них имеет определенный вес в общей разнородной совокупности. Сумма весов вероятностей суммарного распределения равна единице. Поэтому распределение суммарной совокупности может быть получено как сумма взвешенных вероятностей относительно однородных совокупностей. Практически это выглядит следующим образом.

На клетчатку вероятностей наносятся эмпирические точки всего ряда наблюдений. В случае его неоднородности образуются две-три достаточно четко выраженные области с различным числом эмпирических точек, относящихся к однородной совокупности. Такое разделение должно подтверждаться физическими причинами. Для каждой из выделенных совокупностей

на той же клетчатке строятся однородные кривые обеспеченности. Затем с каждой кривой для всего диапазона изменения стоковой характеристики (модуль, расход воды) через равные интервалы снимаются значения этой характеристики и соответствующая ей обеспеченность. Таким образом, для одного значения стоковой характеристики имеется два-три значения обеспеченности. Величина каждой обеспеченности умножается на соответствующий данной совокупности весовой коэффициент, и для каждого значения стоковой характеристики полученные результаты суммируются. Стоковая характеристика, таким образом, приобретает уже иную, чем в неоднородном ряду, обеспеченность. По рассчитанным ординатам строится суммарная кривая обеспеченности, которая обычно наилучшим образом осредняет эмпирические точки на клетчатке вероятностей. Следовательно, чем сложнее конфигурация эмпирической кривой, тем меньший интервал значений стоковой характеристики необходимо использовать при выделении однородной совокупности.

Можно отметить наличие определенной доли субъективизма при выделении однородных совокупностей, однако существенного значения это не имеет, поскольку достаточно учесть лишь наиболее разнородные совокупности.

Таким образом, при определении расчетных минимальных, меженных и лимитирующих расходов воды используются как теоретические (аналитические) кривые обеспеченности, так и сглаженные эмпирические кривые. Последние широко применяются в случае неоднородного ряда наблюдений или наличия в нем нулевых значений. При этом параметры сглаженных эмпирических кривых обеспеченности устанавливаются графоаналитическим методом Алексеева, который в подавляющем числе случаев позволяет весьма быстро и с достаточной надежностью определять расчетные величины.

Глава 5

РАСЧЕТ СТОКА РЕК В МАЛОВОДНЫЙ ПЕРИОД ПРИ ОТСУТСТВИИ ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

5.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИЕМОВ РАСЧЕТА НИЗКОГО СТОКА РЕК И ПРИНЦИПЫ ОБОБЩЕНИЯ ЕГО ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Основной задачей гидрологических исследований является всемерное удовлетворение запросов различных отраслей народного хозяйства в данных о стоке рек во все фазы их водного режима. Однако обширные размеры нашей страны и огромное количество рек (порядка 3 000 000) не позволяют иметь необходимые натурные гидрологические данные по любой интересующей народное хозяйство реке. Приблизительно лишь по одной тысячной части всех рек имеются достаточно надежные данные по низкому стоку. Поэтому на первый план в исследованиях речного стока выступает разработка методов расчета различных элементов гидрологического режима рек при отсутствии необходимых фактических данных, в частности характеристик низкого стока. В практике проектирования при расчетах низкого стока используются величины расходов воды главным образом больших обеспеченностей (75—97%) как характеризующие самые напряженные по водности условия и ограничивающие использование рек в народном хозяйстве.

Обобщения материалов по низкому стоку рек в масштабах всего Советского Союза с учетом степени гидрологической изученности территории и разнообразия физико-географических условий, обуславливающих режим и величину стока рек, возможны лишь при известной схематизации процессов стока и генерализации расчетных методов.

Детальный анализ влияния обуславливающих сток факторов на его величину и построение расчетных зависимостей на этой основе можно производить лишь при достаточном объеме необходимой информации, что в настоящее время имеется далеко не для всех районов СССР. Более того, по основной части территории СССР (север и восток ЕТС и большая часть АТС) все еще не имеется такого количества гидрометеорологической информации, которое позволило бы осуществить подробные исследования физических процессов низкого стока и на их основе создать методы его расчета, в полной мере учитывающие особенности формирования стока в данном однородном районе. Так, А. Г. Комлев указывает [90], «что при современной изученности территории Западной Сибири и большом разнообразии ее

природных условий расчеты минимального стока рек могут базироваться преимущественно на методах, основы которых разработаны Государственным гидрологическим институтом» (т. е. построение карт изолиний низкого стока и расчетных зависимостей, основанных на общих осредненных соотношениях при заданной точности расчета). Понимание существующего в настоящее время соотношения между объемом и надежностью информации по низкому стоку и возможностями ее обобщения является неперенным условием для успешного завершения исследований.

Процесс получения расчетных данных по низкому стоку неизученных рек можно разделить на два этапа: определение метода расчета искомых характеристик и осуществление необходимых обобщений, позволяющих установить все необходимые расчетные параметры, используемые при данном методе расчета.

В гидрологической практике наиболее часто употребляются три самостоятельных метода расчета: определение искомых характеристик с использованием эпизодических наблюдений за стоком и данных бассейнов-аналогов; определение расчетных величин стока на основе обобщений, осуществленных для трех параметров — нормы и коэффициентов изменчивости и асимметрии, по данным изученных рек; использование переходных коэффициентов от характеристики стока определенной (фиксированной) обеспеченности для расчета стока искомой обеспеченности. Основное различие между первыми двумя методами заключается в приемах оценки величины нормы низкого стока.

Применительно к расчетам низкого стока целесообразно использовать различного рода обобщения расчетных параметров, поскольку каждое из них имеет определенные граничные условия, достоинства и недостатки. В зависимости от характера водного объекта применяются следующие способы обобщения: построение карт изолиний стока; районирование территории и установление районных параметров эмпирических зависимостей, связывающих величину низкого стока с основными физико-географическими факторами; расчет районных переходных коэффициентов. Инструментом при производстве такого рода обобщений могут служить различные методы генетического анализа (пространственная интерполяция, эмпирические зависимости) и вероятностно-статистические методы расчета (корреляция, регрессия, обеспеченность).

Широко рекомендуемым методом расчета характеристик низкого стока, как и вообще речного стока, является метод аналогии. Использование этого метода применительно к неизученным рекам, помимо соблюдения всех основных требований, предъявляемых к бассейну-аналогу и изложенных в главе 4, предусматривает наличие каких-либо непродолжительных наблюдений за стоком этих рек. Тогда по связи между величиной стока изучаемой реки и реки-аналога в данном году (сезоне)

при известном соотношении стока реки-аналога этого года с многолетним его значением можно рассчитать с определенной долей достоверности величину многолетнего стока неизученной реки. Исходные данные для этого можно получить методом гидрометрической съемки.

Гидрометрическая съемка для определения стока неизученных рек используется сравнительно давно. Методика проведения гидрометрических работ при изучении меженного стока рек, а также обработка полученных результатов довольно подробно изложена в работах [59, 126]. Широкое применение этот метод нашел в проводимых ГГИ исследованиях подземного и меженного стока на территории Курской магнитной аномалии (КМА), Московского артезианского бассейна (МAB), Северо-Онежского бокситогорского района (СОБР) и в других местах [62, 148].

При использовании данных гидрометрической съемки, производимой, например, в меженный период, большое значение имеет характер фазы водного режима и ее устойчивость во времени и по территории. Наиболее благоприятным для производства измерений применительно к оценке низкого стока является устойчивый меженный период с отсутствием дождевых или снеговых паводков. Единичные измерения расходов воды в этот период на временных постах приводятся к многолетним значениям на основе выявления синхронности колебаний расходов воды на различных участках изучаемой территории и сопоставления этих колебаний с измерениями расходов воды за те же периоды по ряду стационарных створов-аналогов. Величина переходного коэффициента устанавливается по отношению стока в створе-аналоге к стоку временного поста на дату производства измерения на нем. За расчетный коэффициент принимается среднее арифметическое значение, определенное по нескольким створам-аналогам, находящимся в однородных гидрогеологических условиях, поскольку измерения осуществляются обычно на многих реках данного района. Единичные значения переходного коэффициента могут быть чисто случайными и обусловить при их использовании весьма большую ошибку в расчетах.

Установленный указанным способом переходный коэффициент позволяет определить среднюю величину низкого стока лишь для данного года. Расчет многолетней величины производится по переходному коэффициенту, определяемому для стационарных постов по соотношению низкого стока данного года и величины среднемноголетнего низкого стока для этого же створа. Рассчитанная для неизученной реки величина низкого стока данного года умножается на этот переходный коэффициент.

Для повышения надежности переходного коэффициента его величину необходимо определять как среднюю для нескольких рек-аналогов, находящихся в одинаковых физико-географиче-

ских условиях. Следует отметить, что величина этого коэффициента обычно слабо изменяется по однородной территории.

Метод расчета среднемноголетнего значения характеристик низкого стока неизученных рек путем перехода от единичных измерений стока к средним за период (30-дневный, меженный) для данного года и затем к среднемноголетним величинам стока может давать достаточно надежные результаты, если измерения и расчет производятся для генетически однородных характеристик с использованием нескольких водотоков, находящихся в сходных (особенно в отношении гидрогеологии) физико-географических условиях и имеющих синхронные колебания низкого стока.

Опыт работ ГГИ показывает, что применение гидрометрической съемки при определении меженного стока, формирующегося подземными водами, позволяет получить его среднемноголетнюю величину для неизученных рек со средней точностью 20%. Повторение таких работ в течение двух-трех лет и более уменьшает вероятность появления случайных величин переходных коэффициентов. При этом по измерениям каждого года определяется среднемноголетняя величина стока, а за фактическую принимается средняя из этих величин. Для отдельных пунктов расхождение нормы стока, определенной по измерениям, например, первого и второго года, может достигать 40—50%, но от средней из этих лет они отличаются в основном лишь на 20—25%, т. е. проведение гидрометрических съемок в течение двух лет и более значительно повышает надежность расчетов. Однако чем сложнее условия формирования низкого стока, тем большее различие наблюдается в величине переходного коэффициента для рек исследуемой территории, тем более что при таком определении стока недостаточно учитывается влияние факторов, обуславливающих режим и величину речного стока.

Как показывает практика, основные трудности при использовании метода аналогии возникают в случае приведения единичных измерений низкого стока (минимального, меженного) к среднему для данного года, особенно при производстве расчетов для малых рек. Это связано с тем, что местные особенности водосборов наиболее ярко проявляются в период, когда сток на реках наименьший. Весьма характерным подтверждением этого являются исследования, произведенные Г. Н. Петровым [126]. Учет физико-географических факторов, интегрально отражающих природные особенности водосборов, позволяет более надежно установить величину переходного коэффициента от единичного измерения к среднему для данного года. В этом плане определенный интерес представляют исследования Б. Л. Соколова [148], показавшего на примере рек Онего-Северо-Двинского междуречья связь величины переходного коэффициента с размерами бассейна и густотой речной сети. Для изученных рек

данного района производится определение переходного коэффициента и устанавливается его зависимость от площади бассейна. Таким образом учитывается существующая разница в режиме малых и средних рек. Величина этого коэффициента, приведенного к площади 1000 км², связывается с коэффициентом густоты речной сети. Полученное семейство кривых используется для нахождения переходного коэффициента на дату единичного измерения расхода воды на неизученной реке путем обратного расчета через величину густоты речной сети и площади бассейна, определяемых по карте для эпизодического створа, в котором были произведены эти измерения. Предложенный Соколовым способ расчета в определенной мере учитывает возможную неоднородность исследуемого района, чем выгодно отличается от способа простого осреднения величины переходного коэффициента по району.

Метод аналогии, основанный на данных полевых наблюдений, требует значительных материальных затрат и длительного времени для сбора данных. Поэтому его применение целесообразно при разработке весьма ответственных проектов, когда не допускается каких-либо перерывов или уменьшения в подаче воды, или же при составлении водного баланса и оценке водных ресурсов значительных по размеру территорий. Эпизодические полевые исследования помогают выявить реки с аномальным режимом и величиной стока (карст, концентрированные выходы глубоких подземных вод или, наоборот, потери стока из русла реки и т. п.).

Метод гидрометрической съемки позволяет определить лишь величину нормы стока, а его изменчивость во времени приходится принимать по аналогии с изученными речными бассейнами. Правда, в отдельных случаях, если существует тесная синхронность в колебаниях стока исследуемой реки и реки-аналога, возможно непосредственно определить величину низкого стока расчетной обеспеченности по данным эпизодических измерений. Тогда переходный коэффициент от нормы к расходу расчетной обеспеченности на реке-аналоге может быть принят и для неизученной реки. В такой же мере водность периода проведения гидрометрических измерений может иметь обеспеченность, совпадающую с расчетной. Следовательно, единичный расход воды, приведенный к среднему минимальному (межевому) для данного года, будет характеризовать величину стока, например, маловодного или очень маловодного года. Так, минимальный 30-дневный сток в летнюю межень 1972 г. на реках центральных областей ЕТС имел величину, отвечающую 95—97%-ной обеспеченности. Поэтому данные гидрометрической съемки, осуществленной в этот период, после приведения к расчетной характеристике показывали непосредственную величину расчетного расхода воды. Обеспеченность данного года, точнее характеристики низкого стока в этот год (минимальный, меж-

ный сток), устанавливается по данным о стоке рек, имеющих достаточный период наблюдений.

Определение расчетных величин расходов воды с помощью трех параметров является в известной мере классическим приемом в гидрологических расчетах и широко используется при осуществлении различного рода расчетов обеспеченных величин стока. Значения параметров для неизученных рек устанавливаются разнообразными способами, в том числе и с помощью метода аналогии. Таким образом, чтобы оперировать методом трех параметров необходимо иметь три расчетных способа, позволяющих определить норму стока, коэффициент изменчивости и коэффициент асимметрии. Понятно, что каждый из этих способов расчета будет обладать некоторой ошибкой, а суммарная средняя квадратическая ошибка расчетной характеристики будет состоять из ошибки нормы стока σ_n , ошибки коэффициента изменчивости σ_{c_v} и ошибки коэффициента асимметрии σ_{c_s} , т. е.

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_{c_v}^2 + \sigma_{c_s}^2}.$$

Расчеты могут быть значительно упрощены, а точность их повышена при равных условиях, если расчетные величины низкого стока определить не по трем, а по двум параметрам — величине расхода воды (минимального, меженного или лимитирующего) фиксированной обеспеченности и переходному коэффициенту λ от этой величины к расходам воды других обеспеченностей. Последние должны находиться в конкретной зоне обеспеченностей, например в зоне больших обеспеченностей (75—97%), где тенденция уменьшения расходов воды с ростом обеспеченности меняется достаточно плавно и однообразно по территории. При такой схеме определения характеристик низкого стока расчетной обеспеченности суммарная средняя квадратическая ошибка будет состоять из ошибки стока фиксированной обеспеченности σ_Φ и ошибки переходного коэффициента σ_λ , т. е.

$$\sigma'_p = \sqrt{\sigma_\Phi^2 + \sigma_\lambda^2}.$$

Поэтому в равных условиях величина σ'_p будет меньше, чем величина σ_p . Такое соотношение может сохраниться даже и при больших значениях составляющих σ'_p ошибок.

На величину переходного коэффициента влияют в основном два фактора: водность территории и изменчивость стока в рассматриваемой зоне обеспеченностей (а не всего ряда наблюдений, как это иногда считается). При обобщении по территории величин этого коэффициента необходимо учитывать сходство основных физико-географических условий, определяющих режим речного стока в маловодный период, и характер истощения стока. Чем они ближе, тем меньше разница в величине

переходных коэффициентов. Недостаточно полный анализ указанных условий или излишняя схематизация в назначении переходного коэффициента могут привести к заметному снижению точности расчетов.

Кривые распределения низкого стока, особенно биномиальная или логарифмически-нормальная, в зоне больших обеспеченностей весьма пологие и равномерно убывают по сравнению с зоной малых обеспеченностей, где интенсивность изменения величины стока значительно больше. Поэтому коэффициент перехода от стока 75 или 80%-ной обеспеченности к еще большим величинам обеспеченности обычно весьма устойчивый и постоянный.

Таким образом, использование способа переходных коэффициентов при расчетах обеспеченных величин низкого стока рек в зоне больших обеспеченностей является наиболее целесообразным как с точки зрения меньшей трудоемкости расчетного процесса, так и в отношении повышения надежности определения необходимых расчетных характеристик.

Преимущества метода переходных коэффициентов наглядно проявляются при сопоставлении рассчитанных им данных с фактическими. Например, для условий Западной Сибири определение минимального 30-дневного стока 90%-ной обеспеченности с использованием трех параметров и переходных коэффициентов показывает, что в последнем случае ошибка снижается в два раза. При этом в первом случае величина нормы минимального стока устанавливается по карте изолиний, коэффициент изменчивости оценивается в зависимости от модуля минимального 30-дневного стока путем интерполяции между крайними значениями этого коэффициента для данного района, а коэффициент асимметрии принимается по соотношению с коэффициентом изменчивости в зависимости от степени увлажненности территории ($2C_v$ для увлажненных районов и $(1,5 \div 1,0)C_v$ для районов недостаточного увлажнения) [19]. Переходный коэффициент принимается от стока 80%-ной обеспеченности и единым по территории [41]. Если же его величину несколько дифференцировать по территории, то результаты расчета еще больше улучшатся. В то же время чтобы повысить точность расчета методом трех параметров, необходимо изменить методику их расчета, что значительно сложнее.

Применение любого метода расчета низкого стока связано с необходимостью иметь достаточно надежные способы определения расчетных параметров для неизученных рек — нормы стока, коэффициентов изменчивости и асимметрии или только величины расхода воды фиксированной обеспеченности и значения переходных коэффициентов. Их обобщение по территории может быть осуществлено несколькими вышеуказанными способами. Применительно к низкому стоку основным из них является картирование стока в виде изолиний, позволяющее весьма

быстро и с достаточной точностью установить искомую характеристику.

Карты изолиний низкого стока отражают зональные изменения данной характеристики, соответствующие изменению зональных физико-географических факторов по рассматриваемой территории. Изменение этих факторов происходит плавно по территории, но с различной степенью интенсивности, определяющейся многолетним ходом климатических процессов и характером влияния на них подстилающей поверхности. Поэтому карты изолиний не отражают тех изменений стока, которые происходят под влиянием местных, а зональных факторов, обусловленных какими-то особенностями рельефа, геологического строения речного бассейна и прочими косвенными и условными факторами, значительно влияющими на условия формирования речного стока данного района в сторону увеличения или снижения его по сравнению с общими зональными величинами стока. С другой стороны, сток больших рек, формирующийся в различных климатических зонах, т. е. имеющий уже полизональный характер, также не может быть отражен на карте изолиний стока. Следовательно, карты изолиний низкого стока должны быть пригодны только для определенного диапазона рек, сток которых формируется сугубо под влиянием зональных факторов, на что указывают и А. А. Соколов [144, 145], В. Г. Андреев [12] и др. Этот диапазон может оцениваться размерами речного бассейна, т. е.

$$F_{\min} < F_r < F_{\max},$$

где F_r — репрезентативная площадь бассейна реки, величина стока которой формируется под влиянием зональных факторов; реки этого диапазона площадей используются при построении карт изолиний как основные источники информации; $F_{\min}$ и $F_{\max}$ — соответственно наименьшая (критическая) и наибольшая площади бассейнов рек, сток которых формируется под влиянием зональных факторов.

Величина $F_{\max}$ зависит от географического положения бассейна. При его расположении, соответствующем широтной климатической зоне (но не на границе смены климатических зон или географических формаций типа равнина—горы), размеры бассейна будут больше, чем при меридиональном положении, когда смена климатических условий происходит значительно быстрее. Однако в целом изменение величины наибольшей площади по территории невелико и может быть принято постоянным для значительных районов.

Величина $F_{\min}$ определяется соотношением конкретной стоковой характеристики и местных факторов, влияющих на ее величину. Поэтому она является разной для отдельных характеристик стока (годовой, максимальный, минимальный) и существенно, особенно для низкого стока, изменяется по территории

СССР. Поскольку в питании рек в лимитирующий сезон определяющее значение имеют подземные воды, то за величину критической площади бассейна может быть принята такая площадь, при которой наступает практически полное дренирование участвующих в питании реки водоносных горизонтов и с увеличением которой уже не наблюдается изменения модуля стока, т. е. когда в формировании стока основное значение имеют уже не местные, а общие (зональные) условия.

Построение карт изолиний стока для горных районов связано с определенными трудностями, обусловленными сложностью физико-географических условий (разнообразная орография местности, пестрота гидрогеологических условий) и необходимостью учета высотной поясности и различий в ориентации водосборов по отношению к влагоносным ветрам. В главе 2 рассматривалось влияние высоты местности на величину низкого стока и отмечалось, что разница в увлажненности двух противоположных склонов одного горного хребта может быть очень значительной (в 1,5—2 раза). Такое различие необходимо учитывать при наведении изолиний стока. Поэтому в отдельных случаях они могут прерываться, не переходя на другой горный склон и не замыкаясь, как это наблюдается, например, на территории Кавказа [45] или Средней Азии [7].

Величина характеристик низкого стока меняется по территории Советского Союза в больших пределах — от нуля до десятков литров в секунду, причем интенсивность этих изменений неравномерна. Поэтому при построении карт необходимо выбирать вполне определенную величину шага изолиний, т. е. разность между смежными изолиниями должна быть постоянной в одних физико-географических условиях и изменяться в других. Эта разность должна превышать возможную ошибку определения стока. Поэтому шаг изолиний устанавливается в зависимости от величины модуля стока и его удвоенной средней квадратической ошибки ($\pm 2\sigma$). Значения σ рассчитываются по формуле (5). Величина шага изолиний T определяется с учетом всего диапазона изменений σ от $+2\sigma$ до -2σ , взятых по абсолютному значению, по уравнению

$$T = 4\sigma M, \quad (10)$$

где M — модуль низкого стока в л/(с·км²).

Расчет шага изолиний необходимо осуществлять дифференцированно по территории с учетом изменения модуля низкого стока и величины коэффициента изменчивости. Для районов с близкими значениями этих характеристик величина шага изолиний осредняется. В табл. 13 показаны значения шага изолиний для некоторых районов ЕТС в зависимости от величины модуля стока лимитирующего сезона и с учетом его коэффициента изменчивости.

Таблица 13
Величина шага изолиний T (л/(с·км²))

Район	Число пунктов	Коэффициент изменчивости C_v	Модуль лимитирующего стока, л/(с·км ²)							Средняя по району величина T
			5—3	3—2	2—1	1—0,5	0,5—0,3	0,3—0,1	<0,1	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. Кольский полуостров	25	0,2—0,35	1,0	0,75	0,70					1,10
2. Белоруссия, Верхний Днепр	68	0,2—0,35 0,36—0,60	0,95 1,60	1,00	0,75	0,60				0,90
3. Нижний Дон и Нижняя Волга	37	0,2—0,7				0,25	0,10	0,10	0,05	0,15

Величина шага изолиний зависит главным образом от модуля стока. Однако при сходных значениях стока, но различной величине коэффициента изменчивости в данном районе роль последнего возрастает, как это наблюдается, например, в районе 2 (графы 3 и 4). При соответствии изменений значений коэффициента изменчивости величине модуля стока, т. е. уменьшению первого с возрастанием второго, специальный учет коэффициента изменчивости не обязателен (например, этого не надо делать в районе 3).

Расчет шага изолиний для определенной территории при дифференциации по величине стока дает более надежные результаты, чем его оценка по средним для этой территории параметрам σ , C_v , M или простое осреднение по району рассчитанных для каждого пункта значений шага изолиний. Последнее наглядно подтверждается сопоставлением данных граф 4—10 с данными графы 11 в табл. 13.

Изложенный метод позволяет установить величину наименьшего шага изолиний, который соответствует точности используемых фактических данных, что особенно существенно при крупномасштабном картировании, так как позволяет избежать неоправданного сгущения изолиний. Дальнейшее изменение величины шага изолиний в сторону его увеличения регламентируется уже масштабом строящейся карты, ее разрешающей способностью. При этом учитывается необходимость обеспечения простоты и легкости интерполяции при пользовании картой.

Точность величины стока, определяемого по картам изолиний, зависит от ошибки исходных данных и правильности наведения изолиний стока. Последнее обуславливается точностью выбора центра водосбора, к которому относятся фактические данные, густотой распределения по территории гидрометрических пунктов наблюдений за стоком и величиной стока. Например,

в зоне избыточного увлажнения соседние изолинии отличаются друг от друга по величине на 25—50%, а в зоне недостаточного увлажнения, где величина стока наименьшая, разница между изолиниями составляет уже 50—100% и, следовательно, точность определения стока в этой зоне будет меньше.

Чем насыщеннее территория пунктами наблюдений за стоком, тем с большей надежностью можно осуществлять интерполяцию и наведение изолиний стока. В этом отношении территория СССР освещена совершенно неравномерно. Если на Северо-Западе ЕТС один пункт наблюдений приходится на 500—1000 км², то в бассейне моря Лаптевых ему соответствует уже 100 000 км². Понятно, что наведение изолиний стока в таких районах возможно только ориентировочно.

В горных районах, где возникают наибольшие трудности при наведении изолиний стока, для повышения точности карт необходимо использовать крупномасштабные бланки карт, иметь гидрометрическую сеть значительной густоты, учитывать при наведении изолиний рельеф, высоту водосбора, гидрогеологические условия. К сожалению, соблюдение перечисленного в полной мере для всех районов СССР, как правило, невозможно. Так, весьма слабо освещены данными наблюдений Памир, Алтай, Верхоянский хребет и другие горные районы Северо-Востока СССР. Поэтому карты изолиний низкого стока для таких горных районов являются в значительной мере приближенными.

Определение характеристик низкого стока неизученных рек по картам изолиний производится для центров водосборов путем прямолинейной интерполяции между изолиниями стока. Если же водосбор пересекается несколькими изолиниями стока, то рассчитывается средневзвешенная величина стока по уравнению

$$M_{\text{ср}} = \frac{M_1 f_1 + M_2 f_2 + \dots + M_i f_i}{F}, \quad (11)$$

где $M_1, M_2, \dots, M_i$ — средние значения модуля стока для площадей $f_1, f_2, \dots, f_i$, заключенных между двумя соседними изолиниями; F — общая площадь водосбора до расчетного створа.

Районирование территории. Как было показано выше, местные особенности формирования низкого стока, его величина картами изолиний не учитываются. Поэтому для определения низкого стока малых рек, т. е. рек, сток которых формируется под подавляющим влиянием местных факторов, обобщения осуществляются в виде районирования с последующим определением районных расчетных зависимостей. Эти зависимости отражают влияние одного или нескольких главных физико-географических факторов, обуславливающих величину той или иной характеристики низкого стока. Характер влияния таких

факторов может учитываться как путем непосредственного его включения в расчетное уравнение, так и в форме выделения районов, однородных по данному фактору или группе факторов. В последнем случае влияние фактора учитывается не в количественном, а в качественном виде. Нередко такой прием является единственно возможным в связи с отсутствием количественных характеристик. Например, учесть гидрогеологические условия в наиболее полной мере можно лишь выделением районов, однородных по гидрогеологическим условиям, так же и при анализе влияния многолетней мерзлоты на величину низкого стока. Таким образом, выделение районов со сходным комплексом физико-географических условий, включающих основные факторы, участвующие в образовании рассматриваемой характеристики низкого стока, позволяет уменьшить количество параметров расчетного уравнения при сохранении общего числа факторов, формирующих сток.

Районирование территории является самостоятельным и весьма сложным методом обобщения и требует значительного объема информации. Вместе с тем для него характерна вполне определенная область применения, на что указывает и А. А. Соколов [145].

Можно отметить несколько видов районирования, используемых при гидрологических обобщениях. Выделяются районы, однородные по одному-двум признакам, например озерный район, болотный район, район с наличием многолетнемерзлых пород. При этом данная характеристика может быть постоянной по району (в количественном выражении) или закономерно изменяться. Могут быть выделены районы, в которых учитывается лишь сходство по качественному признаку. Такое районирование широко используется, например в гидрогеологии, когда выделяются территории, сложенные породами одного литологического состава и возраста, но имеющие разную обводненность (которая выражается количественно). При исследованиях низкого стока районирование только по качественным признакам без их количественного выражения недостаточно. При разработке расчетных методов оценки величины низкого стока основное значение имеет районирование, осуществляемое с учетом сходства характера зависимости данной стоковой характеристики от основных факторов, определяющих ее величину. Такое районирование является как бы заключительным этапом процесса выделения однородных районов, поскольку в этом случае происходит выделение районов как по общности природных условий (качественная форма), так и по характеру их количественного влияния на режим и величину стока рек.

При изучении низкого стока выделение однородных районов по генетическим признакам должно осуществляться прежде всего на основании анализа геолого-гидрогеологических условий, которые определяют величину подземного стока в реки, при

одновременном учете климатических условий территории, определяющих общую увлажненность местности, т. е. рассматривается сходство исследуемой территории по характеру проявления стокообразующих факторов. Оно учитывается как в качественном (литологический состав пород, тип связи водоносных горизонтов с реками, характер рельефа, наличие многолетней мерзлоты и т. п.), так и в количественном выражении (дебит источников и скважин, глубина залегания водоносных горизонтов, количество выпадающих осадков, величина испарения и пр.).

При выделении однородных по гидрологическим признакам районов (имеются в виду частные признаки — однородность района по условиям формирования, например, минимального или сезонного стока) необходимо соблюдать основные принципы физико-географического районирования: принцип генетического единства, принцип комплексности, принцип относительной однородности и территориальной общности районов [114, 115]. Существует разница в понятиях «географическая однородность района», когда изменение наблюдаемых признаков внутри района может рассматриваться как несущественное для цели, масштаба и степени детальности данного исследования, и «гидрологическая однородность района», когда стокообразующие признаки неизменны по району, а косвенные меняются. В первом случае выделяются районы с одинаковым рельефом, величиной озерности, заболоченности, лесистости, обводненностью почво-грунтов и их литологическим составом. При этом величина стока должна быть одинаковой по району или зависеть только от изменяющихся по району факторов, например глубины вреза русла или размеров водосборной площади. Во втором наблюдается изменение по району того или иного географического признака, например величины озерности, заболоченности, тогда отмечается наличие зависимости изменения стока с изменением величины этих признаков. На практике нередко происходит объединение принципов географического и гидрологического районирования, дополнение одного другим.

Большое значение при осуществлении районирования, помимо принципов выделения районов, имеет способ определения границ районов, поскольку наличие границы между смежными районами подразумевает резкое изменение рассматриваемых гидрологических характеристик. Поэтому граница района обычно приурочивается к месту значительной смены физико-географических условий, точнее тех факторов, в отношении которых производилось разделение территории на однородные участки. Применительно к низкому стоку рек границы районов проводятся прежде всего по границам резкой смены гидрологических условий (гидрогеологических комплексов). При этом основным отличием служит разница в степени обводненности гидрогеологических комплексов. Определенное значение при выделении районов имеет характер рельефа, смена равнинных

территорий на возвышенные, изменение климатических условий. Большинство исследователей, как гидрологов, так и гидрогеологов, отмечают совпадение границ подземного и поверхностного бассейнов рек. Поэтому нередко смена гидрогеологических условий происходит на водоразделах рек, особенно для средних и больших рек. Водоразделы рек приурочены, как известно, к возвышенным формам рельефа, которые оказывают влияние на распределение осадков и общее увлажнение местности. Поэтому границы районов могут проводиться по линиям водоразделов больших и средних рек. Границей района может служить также русло большой реки (например, реки Днепр, Волга, Обь, Енисей и т. п.), поскольку оно нередко проходит по границе смены физико-географических условий.

Как показала практика исследований, чем в большей мере реки питаются подземными водами, тем лучше совпадают границы гидрогеологических и гидрологических районов, конечно, если последние выделяются в целях исследования изменения характера связи основных параметров низкого стока с изменением условий их формирования. Так, для территории КМА исследовалась зависимость минимального 30-дневного стока от площади бассейна реки для районов, сходных по гидрогеологическим условиям. При выделении однородных гидрологических районов за основу были приняты границы основных водоносных горизонтов, дренируемых реками на территории КМА. Впоследствии, при построении расчетных зависимостей, помимо учета климатических и морфологических факторов, осуществлялось более детальное изучение гидрогеологических условий отдельных регионов с целью выяснения степени однородности их водности. В случае пестрой водности почво-грунтов, слагающих территорию региона, производилось его разделение на районы с близкой по величине водностью. Следует отметить, что на существующих гидрогеологических картах (например, [79]) регионы выделяются главным образом по сходству литологического состава пород и их возрасту, а величина обводненности может значительно меняться по району. Поэтому, помимо указанных карт, необходимо использовать гидрогеологические описания, в которых приводится характеристика обводненности пород. На рис. 31 показаны гидрогеологические и гидрологические районы, сходные по условиям питания рек и формирования минимального стока. Границы гидрогеологических и гидрологических районов на большей части территории КМА совпадают. Существующие отдельные различия в положении границ связаны с разной обводненностью отдельных частей гидрогеологических регионов. Простирающиеся основные водоносные горизонты, питающие реки, и их смена происходит с северо-северо-запада на юго-юго-восток. В этом же направлении уменьшается общая увлажненность территории. Поэтому понятно, что в северо-западной части одного гидрогеологического района реки получают

большее питание, чем в его юго-восточной части, и, следовательно, при гидрологическом районировании будут выделены дополнительные районы, отражающие различие в обводненности.

При наведении границ районов, выделяемых с целью использования их при гидрологических расчетах, необходимо учитывать вес площади бассейна реки с едиными условиями форми-

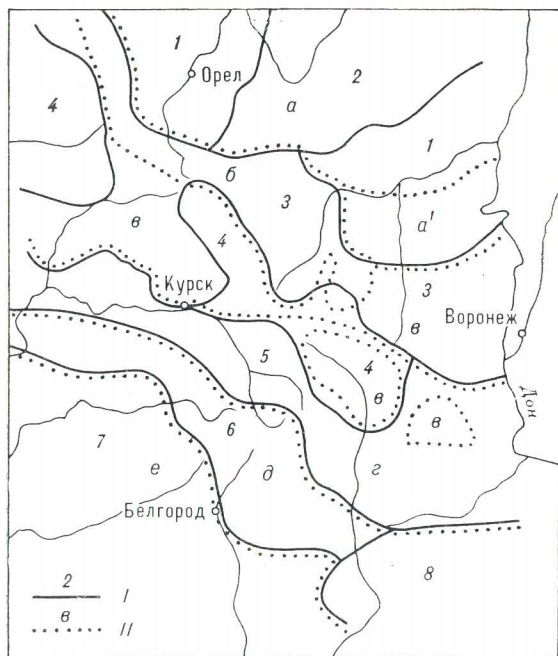


Рис. 31. Карта однородных гидрогеологических и гидрологических районов на территории КМА.

I — граница и номер гидрологического района; II — граница и номер гидрогеологического района.

рования стока по отношению ко всему речному бассейну. Так, если в бассейне реки произошла смена гидрогеологических условий и величина подземного питания реки изменилась, то заметное изменение величины стока реки будет наблюдаться не сразу, а постепенно. Наиболее существенно оно проявится при слиянии двух рек, формирование стока одной из которых происходит полностью или большей частью в других гидрогеологических условиях. В этом случае граница района может проходить по водоразделу между этими реками и через место их слияния.

Увеличение количества районов на территории ведет к росту степени однородности районов по условиям формирования стока

и снижению различий в его величине. При достаточной освещенности территории данными гидрометрических наблюдений возможно выделить элементарные районы с постоянным модулем стока. Средневзвешенная величина этих модулей позволяет оценить значения стока для конкретного речного бассейна. Этот прием известен как расчет стока по частным водосборам. Его применение при расчетах низкого стока целесообразно в условиях пестрого геолого-гидрогеологического строения территории и использования данных гидрометрической съемки.

Детальность районирования, помимо наличия необходимого числа данных, зависит от масштаба используемой для этого карты. Чем он мельче, тем крупнее выделяемые районы, тем труднее соблюсти необходимую степень однородности. К тому же, на мелкомасштабных картах нет малых рек, для которых собственно и предназначен метод районирования.

Исходя из опыта работ и учитывая количество гидрометрических пунктов наблюдения за стоком на территории СССР и ее гидрогеологическую изученность можно рекомендовать при широких территориальных исследованиях для выделения сходных по условиям формирования низкого стока районов применять бланки карт масштаба 1 : 5 000 000 для ЕТС и 1 : 7 500 000 (или 1 : 10 000 000) для АТС. В последнем случае более мелкий масштаб используется для северной и северо-восточной частей АТС. В горных районах и при региональных исследованиях масштаб может быть значительно увеличен. Чем больше объем необходимой информации, тем более крупный масштаб карты целесообразно использовать. При генерализованном районировании невозможно учесть особенности отдельных речных бассейнов.

Выделение однородных районов по генетическим признакам (сходство условий питания и разгрузки основных водоносных горизонтов, в которых формируется подземный сток в реки, их одинаковая обводненность и характер связи с рекой, единообразие климатических и морфологических условий и пр.) требует наличия достаточно полных сведений о строении и физических свойствах (условиях) поверхностного и подземного бассейнов рек рассматриваемой территории. Применение статистических методов выделения однородных районов позволяет сократить необходимый объем информации и вместе с тем количественно оценить степень однородности выделенных районов. Определенные исследования в этом направлении применительно к задачам расчетов стока осуществлены Г. А. Алексеевым [6] и В. Ф. Крюковым [95].

Выделение однородных районов статистическими методами производится на основе оценки вероятности принадлежности рассматриваемых характеристик стока имеющихся на данной территории гидрометрических пунктов наблюдения одной генеральной совокупности, т. е. их подчинение одному и тому же закону распределения вероятностей (кривой обеспеченности).

Эта оценка производится путем сортировки и классификации результатов попарного сравнения параметров кривой обеспеченности с применением критериев однородности. Если расхождение между параметрами кривой обеспеченности (норма, коэффициент изменчивости) сравниваемых пунктов связано лишь со случайными причинами, то можно предположить, что отсутствует существенное различие между двумя сравниваемыми рядами наблюдений. Последовательное сравнение имеющихся на рассматриваемой территории рядов наблюдений, точнее характеризующих их параметров кривой обеспеченности, позволяет установить границу, где расхождение между ними является существенным и не случайным, вызванным различного рода причинами. Группа пунктов считается однородной, если все возможные сочетания пар внутри этой группы имеют наименьший уровень доверительной вероятности. Чем он ближе к нулю, тем однороднее сравниваемые ряды. Так, Крюков считает возможным принимать группировку за однородную при уровне доверительной вероятности β , равном или меньшем 90%. Его величина устанавливается по уравнению

$$\beta = 2\Phi_0(t_p), \quad (12)$$

где $\Phi_0(t_p)$ — нормированная функция Лапласа, равная

$$\Phi_0(t_p) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_p}^{\infty} e^{-\frac{t_p^2}{2}} dt_p. \quad (13)$$

На практике она определяется обратным путем по уравнению (12) при заданных β . По таблице нормированной функции $\Phi_0(t_p)$ (имеющейся в учебниках по теории вероятности) тоже обратным путем устанавливаются значения t_p , соответствующие определенной величине β , которые приводятся в табл. 14, заимствованной из работы [95].

Таблица 14

Соотношение β и t_p при нормальной аппроксимации											
$\beta\%$	99	95	90	80	70	50	40	30	20	10	0
t_p	2,58	1,96	1,46	1,28	1,04	0,68	0,52	0,38	0,25	0,12	0,0

Значения t_p для сравниваемых попарно рядов наблюдений определяются из соотношения

$$u \geq Mu + t_p \sigma_u, \quad (14)$$

где u — число инверсий (статистика u критерия Вилкоксона), т. е. количество значений одного ряда рассматриваемых величин, предшествующее какому-либо значению другого ряда при расположении этих величин в одной ранжированной совокуп-

ности. При этом если используется величина среднего значения стока, то осуществляется его приведение к одному размеру бассейна. При объемах выборок n_1 и n_2 , превышающих 10 лет, число инверсий распределено приблизительно нормально с центром

$$Mu = \frac{n_1 n_2}{2}$$

и дисперсией $Du = \frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}$ при $\sigma_u = \sqrt{Du}$.

Подставляя в соотношение (14) значения u , Mu , σ_u , нетрудно определить t_p , а по табл. 14 — соответствующее ему β . Если величина β при попарном сравнении рядом расположенных пунктов находится в допустимых пределах, то эти пункты считаются однородными.

Можно произвести одновременное исследование всех возможных сочетаний пар имеющихся рядов наблюдений на данной территории независимо от их расположения по отношению к начальному (отправному) пункту сравнения, т. е. первый пункт сравнить со вторым, третьим, четвертым и т. д., второй — с третьим, четвертым, пятым и т. д., третий — с четвертым, пятым, шестым и т. д. Затем производится сортировка полученных сочетаний по величине β . Все допустимые по β сочетания группируются с учетом географического положения пунктов наблюдений, т. е. данная группировка должна объединяться в одном районе и не иметь посторонних включений. Результаты попарного сравнения с последующей их сортировкой и классификацией можно проверить и уточнить, применив критерий множественной инверсии, когда вышеуказанные параметры u , Mu и σ_u определяются попарно, а затем суммируются и уже по сумме каждого из них устанавливается величина t_p . Этот прием позволяет оценить полноту выделенной группировки, которая считается полной, если прибавление к ней хотя бы одного пункта соседней группировки вызовет увеличение β выше критического.

Таким образом, предложенный Крюковым способ выделения однородных районов по статистическим данным, обладая определенной объективностью, в то же время имеет элемент начальной неопределенности, так как базируется на механическом поиске, а не на предварительном выделении района по сходству природных условий с последующим уточнением его границ вышеуказанным способом. Представляется более целесообразным сочетание генетического и статистического методов выделения однородных районов, а именно: на основе анализа физико-географических условий производится предварительное выделение однородных районов на данной территории, которое впоследствии уточняется вышеуказанным статистическим способом в отношении однородности по рассматриваемым характеристикам. В этом случае значительно сокращается время поиска

наилучших сочетаний, особенно при широких территориальных исследованиях с большим количеством пунктов наблюдений, когда число сочетаний может достигать десятков тысяч. Естественно, что при подобных расчетах необходимо использование ЭВМ.

Указанный метод позволяет установить лишь возможную однородность сравниваемых пунктов наблюдений по конкретным характеристикам, но оставляет открытым вопрос определения места проведения границы между неоднородными пунктами. Последнее весьма существенно, особенно при значительном расстоянии между неоднородными пунктами и отсутствии четких природных рубежей. В этом вопросе также необходимо применение генетического анализа, позволяющего достаточно обоснованно устанавливать местоположение границы между районами. Это впоследствии использовал и В. Ф. Крюков для бассейна Дона [96].

Однородность района по основным физико-географическим факторам, определяющим величину низкого стока рек, может характеризоваться общим (полным, сводным) коэффициентом множественной линейной корреляции R с учетом частных коэффициентов корреляции r , показывающих тесноту связи этих факторов. Чем ближе величина R к единице (предельное значение) и больше значения r , тем полнее учтены природные факторы и тем действеннее и однозначнее их влияние на сток, тем, следовательно, однороднее выделенный район по характеру воздействия этих факторов. Выделяемые с учетом указанных признаков районы (помимо учета физико-географических принципов районирования) обладают определенной структурой взаимосвязей аргументов и функции, присущих лишь данной территории в определенный период времени (сезон, год). Однако предварительное районирование осуществляется на генетической основе и лишь потом производится уточнение их границ по тем корреляционным матрицам, численные реализации которых дают лучшие результаты при определении общих и частных коэффициентов корреляции. При этом необходимо учитывать их среднеквадратические ошибки, поскольку они тем больше, чем меньше разность между числом рассматриваемых факторов и количеством используемых для анализа пунктов наблюдений. Это положение является весьма важным, так как ограничивает применение метода только хорошо изученными в гидрологическом отношении территориями. За количественный критерий однородности выделенного района принимаются значения общего и частного коэффициентов корреляции. Район считается однородным, если они равны или больше 0,80 и 0,55 соответственно. Их величина вычисляется по уравнениям линейной множественной корреляции [6, 17].

В табл. 15 приводятся значения средней квадратической ошибки σ_R общего коэффициента корреляции R в зависимости

Таблица 15

Величина средней квадратической ошибки общего коэффициента корреляции σ_R в зависимости от соотношения N и n

N	R					
	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	0,99
$n=3$						
10	0,19	0,14	0,11	0,072	0,038	0,008
15	0,15	0,10	0,081	0,055	0,029	0,006
20	0,12	0,087	0,068	0,046	0,024	0,005
25	0,11	0,076	0,060	0,040	0,021	0,004
30	0,098	0,069	0,054	0,037	0,019	0,004
$n=4$						
10	0,21	0,15	0,11	0,078	0,041	0,008
15	0,15	0,11	0,084	0,057	0,030	0,006
20	0,13	0,090	0,070	0,048	0,025	0,006
25	0,11	0,079	0,061	0,041	0,022	0,004
$n=5$						
10	0,23	0,16	0,12	0,085	0,045	0,009
15	0,16	0,11	0,089	0,060	0,032	0,006
20	0,13	0,093	0,072	0,049	0,026	0,005
25	0,11	0,080	0,063	0,042	0,022	0,004
30	0,10	0,072	0,056	0,038	0,020	0,004
$n=6$						
10	0,26	0,18	0,14	0,095	0,050	0,010
15	0,17	0,12	0,093	0,063	0,033	0,007
20	0,14	0,096	0,075	0,051	0,027	0,005
25	0,12	0,082	0,064	0,044	0,023	0,004
30	0,10	0,073	0,057	0,039	0,020	0,004

от количества информационных пунктов N и числа рассматриваемых факторов n , определяемой по уравнению

$$\sigma_R = \frac{1 - R^2}{\sqrt{N - n}}.$$

Анализ данных таблицы показывает, что при высоком коэффициенте R ($R > 0,95$) его ошибка невелика даже при небольшой разнице между N и n . Однако на практике чаще всего встречается величина R в диапазоне 0,85—0,90. В этом случае число используемых для расчета пунктов при $\sigma_R < 0,1$ должно превышать 10—15, но чем меньше территория района, тем меньшее

количество пунктов наблюдения на ней находится. Увеличение же размеров района ради увеличения числа пунктов ведет к снижению степени однородности района. Учитывая современную гидрологическую изученность территории СССР, можно считать возможным применение метода линейной множественной корреляции (в отношении достаточного объема исходной информации) в основном для ЕТС (кроме ее северной и северо-восточной частей) и некоторых южных районов АТС.

Выделенные однородные районы используются для выявления характера и величины соотношения основных определяющих сток факторов с величиной речного стока. Совместное влияние нескольких факторов и каждого в отдельности на ту или иную характеристику стока позволяет оценить метод линейной множественной корреляции. Сущность метода достаточно полно изложена в работе [6], а его практическое применение к решению вопросов минимального стока — в работе [57]. Следует отметить, что выравнивание и нормализация монотонных корреляционных связей, т. е. нормализация каждой исходной переменной монотонно возрастающей или убывающей функции, непосредственно по эмпирическим вероятностям непревышения наблюденных значений при одновременном определении вклада каждого из рассматриваемых факторов в уравнение множественной линейной регрессии с большей надежностью позволяют установить параметры этого уравнения.

Правда, метод множественной линейной корреляции еще не нашел широкого применения в исследованиях низкого стока рек, что связано в значительной мере с отсутствием необходимого объема информации для многих районов СССР, как это уже было указано выше, и недостаточным опытом его использования. Не случайно поэтому, что получаемые при его применении выводы не всегда находят достаточно строгое физическое обоснование. Например, применение метода множественной корреляции для определения влияния на величину минимального зимнего и летне-осеннего 30-дневного стока рек Западной Сибири основных факторов: площади водосбора, его заболоченности, лесистости, озерности, средней высоты и величины нормы годового стока [57] — показывает наличие существенного влияния леса на величину зимнего минимального стока на обширных пространствах (почти все левобережье среднего и нижнего течения р. Оби), хотя величина облесенности изменяется в основном в небольших пределах — 60—85%. Физическое объяснение этого найти нелегко. Столь же трудно объяснить преимущественное влияние высоты водосбора на минимальный зимний сток рек Таза, Большого Пура, Надыма, Казыма, так как скольнибудь заметное изменение высоты водосбора отмечается лишь в верховьях этих рек. Так же непонятна причина полученного отрицательного влияния в зимний сезон нормы годового стока на величину минимального стока рек юга Западно-Сибирской

равнины, в то время как летом она является определяющим фактором для рек этого района.

Подобные случаи происходят в основном вследствие малого различия между объемом выборки и числом независимых переменных, недостаточным диапазоном изменения величины используемых факторов и наличием определенной взаимозависимости некоторых факторов. Так, включение в анализ величины годового стока, имеющей корреляционную связь с аргументами, которую полностью исключить практически невозможно, приводит к тому, что вклады некоторых аргументов становятся отрицательными. К тому же, эта характеристика в подавляющем числе случаев имеет заведомо наибольший вес (вклад) как однородная с рассматриваемой функцией и затушевывает влияние других факторов, снижая долю их вклада в уравнение регрессии. Подобные факты заставляют с осторожностью подходить к использованию метода множественной корреляции, особенно в слабоизученных районах, когда распределение пунктов наблюдений за стоком неравномерно по территории и число их недостаточно. Особое внимание необходимо обращать на наличие существенного диапазона изменений величины включаемых в уравнение регрессии параметров (факторов) и их независимость.

Для решения практических задач по расчету характеристик низкого стока неизученных рек целесообразно использовать корреляционные отношения одной-двух переменных, поскольку, как уже указывалось, метод множественной корреляции далеко не всегда обеспечен необходимыми исходными данными и еще недостаточно апробирован. Это подтверждается исследованиями В. П. Герасименко [57], применившего метод множественной линейной корреляции для вывода расчетных уравнений по определению зимнего минимального 30-дневного стока для условий Западной Сибири. Из шести использованных им факторов в двух уравнениях была оставлена всего одна переменная, в шести уравнениях — две переменные и только в одном случае в уравнении присутствуют три переменные. Для летне-осеннего сезона из шести уравнений четыре содержат две переменные, одно уравнение одну переменную и еще одно — три переменные.

Использование расчетных уравнений с одной-двумя переменными значительно упрощает обобщения, облегчает расчет и обеспечивает в большинстве случаев практически ту же точность, поскольку нередко в уравнении множественной регрессии основная доля вклада приходится на один, в крайнем случае на два аргумента. Так, при решении уравнения с тремя переменными — нормой годового стока, заболоченности и залесенности (район V для зимнего сезона [57]) — рассчитанная величина стока практически не изменится, если исключить параметр, характеризующий залесенность, или даже оба — залесенность

и заболоченность — и оставить лишь основной для данного уравнения параметр — норму годового стока. Это связано с тем, что регрессионные коэффициенты у этих переменных малы и при расчете обуславливают весьма незначительную добавку стока. Подобное встречается и в других уравнениях, определенных в вышеуказанной работе.

Однако если коэффициенты регрессии сопоставимы между собой в данном уравнении, то производить исключение одного из них нельзя. На практике чаще всего встречаются случаи, когда превалирует влияние одного или двух параметров (озерность — для озерной реки, карст — для карстовой и т. п.), причем влияние одного из них может быть учтено не в явном виде (в количественном выражении), а в форме выделения однородных по этому параметру районов, имеющих к тому же сходные физико-географические условия, т. е. с учетом изложенных в главе 2 способов районирования и оценки влияния физико-географических факторов на величину низкого стока.

Таким образом, при производстве обобщений характеристик низкого стока можно ограничиться использованием в количественном выражении лишь одного, главного фактора, в наибольшей мере отражающего особенности условий данного речного бассейна. Опыт автора в области исследований минимального стока показал, что таким интегральным показателем физико-географических условий формирования низкого стока рек является площадь бассейна реки на равнинной и возвышенной территории, а также средняя высота водосбора в горной местности. Это же отмечается и другими авторами. В отдельных районах к названным добавляются такие факторы, как озерность, закарстованность или заболоченность водосбора и др.

Учитывая степень гидрологической изученности территории СССР, точность исходных фактических данных, уровень гидрогеологической информации и вышеизложенный анализ существующих способов обобщения и расчета стока, можно определить как наиболее эффективные два способа обобщений основных характеристик низкого стока рек для оценки их величины на неизученных реках СССР — карты изолиний стока и локальные зависимости низкого стока от основных обуславливающих его факторов. Теоретической основой первого из них является положение о неизменности среднего уровня увлажненности в историческом плане и проявление закона географической зональности в гидрологии. Второй метод базируется на сохранении во времени характера соотношения географической среды и речного стока, формирующегося в локальных природных условиях. Любое существенное изменение этих условий вызывает соответствующее изменение режима и величины низкого стока рек. Каждый из методов имеет строго ограниченные пределы применения, обоснованные в теоретическом плане и подтвержденные практическими материалами.

5.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИЗКОГО СТОКА СРЕДНИХ РЕК

При анализе условий формирования низкого стока рек и оценке степени влияния на этот процесс физико-географических факторов было отмечено наличие существенной разницы в режиме рек, имеющих различные по размерам бассейны (см. главу 2). Реки с небольшой площадью бассейна характеризуются незначительной аккумулярующей способностью бассейна, небольшим временем добегания стока, быстрым истощением руслового стока и, как следствием всего этого, глубокой меженью. При этом большое значение имеет степень дренирования рекой водоносных горизонтов, питающих реки, определяющаяся глубиной эрозионного вреза русла.

Реки, находящиеся в тех же физико-географических условиях, но имеющие значительные размеры бассейна, обуславливающие наличие больших запасов подземных вод и относительно длительное время добегания поверхностных вод, вызывающее распластывание небольших паводков, а также медленное истощение стока с бассейна, имеют более сглаженный режим стока в маловодный период и значительно большую его величину. Увеличение подземного питания рек в значительной мере связано с увеличением глубины эрозионного вреза русла.

Таким образом, вполне четко выделяется две группы рек (малые и средние), получающих разное по величине подземное питание и имеющих различия в величине доли поверхностных вод, участвующих в питании рек в маловодный период.

Принципы разделения рек на малые и средние при изучении минимального стока изложены автором в работе [40]. Как показали последующие исследования, эти принципы применимы и к лимитирующему, и к межённому стоку. Сущность их заключается в исследовании изменения величины стока с изменением степени дренирования рекой водоносных горизонтов, питающих ее. Чем больше глубина вреза русла реки в водоносные горизонты, тем большую величину питания она получает.

Глубина эрозионного вреза русла реки зависит от размывающей способности реки, определяющейся величиной стока, уклоном и местным базисом эрозии, а также от литологического состава почво-грунтов, слагающих бассейн. Поэтому в однородных физико-географических условиях (увлажненность территории, ее геологическое строение и пр.) глубина вреза будет тем больше, чем больше мощность реки, ее размеры, т. е. объем бассейна. С увеличением глубины эрозионного вреза и ростом размеров реки увеличивается, естественно, и ее площадь водосбора. Линия водораздела, проходящая по наиболее возвышенным местам водосбора, как правило, совпадает с подземным водоразделом. Это подтверждается данными гидрогеологических исследований. Исключение составляют некоторые реки карстовых

районов, области напорного питания и т. п. Таким образом, вместо таких трудно определяемых на практике характеристик, как объем подземного бассейна и глубина эрозионного вреза, можно использовать площадь бассейна реки, рассматривая ее как характеристику, являющуюся интегральным показателем морфологических, гидрологических и гидрогеологических условий формирования низкого стока рек в маловодный период.

Исследование зависимости модуля минимального, меженного и лимитирующего стока от площади бассейна реки для сходных по физико-географическим условиям районов показывает, что величина модуля низкого стока изменяется лишь до определенного предела площади бассейна, а затем интенсивность его изменения резко снижается (рис. 32). Это свидетельствует о том, что река уже полностью дренирует водоносные горизонты и в дальнейшем с увеличением ее площади бассейна (т. е. мощности реки) изменения в величине удельного питания реки могут происходить в основном только за счет смены гидрогеологических и климатических условий. Аналогичный факт отмечается и другими авторами [63, 129], исследовавшими подземный сток в реки.

Величина площади бассейна реки, до которой происходит интенсивное изменение модуля низкого стока, является практически одинаковой для всех характеристик низкого и подземного стока данного района, поскольку они однородны по генетическому признаку. Поэтому величина этой критической площади бассейна принимается единой по району для всех характеристик низкого стока.

Обычно полное дренирование рекой водоносных горизонтов происходит постепенно в некотором диапазоне площадей (100—200 км²), поэтому за критическую принимается средняя по району величина площади бассейна. При этом изменение величины стока рек в таком диапазоне площадей незначительно.

С учетом этого автором при исследовании минимального стока было осуществлено районирование территории СССР, которое в полной мере может быть использовано и при изучении меженного и лимитирующего стока. Подробные карты районов для зимнего и летне-осеннего сезонов и таблица соответствующих критических значений площадей приведены в работе [40]. На территории СССР, кроме Кавказа и Средней Азии, выделено 11 районов в зимний сезон и 14 районов в летне-осенний. Границы районов проводились по водоразделам рек или границам резкой смены гидрогеологических условий. Средние значения критических площадей не всегда одинаковы по сезонам года для данного района, так же как и границы районов не везде совпадают в зимний и летне-осенний сезоны. Это связано с тем, что площадь бассейна характеризует влияние на величину минимального стока не только гидрогеологических факторов, но и некоторых физико-географических факторов, обуславливающих

различные условия питания рек по сезонам (например, разная увлажненность территории в зимний и летне-осенний сезоны,

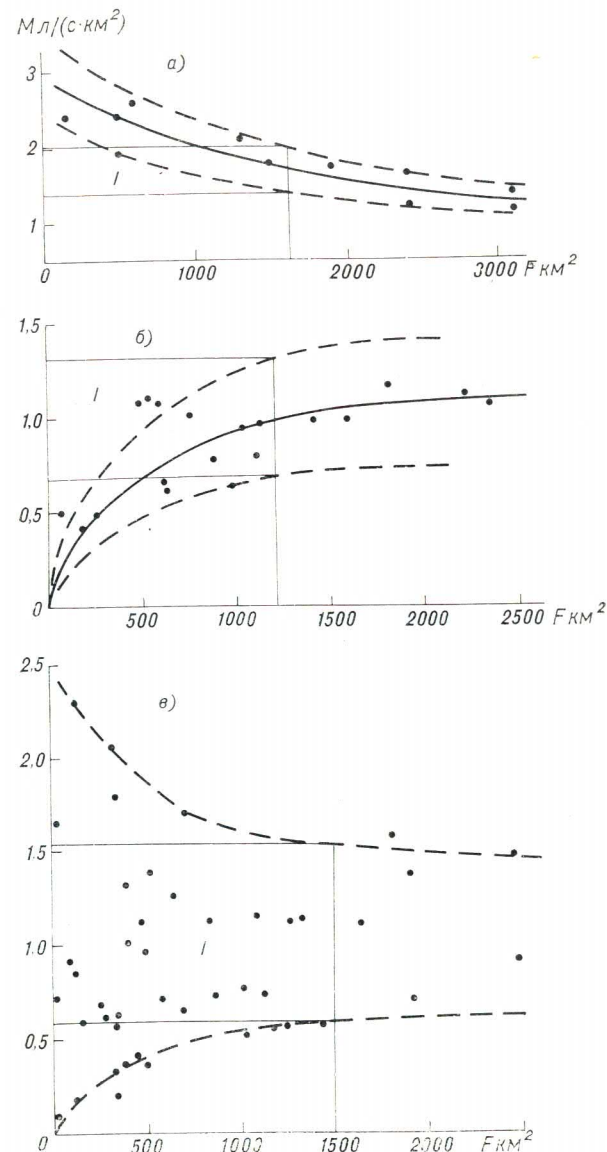


Рис. 32. Зависимость модуля минимального (а) и лимитирующего (б, в) стока от площади бассейна реки.

наличие временных водообильных горизонтов летом, влияние испарения в теплое время и т. п.).

В равнинных районах зоны достаточного увлажнения величина критической площади бассейна колеблется в основном в пределах 1000—1500 км² в зимний и летне-осенний сезоны. В зоне недостаточного увлажнения, где постоянные водоносные горизонты залегают на большей глубине, эта площадь увеличивается до 2000—2500 км². На территории с наличием постоянно пересыхающих (Причерноморье, Прикаспийская низменность, Казахстан и др.) или перемерзающих на длительный срок рек (Восточная Сибирь, Казахстан и др.) величина критической площади возрастает до 5000—10 000 км².

На возвышенных и горных территориях величина критической площади бассейна незначительно отличается от аналогичной величины на равнинной территории, поскольку базис эрозии рек этих территорий обычно общий, а эрозионная деятельность горных рек протекает значительно интенсивнее, чем равнинных, вследствие наличия больших уклонов. В отдельных горных районах реки достигают местного базиса эрозии даже при меньшей величине площади бассейна, чем равнинные реки. В среднем же значения критической площади бассейна колеблются около 1200—1400 км².

В зоне многолетней мерзлоты в зимний период постоянно отсутствует сток на реках с площадью бассейна до 5000 км². Естественно, что это вызывается климатическими условиями территории и не является результатом недодренирования водоносных горизонтов, поскольку в летне-осенний период модуль минимального стока существенно изменяется с ростом площади бассейна всего до 1000—1700 км² (в зависимости от района). Очевидно, что эти размеры бассейна и являются показательными при оценке дренируемости территории. На реках Казахстана происходит обратное. Наибольшие площади с отсутствием стока отмечаются в летне-осенний период (до 10 000 км²), что связано с малой увлажненностью и высоким испарением на этой территории. В зимний период постоянный сток наблюдается на реках с площадью бассейна свыше 5000 км². Следовательно, реки с таким размером бассейна уже достигают полного дренирования водоносных горизонтов, а в летний сезон происходит лишь истощение тех горизонтов, которые наиболее близко располагаются к дневной поверхности.

Дальнейший анализ распределения по территории величины критической площади бассейна показал возможность значительной генерализации выделенных ранее районов [40]. На рис. 33 и 34 показаны районы, а в табл. 16 — соответствующие им значения критической площади. Сток рек с площадью, превышающей указанную в таблице, формируется под влиянием зональных факторов, а на реках с меньшей площадью его величина в значительной мере определяется местными (азональными) условиями.

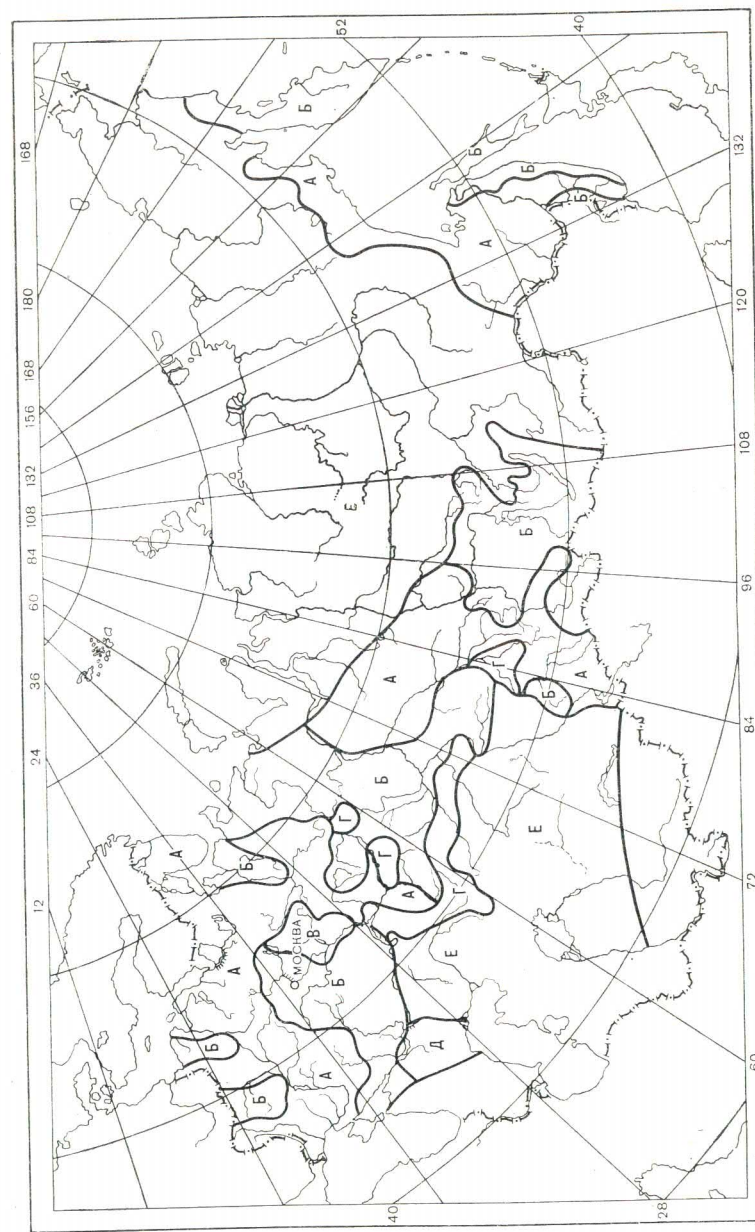


Рис. 33. Районы с принятыми значениями критической площади бассейна в зимний сезон. Район Е занимает территорию Восточной Сибири, Северо-Востока СССР, бассейн Верхнего Амура.

Таблица 16

Значения критической площади бассейна (км²)

Район	Зимний период	Летне-осенний период
А	1200	1200
Б	1500	1500
В	1800	2000
Г	2000	2500
Д	2500	5000
Е	5000	10000

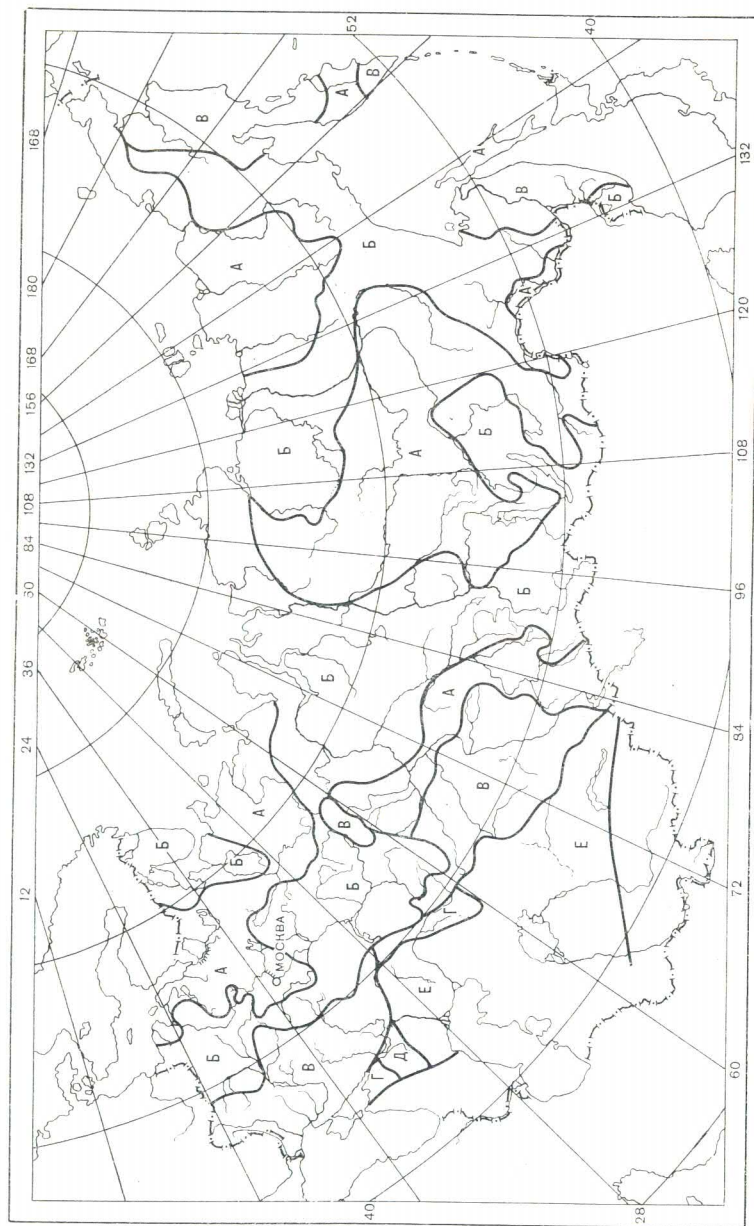


Рис. 34. Районы с принятыми значениями критической площади бассейна в летне-осенний сезон.

При построении карт изолиний стока могут использоваться значения стока рек с площадью меньше критической, если их величина незначительно отклоняется от зональной. Это нетрудно установить по тем же графикам связи модуля низкого стока с площадью бассейна. Все эмпирические точки, находящиеся в области значений равных зональным (область I на рис. 32) могут использоваться при построении карт изолиний как дополнительный материал. Однако применять карту для расчета стока малых рек нельзя, поскольку его величина может быть как меньше, так и больше зональной для данного диапазона площадей бассейнов. Это особенно наглядно видно на рис. 32 в.

Величина критической площади бассейна является тем нижним пределом диапазона площадей, начиная с которого реки считаются средними, а их верхним пределом будет та наибольшая площадь бассейна, при которой сток рек формируется еще под влиянием зональных факторов и, превысив которую реки приобретают уже полизональный режим. Поэтому понятно, что широтное расположение речного бассейна обуславливает большие размеры этой площади, а меридиональное — меньшие. Исходя из практики исследований целесообразно в первом случае за наибольшую площадь принимать 75 000 км², а во втором — 50 000 км², хотя для отдельных бассейнов эти значения могут быть существенно увеличены.

Наибольшая площадь, для которой остается справедливым применение закона географической зональности, может быть установлена по таким же графикам связи, как и критическая площадь. В зоне больших площадей линия связи изменяет свое положение с горизонтального или близкого к нему на наклонное в сторону возрастания (при переходе реки в более увлажненную зону) или падения (при переходе в менее увлажненную зону). Правда, чем больше площадь бассейна реки, тем инертнее ведет себя величина стока. Поэтому необходимо обращать внимание на соответствие величины стока реки с наибольшей площадью зональным значениям стока. Так, р. Ока полностью дренирует водоносные горизонты при площади бассейна около 1700 км², поскольку именно до этой величины наблюдается

интенсивное увеличение минимального стока (например, в летне-осенний сезон от 0 до $1,2 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$). Дальнейшее увеличение модуля минимального стока происходит весьма незначительно, определяясь общей водностью территории. При возрастании площади в девять раз (до $15\,000 \text{ км}^2$) модуль увеличивается всего на $0,5 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$. Это связано с тем, что климатические условия остаются постоянными. Их слабое изменение по территории обуславливает то, что дальнейшее возрастание площади бассейна до $70\,000 \text{ км}^2$ приводит к росту модуля всего на $0,3 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$. Такая величина модуля сохраняется до площади $100\,000 \text{ км}^2$. Лишь при дальнейшем возрастании площади модуль начинает убывать. В подобных условиях, особенно при недостаточности данных наблюдений за стоком, возможно использование для обобщений сведений о стоке рек, имеющих площадь бассейна, превышающую указанные пределы для средних рек.

Основные характеристики низкого стока средних рек обобщаются в форме карт изолиний стока, позволяющих определять необходимые стоковые характеристики для неизученных рек с высокой точностью. Возможность построения таких карт подтверждается практикой гидрологических исследований, хотя еще до настоящего времени иногда встречаются возражения против использования при обобщениях минимального стока закона географической зональности. Основным доводом при этом служит действительно встречающаяся в природе пестрота гидрогеологических и геологических условий, обуславливающих разную величину питания рек подземными водами. Но достаточно внимательный анализ фактических данных о величине речного и подземного стока и их распределении по территории ясно показывает ограниченность влияния местных факторов и нивелирование этого влияния с возрастанием размеров речного бассейна, т. е. необходимость дифференциации рек по величине, разделение их на малые и средние. Это было уже достаточно обосновано автором в работе [40]. Некоторые исследователи пытаются избежать такого разделения рек и осуществить обобщения в виде карт изолиний для всего диапазона рек путем приведения исходных данных разных по величине рек к единой площади бассейна.

Этот прием, являясь в значительной мере условным, не дает практического выигрыша не только в точности расчета, но даже в скорости получения информации. В этом случае требуется произвести две операции: определить сток по карте и пересчитать его для реальной площади. И в том, и в другом случае появляются ошибки расчета. А при использовании самостоятельных расчетных методов для малых и средних рек существует только одна операция для определения искомой характеристики, и, следовательно, ошибка снижается. При этом, как было показано выше, фактические данные по средним рекам вообще не требуют приведения к единой площади. В от-

ношении малых рек можно отметить, что при достаточно тесной (близкой к функциональной) зависимости модуля низкого стока от площади бассейна для данного района приведение теряет смысл, так как для одного значения площади бассейна будет лишь одна величина модуля стока, а при корреляционной связи со значительным рассеянием точек в результате приведения будет осуществлена большая генерализация и, как следствие, появятся значительные ошибки при расчетах. В случае же отсутствия связи модуля стока с площадью бассейна достаточно надежное приведение вообще невозможно. Не случайно поэтому сравнение карты нормы минимального 30-дневного стока для рек Урала, построенной по данным, приведенным к 2000 км^2 [122], с аналогичной картой, построенной обычным способом без приведения к единой площади [20], не показывает практически никакой разницы в конфигурации изолиний и величине стока.

Для целей практического расчета осуществлять приведение малых рек к единой площади бассейна нецелесообразно, так как определять сток можно уже по тем районным зависимостям, которые предназначены для использования при приведении. Употребление же для расчета стока малых рек карт изолиний с последующим обратным пересчетом лишь усложняет способ расчета и уменьшает точность искомых величин. Увеличение количества расчетных приемов, основанных на корреляционных связях и пространственной интерполяции, повышает возможность появления случайных и систематических ошибок.

Территория Советского Союза неравномерно освещена данными наблюдений за стоком. Большее количество пунктов с длительным периодом наблюдения находится на ЕТС, меньшее — на АТС. При составлении карт не используются фактические данные о стоке рек с озерностью бассейна свыше 3—5% или имеющих в своем бассейне карстовые породы, заметно искажающие величину стока данной реки по сравнению с окружающими реками, а также рек с резко выраженным влиянием хозяйственной деятельности на низкий сток.

Применение довольно жестких границ использования фактических данных (исключение малых рек и рек с зарегулированным или нарушенным режимом стока) позволяет до минимума свести наличие азональных величин стока и, следовательно, максимально сократить количество замкнутых изолиний стока, обусловленных главным образом местными особенностями условий формирования стока.

Масштаб карты в значительной мере зависит от степени изученности территории, т. е. от величины площади, приходящейся на один гидрологический пост. Чем она меньше, тем полнее изучен сток рек данной территории и тем крупнее может быть масштаб составляемой карты. Наиболее изучены северо-западная и западная части ЕТС, где один гидрологический

пост приходится в среднем на 500—800 км². Меньше всего пунктов наблюдений в северной и северо-восточной частях АТС — один пункт на 80 000 или 100 000 км² и более. Учитывая густоту расположения гидрологических пунктов в различных частях Советского Союза, целесообразны следующие масштабы карты для построения изолиний стока: для ЕТС 1 : 5 000 000, для АТС — 1 : 10 000 000. В целом же по территории СССР вполне приемлемым масштабом, отвечающим существующему количеству пунктов с длительным периодом наблюдений, равно как и другим положениям, разработанным К. П. Воскресенским [53], является карта масштаба 1 : 7 500 000.

Использование бланков гипсометрической карты значительно облегчает учет рельефа при наведении изолиний стока. Направление и конфигурация изолиний не только обосновываются фактическими данными, но и согласовываются с величиной и характером распределения и степенью влияния стокообразующих и косвенных факторов (см. главу 2). При этом также учитываются карты подземного и годового стока, гидрогеологические карты, построенные для территории СССР [53, 78, 79].

При построении карт изолиний низкого стока величина модуля стока относится к центру водосбора. Для облегчения и конкретизации определения величины стока в замкнутых изолиниях в них указывается наибольшая или наименьшая фактическая величина модуля стока, отнесенная к соответствующему центру водосбора.

При осуществлении расчетных построений (карты изолиний стока, эмпирические зависимости) использовался обширный фактический материал по низкому стоку рек, собранный в ГГИ, ВНИИ ВОДГЕО, а также в УГМС при составлении «Справочников по водным ресурсам СССР». Обеспеченные величины стока определялись по рядам с периодом наблюдения не менее 10 лет для рек ЕТС и 8 лет для рек АТС. Как уже отмечалось, на большей части рек СССР низкий сток формируется в основном подземными водами, поэтому величина его коэффициента изменчивости обычно не превышает 0,50, что при величине допустимой среднеквадратической ошибки нормы низкого стока 15% позволяет оперировать рядами с указанной продолжительностью. Поскольку реки АТС в гидрологическом отношении изучены еще довольно слабо и многие пункты наблюдений за стоком часто имеют короткие ряды, временной критерий для этой территории был несколько снижен, чтобы иметь большее количество данных о стоке. Сток в пунктах с коротким периодом наблюдений сопоставлялся со средней величиной стока за этот же период и нормой стока в пунктах с длительным периодом наблюдений. При значительных расхождениях средних величин (более 15—20%) производилось приведение стока короткорядных пунктов. Таким образом, например, было выявлено завышение минимального стока в сред-

нем на 25% в бассейнах рек Киренги (реки Миня, Могол) и Витима (реки Мама, Мамакан) в случае использования только последних 8—10 лет. Однако неучет этих лет в общем ряду наблюдений приводит к занижению минимального стока в этом районе, что проявилось, например, при составлении карт среднегогодового минимального 30-дневного стока [19].

Карты изолиний лимитирующего стока. В середине 50-х годов В. Г. Андреяновым были построены наиболее подробные по тому времени карты изолиний среднего многолетнего слоя сезонного стока за летне-осенний и зимний периоды для рек ЕТС [8]. Сроки сезонов были жестко закреплены для данной климатической зоны, но изменялись от зоны к зоне. Таким образом, это были в известной мере карты стока лимитирующего и маловодного сезонов, но не разделенные по этому признаку, поскольку на карте, например, зимнего сезона показан сток и лимитирующего (север и восток территории), и маловодного (западная и южная части ЕТС) сезонов. Для АТС в целом по территории какие-либо карты лимитирующего стока отсутствуют. Лишь для Западной Сибири (равнинная часть) построены карты сроков наступления и продолжительности гидрологических сезонов [152]. Однако судя по методике выборки, к лимитирующему может быть отнесен зимний сезон лишь с некоторой долей условности. Зимний сток (за весь сезон) различной обеспеченности этих же рек исследован А. М. Комлевым [90]. Им построены карты нормы средnezимнего стока рек Западной Сибири в мм и л/(с·км²), а для определения стока расчетной обеспеченности за зимний сезон установлены районные зависимости величины коэффициента изменчивости от нормы средnezимнего стока.

Таким образом, непосредственно карт лимитирующего стока (карты лимитирующего и маловодного сезонов) для территории СССР до настоящего времени не имелось. Поэтому в последнем нормативном документе Госстроя СССР по определению расчетных гидрологических характеристик [155] отсутствует прикладной материал по этому вопросу, а лимитирующий сток предлагается определять по связи с годовым. Однако не следует ожидать хороших корреляционных связей этих характеристик, если, например, величина лимитирующего стока составляет всего 3—5% годового стока (зимний сток рек АТС и севера ЕТС). Поэтому для улучшения методов расчета лимитирующего стока и повышения надежности его расчетных величин необходимо было произвести специальные исследования и разработать новые способы определения этих величин. Приведенные ниже карты лимитирующего стока, построенные автором, призваны в известной мере восполнить указанный пробел.

Построение карт изолиний лимитирующего стока производилось по данным о стоке двух сезонов: зимнего и летне-осен-

него. Учитывая практическую направленность работ и необходимость удовлетворения запросов различных отраслей народного хозяйства как в приемах расчета стока в период ограниченной водности, так и в разрезе внутригодового распределения стока более целесообразно строить карты не отдельно для каждого сезона, а отдельно для каждой характеристики лимитирующего стока, т. е. для стока лимитирующего и маловодного сезонов. В этом случае на одном бланке карты будут совмещены два климатических сезона. Так, карта стока лимитирующего сезона составлена по данным о стоке зимнего

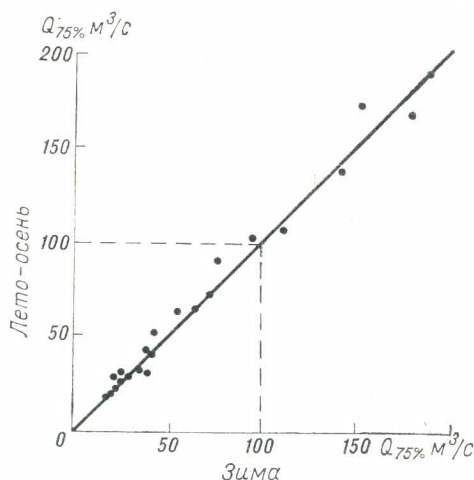


Рис. 35. Связь зимнего и летне-осеннего лимитирующего стока 75%-ной обеспеченности для зоны смены периодов года.

сезона в такие годы, а также графиком связи лимитирующего стока за зимний и летне-осенний сезоны для рек, расположенных в районе границы между зонами (рис. 35). Линия связи проходит через начало координат, и тангенс угла ее наклона равен 1,0. Связь весьма тесная, однако чем дальше от границы расположен сток, тем далее от линии связи отклоняется точка, так как начинает сказываться разница в условиях формирования летне-осеннего и зимнего лимитирующего стока.

Расчетными картами лимитирующего стока являются карта стока лимитирующего сезона маловодного года, имеющего 75%-ную обеспеченность, и карта стока маловодного сезона той же обеспеченности. Эти карты приводятся на рис. 36 и 37 (см. на вклейке в конце книги). Естественно, что карта стока маловодного сезона показывает величину стока на данной территории за противоположный лимитирующему сезон: для АТС летне-осенний, а для ЕТС зимний в южной и западных частях

и летне-осенний — в северной и восточной. Начало и конец лимитирующего и маловодного сезонов указаны в главе 3.

Построение карт осуществлялось по вышеизложенным принципам, т. е. в первую очередь учитывались размеры бассейна реки, рельеф территории, высотное положение водосбора, климатические факторы, гидрогеологические условия, местные особенности территории и наличие аномалий в величине стока. Помимо изложенного, учитывались карты минимального стока, построенные ранее Л. Н. Поповым [19, 20] и автором [41], а также региональные исследования [11, 90, 152]. В процессе построения карт лимитирующего стока шаг изолиний выбирался в зависимости от величины стока, его изменчивости и средней квадратической ошибки нормы стока рек данного района, т. е. согласно вышеизложенным рекомендациям.

Для районов с величиной модуля стока $2 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$ и более шаг изолиний принят равным $1,0 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$. При этом отдельные локальные особенности территорий, на которых расчетный шаг больше $1,0 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$, не учитывались. В районах с величиной модуля стока от $0,5$ до $2,0 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$ шаг составляет $0,5 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$, хотя средняя величина расчетного шага в целом по территории несколько больше, но в данном случае учитывается удобство построения карты и пользование ею. При изменении модуля стока от $0,1$ до $0,5 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$ шаг принят равным $0,2$ и $0,1 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$, что значительно выше наименьшей величины расчетного шага. Однако использование меньшего размера шага лимитируется разрешающей способностью карты. В отдельных районах расстояния между изолиниями становятся настолько малыми, что затрудняется интерполяция величин стока.

Поскольку принципы построения карт стока лимитирующего и маловодного сезонов едины, а точность исходных данных в общем одинакова, то суммарная ошибка определения лимитирующего стока по этим картам в целом по территории, учитывая ошибку исходных данных и величину отклонения фактических данных от снятых с карт, будет схожей и в среднем составит $15\text{--}20\%$. Однако неравномерная изученность территории СССР приводит к тому, что величина средней ошибки значительно колеблется по территории. На достаточно изученных равнинных пространствах ЕТС и Западной Сибири средняя ошибка карт составляет $10\text{--}15\%$. В районах со сложными физико-географическими условиями (Карелия, Северо-Запад ЕТС и др.), а также в зоне недостаточного увлажнения, где величина стока весьма мала, средняя ошибка повышается до $15\text{--}20\%$. Еще больших значений (до $20\text{--}25\%$) она может достигать в горных, особенно слабоизученных районах, например на Северном Урале, в Восточной Сибири и на Северо-Востоке СССР. В зоне многолетней мерзлоты сток лимитирующего сезона (зимняя межень) чрезвычайно мал, а на большинстве рек вообще отсутствует, поэтому обширная территория

оконтуривается нулевой изолинией. Но на отдельных средних и даже малых реках может существовать сток вследствие выклинивания в их русла глубоких трещинных термальных вод или вод, содержащихся в мощных подрусловых отложениях, а также таликах, не промерзающих в продолжение всей зимы.

Карты изолиний минимального стока. В настоящее время при производстве гидрологических расчетов наиболее широко используется величина минимального стока. В 1966 г. Госстроем СССР в практику строительного проектирования были введены «Указания по расчету минимального стока» [156], регламентирующие расчетные характеристики минимального стока и способы их определения. В основу последних для средних рек были положены карты изолиний минимального стока, построенные Л. Н. Поповым и др. для нормы минимального 30-дневного зимнего и летне-осеннего стока [19, 20]. По сравнению с ранее существовавшими картами минимального стока (В. А. Урываев [157], Б. В. Поляков [128]) они были наиболее обоснованы как в отношении методики построения, так и по обеспеченности фактическими данными. При их построении использовались данные о стоке рек по 1959 г. для ЕТС и по 1961 г. для АТС, причем частично употреблялись данные по малым рекам. Поэтому на картах появился ряд замкнутых изолиний, обусловленных не зональными, а местными условиями формирования минимального стока. Для некоторых районов, особенно на АТС, сказалась недостаточная длительность периодов наблюдения за стоком. Так; на реках Станового нагорья величина минимального стока оказалась значительно заниженной: до 30—40% для отдельных рек, а в среднем на 20—25% меньше, если учесть последнее десятилетие, явившееся весьма многоводным для этой территории.

В результате усовершенствования методов расчета минимального стока с 1972 г. в практике строительного проектирования используется разработанный автором применительно к низкому стоку способ определения расчетных величин минимального стока, основанный на применении переходных коэффициентов от стока фиксированной обеспеченности, преимущества которого по сравнению с ранее использовавшимся способом трех параметров были изложены выше.

Для территории Советского Союза автором построены карты минимального 30-дневного стока 80%-ной обеспеченности для зимнего и летне-осеннего сезонов. Эти карты построены по данным о стоке 1200 пунктов, расположенных на средних реках и имеющих период наблюдения по 1966—1967 гг. включительно. Применение довольно жестких критериев использования фактических данных (исключение малых рек и рек с нарушенным режимом стока) позволило до минимума свести наличие азональных величин стока, что выразилось в резком уменьшении количества замкнутых изолиний стока

по сравнению с вышеуказанными картами среднемноголетнего минимального 30-дневного стока.

Карты минимального 30-дневного стока 80%-ной обеспеченности представлены на рис. 38 и 39 (см. на вклейке в конце книги). Они нашли широкое практическое применение и включены в нормативный документ Госстроя СССР [155]. При построении карт по ряду районов учитывались материалы «Справочников по водным ресурсам СССР», а также исследования А. М. Комлева по зимнему стоку Западной Сибири [90] и другие работы [19, 20, 125]. Для горной части Средней Азии карты минимального стока составлены А. З. Амусья [7].

Сравнение величины стока, определенной по этим картам, с фактическими данными показывает, что для равнинной части ЕТС и Западной Сибири расхождение между ними составляет в среднем 10—15%, а на возвышенностях и для территорий со сложными физико-географическими условиями оно повышается до 20%. В горных районах Северо-Востока СССР (хребты Верхоянский, Колымский и др.) построение карт осложняется не только необходимостью учета изменения высоты водосбора и быстрой сменой рельефа, но и недостатком фактических данных. Поэтому карты изолиний минимального стока в таких горных областях являются приближенными, поскольку средняя ошибка определения стока по ним в отдельных случаях может достигать 30—40%.

Фактическая ошибка карт изолиний минимального стока, включающая ошибку исходных данных, будет превышать вышеуказанные величины. Принимая среднюю ошибку исходных данных равной 10%, а среднее расхождение фактических данных с величиной, полученной по карте, — 10 и 20%, получим, что суммарная средняя квадратическая ошибка карт изолиний минимального 30-дневного стока 80%-ной обеспеченности составит соответственно 14 и 22%, а при наибольших значениях средней ошибки (15% для исходных данных и 25% для снятых с карты) — 29%.

Следует отметить, что как правило, исследователи, оценивая точность своих карт, не учитывают ошибку исходных данных, заметно занижая таким образом величину действительной ошибки [19, 20, 57, 90].

Минимальный 30-дневный сток и сток лимитирующего сезона по условиям своего формирования довольно близки между собой, поэтому определенный интерес представляет сопоставление карт изолиний этих характеристик. Сравнение карты стока лимитирующего сезона 75%-ной обеспеченности с картами минимального 30-дневного стока 80%-ной обеспеченности показывает соответствие распределения по территории этих стокowych величин и совпадение основных областей повышения или понижения стока. Обе характеристики уменьшаются с севера (и северо-запада на ЕТС) на юг (и юго-

восток на ЕТС), увеличиваясь, однако, в южных горных районах. На территории севера и северо-востока АТС в зимний сезон наблюдается длительное отсутствие стока на реках в результате их замерзания.

Величина лимитирующего стока всегда больше минимального 30-дневного стока, но разница между ними может колебаться от значительной до небольшой. Это определяется главным образом характером лимитирующего сезона. Чем меньше поступление поверхностных вод или вод из временных водоносных горизонтов в реки данной территории в лимитирующий сезон, тем ближе по величине минимальный и лимитирующий сток. Наименьшая разница между ними наблюдается у рек севера ЕТС (бассейны рек Северной Двины и Печоры) и средней зоны АТС, где в зимний сезон отсутствует поступление в русла рек поверхностных вод, а истощение горизонтов подземных вод происходит относительно медленно. Разница между стоком за весь зимний сезон и за месяц с наименьшим стоком составляет небольшую величину, уменьшаясь к северу до 15—20%. Поэтому для таких районов возможно определение генетически однородных характеристик стока (минимальный суточный и месячный, меженный, лимитирующий) для неизученных рек по связи с одной из них, например с минимальным 30-дневным стоком.

Меженный сток по своей величине занимает промежуточное положение между минимальным и лимитирующим стоком. В зависимости от физико-географических условий территории и периода года величина меженного стока может быть ближе к той или другой характеристике. Как правило, меженный сток превышает величину минимального, хотя в отдельных случаях равен ему. По отношению к лимитирующему стоку он может быть как больше его, так и меньше. Величина соотношения меженного и лимитирующего стока определяется длительностью их периодов; чем больше разница в их продолжительности, тем, следовательно, в большей мере различается их сток. Сопоставление продолжительности лимитирующего сезона со средней и наименьшей продолжительностью меженного периода для различных районов СССР (табл. 17) показывает, что в зимний период лимитирующий сезон полностью включается в меженный период в средние по продолжительности меженные годы. В годы с наименьшей длительностью меженности разница во времени их появления тоже незначительна на реках АТС и лишь на реках запада и юга ЕТС она становится заметной. Следовательно, зимний меженный сток рек АТС генетически однороден с лимитирующим стоком и не может существенно отличаться от его величины. Это позволяет осуществлять расчет зимнего меженного стока по его связи с лимитирующим стоком. Произведенные автором построения показывают весьма тесную прямолинейную связь среднего-

Таблица 17

Сопоставление продолжительности лимитирующего сезона и меженного периода

Район	Продолжительность лимитирующего сезона, дни	Продолжительность меженного периода, дни	
		средняя	наименьшая
А (5)	90	130	60
А (3)	90	50	20
Б (6)	120	150	60
Б (8)	120	180	150
Б (9)	120	150	120
Б (10)	120	120	80
В (7)	180	200	150
Г (11)	150	170	150
Д (1)	210	120	60
Е (2)	180	80	10
Ж (2)	180	90	10

Примечание. Буквенное обозначение относится к району с лимитирующим сезоном, а цифровое — к району с меженным периодом; районы 1 и 2 относятся к летне-осеннему сезону, а 3—11 к зимнему; для районов Д и Е за лимитирующий принят летне-осенний сезон, сроки начала и окончания которого близки к соответствующим характеристикам меженного периода.

летнего лимитирующего и меженного стока за зимний период (рис. 40 а).

Наибольшая разница наблюдается между величиной меженного стока и стока маловодного сезона. Последний, как уже было показано в главе 3, бывает на большей части территории СССР в летне-осенний сезон, когда меженный период нередко нарушается дождевыми паводками, не включаемыми в него, но попадающими в маловодный сезон. Поэтому разница в продолжительности этих периодов значительна (табл. 18), особенно для рек АТС. В многоводные годы величина стока маловодного сезона превышает меженный сток в несколько раз, что, конечно, сказывается и на соотношении их средних значений.

Методика определения меженного и минимального стока обуславливает их близость по генетическим признакам (см. главу 2). К тому же для обширных районов СССР не только наименьшая, но и средняя продолжительность меженных периодов довольно близка к 30-дневному периоду минимального стока. В связи с вышесказанным можно ожидать наличия более тесных связей между меженным и минимальным 30-дневным стоком в летне-осенний сезон, чем между меженным и стоком маловодного сезона. Это подтверждается фактическими данными (рис. 40 б).

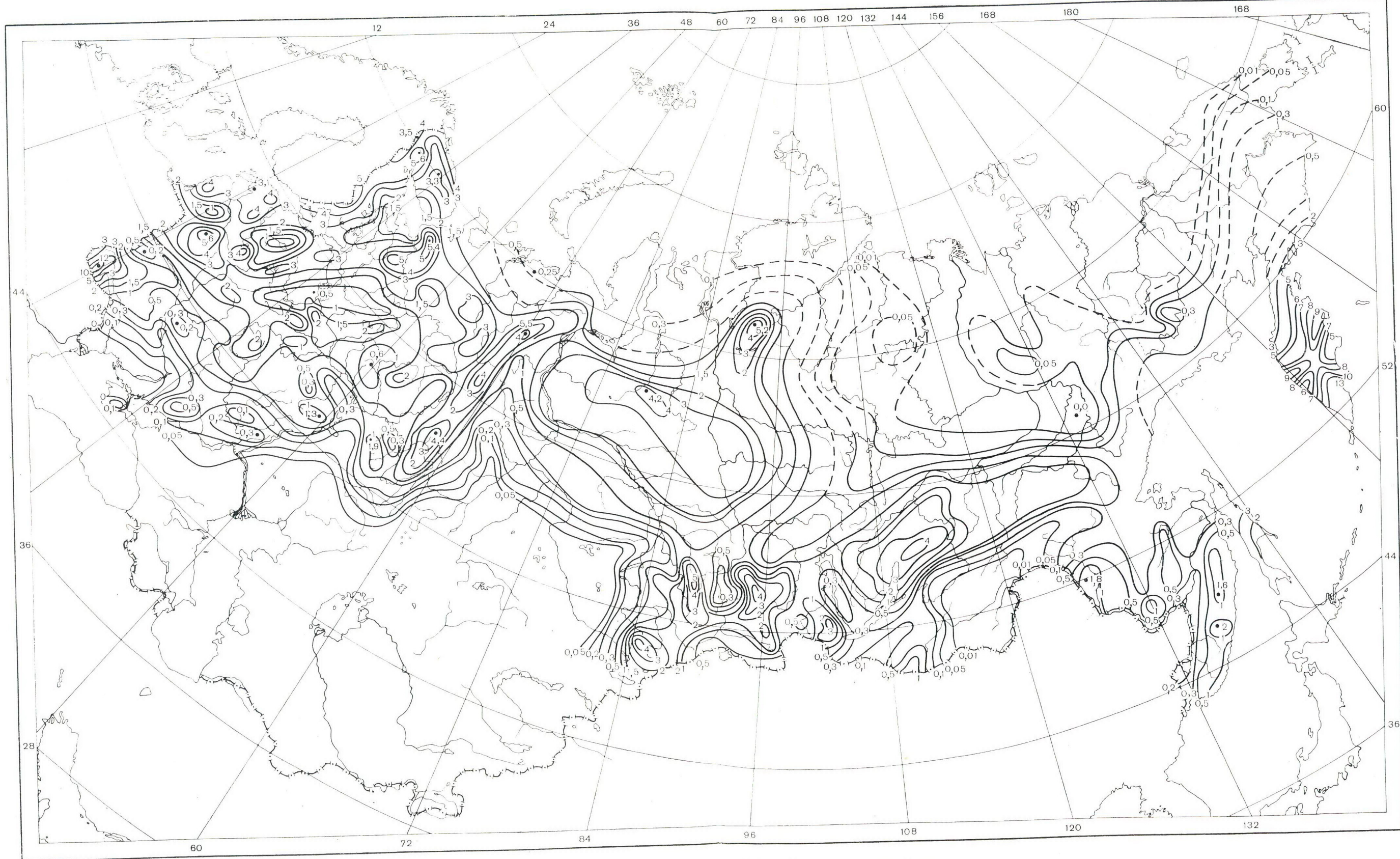


Рис. 36. Карта стока 75%-ной обеспеченности (л/(с·км²)) за лимитирующий сезон.

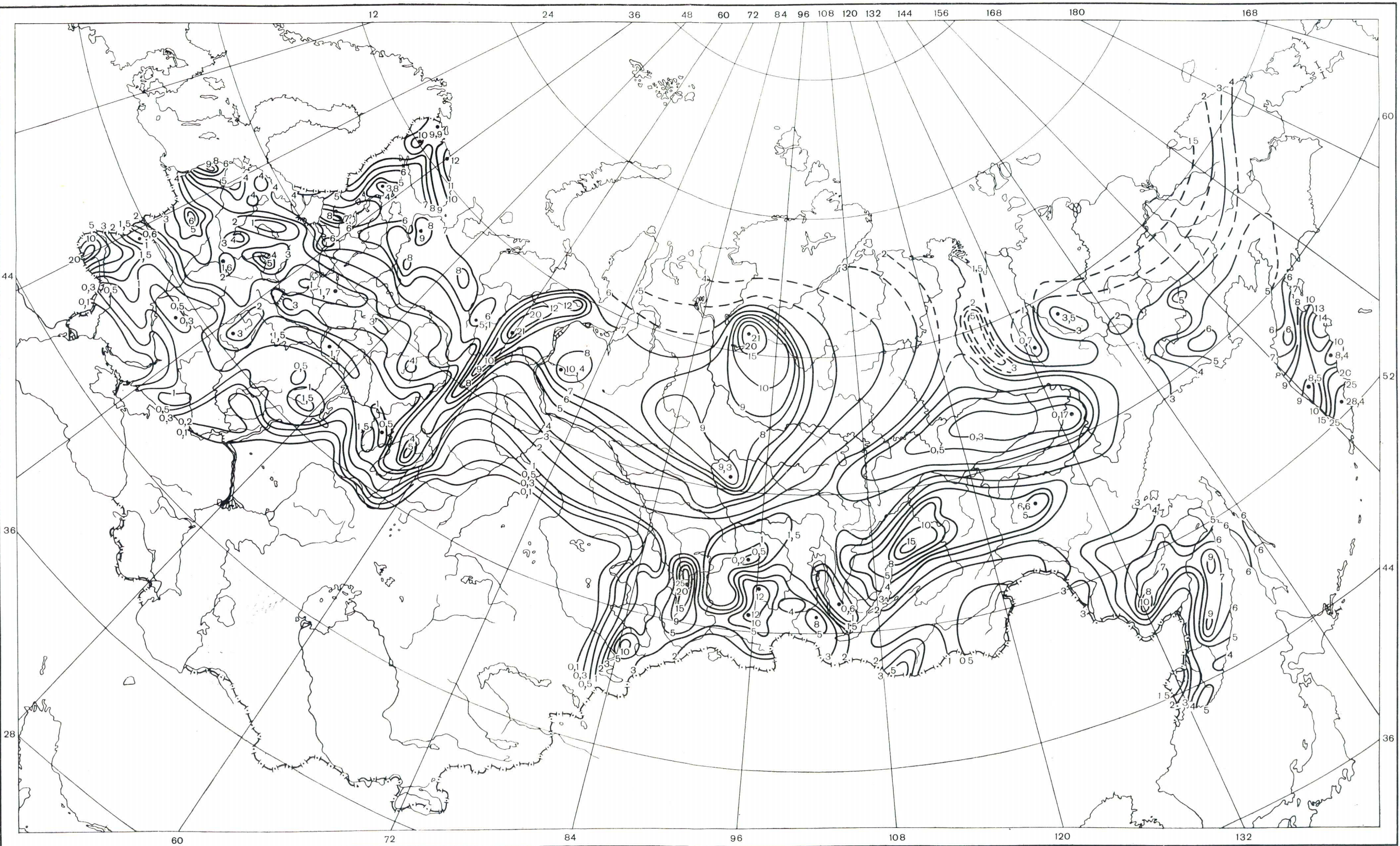


Рис. 37. Карта стока 75%-ной обеспеченности ($л/(с \cdot км^2)$) за маловодный сезон.

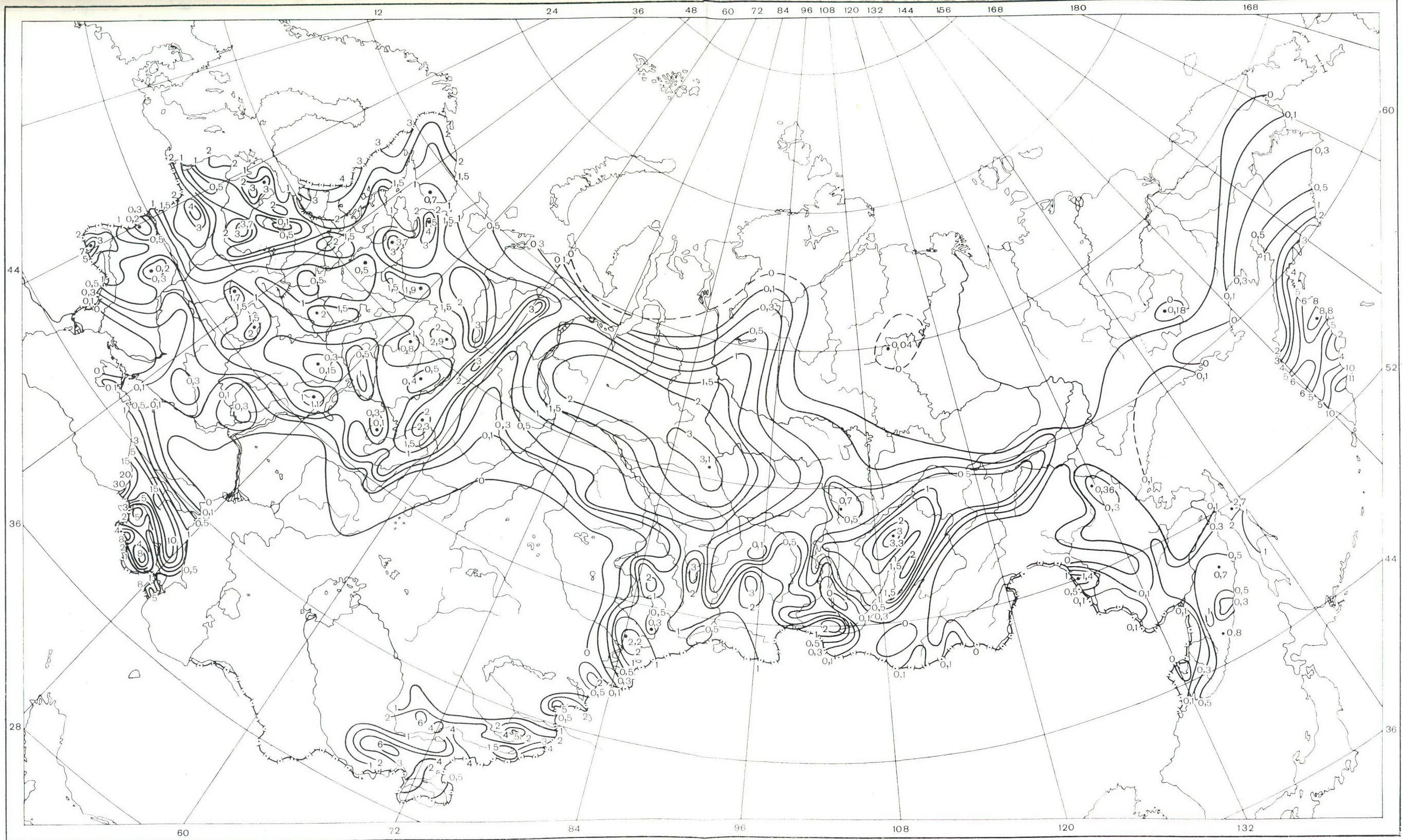


Рис. 38. Карта минимального 30-дневного зимнего стока 80%-ной обеспеченности (л/(с·км²)).

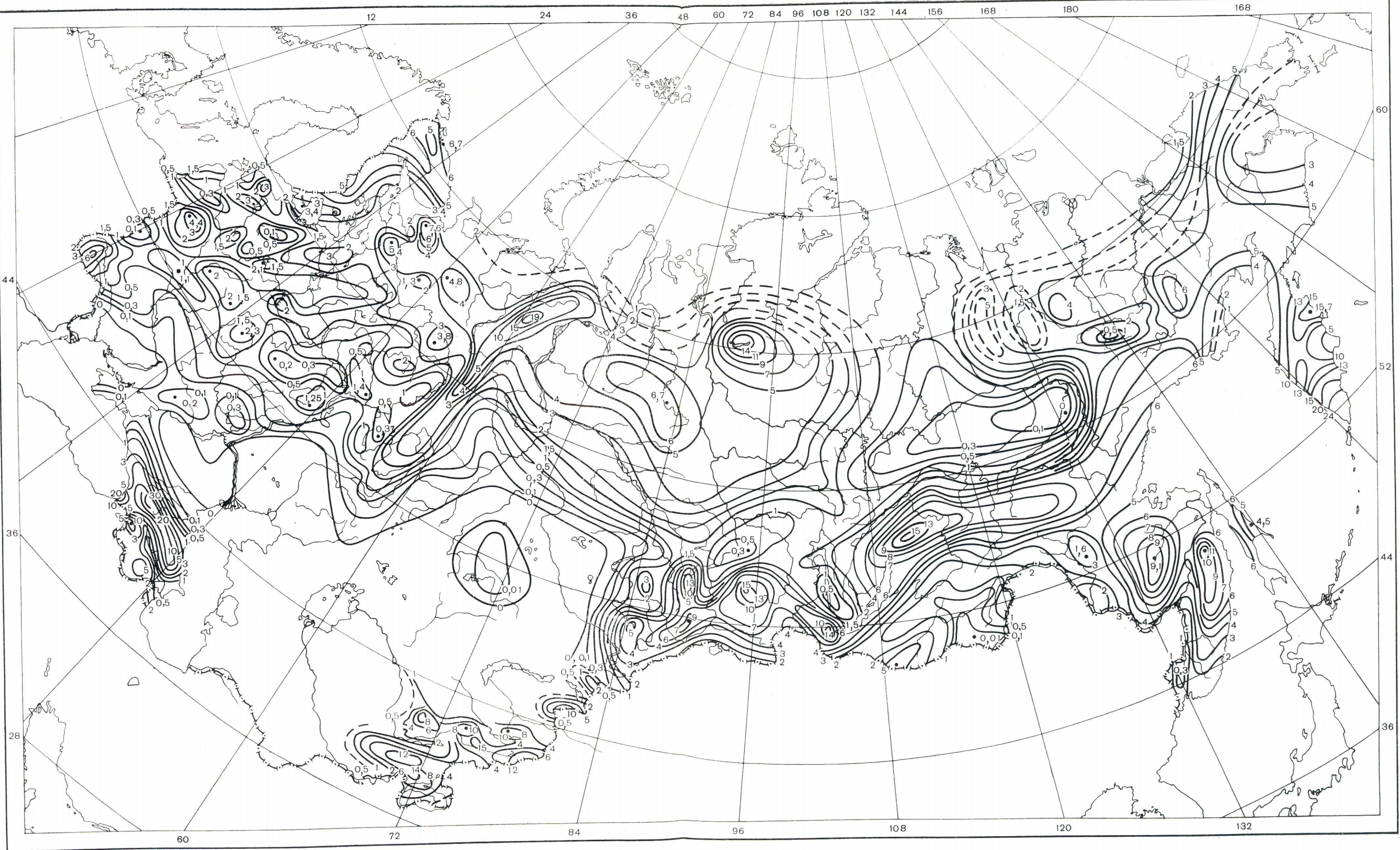


Рис. 39. Карта минимального 30-дневного летне-осеннего стока 80%-ной обеспеченности (л/(с · км²)).

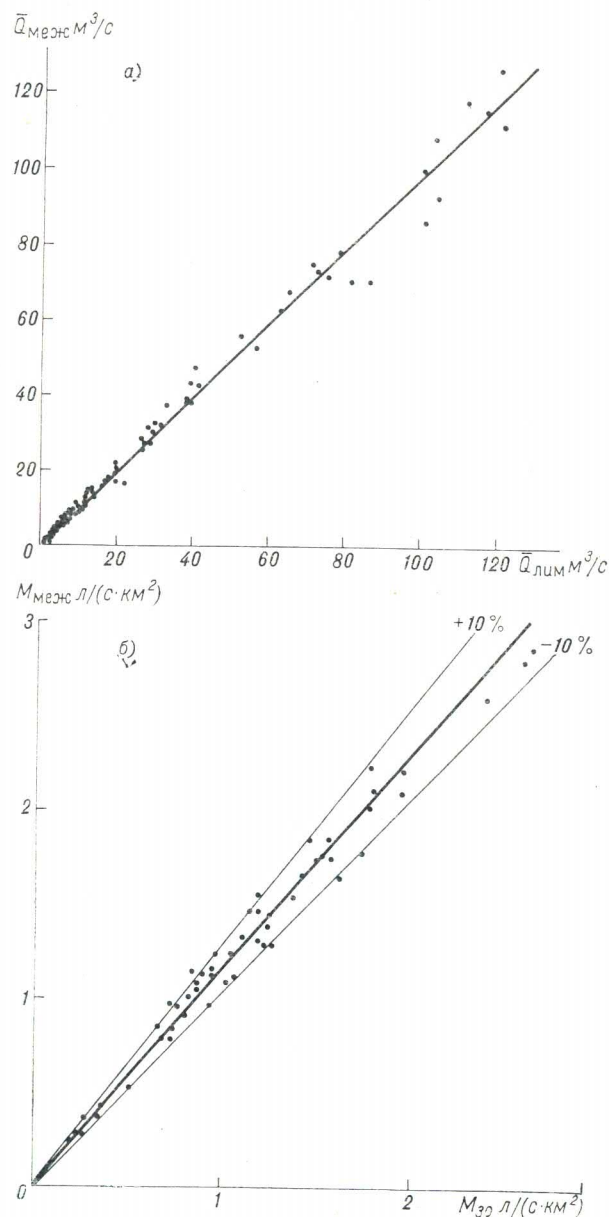


Рис. 40. Связь зимних меженного и лимитирующего расходов воды (а), меженного и минимального 30-дневного модулей стока (б).

Таблица 18

Сопоставление продолжительности маловодного сезона и соответствующего меженного периода

Район	Продолжительность маловодного сезона, дни	Продолжительность меженного периода, дни		Район	Продолжительность маловодного сезона, дни	Продолжительность меженного периода, дни	
		средняя	наименьшая			средняя	наименьшая
I (1)	60	65	10	VI (10)	60	45	10
II (2)	90	90	45	VII (6)	120	25	10
II (4)	90	70	15	VII (7)	120	45	10
III (1)	180	140	60	VII (8)	120	85	20
III (2)	180	110	25	VII (13)	120	80	10
IV (3)	150	80	20	VIII (11)	90	60	30
IV (17)	150	50	10	IX (12)	30	40	10
IV (18)	150	60	10	X (14)	60	25	0
V (4)	90	60	15	X (16)	60	30	0
VI (5)	60	40	10	X (17)	60	50	10
VI (9)	60	25	10				

Примечание. IV — район для маловодного сезона, 4 — район для меженного периода.

Таким образом, определение меженного стока расчетной обеспеченности для неизученных средних рек осуществляется по связи со стоком соответствующей обеспеченности за генетически однородные периоды. Зимний меженный сток для неизученных рек, расположенных восточнее границы г. Нарва — г. Псков — г. Витебск — г. Могилев — г. Воронеж — г. Волгоград — г. Астрахань (см. рис. 23), устанавливается по графикам связи со стоком зимнего лимитирующего сезона, а западнее этой границы — с минимальным 30-дневным зимним стоком. Летне-осенний меженный сток расчетной обеспеченности определяется по графикам связи с минимальным 30-дневным летне-осенним стоком. Для южных и западных районов ЕТС может использоваться связь со стоком летнего лимитирующего сезона.

В связи с развитием мелиоративных работ (орошение и осушение) все большее практическое значение приобретают сведения о так называемом бытовом стоке рек. В частности, при проектировании осушительной сети за бытовой принимается меженный расход воды (и отвечающий ему уровень), соответствующий норме осушения. Под последней понимается глубина уровня грунтовых вод, при которой определенная сельскохозяйственная культура при данной агротехнике дает наивысший урожай [58]. При проектировании оросительных систем основное значение имеют расходы воды за вегетационный период, который определяется датами перехода среднесуточных температур воздуха через 5°C . В зависимости от физико-географических условий района этот период на большей части

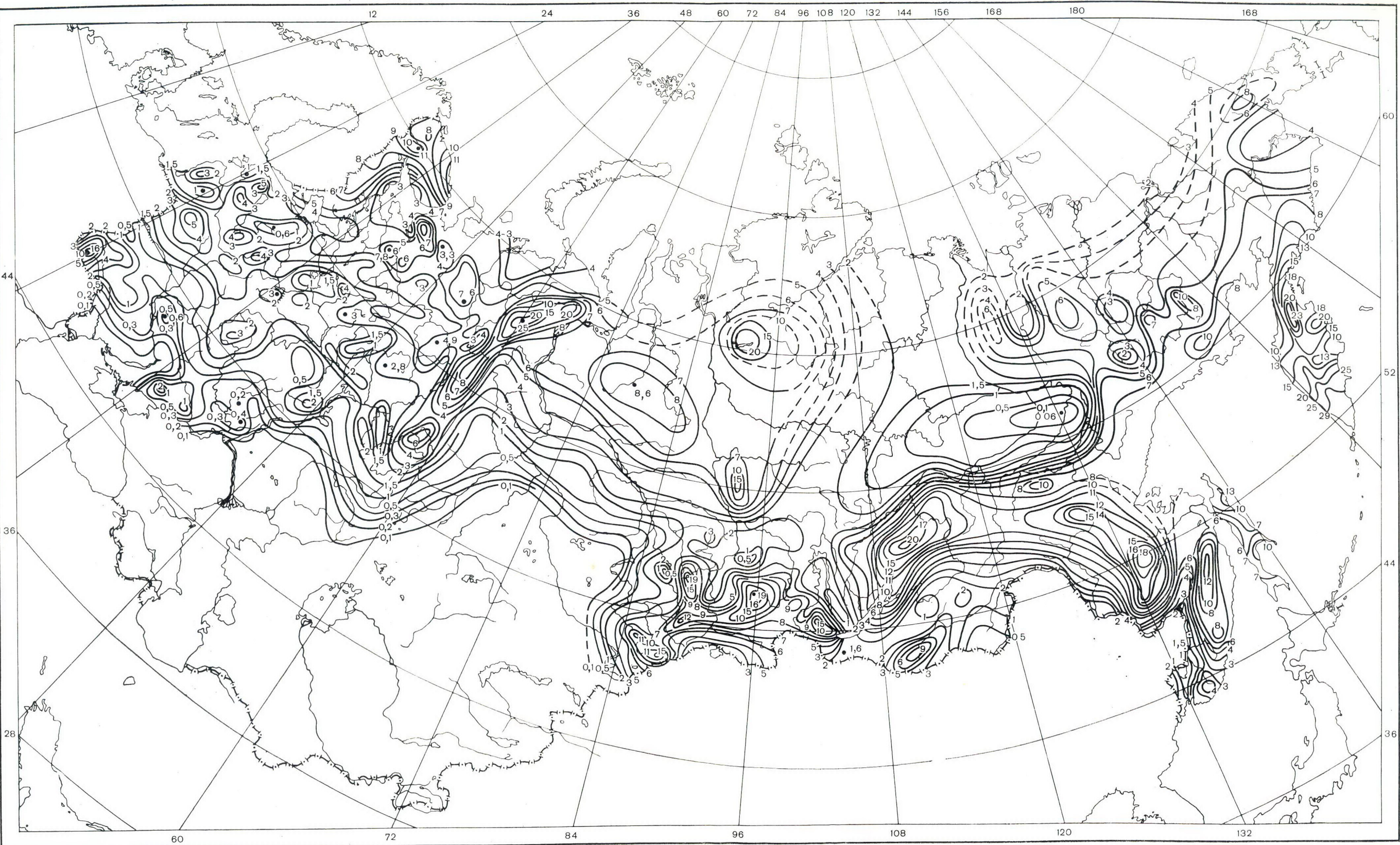


Рис. 41. Карта среднемноголетнего межennaleго стока ($\text{л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$) в летне-осенний сезон.

территории СССР может длиться с мая—июня по сентябрь—октябрь. Таким образом, по времени он совпадает с летне-осенним меженным периодом, особенно в зоне недостаточного увлажнения.

В мелноративной практике за величину бытового расхода воды принимается расход 50%-ной обеспеченности за вегетационный период. Учитывая вышеизложенное, можно с полным основанием принять величину среднегогодового расхода воды летне-осеннего меженного периода за бытовой расход. Для определения его величины автором построена карта нормы меженного стока за этот период (рис. 41, см. на вклейке в конце книги). При построении карты использованы те же пункты наблюдения за стоком, что и при обобщении минимального и лимитирующего стока. За расчетную продолжительность меженного периода целесообразно принимать среднюю длительность межени, указанную в главе 3 (при региональных обобщениях эти данные могут быть уточнены).

Минимальный суточный сток генетически однороден с минимальным месячным (30-дневным) стоком и для большинства рек СССР, особенно в зимний период, близок по величине к 30-дневному. Поэтому основным способом его определения являются уравнения, связывающие величину расхода воды или модуля стока этих характеристик для районов, сходных по климатическим условиям и степени истощения минимального стока. В работе автора [40] довольно подробно исследованы вопросы формирования и расчета нормы минимального суточного стока. На территории СССР выделено 16 районов в зимний сезон и 22 района в летне-осенний, имеющих различное соотношение величины среднегогодового суточного и 30-дневного минимального стока. Значения переходного коэффициента от 30-дневного к суточному минимальному стоку изменяются по территории Советского Союза в больших пределах: в зимний сезон от 0,55 до 0,95, а в летне-осенний от 0,42 до 0,88. Разница в величине коэффициента объясняется тем, что характер меженного периода неодинаков по территории. Чем меньше он нарушается паводками, т. е. чем он продолжительнее и устойчивее, тем меньше абсолютная разница между суточными и 30-дневными величинами стока и тем больше величина переходного коэффициента. В летне-осенний сезон такие климатические факторы, как осадки и испарение, оказывают большое влияние на характер меженного периода, а следовательно, и на величину соотношения суточного и 30-дневного стока. Поэтому границы районов, как и переходные коэффициенты, различаются по сезонам.

При исследованиях в масштабах всей страны производилась известная генерализация величины переходного коэффициента и районов. Однако при локальных исследованиях, когда возможен более детальный учет факторов, влияющих на соот-

ношение указанных характеристик минимального стока, целесообразно величину переходных коэффициентов устанавливать для меньших по размерам районов, не осредняя по территории значения коэффициентов, как это сделано в работе [40], когда осреднялись коэффициенты, различающиеся на 10—15%. Например, для условий Западной Сибири в зимний период было принято два значения переходных коэффициентов: 0,90 и 0,95 [40], а при более детальных исследованиях Комлев [90] выделил на этой территории пять районов, для которых величина переходного коэффициента равна 0,86, 0,88, 0,90 и 0,93, т. е. отличие от вышеуказанных коэффициентов весьма небольшое и при широкомасштабных исследованиях может не учитываться. Лишь для одного небольшого района им установлено несколько большее различие в коэффициентах—0,76 в работе [90] при 0,90 в работе [40]. Однако и эта разница находится в пределах принятой автором точности обобщения.

Построение графиков связи минимального суточного и 30-дневного стока целесообразно производить по данным о величине расхода воды, а не модуля стока или другой характеристики.

Низкий сток расчетной обеспеченности. Обеспеченные величины низкого стока устанавливаются по переходным коэффициентам от величины стока фиксированной обеспеченности. В практике строительного проектирования расчеты основных характеристик низкого стока производятся для обеспеченности 75—97%. Поэтому за исходную для расчета (фиксированную) обеспеченность принято для лимитирующего стока 75%, а для минимального—80% как начальные в ряду используемых расчетных обеспеченностей при определении указанных характеристик. Сток фиксированной обеспеченности устанавливается по вышеуказанным картам лимитирующего и минимального стока.

Расчетная величина расхода воды определяется по уравнению

$$Q_p = \lambda Q_{\phi}, \quad (15)$$

где Q_p — расход воды расчетной обеспеченности; Q_{ϕ} — расход воды фиксированной обеспеченности; λ — переходный коэффициент.

Переходные коэффициенты устанавливаются по графикам связи минимальных 30-дневных расходов воды 80%-ной обеспеченности или лимитирующих расходов воды 75%-ной обеспеченности с соответствующими расходами воды, обеспеченными на 75, 80, 85, 90, 95 и 97% (рис. 42). Графики строились для районов со сходными физико-географическими условиями. При этом учитывалось ранее осуществленное районирование СССР по величине коэффициента изменчивости минимального 30-дневного стока [40]. Районы с одинаковыми или очень близкими (расхождение до 10%) значениями переходного коэффициента

объединялись и для них устанавливался средний коэффициент. В табл. 19 и 20 приводятся значения коэффициента λ для определения лимитирующих и минимальных расходов воды расчетной обеспеченности, а на рис. 43 показаны районы с одинаковыми значениями переходных коэффициентов.

Величины переходного коэффициента для маловодного и лимитирующего сезонов часто очень близки между собой (в пре-

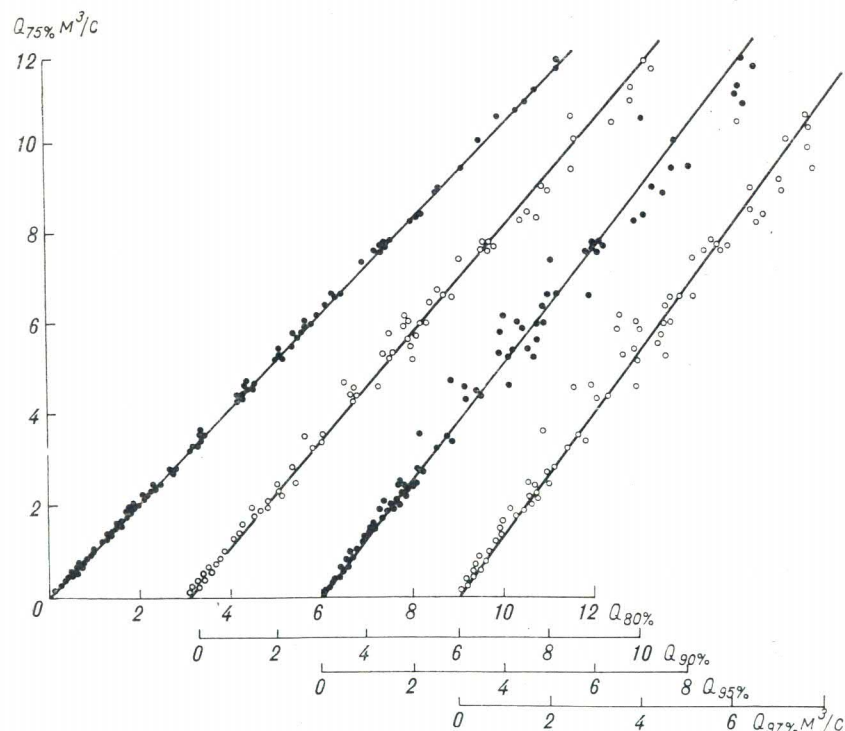


Рис. 42. Связь лимитирующего стока 75%-ной обеспеченности с лимитирующим стоком большей обеспеченности для рек севера ЕТС.

делах 10% для соответствующей обеспеченности) и поэтому принимаются едиными для обоих сезонов. Однако для отдельных районов в наиболее маловодные годы величина переходного коэффициента существенно различается по сезонам, что связано с различной степенью истощения подземных вод в зимний и летне-осенний сезоны. Это отражено в табл. 19 в виде различных значений переходного коэффициента для лимитирующего и маловодного сезонов в диапазоне обеспеченностей 90—97%.

Для рек с интенсивным истощением сезонного стока в очень маловодные годы (кривая обеспеченности имеет резкий изгиб

Таблица 19

Переходные коэффициенты λ для определения лимитирующих расходов воды расчетной обеспеченности

Район	Обеспеченность, %				
	75	80	90	95	97
1	1,0	0,94	0,85/0,77	0,78/0,60	0,70/0,52
2	1,0	0,92	0,77	0,66	0,59
3	1,0	0,88	0,56	0,36	0,29
4	1,0	0,91	0,70	0,51	0,32
5	1,0	0,89	0,66	0,49	0,42
6	1,0	0,92	0,77	0,60/0,69	0,48/0,64
7	1,0	0,93	0,78	0,70	0,65
8	1,0	0,95	0,80/0,85	0,63/0,77	0,49/0,70
9	1,0	0,88	0,58	0,45	0,40
10	1,0	0,85	0,57	0,44	0,35
11	1,0	0,90	0,75	0,63	0,60
12	1,0	0,80	0,50	0,30	0,25
13	1,0	0,95	0,90/0,85	0,83/0,77	0,80/0,73
14	1,0	0,97	0,87	0,80	0,75
15	1,0	0,95	0,85	0,78	0,71
16	1,0	0,93	0,80	0,70	0,62
17	1,0	0,97	0,92	0,87	0,84

Примечание. В числителе дробей величина коэффициента λ для лимитирующего сезона, в знаменателе — для маловодного сезона.

Таблица 20

Переходные коэффициенты λ для определения минимальных расходов воды расчетной обеспеченности

Район	Обеспеченность, %					
	75	80	85	90	95	97
I	1,04	1,0	0,94	0,87	0,80	0,75
II	1,04	1,0	0,93	0,70	0,60	0,45
Эпизодически пересыхающие или перемерзающие реки	1,20	1,0	0,75	0,45	0,15	0,00

в зоне 90—95%-ной обеспеченности, свидетельствующей о возможности прекращения стока на некоторый период времени в засушливые годы) величина переходного коэффициента λ уменьшается и равна для обеспеченности 90% $0,85\lambda$ (лимитирующий сезон) и $0,75\lambda$ (маловодный сезон), а для обеспеченностей 95 и 97% величина уменьшения одинаковая, точнее, очень близкая и составляет $0,75\lambda$ для лимитирующего сезона и $0,65\lambda$ для маловодного.

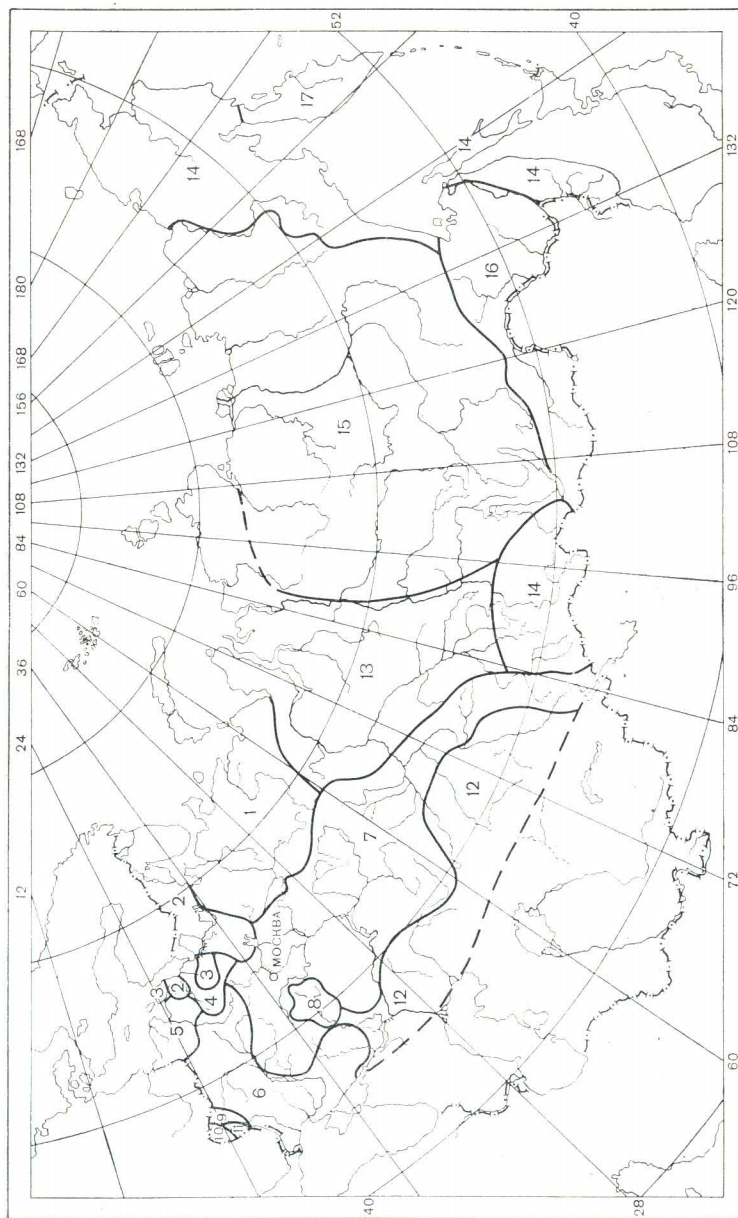


Рис. 43. Районы с одинаковыми значениями переходного коэффициента λ для определения лимитирующих расходов воды.

Применительно к лимитирующему стоку наиболее тесные связи 75%-ного стока наблюдаются со стоком 80 и 90%-ной обеспеченности. Максимальное отклонение эмпирических точек от средней линии на графиках связи, как правило, не превышает 10 и 20% соответственно. Для обеспеченностей 95 и 97% связь несколько ухудшается, так как разница величин стока 75%-ной и указанных обеспеченностей становится значительной, особенно при резком изменении условий питания рек в самые маловодные годы вследствие истощения источников питания. Наибольшие отклонения отдельных точек достигают уже 30—40% и более, особенно в районах, где имеются пересыхающие или перемерзающие реки, хотя в среднем величина отклонения находится в пределах 10—20%.

На распределение по территории величины переходного коэффициента основное влияние оказывает изменчивость расхода воды в маловодные годы: чем он меньше меняется по территории, тем устойчивее коэффициент λ . Следовательно, чем однообразнее и постояннее во времени питание рек в рассматриваемый отрезок времени, тем меньше изменяется величина стока с уменьшением водности данного сезона.

Минимальный сток характеризует самые маловодные периоды, когда подземные воды обеспечивают наиболее устойчивое питание рек. Поэтому диапазон изменения величины минимального стока по территории значительно меньше, чем сезонного (лимитирующего). При определении переходного коэффициента для расчета минимального стока исследованию подвергалась только нижняя часть кривой обеспеченности в диапазоне значений, имеющих весьма небольшую изменчивость даже при высоких коэффициентах вариации всего фактического ряда. Поэтому коэффициент λ оказался очень устойчивым по территории СССР, так что его значения можно было принять практически постоянными и едиными для зимнего и летне-осеннего сезонов. Исключения составили реки муссонных районов Дальнего Востока (бассейны рек Шилки, Аргуни, Буреи, левые притоки низовой Зей, бассейн Уссури), а также реки, на которых наблюдается эпизодическое отсутствие стока.

Переходный коэффициент 75%-ной обеспеченности для всех рек СССР находится в пределах 1,03—1,05, для обеспеченности 85% — 0,91—0,96, для обеспеченности 90% — 0,83—0,91 (кроме муссонных районов и рек с эпизодическим отсутствием стока). При этом отклонение эмпирических точек от средней линии на графиках связи, как правило, не превышает 10%. Для обеспеченностей 95 и 97% связь несколько ухудшается, поскольку разница в величинах стока 80%-ной и указанных обеспеченностей становится значительной, особенно при резком изменении питания рек вследствие истощения источников питания. Это относительно часто наблюдается для стока, соответствующего 97%-ной обеспеченности. Отклонение точек от средней линии

на графиках связи достигает 20%, хотя связь продолжает оставаться достаточно тесной. Колебания коэффициента λ по территории СССР (кроме вышеуказанных районов) составляют 0,77—0,83 для обеспеченности 95% и 0,70—0,79 для 97%-ной обеспеченности. Таким образом, средняя районная величина коэффициента λ для стока данной обеспеченности почти для всей территории Советского Союза изменяется в пределах 5—10% и может быть осреднена по территории. В табл. 20 представлены значения переходных коэффициентов, средние для данной обеспеченности, имеющие ошибку в среднем от 5% (для 75%-ной обеспеченности) до 15% (для 97%-ной обеспеченности) и позволяющие определить расчетную величину минимального 30-дневного расхода воды для зимнего и летне-осеннего сезонов.

В маловодные годы в бассейне Амура наблюдается резкое сокращение питания рек. Эмпирическая кривая обеспеченности интенсивно приближается к оси абсцисс или может сильно изогнуться вниз в диапазоне обеспеченностей 90—95% и при больших значениях обеспеченности пересечь ось абсцисс. Поэтому величина коэффициента λ для самых больших обеспеченностей в этом районе значительно отличается от общей по территории СССР.

Для эпизодически пересыхающих или перемерзающих рек переходный коэффициент будет существенно отличаться от средних по территории коэффициентов, определенных для рек с постоянным стоком. Это связано с тем, что вариация стока эпизодически пересыхающих или перемерзающих рек очень значительна, истощение стока в меженный период происходит интенсивно и эмпирическая кривая обеспеченности в нижней части отличается большой крутизной. Следует учесть, что в этом случае приходится иметь дело с исчезающе малыми расходами воды (десятки литров и литры), поэтому значения ошибки коэффициента λ (особенно для обеспеченности 95% и более) будут увеличиваться, так как даже небольшая абсолютная разница в величинах, имеющих сотые и тысячные значения, приводит к большому проценту ошибки. Когда нулевые значения стока в имеющейся совокупности фактических данных составляют не более 25%, минимальный сток 97%-ной обеспеченности обычно равен нулю. Поэтому и переходный коэффициент для рек с эпизодическим отсутствием стока будет равен нулю. Естественно, что величина коэффициента λ может иметь в подобных случаях нулевые значения и при меньшей обеспеченности. В связи с этим при локальных исследованиях в районах с наличием явлений пересыхания или перемерзания рек необходимо производить дополнительные исследования, чтобы уточнить величину переходного коэффициента. Уточнения заключаются главным образом в построении локальных зависимостей минимального стока 80%-ной и расчетной обеспеченности на основе

использования данных наблюдения за стоком рек с размерами бассейна одного порядка.

Величина минимального суточного стока 80%-ной обеспеченности устанавливается по графику связи этой характеристики с минимальными 30-дневными расходами воды той же обеспеченности для районов, выделенных ранее при определении

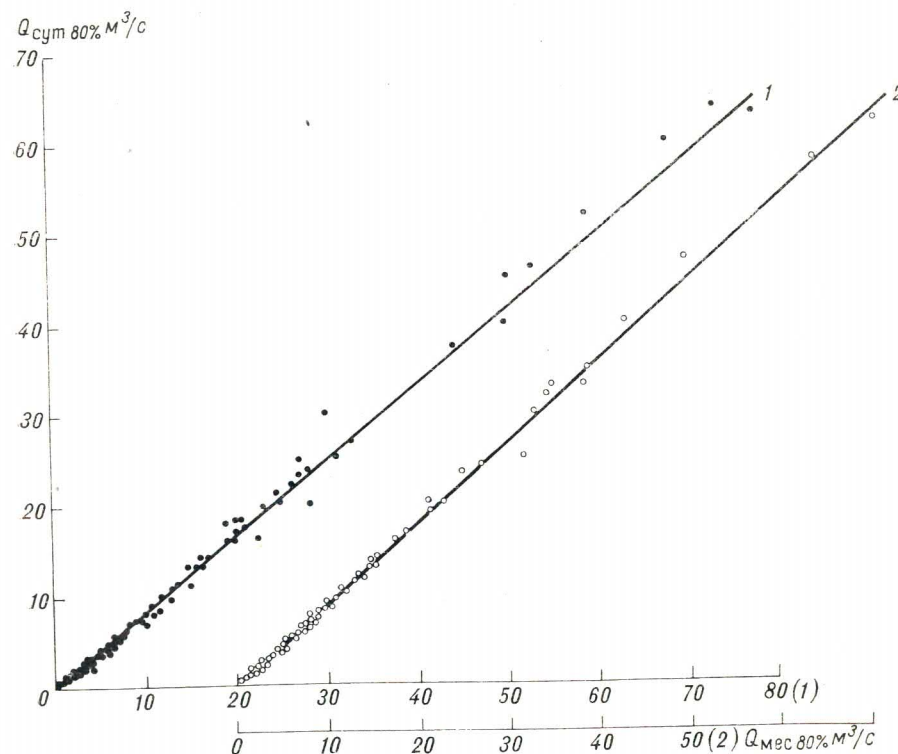


Рис. 44. Связь минимальных суточных и 30-дневных расходов воды 80%-ной обеспеченности в летне-осенний (1) и зимний (2) периоды для рек бассейна Верхней Волги.

минимального среднегогодового суточного расхода воды [40]. Связь весьма тесная, отклонение точек от средней линии на графиках не превышает 10—20%. Пример такой связи показан на рис. 44. Наиболее тесная связь отмечается для районов с устойчивым и продолжительным меженным периодом. Значения минимальных 30-дневных и суточных расходов воды 80%-ной обеспеченности намного ближе друг к другу, чем их среднегогодовые величины. С ростом обеспеченности их значения обычно сближаются, поскольку в пределах они должны совпасть, что и наблюдается на реках с длительной и устойчивой меженью.

Поэтому переходный коэффициент более устойчив по территории, чем при связи среднесуточных величин минимального 30-дневного и суточного стока. В зимний сезон на территории СССР выделяется три района, для которых средняя величина переходного коэффициента колеблется от 0,54 до 0,90. Наибольшую территорию занимает район 1 (рис. 45), в котором на реках в зимний сезон межень продолжительная и устойчивая. Поэтому величина коэффициента в этом районе колеблется в очень незначительных пределах (0,88—0,91) и может быть принята единой по району. Наименьшее значение коэффициент имеет на реках Карпат, где в зимний сезон часты оттепели и дожди, и поэтому разница в величине минимального 30-дневного и суточного стока 80%-ной обеспеченности здесь наиболее существенна.

В летне-осенний сезон на территории СССР выделяется шесть районов (рис. 45) с величиной коэффициента от 0,45 до 0,86. Это обусловлено большим разнообразием климатических условий в летне-осенний сезон, чем в зимний. Влияние климатических факторов сказывается на величине минимального стока не только прямым путем (через осадки, температуру воздуха и пр.), но и косвенно, через факторы, непосредственно обуславливающие режим и величину стока рек в меженный период (почво-грунты, гидрогеологические условия и пр.). Сокращение длительности меженных периодов или их отсутствие в областях с частым выпадением дождей, равно как и интенсивное истощение стока в районах с наличием большого испарения или в зоне многолетней мерзлоты, приводит к значительной разнице между 30-дневными и суточными расходами воды. Поэтому в подобных районах величина переходного коэффициента наименьшая.

Таблица 21

Значения коэффициента k для определения минимального среднесуточного расхода воды 80%-ной обеспеченности

Район	Зимний период	Летне-осенний период
1 (I)	0,90	0,86
2 (II)	0,83	0,83
3 (III)	0,54	0,73
4	—	0,68
5	—	0,60
6	—	0,45

Примечание. Арабскими цифрами даны номера районов для летне-осеннего периода, римскими — для зимнего.

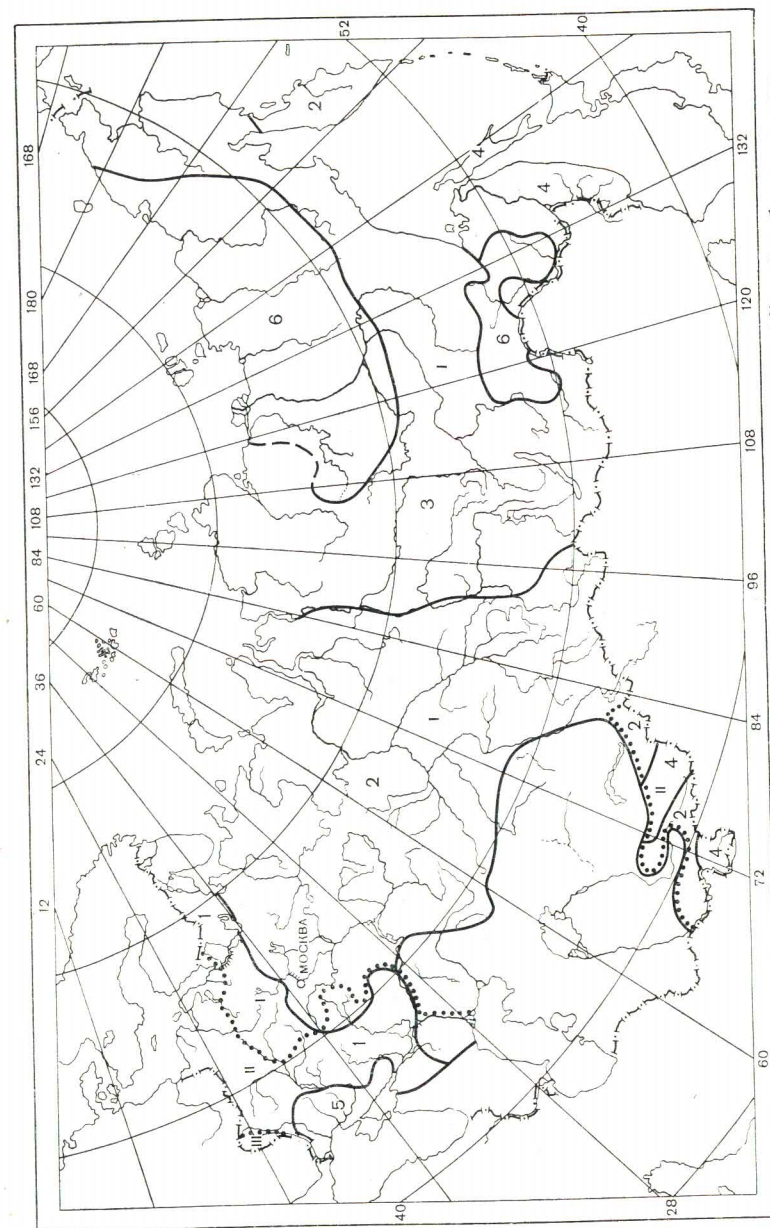


Рис. 45. Карта районов для определения минимального суточного стока 80%-ной обеспеченности.

Расчет минимального суточного стока 80%-ной обеспеченности производится по уравнению

$$Q_{80\% \text{ сут}} = k Q_{80\% \text{ мес}}, \quad (16)$$

где $Q_{80\% \text{ сут}}$ — минимальный суточный расход воды 80%-ной обеспеченности; $Q_{80\% \text{ мес}}$ — минимальный 30-дневный расход

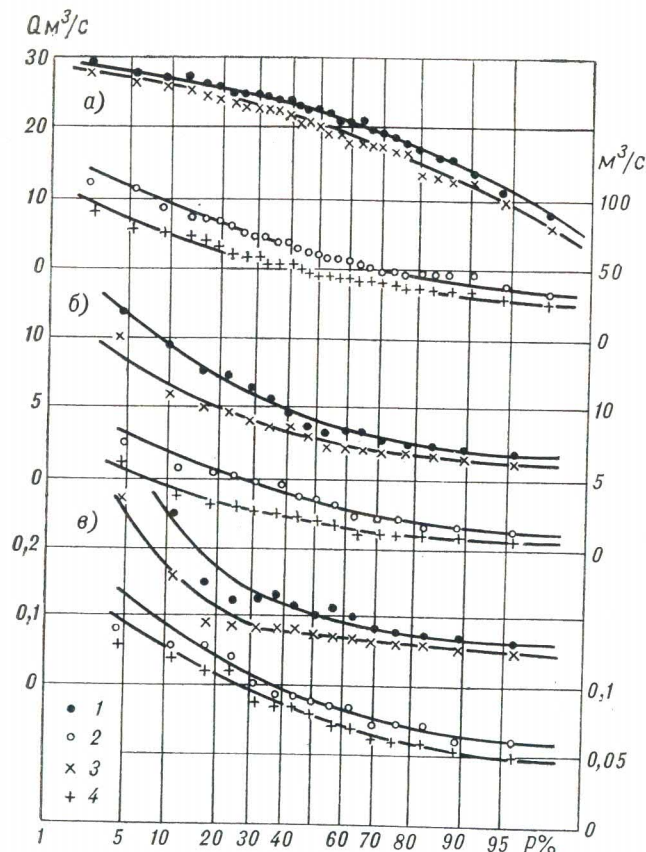


Рис. 46. Эмпирические кривые обеспеченности минимальных 30-дневных и среднесуточных расходов воды.

а — р. Большая (Быстрая) — с. Малка (2890 км²), б — р. Стрый — г. Турка (897 км²), в — р. Чугур — с. Барандяны (168 км²); 1 — 30-дневные зимние расходы воды, 2 — 30-дневные летне-осенние, 3 — среднесуточные зимние, 4 — среднесуточные летне-осенние.

воды 80%-ной обеспеченности, определяемый по картам изолиний; k — переходный коэффициент, устанавливаемый по табл. 21.

Исследование графиков связи минимального суточного расхода воды 80%-ной обеспеченности с аналогичными расходами

воды других обеспеченностей (75—97%) показало, что величина переходного коэффициента от 80%-ной обеспеченности к другим обеспеченностям практически такая же, как и для 30-дневного стока. Это вполне понятно, поскольку, как правило, наблюдается соответствие тенденции изменения величин суточного и 30-дневного расхода воды с ростом обеспеченности, что ясно видно на рис. 46. Поэтому минимальные суточные расходы воды различной обеспеченности могут быть установлены с помощью тех же переходных коэффициентов k , которые используются при определении расчетных минимальных 30-дневных расходов воды (см. табл. 20).

Меженный сток в диапазоне обеспеченностей 75—97% устанавливается по графикам связи со стоком 75%-ной обеспеченности за лимитирующий сезон для зимнего периода и с минимальным 30-дневным стоком 80%-ной обеспеченности для летне-осеннего периода. Полученные величины принимаются за исходные (фиксированной обеспеченности). Меженный сток расчетной обеспеченности определяется по переходному коэффициенту от этой величины. Значения переходных коэффициентов принимаются по аналогии с установленными для данного района величинами. По величине меженного стока расчетной обеспеченности для пунктов, имеющих длительные периоды наблюдения за стоком, строятся графики связи меженного стока 75 или 80%-ной обеспеченности (в зависимости от периода года) со стоком расчетной обеспеченности. Графики имеют прямолинейный вид, поэтому величину переходного коэффициента к соответствующей обеспеченности определить нетрудно. Для зимнего меженного стока рек АТС и рек севера ЕТС величина переходного коэффициента практически не отличается от такого же коэффициента, определенного для стока лимитирующего сезона, поэтому последний может использоваться и для расчета зимнего меженного стока.

5.3. РАСЧЕТ НИЗКОГО СТОКА МАЛЫХ РЕК

Низкий сток малых рек — одна из наиболее трудно определяемых гидрологических характеристик, так как его величина в сильной степени зависит от локальных условий территории. Поэтому требуется подробная информация как об условиях формирования низкого стока малых рек, так и об изменении его величины во времени и по территории. Однако такие сведения обычно имеются в недостаточном объеме. Вследствие этого обобщения приходится осуществлять с известной долей условности.

Вопросы расчета низкого стока малых рек исследованы далеко не достаточно. Наибольшее внимание им уделялось в ГГИ [37, 40, 118], но в основном в аспекте минимального стока. Опре-

деленный интерес представляют исследования, выполненные Комлевым [90]. Он предложил рассчитывать минимальный и меженный сток малых рек в зимний сезон через переходный коэффициент (коэффициент редукции), учитывающий отклонение фактического стока от зонального, снятого с карты изолиний или определенного по зависимости от средней высоты водосбора с учетом размеров бассейна. Этот способ применяется в случае снижения величины стока малых рек по сравнению с зональными значениями. Если же сток малых рек превышает зональные значения, то его величина будет значительно занижена. Возможно поэтому попытка В. П. Герасименко рассчитать величину зимнего минимального месячного стока малых рек Западной Сибири указанным способом не дала положительных результатов, средняя ошибка оказалась в пределах 50% [57]. Полученные им расчетные уравнения для определения минимального месячного стока малых рек Западной Сибири основаны на использовании метода множественной корреляции и связывают величину минимального стока главным образом с нормой годового стока. Недостатки такого приема расчета, как и принципиальные возможности применения метода множественной корреляции, рассматривались ранее.

В монографии [40] были рассмотрены существующие способы расчета минимального стока малых рек, основанные на эмпирических зависимостях его характеристик от основных физико-географических факторов. Таковыми обычно являлись площадь бассейна реки, средняя высота водосбора для горных рек, величина озерности водосбора для озерных рек, а также модуль годового стока.

Эмпирические зависимости позволяют определять низкий сток рек с различными размерами бассейна, но главным образом на малых реках. Поэтому они приняты за основную форму обобщения данных по низкому стоку малых рек. Как было показано в главе 2, наиболее общим фактором, имеющим четкое количественное выражение, не изменяющимся во времени и интегрально отражающим влияние стокообразующих и в значительной мере косвенных факторов, является площадь бассейна реки. Ее величина, как уже указывалось, принята за критерий при разделении рек на малые и средние.

При разработке расчетных зависимостей для определения стока неизученных рек обычно оперируют величиной модуля или слоя стока, т. е. параметрами, приведенными к единице площади, а величина расхода воды непосредственно не используется. Применение этих в известной мере условных характеристик без должного анализа механизма их связи с площадью бассейна реки, как показали исследования автора [40], нередко не позволяет делать определенных выводов. На тесноту связи модуля стока с площадью бассейна влияет степень сходства стокоформирующих условий данного района и точность определения

функциональных характеристик. Применительно к низкому стоку при исследовании указанной связи большое значение имеет факт замены объема подземного бассейна, питающего реку, площадью его поверхности и отнесение величины стока к последней. Чем меньше река, тем значительнее может быть разница между объемом и площадью бассейна. Этим в значительной мере объясняется встречающееся большое различие величин модуля низкого стока особо малых рек одного района, создающих «вилкообразный» график связи модуля стока с площадью бассейна. Этому же способствует различие в интенсивности изменения модуля низкого стока и площади бассейна с ростом реки.

Большое значение имеет развитость речной сети. Так, две реки с одинаковой площадью, но разной густотой речной сети при прочих равных условиях будут иметь разный модуль стока, так как водосборная способность этих рек будет различной. Заметно различаются величины модуля низкого стока при одинаковой площади бассейна в случае разной глубины вреза реки — чем она больше, тем большее питание получает река. Все это обуславливает появление дополнительных районов на в общем однородной территории либо создает значительный разброс эмпирических точек на графиках связи модуля с площадью бассейна.

Зависимость модуля стока от площади бассейна показывает изменение интенсивности питания реки с ростом площади бассейна. Интенсивность питания резко возрастает или уменьшается для малых рек и остается неизменной или слабо меняющейся для средних рек. Если интенсивность поступления воды с бассейна в русло реки одинакова по ее длине, т. е. увеличение (или уменьшение) расхода воды прямо пропорционально увеличению площади бассейна, то величина модуля стока изменяться не будет. Но это может происходить только при сохранении всех физико-географических условий по длине реки, чего практически не наблюдается. Обычно величина расхода воды не изменяется прямо пропорционально росту площади бассейна, поэтому на графиках связи эмпирические точки разбросаны.

При исследовании минимального стока была выявлена более надежная и обоснованная пространственная связь минимального расхода воды с площадью бассейна реки, на которую не влияют вышеизложенные особенности, свойственные зависимости модуля стока от площади бассейна и затрудняющие производство обобщений расчетного плана. Расход воды является характеристикой, в полной мере отражающей условия питания реки. Реки с одинаковой площадью бассейна, но с разной интенсивностью подземного питания и прочими условиями будут иметь различную величину расхода воды. Следовательно, чем теснее зависимость минимального расхода воды от площади бассейна реки в данном районе, тем он однороднее, по условиям

формирования минимального стока. Однако при значительном возрастании площади бассейна зависимость начинает ухудшаться, поскольку увеличивается территория района, что ведет к снижению его однородности.

Таким образом, зависимость величины минимального расхода воды от площади бассейна является достаточно гибкой, чтобы отражать происходящие изменения в условиях формирования минимального стока по территории, и в то же время не чувствительной к случайным ошибкам, свойственным зависимостям, использующим другие стоковые характеристики.

При подготовке в середине 60-х годов нормативного документа по расчетам минимального стока при строительном проектировании [156] автором был разработан метод расчета минимального среднегогодового 30-дневного стока малых рек, основанный на вышеуказанных принципах. Для однородных по физико-географическим (особенно по гидрогеологическим) условиям районов была исследована зависимость минимального 30-дневного расхода воды от площади бассейна. При этом использовались данные наблюдения за стоком на 2700 пунктах территории СССР, расположенных на реках с площадью бассейна от нескольких квадратных километров до 10 000—15 000 км². При анализе материалов и его обобщении использовались: карта дренирования водоносных пород реками, гидрогеологические описания условий формирования подземного стока регионов, карта подземного стока зоны интенсивного водообмена, карта подземного стока в процентах от осадков, карта годового стока, карты осадков за теплый и холодный сезоны, данные об испарении и температуре воздуха в летний сезон и в районах с наличием оттепелей в зимний, а также карта рельефа территории СССР, гидрологическое районирование Советского Союза (по П. С. Кузину), физико-географическое районирование СССР (по МГУ).

Предварительный анализ зависимости минимальных 30-дневных расходов воды от площади бассейна производился на основании графиков связи указанных характеристик, построение которых осуществлялось для сходных по водности гидрогеологических районов или регионов, выделенных по условиям формирования подземного стока в качестве основы к «Карте подземного стока СССР» [79].

Впоследствии эти зависимости, как и границы районов, уточнялись на основании более детального анализа гидрогеологического строения регионов (водообильность питающих горизонтов и литологический состав пород, степень связи водоносных горизонтов с дренирующими системами, наличие выходов напорных или карстовых вод и др.). В случае пестрой водности почво-грунтов, слагающих территорию региона, и отсутствия более детального гидрогеологического районирования производилось его разделение на районы с близкой по величине вод-

ностью. С другой стороны, часть гидрогеологических районов, имеющих близкую по величине водность пород и выделенных главным образом на основании возраста водовмещающих пород, после соответствующего анализа (учитывались дебиты родников и скважин в различных частях района) объединялись в более крупные районы. Если гидрогеологическое районирование оказывалось достаточно подробным, то выделение районов по однородным условиям формирования минимального стока и его зависимости от площади бассейна не представляло особых трудностей.

На рис. 47 (см. на вклейке в конце книги) в качестве примера приводится карта районов для определения минимальных 30-дневных расходов воды в зимний период на малых реках. Границы северных и центральных районов на ЕТС несколько уточнены по сравнению с ранее опубликованной картой [40]. Полностью карты районов для зимнего и летне-осеннего сезонов в масштабе 1:10 000 000 приводятся в работе [142]. В рабочем варианте районирование территории Советского Союза произведено автором на карте масштаба 1:5 000 000. Всего на территории СССР, исключая горные районы Кавказа и Средней Азии, выделено 148 районов в летне-осенний сезон и 158 районов в зимний. Разница в количестве районов и положении их границ по сезонам определяется различием климатических условий, обуславливающих формирование подземного и речного стока в зимний и летне-осенний сезоны. В зимний сезон влияние гидрогеологических условий проявляется наиболее резко, а в летне-осенний сезон оно несколько затушевывается такими факторами, как осадки и испарение.

Границы районов проводились по границам резкой смены гидрогеологических условий или по водоразделам рек, относящихся к категории средних и больших. При этом учитывался вес площади бассейна с едиными условиями формирования минимального 30-дневного стока в общей площади. Например, в случае смены в бассейне реки гидрогеологических условий изменения в величине стока реки будут наблюдаться не сразу, а постепенно. Наиболее заметное изменение произойдет при слиянии двух рек, формирование минимального стока одной из которых происходит полностью или большей частью в других гидрогеологических условиях. В этом случае граница района проходит по водоразделу между водосборами этих рек и через место их слияния.

Общая расчетная зависимость для определения минимальных 30-дневных расходов воды неизученных малых рек имеет вид

$$Q_{\min} = a (F \pm f)^n, \quad (17)$$

где $Q_{\min}$ — средний многолетний минимальный 30-дневный расход воды в зимний или летне-осенний сезоны, в м³/с; F — площадь бассейна реки, в км²; f — средняя по району площадь с от-

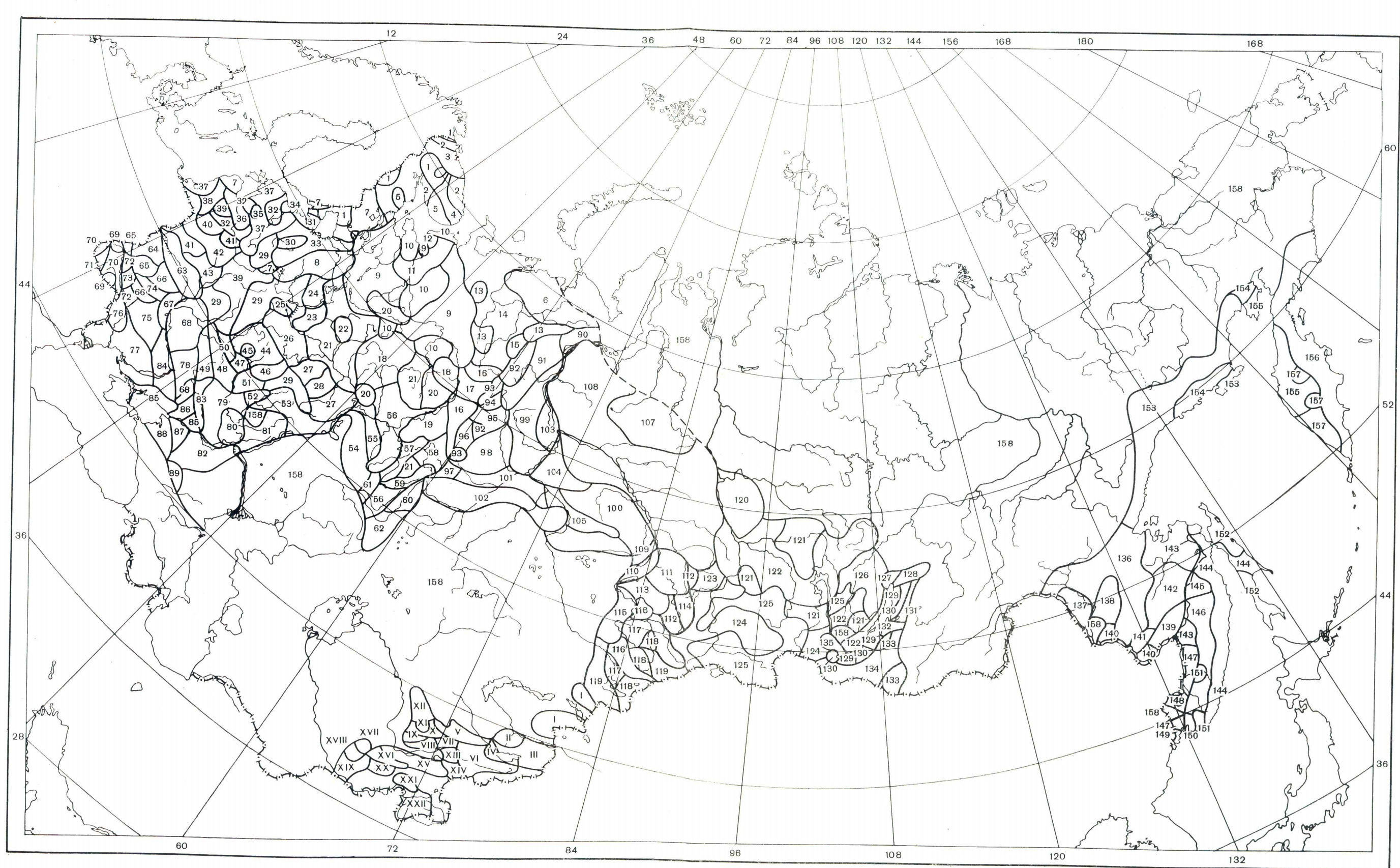


Рис. 47. Карта районов для определения минимальных 30-дневных и лимитирующих расходов воды на малых реках в зимний период.

сутствием стока (при минусе в скобках) или средняя площадь подземного бассейна, обеспечивающая дополнительное питание рекам данного района (при плюсе в скобках) вследствие особых гидрогеологических условий (карст, выходы глубоких напорных вод, несовпадение границ подземного и поверхностного водосборов) или регулирующего влияния озер (при озерности водосбора до 5%); a и n — параметры, характеризующие влияние степени увлажненности данного района на условия формирования минимального стока малых рек. В зависимости от интенсивности возрастания минимальных расходов воды с увеличением площади бассейна, в значительной мере зависящей от обводненности территории, редуцированный коэффициент n изменяется от величины, превышающей 1,0 (при нарастании интенсивности питания с увеличением площади бассейна), до величины, меньшей 1,0 (при уменьшении этой интенсивности по длине реки).

В случае если величина площади бассейна исследуемой реки меньше, чем средняя по району площадь с отсутствием стока, т. е. $F < f$, то минимальный 30-дневный расход воды принимается равным нулю.

Параметр f как физическая величина представляет определенный интерес. Он характеризует условия формирования речного стока в верховьях речного бассейна в маловодный период. В районах с отсутствием ежегодно пересыхающих или перемерзающих водотоков его величина равна нулю. В этом случае уравнение (17) приобретает наиболее простую форму.

Любая река имеет в своих верховьях определенных размеров бассейн, с которого формируется ее начальный сток. Эту площадь можно назвать площадью бассейна истока реки, или площадью начального стока. Следовательно, расчет минимального стока по формуле (17) может осуществляться лишь до величины этой площади. При ее меньших значениях он теряет практический смысл, однако для решения других задач, например, изменения дренаруемых запасов подземных вод с уменьшением площади начального стока, вполне может использоваться. Площадь начального стока обязательно должна учитываться в общей расчетной зависимости и исключение ее из расчетов совершенно неправомерно. Площадь начального стока входит в параметр f и тогда, когда он характеризует величину площади с отсутствием стока в маловодный период. В зоне недостаточного увлажнения этот параметр включает в себя площадь начального стока, площадь с временным отсутствием стока и постоянно бессточную (в период маловодья) площадь.

При расчетах минимального стока, когда $f=0$, за площадь начального стока целесообразно принимать такое значение площади бассейна, при котором величина расхода воды, рассчитанного по формуле (17), не превышает 1 л/с. Естественно, что при концентрированных выходах подземных вод в истоке реки, а тем более при истоке реки из озера или болота такое допущение

становится неприемлемым и в этом случае необходимо опираться на данные непосредственных измерений в истоке реки.

Формула (17) позволяет оценивать минимальный сток рек, в определенной степени зарегулированных озерами (средняя озерность водосбора до 5%). При этом параметр f характеризует размер бассейна, который в рассматриваемых физико-географических условиях оказывает такое же влияние на величину минимального стока, как и озерное регулирование.

Величина параметра f значительно изменяется по территории СССР. В зоне достаточного увлажнения для основной части рек она равна нулю. Исключение составляют карстовые районы, а также районы с интенсивным напорным питанием или превышением площади подземного бассейна над поверхностным. Всего выделяется восемь районов, в которых величина f положительна и изменяется по районам от 20 до 120 км². В зоне недостаточного увлажнения ее величина, характеризующая площадь с отсутствием стока, изменяется от 20 до 1000 км². Существующая точность исходных данных, недостаток необходимой информации и используемые приемы обобщения не позволяют достаточно надежно определять величину f для любого района территории СССР, если она меньше 20 км². По этой же причине нижним пределом применимости расчетной формулы (17) является площадь бассейна реки, составляющая 20 км² для зоны достаточного увлажнения, а для рек зоны недостаточного увлажнения, где величина минимального стока весьма мала и влияние разного рода факторов проявляется наиболее резко, она должна быть не менее 50 км². В районах с очень сложными условиями формирования стока и малым числом фактических данных нижняя граница повышается до 100 км².

За наибольшую площадь бассейна, подпадающую под действие формулы (17), принимается средняя по данной территории критическая площадь бассейна, указанная в табл. 16.

Формула (17) не может использоваться для расчета минимального стока рек со значительным озерным регулированием или протекающих в районах с наличием локального карста, оказывающего резкое влияние на речной сток, а также рек с ярко выраженным влиянием хозяйственной деятельности на сток в меженьный период.

Массовые поверочные расчеты по формуле (17) показали, что для 760 пунктов в зимний сезон и 1460 пунктов в летне-осенний средняя величина отклонения рассчитанных данных от фактических составила 15—20%. В районах со сложными условиями формирования минимального стока на малых реках, особенно в зоне недостаточного увлажнения, она увеличивалась до 25—30%.

Достаточная надежность и простота использования формулы (17) обусловили ее широкое применение в практике проектирования и включение в нормативный документ Госстроя СССР

[156]. По этой же причине она была принята за исходную при разработке способа определения минимального стока малых рек различной обеспеченности с использованием переходных коэффициентов от стока фиксированной обеспеченности.

Применительно к районам, выделенным на территории СССР для определения минимального среднегогодового 30-дневного стока малых рек [38, 39], была исследована связь среднегогодовых минимальных 30-дневных расходов воды с минимальными 30-дневными расходами воды 80%-ной обеспеченности для зимнего и летне-осеннего сезонов (рис. 48). При построении графиков связи использовались фактические данные о минимальном стоке по малым и частично средним рекам, поскольку существенной разницы в характере связи для малых и средних рек не наблюдалось. Это обусловливается тем, что основным фактором, определяющим характер связи указанных величин стока, являются климатические условия, более однообразные по территории, чем гидрогеологические. На территории СССР выделяется пять областей, в которых переходный коэффициент r от среднегогодового минимального 30-дневного стока к его величине, обеспеченной на 80%, изменяется от 0,4 до 0,8 в оба сезона. Наибольшую область занимают реки, для которых этот коэффициент равен 0,75 (из 158 районов, выделенных в зимний сезон при разработке формулы (17), указанная величина наблюдается для 100 районов; в летне-осенний сезон — для 66 районов из 148). В зимний сезон к этой области относится почти вся территория АТС, исключая некоторые районы Дальнего Востока и юга Западной Сибири. В летне-осенний сезон наблюдается большая изменчивость по территории величины переходного коэффициента. Так, $r=0,6$ получено для 55 районов, в то время как зимой такая величина отмечена только для 26 районов.

Связь минимальных среднегогодового и 80%-ной обеспеченности 30-дневных расходов воды является весьма тесной для выделенных областей. Эмпирические точки на графиках связи находятся, как правило, в пределах зоны 20% отклонения от средней линии. Поэтому применительно к условиям определения минимальных 30-дневных расходов воды 80%-ной обеспеченности формула (17) может быть представлена в виде

$$Q_{80\%} = ra(F \pm f)^n. \quad (18)$$

После перемножения коэффициентов r и a для каждого ранее выделенного района целесообразно в написании формулы (18) сохранить лишь одно обозначение коэффициентов — a . Значения a для выделенных районов представлены в табличной форме. Величина коэффициента a довольно мала, поэтому для удобства записи в таблице этот коэффициент увеличивается в 1000 раз, а в уравнении такое увеличение компенсируется множителем 10^{-3} . Таким образом, окончательной расчетной

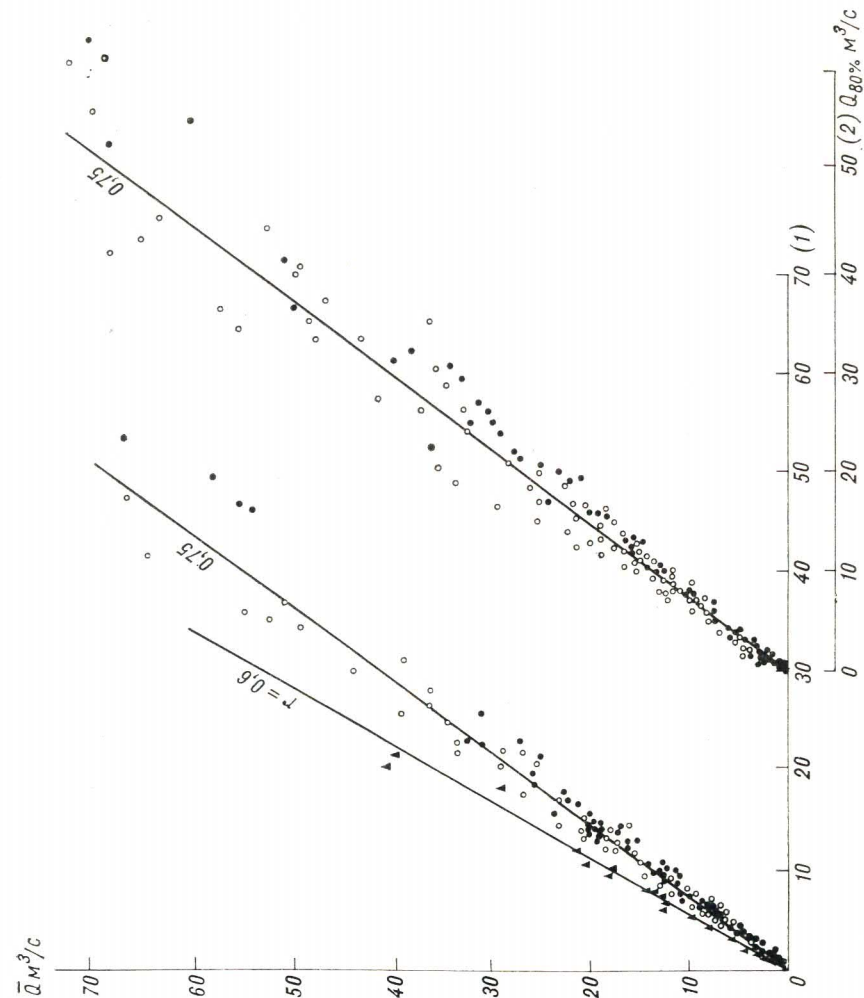


Рис. 48. Связь минимальных 30-дневных расходов воды 80%-ной обеспеченности с их среднегогодовыми величинами.

формулой, используемой на практике для определения минимальных 30-дневных расходов воды 80%-ной обеспеченности, будет

$$Q_{80\%} = 10^{-3} a (F \pm f)^n. \quad (19)$$

При наличии минуса в скобках уравнения и значении параметра f , превышающем величину F , расчет не производится, поскольку данная река является пересыхающей или перемерзающей.

Значения параметров a , n , f рассчитаны для всех районов, выделенных на территории СССР для зимнего и летне-осеннего периодов, и приводятся в специальной таблице [41, 142], образец которой показан (табл. 22). При этом знак «минус» из скобок формулы (19) перенесен в таблицу. Значения параметров a , n , f являются средними по данному району. Их величины изменяются от района к району весьма существенно (на 50—100% и более), поэтому следует обращать особое внимание на правильность определения местоположения реки, для которой ведется расчет, и отнесения ее к данному району, особенно если ее изображение отсутствует на карте. Ошибка в этой начальной операции расчетов сразу же обуславливает значительную ошибку в конечном результате, который может быть больше или меньше фактического в 2—3 раза и более. Устанавливая местоположение рек и расчетных створов, отсутствующих на карте и находящихся по предварительным данным вблизи границы района, следует учитывать, что границы районов проводились по водоразделам главных рек или границам резкой смены гидрогеологических комплексов. В последнем случае они могут пересекать любую реку, в остальных — граница района пересекает только средние и большие реки чаще всего в месте слияния двух рек, текущих из разных районов. Мелкий масштаб рабочих карт [142] и возможные неточности при издании могут привести к тому, что малая река окажется на границе района или пересеченная границей. В этом случае, если отсутствует резкая смена гидрогеологических условий, что можно установить по гидрогеологическим материалам, искомый бассейн должен быть отнесен к району, в котором находится река, принимающая изучаемую реку.

Влияние площади бассейна на величину низкого стока сказывается не только в равнинных, но и в возвышенных и горных районах, если последние имеют относительно сглаженные обледененные формы рельефа (Карпаты, Урал, Забайкалье и др.). Поэтому в таких районах влияние площади бассейна как фактора, суммирующего влияние различных физико-географических характеристик на формирование низкого стока, будет не меньшим, чем влияние средней высоты водосбора. Конечно, площадь бассейна не является единственной характеристикой, позволяющей с абсолютной достоверностью судить о величине той или иной характеристики низкого стока рек любого района. Но тем

Таблица 22

Значения параметров a , n , f в уравнении (19)

Район	Зимний период			Летне-осенний период		
	a	n	f	a	n	f
1	1,85	1,08	0	7,60	1,03	0
2	1,20	1,05	0	0,70	1,24	0
3	0,75	1,14	50	0,48	1,22	0
4	0,18	1,20	0	1,28	1,24	0
5	0,60	1,07	0	0,37	1,14	0
6	0,13	1,02	—1000	1,20	1,17	0
7	0,82	1,14	0	9,75	1,05	0
8	0,10	1,40	80	22,5	0,97	0
9	0,10	1,30	0	0,68	1,19	0
10	0,20	1,29	0	1,05	1,17	0
11	0,26	1,34	0	0,59	1,11	0
12	1,80	1,08	120	0,49	1,20	0
13	0,34	1,26	0	0,15	1,24	0
14	1,35	1,00	0	2,32	1,08	0
15	2,40	0,98	0	0,09	1,45	0
16	0,53	1,09	0	0,08	1,55	0
17	1,58	1,07	0	0,60	1,00	100
18	0,29	1,08	0	0,04	1,54	0
19	0,91	1,08	0	0,10	1,32	0
20	0,11	1,25	0	0,08	1,24	0
21	0,07	1,40	0	0,56	1,00	0
22	0,76	1,11	0	0,009	1,89	0
23	1,95	1,00	—40	0,06	1,39	0
24	0,50	1,03	0	0,0007	1,78	0
25	0,52	1,13	0	0,02	1,44	0
26	0,10	1,25	0	52,0	0,57	0
27	0,04	1,30	0	0,18	1,24	0
28	0,02	1,28	0	1,80	1,00	0
29	0,09	1,30	0	0,40	1,11	0
30	0,05	1,20	0	0,14	1,18	0
31	0,32	1,32	50	0,48	1,04	0
32	1,26	1,13	0	0,01	1,54	0
33	0,11	1,25	0	0,12	1,26	0
34	0,10	1,37	25	0,40	1,08	0
35	1,26	1,05	0	0,45	1,22	0
36	0,34	1,18	0	0,75	1,10	0
37	0,40	1,20	0	0,22	1,00	0
38	0,13	1,27	0	0,18	1,27	0
39	0,54	1,05	0	0,51	0,93	0
40	0,66	1,26	50	1,50	0,77	—800
41	3,00	0,92	0	0,10	1,21	—60
42	0,60	1,20	0	5,25	0,81	0
43	0,11	1,28	0	0,47	0,84	0
44	0,31	1,18	0	0,35	0,83	—400
45	6,60	0,78	—20	0,25	1,08	0
46	3,00	0,71	30	0,19	1,27	0
47	0,21	1,17	0	0,31	1,12	—200
48	0,30	1,06	0	0,02	1,49	0
49	0,17	1,06	0	0,003	1,28	—100
50	1,80	0,91	0	5,30	0,80	0

Район	Зимний период			Летне-осенний период		
	<i>a</i>	<i>n</i>	<i>f</i>	<i>a</i>	<i>n</i>	<i>f</i>
51	0,02	1,30	0	2,90	0,84	0
52	0,20	0,96	—400	0,32	1,14	0
53	0,20	1,11	0	10,7	0,61	—100
54	0,58	0,89	0	0,01	1,33	—50
55	4,35	0,82	0	0,017	1,40	0
56	0,52	0,98	0	0,06	1,15	—80
57	0,08	1,44	0	0,20	1,06	0
58	0,86	1,00	0	0,017	1,27	0
59	0,08	1,26	60	0,23	1,24	0
60	4,40	0,54	—140	0,04	1,38	0
61	1,00	0,78	0	0,67	1,02	0
62	0,20	0,86	0	0,64	1,15	0
63	0,34	1,12	0	2,38	1,05	0
64	0,33	1,08	0	2,80	1,12	0
65	0,90	1,09	0	0,93	1,12	0
66	0,032	1,38	0	0,02	1,23	0
67	0,41	1,02	0	0,26	0,90	0
68	0,30	1,00	—100	0,24	0,85	—950
69	0,06	1,48	0	0,07	1,10	—80
70	1,42	1,16	20	0,82	0,84	0
71	9,74	0,94	0	0,04	1,09	0
72	0,47	1,21	0	0,03	1,06	—500
73	0,10	1,34	0	0,002	1,12	—500
74	0,25	1,12	0	0,09	1,05	—200
75	2,82	0,72	0	0,0001	1,93	—200
76	0,32	0,91	—50	0,02	1,10	—1000
77	1,36	0,55	—150	0,17	0,90	—150
78	0,034	1,20	0	0,28	0,94	0
79	0,044	1,17	0	3,15	1,04	0

не менее она позволяет просто и с достаточной в большинстве случаев надежностью определять величину низкого стока неизученной реки.

Произведенное районирование территории СССР по условиям формирования минимального 30-дневного стока и зависимости его от площади бассейна позволяет осуществлять гидрологические расчеты для неизученных малых рек, опираясь только на морфометрические данные, а именно на величину площади бассейна реки до рассматриваемого створа. Этот метод расчета дает возможность получать необходимые величины низкого стока, не производя полевых работ и с минимальной затратой средств и времени. Конечно, он еще не настолько совершенен, чтобы полностью исключить потребность в проведении полевых работ при проектировании ответственных сооружений, поскольку любой расчетный метод, основанный на учете одного-двух, даже основных параметров (особенно для обширных территорий с весьма различными физико-географическими условиями), не может являться совершенно надежным для любых

условий. Но этот метод разрешает иметь предварительные суждения, часто с вполне достаточной точностью и надежностью, о возможных величинах забора воды из водотоков в маловодный период, которые могут быть уточнены полевыми исследованиями. Используя вышеизложенный метод расчета, можно получить значительную экономию средств вследствие более точного определения расчетных характеристик для проектирования.

Расчетный минимальный 30-дневный расход воды малых рек в диапазоне обеспеченностей 75—97% устанавливается аналогично определению этой характеристики для средних рек с использованием тех же переходных коэффициентов (табл. 20), поскольку разницы в величинах коэффициентов практически не наблюдается. Это связано с тем, что интенсивность изменения минимального стока в рассматриваемом диапазоне обеспеченностей весьма схожа для малых и средних рек, имеющих постоянное подземное питание, поскольку оно наиболее устойчиво во времени. Некоторое различие величин коэффициента отмечается для малых рек с эпизодическим отсутствием стока, так как интенсивность его истощения для них выше, чем для средних рек. Но эта разница обычно находится в пределах принятой точности расчета. При необходимости повышения точности расчета целесообразно произвести дополнительные исследования величины переходного коэффициента по конкретным речным бассейнам.

Разработанный автором метод расчета минимального стока правомерно использовать при расчетах меженного и лимитирующего стока малых рек, поскольку они в целом, особенно в годы малой водности, соответствующие расчетной обеспеченности, являются генетически однородными. Это подтверждается практическими построениями, произведенными автором для рек ЕТС. Применительно к районам, выделенным для определения минимального 30-дневного стока, были построены графики связи расходов воды лимитирующего сезона с площадью бассейна реки для среднего по водности года и года (сезона) 75%-ной обеспеченности. Пример такой связи показан на рис. 49. Связь лимитирующего расхода воды с площадью бассейна столь же тесная, как и минимального 30-дневного расхода воды.

Естественно, что расчетные коэффициенты в формулах (17), (19) будут различными для меженного и лимитирующего стока. При их определении для стока лимитирующего сезона и зимней межени используются районы, установленные для зимнего периода, а для стока маловодного сезона и летней межени — районы, выделенные в летне-осенний период. Правда, в отношении меженного стока целесообразнее использовать графики его связи с минимальным и лимитирующим стоком, как это указано выше для средних рек.

Минимальный суточный сток малых рек определяется по связи с минимальным 30-дневным. В целом по территории СССР

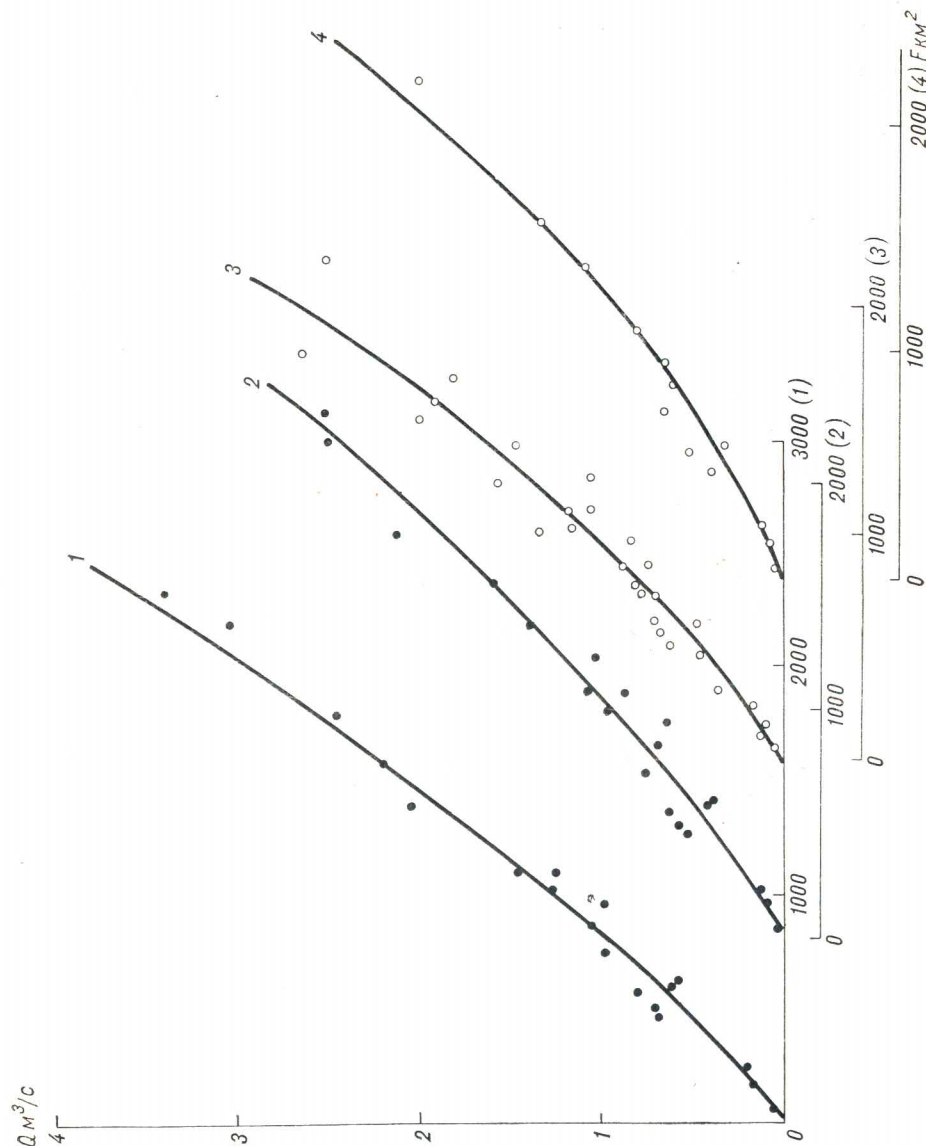


Рис. 49. Зависимость минимальных 30-дневных и за лимитирующий сезон расходов воды от площади бассейна реки для района 9 (см. рис. 47). 1, 2 — соответственно среднемноголетний и 75%-ной обеспеченности расходы воды за лимитирующий сезон; 3, 4 — среднемноголетний и 80%-ной обеспеченности минимальные расходы воды.

для его расчета используются те же переходные коэффициенты, что и для средних рек (табл. 21). Правда, для эпизодически пересыхающих или замерзающих малых рек могут быть заметные отличия в величине переходного коэффициента. Так, Комлев показал, что для Западной Сибири [90] существует некоторая зависимость величины переходного коэффициента от площади бассейна реки в зимний период, в основном для рек с площадью бассейна до 500—1000 км². Например, в бассейнах рек Томи и Чулыма величина переходного коэффициента для рек с площадью бассейна свыше 500 км² составляет 0,8—0,9, а для рек с меньшей площадью 0,4—0,9. При этом наименьшие значения коэффициента отмечаются для эпизодически замерзающих рек.

При построении графиков связи минимальных 30-дневных и суточных расходов воды может наблюдаться значительное рассеяние точек вследствие различий в продолжительности отсутствия стока в 30-дневный период (при эпизодическом пересыхании рек). Поэтому такие построения целесообразно производить для локальных однородных районов.

Определение минимального суточного стока расчетной обеспеченности производится таким же образом, как и для средних рек, по тем же переходным коэффициентам (табл. 20), поскольку тенденция изменения суточного стока обычно соответствует изменению 30-дневного стока в рассматриваемом диапазоне обеспеченностей.

5.4. ОЦЕНКА НИЗКОГО СТОКА ГОРНЫХ РЕК

В горных районах, особенно на территории Кавказа и Средней Азии, большое значение для формирования речного стока имеет высотное положение водосбора реки. О роли высоты водосбора как фактора низкого стока указывалось в главе 2. Применительно к меженному и тем более минимальному стоку не меньшее значение имеют гидрогеологические условия территории и характер подстилающей поверхности, интегральным показателем которых является площадь бассейна. Поэтому для большинства возвышенных и горных районов существует достаточно тесная связь характеристик низкого стока с площадью бассейна. Однако имеются районы, в которых превалирующее влияние на величину стока оказывает высота водосбора.

Зависимость увлажненности водосбора от его высотного положения (при прочих равных условиях) обуславливает необходимость учета при производстве территориальных обобщений высоты водосбора не только в случае графических построений, но и при построении карт изолиний стока.

При разработке региональных методов расчета минимального стока горных рек довольно широкое применение находят связь величины стока со средней высотой водосбора для

районов, имеющих сходные гидрогеологические и климатические условия, одинаковую экспозицию по отношению к влагоносным ветрам и однотипное внутригодовое распределение величины осадков. Работы подобного плана выполнены для Кавказа [31, 47], горных районов Средней Азии [170], Урала [30, 122], Алтая [90], Забайкалья [125].

Карты изолиний низкого стока рек для горных территорий позволяют получить общерегиональные представления о величине и общих закономерностях распределения низкого стока. Это имеет немаловажное значение, например, при составлении схем комплексного использования водных ресурсов. Построение таких карт осложняется необходимостью подробного учета рельефа и высотного положения водосбора. В связи с этим большое значение имеет масштаб карт, который должен выбираться исходя из гидрологической изученности территории, необходимой точности исследований и степени изменения по территории изучаемой характеристики. Для районов Кавказа и Средней Азии, учитывая их гидрологическую изученность (250 пунктов для первой и 260 пунктов для второй с периодом наблюдения 10 лет и более), точность исходных данных (в пределах 15%) и значительный диапазон изменения величины низкого стока (до 30—50 л/(с·км²)) по территории, целесообразно использовать для построения карт изолиний бланки масштаба 1:2 500 000 и более. Фактическая величина стока относится к средневзвешенной высоте водосбора (или к центру бассейна при мелкомасштабном картировании). Изолинии проводятся в соответствии с рельефом местности и гипсометрией с учетом зависимости модуля низкого стока от высоты местности. При этом осуществляется необходимая генерализация изолиний стока, т. е. их конфигурация лишь в общем соответствует положению изогипс. Шаг изолиний зависит от диапазона изменения модуля низкого стока и расстояния между изолиниями стока.

В высокогорных и среднегорных районах обычно трудно выявить влияние площади бассейна на величину стока вследствие большого изменения высот местности. Реки с небольшой площадью бассейна находятся, как правило, в высокогорной зоне, средние реки там практически отсутствуют. По мере роста площади бассейна реки изменяются и климатические условия на водосборе вследствие проявления закона вертикальной зональности. Поэтому последнее оказывает определяющее влияние на величину низкого стока. Однако по мере снижения высоты водосбора роль площади бассейна возрастает.

При построении карт изолиний низкого стока не учитываются данные о стоке больших рек (Кубань, Терек, Амударья и т. п.), поскольку формирование стока таких рек происходит в резко различных климатических условиях. Не учитывается сток карстовых и озерных рек, а также рек, находящихся под существенным влиянием хозяйственной деятельности человека.

Например, минимальный сток рек бассейна Аракса значительно искажен в летне-осенний сезон в результате забора воды на орошение. Подобная картина наблюдается в Ферганской долине и других местах. Следует отметить, что в южных горных районах наибольшее искажение низкого стока отмечается в летний сезон вследствие интенсивного потребления речных вод для сельскохозяйственных нужд, поэтому возникают значительные трудности при его обобщении.

На реках Черноморского побережья Кавказа в зимний период наблюдаются частые дождевые паводки или волны паводков. Это не позволяет выделить меженные периоды на таких реках, за исключением маловодных лет. Подобное отмечается и в ряде горных районов Средней Азии, где реки питаются водами ледников, создающих паводочную волну в течение всего теплого сезона. Поэтому для таких районов построение карт изолиний низкого стока в зимний или летний сезон не производится.

Интерполяция величин стока осуществляется обычно лишь в пределах отдельных горных систем или склонов, особенно в высокогорных районах, поскольку условия формирования стока на разных склонах одного и того же хребта могут значительно различаться и вследствие этого изолинии в приводораздельных частях не замыкаются. Так, Главный Кавказский хребет является естественным водоразделом между реками Северного Кавказа и Закавказья. Величины низкого стока на реках противоположных склонов хребта, как и общая увлажненность этих территорий, различаются весьма существенно, поэтому изолинии стока в высокогорной части хребта не замыкаются. Наиболее сложная конфигурация изолиний с частыми разрывами будет в районах со сложной орографией местности и резкими перепадами высот, наличием разобщенных хребтов, имеющих, к тому же, различную ориентацию. Примером этого является горная система Памира и Тянь-Шаня.

Для территории Кавказа автором составлены карты минимального 30-дневного стока 80%-ной обеспеченности для зимнего и летне-осеннего периодов. Для горных районов Средней Азии подобные карты составлены А. З. Амусья [7]. Они вошли составной частью в общесоюзные карты минимального стока (рис. 38 и 39). Для слабоизученных районов изолинии проведены ориентировочно. В целом расхождение между фактическими данными и величинами, снятыми с карт изолиний для различных участков территории, составляет 20—40%. Меньшая точность соответствует слабоизученным районам. Карты могут быть использованы для приближенной оценки минимального 30-дневного стока расчетной обеспеченности, особенно в пределах районов, где недостаток данных не позволяет использовать другие расчетные способы.

Минимальный 30-дневный сток в диапазоне обеспеченностей 75—97% устанавливается по переходным коэффициентам от

стока 80%-ной обеспеченности, определяемого по картам изолиний или по районным кривым зависимости расчетной величины от высоты водосбора. Так, для горной части Средней Азии Амусья выделила 22 района с различным типом зависимости модуля минимального 30-дневного стока 80%-ной обеспеченности от средней высоты водосбора [7].

В один район объединялись участки территории с относительно однородными климатическими и гидрогеологическими условиями формирования минимального стока и однотипностью зависимости указанных характеристик. Как правило, районы рас-

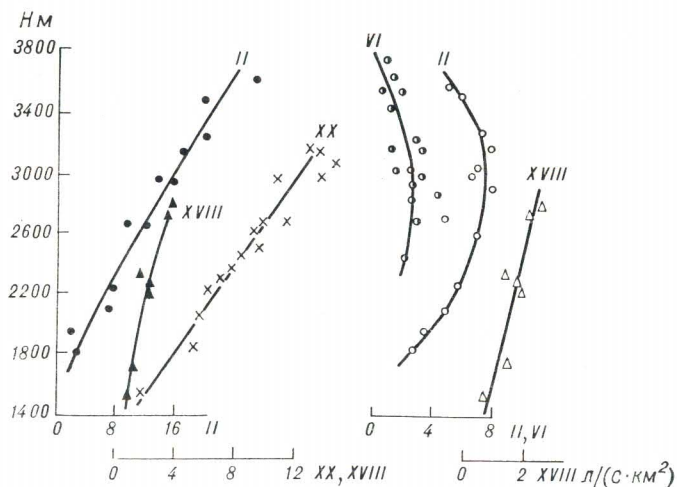


Рис. 50. Зависимость величины 30-дневного минимального стока 80%-ной обеспеченности от средней высоты водосбора в теплый (районы II, XX, XVIII) и холодный (районы II, VI, XVIII) периоды для некоторых горных районов Средней Азии.

полагались в пределах отдельных горных систем или склонов одной ориентации. Границы районов проводились по водоразделам рек, нередко совпадающим с гребнями горных хребтов, по границам резкой смены гидрогеологических комплексов или большим рекам. Отсутствие необходимого фактического материала не позволило выделить районы в Восточном Памире, бассейне р. Тарим, Чу-Илийских горах и на южном склоне Алайского хребта. Выделенные районы являются общими для зимнего и летне-осеннего сезонов, поскольку в формировании минимального стока в оба сезона участвуют практически одни и те же водоносные горизонты. Районы показаны на рис. 47, а примеры графических зависимостей величины модуля минимального 30-дневного стока от средней высоты водосбора — на рис. 50.

Для большинства районов отклонение эмпирических точек от средней линии связи не превышает в среднем 15% при максимальном отклонении отдельных точек до 60—70%. Следовательно, графики связи вполне могут использоваться для расчета минимального стока неизученных рек данного района. Правда, кривые связи нередко имеют весьма сложный вид, поэтому их выражение в математической форме очень сложно. Для облегчения практических расчетов целесообразно составить интерполяционную таблицу, отражающую изменение величины модуля минимального стока с ростом высоты водосбора в данном районе. Такую таблицу для горной территории Средней Азии составила Амусья (часть этой таблицы показана в табл. 23)

Таблица 23

Модули минимального 30-дневного стока (л/(с·км²)) 80%-ной обеспеченности в зависимости от средней высоты водосбора для горной территории Средней Азии

Район	Средняя высота водосбора, м	Зимний сезон	Летне-осенний сезон	Район	Средняя высота водосбора, м	Зимний сезон	Летне-осенний сезон
I	1000	0,40	0,20	V	3000	2,30	3,80
	1400	1,30	1,20		3200	2,40	5,00
	1800	2,20	2,90		3400	2,10	6,80
	2200	3,10	5,00		3600	1,60	9,40
	2600	4,00	7,60	VI	2200	0,90	1,40
II	3000	5,00	11,8		2400	1,00	2,10
	1800	2,60	2,00		2600	1,40	3,40
	2200	4,50	6,40		3000	2,60	7,40
	2600	6,60	10,4		3300	4,50	10,7
III	2800	7,10	12,6	VII	2400	2,40	3,60
	3100	7,50	16,2		2800	3,10	4,30
	3200	7,40	17,5		3000	3,20	4,90
	3400	6,60	20,1		3400	2,40	6,10
	3600	5,00	20,8	VIII	3800	0,80	7,70
IV	2200	1,20	2,30		1900	4,30	6,60
	2400	2,10	3,80		2400	4,30	6,60
	2600	2,90	5,00		2800	4,10	7,50
	2800	3,60	6,90		2400	1,50	2,00
	3000	4,00	8,60	IX	2800	2,00	3,30
	3200	4,40	10,4		1600	2,60	1,30
	3400	4,40	12,8		1800	2,70	1,90
	3600	4,10	15,6		2200	2,85	2,80
	2600	1,10	2,00		2800	3,10	3,40
	2800	1,90	2,80				

При построении графиков связи не учитывались данные о стоке рек с площадью бассейна менее 100 км², которые наиболее сильно подвержены влиянию сугубо местных факторов, нередко значительно изменяющих величину стока по сравнению с ее районными значениями. Не принимались во внимание и

данные о минимальном стоке транзитных рек, формирующих свой сток в пределах нескольких районов (реки Вахш, Сурхандарья, Бартанг и др). Неприменимы указанные зависимости при расчете минимального стока эпизодически пересыхающих или перемерзающих рек, а также рек, находящихся под существенным влиянием хозяйственной деятельности (например, в результате забора воды на орошение). Точность расчетов снижается в районах, имеющих пестрые гидрогеологические условия и недостаточно схожую экспозицию склонов по отношению к влагоносным ветрам или недостаточное количество пунктов наблюдения за стоком, не позволяющее произвести дополнительную детализацию территории по условиям формирования минимального стока. Так, район VI имеет сложные гидрогеологические условия, обусловленные наличием множества высокогорных впадин и горных хребтов при различной степени увлажненности отдельных участков территории. Поэтому разброс точек на графике связи для этого района довольно значительный.

Характер изменения величины минимального стока с ростом высоты водосбора неоднозначен не только по сезонам года, но и внутри сезона. В летне-осенний сезон величина минимального стока обычно возрастает с увеличением высоты водосбора, в зависимости от района меняется лишь интенсивность этого роста. В зимний сезон отмечается наибольшее разнообразие в характере этой зависимости. Так, модуль минимального 30-дневного стока 80%-ной обеспеченности в зимний сезон для большей части территории горных районов Средней Азии возрастает до высот 3000—3200 м. Правда, интенсивность этого роста значительно меньше, чем в летне-осенний сезон. При дальнейшем увеличении высоты условия питания рек ухудшаются вследствие увеличения длительности холодного периода и уменьшения мощности водоносной трещиноватой зоны. Это обуславливает уменьшение величины минимального стока с ростом высоты водосбора. Для Памира, имеющего наибольшие высоты местности (3400—3500 м), характерно общее уменьшение модуля минимального стока с увеличением высоты. Своеобразие гидрогеологических условий может обусловить обратное соотношение между модулем стока и высотой и при меньших высотах территории. Так, районы VII и XVII сложены в основном карбонатными отложениями, а явления карста развиты преимущественно в нижних частях водосборов, поэтому в этих районах отмечается уменьшение минимального стока с увеличением высоты водосбора, хотя отметки высот в этих районах составляют лишь 2000—2500 м.

Градиент изменения расчетных величин минимального стока различен как по сезонам года, так и по районам. В теплый сезон он достигает 1,5—2,0 л/(с·км²) на 100 м высоты для отдельных районов, а в холодный сезон не превышает 0,5—

0,6 л/(с·км²). Наименьшую величину градиент имеет на высотах более 4000 м (район XXII) — менее 0,1 л/(с·км²) на 100 м. Изменение градиента стока связано с возрастанием увлажненности и уменьшением испарения с ростом высоты водосбора.

Определение расчетных величин минимального стока в диапазоне обеспеченностей 75—97% производится по переходным коэффициентам аналогично порядку определения стока равнинных рек. Колебания переходных коэффициентов по территории Кавказа и Средней Азии для обеспеченностей 75, 85, 90% находятся в пределах 10% и могут быть приняты едиными для всех районов. При этом различие по сезонам практически не проявляется. Значения коэффициента в среднем составляют соответственно 1,05, 0,95 и 0,87. Для расходов воды 95—97%-ной обеспеченности отмечается существенное различие величин переходных коэффициентов для Колхидской низменности в зимний сезон и северо-западной части Черноморского побережья Большого Кавказа в летне-осенний по сравнению с остальной территорией. На основной территории Кавказа и горной части Средней Азии средняя величина этого коэффициента равна соответственно 0,80 и 0,75 при крайних значениях 0,73—0,88 и 0,68—0,82. Таким образом, значения переходных коэффициентов практически совпадают для горных и равнинных рек (см. табл. 20). Для рек Колхидской низменности эти коэффициенты равны 0,54 и 0,45, а для рек северо-западной части Черноморского побережья — 0,40 и 0,30. Это связано с тем, что истощение стока на реках указанных районов происходит весьма интенсивно. В маловодные годы величина минимального стока на реках намного меньше, чем в средние по водности годы, и поэтому кривая обеспеченности имеет большой наклон в нижней части, особенно в зоне обеспеченностей 95% и более. Это же обуславливает некоторое отличие переходного коэффициента для 90%-ной обеспеченности, который равен в среднем 0,68 против 0,87 для рек основной территории.

Минимальный суточный сток горных рек, так же как и равнинных, устанавливается по связи с минимальным 30-дневным стоком. Так, между минимальными суточными расходами воды 80%-ной обеспеченности и 30-дневными расходами той же обеспеченности для рек Кавказа и Средней Азии существует весьма тесная связь прямолинейного вида. Линия связи обычно проходит через начало координат. Наименьший разброс точек от средней линии характерен для районов с длительным и устойчивым меженным периодом. В районах с преимущественно прерывистой меженью, а также в случаях, когда минимальные суточные расходы воды по времени не совпадают с меженным периодом, наблюдаясь весной или осенью (особенно в высокогорной зоне в теплый период), связь между указанными характеристиками низкого стока становится менее тесной. Однако для

большинства районов рассеяние точек на графиках связи не превышает 10—20%.

Величина коэффициента связи, или переходного коэффициента от 30-дневных значений минимального стока 80%-ной обеспеченности к суточным расходам воды той же обеспеченности, является довольно устойчивой по территории и в среднем равна для Кавказа 0,80, а для Средней Азии 0,83 в зимний и летне-осенний сезоны. Изменение этого коэффициента по территории происходит в пределах 5—10%. Так, для рек Средней Азии его величина колеблется от 0,74 до 0,88 в зимний сезон. Правда, на реках Ленкоранской низменности (Кавказ) в зимний период наблюдаются частые дождевые паводки, повышающие минимальный 30-дневный сток, при глубоком истощении стока в межпаводочные периоды. Это создает большую разницу между суточным и 30-дневным минимальным стоком и обуславливает значительно меньшую величину переходного коэффициента — 0,65. Подобные же районы имеются на территории Средней Азии в летне-осенний сезон, где в формировании минимального 30-дневного стока определенное участие принимают талые воды ледников (высокогорные районы). Величина переходного коэффициента для рек этих районов равна 0,67—0,68, т. е. практически такая же, как и для рек Ленкоранской низменности.

Минимальный суточный сток расчетной обеспеченности устанавливается по тем же переходным коэффициентам λ , что и минимальный 30-дневный сток, поскольку интенсивность изменения этих величин на расчетном участке кривой обеспеченности практически одинакова.

Лимитирующий сток для горных рек определяется аналогично минимальному стоку по связи со средней высотой водосбора для районов, выделенных применительно к расчету минимального 30-дневного стока. На территории горной части Средней Азии к лимитирующему сезону чаще всего относится зимний период, хотя для некоторых районов им может оказаться и весенний период. На реках Восточного Кавказа и Закавказья лимитирующим может быть как зимний, так и летний сезон. Последний является лимитирующим на реках Черноморского побережья Кавказа.

Глава 6

ХАРАКТЕРИСТИКА КАЧЕСТВА РЕЧНОЙ ВОДЫ В МАЛОВОДНЫЙ ПЕРИОД

В последнее десятилетие все острее встает вопрос о качестве используемых или проектируемых для использования водных ресурсов, учете изменения химического состава вод во времени при различных условиях водного режима и влиянии хозяйственной деятельности человека.

Удовлетворение необходимых потребностей в воде осложняется не только в связи с постоянно возрастающим водопотреблением. В результате развития промышленности, сельского хозяйства, транспорта и градостроительства резко возрос сток отработанных загрязненных вод. В 1971 г. объем сточных вод, поступивших в водотоки и водоемы, достиг почти 100 км³. Наибольшая их часть приходится на Европейскую территорию СССР, где проживает три четверти населения страны. Однако ресурсы поверхностных вод этой территории составляют менее четверти всех ресурсов страны (около 1000 км³). Учитывая, что для разбавления сточных вод до предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ, устанавливаемых санитарными или рыбохозяйственными органами, требуется в среднем в 5—10 раз больше чистой воды, чем поступило загрязненной, можно вполне ясно представить всю важность проблемы оценки водных ресурсов данной территории с количественных и качественных позиций.

На IV Всесоюзном гидрологическом съезде в докладе А. А. Зенина и В. Р. Лозанского отмечалось, что к 1990 г. поступление сточных вод в водные объекты страны увеличится в три раза, причем основная часть этих вод будет попадать в реки южных районов СССР, имеющих большую плотность населения. Удовлетворение необходимых потребностей в воде осложняется не только в связи с уменьшением запасов пресных качественных вод, но и в результате неравномерного распределения водных ресурсов по территории и во времени. Наименее обеспечены водой южная часть Украины, Молдавия, Заволжье и Прикаспийская низменность, Казахстан, Туркмения и некоторые другие южные районы.

Многолетние и сезонные колебания стока обуславливают большую неравномерность распределения во времени его

величины и качественных показателей. На том же съезде в докладе С. К. Черкавского и А. А. Коноплянцев указывалось: «В маловодные периоды создаются наибольшие затруднения с удовлетворением потребностей водопользователей и именно в эти периоды наиболее проявляется необходимость управления водными ресурсами, т. е. регулирования стока рек, объемов водопотребления и водоотведения». И это вполне понятно, если учесть, что величина меженного, а тем более минимального стока в десятки и даже сотни раз меньше стока половодий и паводков. При этом продолжительность этих периодов, наблюдающихся на реках СССР в зимний и летне-осенний сезоны, может составлять 6—8 месяцев и более (см. главу 3).

Таким образом, неравномерность распределения запасов пресных вод по территории и во времени при длительном периоде низкого стока, лимитирующего водопотребление, наряду с увеличением объема сточных вод обуславливает необходимость комплексной разработки проблемы водообеспечения с учетом не только количества воды, но и ее качества.

Вопросы загрязнения природных вод входят составной частью в проблему охраны природы, взаимодействия человеческого общества и окружающей среды. Этой проблеме уделяется весьма большое внимание со стороны Коммунистической партии Советского Союза и Правительства СССР. В нашей стране во всех союзных республиках имеются законы об охране природы. Например, с 1960 г. существует «Закон об охране природы в РСФСР». За последние годы был принят ряд постановлений об охране вод бассейнов рек Волги и Урала, Каспийского моря, оз. Байкал. В 1970 г. принят закон «Об утверждении Основ водного законодательства Союза ССР и союзных республик». В них регламентируется использование природных вод, указывается, что государственный учет вод и их использование имеет своей задачей установление количества и качества вод, данных об использовании вод для нужд населения и народного хозяйства, и предусматривается ответственность за неправильную эксплуатацию, загрязнение и истощение природных вод. В 1972 г. Верховный Совет СССР признал одной из важнейших государственных задач неустанную заботу об охране природы и лучшем использовании природных ресурсов страны. На основании этого было принято специальное постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР «Об усилении охраны природы и улучшении использования природных ресурсов». В них, в частности, указано, что все министерства и ведомства Советского Союза, так или иначе связанные с вопросами водного хозяйства, «обязаны разработать мероприятия, обеспечивающие полное прекращение сброса в водоемы неочищенных или недостаточно очищенных и обезвреженных сточных вод».

Все вышеуказанное обусловило широкое развитие мер по предотвращению загрязнения и очищению природных вод.

На первый план в этих вопросах выступает научное изучение рек и водоемов нашей страны в отношении взаимосвязи количественных и качественных характеристик воды.

Следует отметить, что проблема водообеспечения существует во всех высокоразвитых странах. Поэтому во многих из них организованы специальные комиссии, занимающиеся вопросами водных ресурсов, и приняты соответствующие законы. Так, во Франции в 1959 г. учреждена Комиссия по вопросам воды, в Англии с 1963 г. функционирует Совет по водным ресурсам, в Польше организовано Центральное ведомство водного хозяйства, в ГДР имеется Ведомство водного хозяйства, а в 1963 г. принят Водный закон. В США с 1948 г. существует закон об охране вод, который дополнялся и конкретизировался в 1961, 1965 и 1966 гг.

Наиболее действенные меры по охране природных вод принимаются в нашей стране, а также в других социалистических странах. В СССР запрещен ввод в действие новых промышленных объектов до завершения строительства очистных сооружений. Еще на XXIV съезде КПСС указывалось: «Принимая меры для ускорения научно-технического прогресса необходимо сделать все, чтобы он сочетался с хозяйским отношением к природным ресурсам, не служил источником опасного загрязнения воздуха и воды, истощения земли».

Рациональное использование воды рек и озер является основным направлением решения проблемы водообеспечения промышленности и сельского хозяйства. Поэтому необходимо разработать расчетные методы, позволяющие определять как количество воды в данном водном объекте, так и ее качество, особенно при отсутствии необходимой информации. Естественно, что эта проблема чрезвычайно сложна и в полном объеме может быть решена лишь большим коллективом исследователей различных направлений. Количественная оценка водных ресурсов осуществляется методами гидрологических расчетов, изложенными применительно к низкому стоку в главах 4 и 5. Вопросы качества воды рассматриваются обычно с гидрохимических и гидробиологических позиций с учетом гидродинамических аспектов водных объектов и требований к качеству воды, предъявляемых службой санитарии и гигиены, рыбоохраны и др. До последнего времени их связь в вопросах изучения качества воды с учетом ее количества была весьма недостаточной, особенно в отношении учета гидрологических факторов, хотя изучение качества воды и разработка практических рекомендаций по его оценке не может осуществляться без тесного взаимодействия гидрологии, гидрохимии, гидробиологии и гидродинамики. Качество воды — явление многофакторное и должно изучаться с различных позиций. При этом одним из важнейших факторов является водный режим рек, его изменения во времени и по территории и связанные с этим изменения химического состава поверхностных вод,

что в свою очередь влияет на биологический режим водотоков.

Оценка качества воды производится в основном в двух направлениях: определение естественного качества природных вод и установление качества воды рек, находящихся под влиянием хозяйственной деятельности человека. В первом случае необходимо иметь сведения о водном и химическом режиме рек, что осуществляется с помощью непосредственных измерений или по косвенным данным, во втором — требуются дополнительные данные о величине сточных вод и их составе. Немалое значение для качества воды имеет забор воды на хозяйственные нужды в больших объемах, вызывающий резкое снижение стока в реке, нарушающее установившийся гидрохимический и биологический режим вод.

Обширность и сложность вопроса при его слабой изученности не позволяют рассмотреть все аспекты проблемы качества воды, поэтому основное внимание будет обращено на связь гидрологического и гидрохимического режима рек в маловодный период, находящихся как в естественном, так и в нарушенном состоянии. Природное качество воды рек является тем фоном и основой, на которых происходят качественные изменения состояния водного объекта, вызванные вмешательством человека.

Водность рек в маловодный период лимитирует не только количество воды, возможное для использования в хозяйственных целях, но и ограничивает сброс в реки сточных вод, даже условно чистых, поскольку способности водотоков в отношении разбавления этих вод и самоочищения являются наименьшими в маловодный период. Поэтому при оценке разбавляющей способности реки за расчетный обычно принимается меженный расход воды 95%-ной обеспеченности [132] как характеризующий наихудшие условия для формирования качества воды.

Пригодность воды для удовлетворения нужд народного хозяйства устанавливается путем оценки ее химических, физических и биологических показателей. Из гидрохимических характеристик наиболее важными являются такие, как минерализация, ионный состав и количество органических веществ. Понятно, что эти показатели не всегда достаточны, поскольку требования к качеству воды определяются видом водопользования.

Наиболее строгие нормы качества воды предусмотрены при использовании рек для питьевого водоснабжения. Правда, в отдельных случаях в промышленности (химическая, целлюлозно-бумажная и др.) требуется вода, содержащая значительно меньшее количество примесей, чем это допускается для питьевой воды. Основное внимание при использовании воды для технологических нужд уделяется оценке жесткости и агрессивности воды как наиболее вредным ее свойствам, особенно при употреблении воды в паросиловых установках или при охлаждении промышленных установок. Требования к качеству воды, используемой в сельском хозяйстве и животноводстве, несколько

ниже, чем к питьевой воде, по таким показателям, как цветность, прозрачность, запах.

Общие требования к составу и свойствам воды в местах водопотребления и водопользования нормируют ее минерализацию, концентрацию посторонних примесей (взвешенные вещества), содержание растворенного кислорода и биохимическую потребность в нем (БПК), водородный показатель, цвет, запах, температуру, отсутствие возбудителей заболеваний и безвредность в отношении содержания ядовитых и радиоактивных веществ.

С гидрохимических позиций качество воды чаще всего оценивается по таким основным показателям, как ее минерализация, жесткость, агрессивность, наличие органических веществ, биогенных соединений и вредных примесей. О качестве воды можно судить и по гидробиологическим признакам: на основании данных о видовом составе гидробионтов с учетом количества присутствующих в воде органических и токсических веществ.

В результате загрязнения в природные воды добавляются минеральные и органические вещества, а также попадают различные живые микроорганизмы (биологическое и бактериальное загрязнение). Степень загрязнения природных вод характеризуется величиной концентрации, т. е. количеством загрязняющих веществ в единице объема воды (мг/л или г/м³). Величина концентрации непостоянна во времени и по территории. Она уменьшается с увеличением количества чистой воды в результате ее добавления при выпадении атмосферных осадков, таянии снега и льда или в процессе самоочищения воды. Последнее, правда, происходит лишь до тех пор, пока концентрация загрязняющих веществ не превысит физической возможности реки к самоочищению, которое наступает при неспособности реки осуществить разбавление сточных вод в необходимой мере. Особенно часто такое положение может возникнуть в период низкого стока на реках.

Наиболее тесно с водным режимом рек связаны гидрохимические показатели качества воды. Поэтому целесообразно рассмотреть эту сторону вопроса, не затрагивая физических и биологических аспектов проблемы качества воды.

Удовлетворение запросов питьевого водоснабжения является важнейшей задачей водопотребления, поскольку оно обеспечивает само существование общества. Пригодность воды для питья определяется количеством и составом растворенных в ней солей, органолептическими показателями и санитарными характеристиками. Условная оценка качества питьевой воды в зависимости от количества растворенных солей приводится в табл. 24. При минерализации свыше 4000 мг/л вода считается совершенно не пригодной для питья человеком, а при количестве растворенных солей свыше 6000 мг/л она не пригодна и для водопоя скота.

Таблица 24

Условная оценка качества питьевой воды

Оценка качества воды	Предельно допустимые нормы			
	минерализация, мг/л	общая жесткость мг-экв/л	перманганатная окисляемость, мгО/л	вредные примеси
Хорошая	600	3	10	Нет
Удовлетворительная	1000	9	20	Не превышают санитарных норм

Немаловажное значение имеет химический состав воды. Для питья может употребляться вода, имеющая большую минерализацию, если в ней преобладают ионы Cl^- и Na^+ , чем при преобладании ионов SO_4^{2-} и Na^+ или Mg^{2+} , вызывающих болезненные явления. Значительно ухудшает качество воды и высокое содержание железа.

Большую опасность представляет бактериологическое загрязнение воды, показателем которого является наличие в воде кишечных палочек, оцениваемое коли-титром. Чем выше его значение, тем лучше бактериологическое качество воды.

Повышенные значения окисляемости естественных вод при их малой цветности, а также наличие ионов Cl^- указывают на отрицательные качества воды и возможность ее загрязнения органическими веществами или продуктами жизнедеятельности животных организмов.

В целом качество воды для питья оценивается большим числом показателей, например к 70-м годам в США оно оценивалось 19 показателями, в ряде европейских стран — 21 показателем, а в Советском Союзе — 24 основными показателями. Кроме того, установлены значения предельно допустимых концентраций для вредных веществ (около 300). Таким образом, большое количество показателей, участвующих в оценке качества воды для питьевых нужд, и разнообразие величин норм их содержания не позволяют увязать по территории СССР количество и качество вод применительно к задаче обеспечения общества питьевой водой в форме, пригодной для непосредственной оценки качества воды естественных неизученных водотоков в различные фазы их водного режима с учетом влияния хозяйственной деятельности. Но если комплексную оценку качества воды по территории произвести чрезвычайно трудно, то по отдельным показателям это сделать вполне возможно.

Одним из основных показателей качества воды, важным для многих водопотребителей (коммунально-бытовое, промышленное, сельскохозяйственное и др.), является величина естественной минерализации воды. Она непосредственно связана с расходом воды в реке и зависит от водного режима водотока.

С уменьшением величины расхода воды наблюдается интенсивное увеличение ее минерализации, достигающее максимальных значений при наибольшем истощении речного стока, т. е. при его минимальных величинах. Эта закономерность уже давно подмечена [3, 50 и др.] и вполне объяснима, если учесть, что в многоводную фазу питание рек осуществляется поверхностными водами, а в маловодную преобладает подземное питание (см. главу 2). Чем больше длительность маловодного периода, особенно меженного, тем меньше величина расхода воды в реке и хуже условия для сохранения необходимого качества воды, особенно в период ледостава при затрудненном газообмене водной и воздушной сред.

Минерализация воды наиболее высокая в период питания рек из наиболее глубоких водоносных горизонтов и в бассейнах рек, сложенных легко растворимыми гидрокарбонатными породами. Поэтому, чем большую долю речного стока составляют воды глубоких водоносных горизонтов, тем выше его минерализация. При гидрохимических исследованиях обычно изучается изменение минерализации (суммы ионов) с увеличением расхода воды лишь по конкретным водным объектам. Однако в районах, имеющих однородное геологическое и гидрогеологическое строение и одинаковый водный режим, должна наблюдаться достаточно тесная зависимость по территории минерализации воды рек от расхода воды. Такие зависимости представляют наибольший интерес с точки зрения оценки величины минерализации неизученных рек по гидрологическим данным.

Следует отметить значительные трудности, возникающие при попытке обобщения по территории указанных зависимостей в связи с недостаточным количеством гидрохимических данных и их малой репрезентативностью. При гидрохимических расчетах еще совершенно недостаточно используются методы вероятностно-статистического анализа. В то время как количественная оценка стока производится по данным об ежедневных расходах воды, которые осредняются для соответствующего периода (месяц, сезон, год), количественная оценка химических ингредиентов осуществляется по результатам единичных проб, которые далеко не всегда показательны, поскольку временная изменчивость химических характеристик хотя и меньше стоковых, но все же весьма значительна. Например, в зимний меженьный период минерализация р. Чусовой у пгт Староуткинска в 1959—1963 г. составляла соответственно 357, 390, 322, 484 и 339 мг/л, т. е. разница между экстремальными величинами была равна 50%. На р. Косье у д. Останкино в 1958 и 1959 гг. минерализация воды зимой была 232 и 307 мг/л соответственно, т. е. тоже существенно различалась. Однако как характерная для этого створа в справочнике «Ресурсы поверхностных вод СССР» приводится величина 307 мг/л, хотя водность межени в этот год

была выше средней. Поэтому далеко не всегда представляется возможным оценить величину минерализации для особо маловодных лет, когда величина стока в два раза и более меньше среднего. Отсутствие соответствующих гидрохимических данных не позволяет производить необходимые исследования для стока различной обеспеченности, поскольку сведения о гидрохимическом режиме лишь за отдельные годы (средний, многоводный, маловодный) не отражают всего диапазона изменения водности рек, а следовательно, и гидрохимического режима как для данного водного объекта, так и по территории.

Следует учесть, что вероятность ошибки количественного определения ингредиентов химического состава вод высока, так как длительность гидрохимических наблюдений на водных объектах в целом весьма небольшая и значительно уступает продолжительности гидрологических наблюдений. Так, из 250 пунктов наблюдения за гидрохимическим режимом на средних реках ЕТС лишь 25 пунктов имеют период наблюдений 20 лет и более, а для половины пунктов продолжительность наблюдений составляет менее 10 лет. Поэтому вопросы оценки точности расчетных гидрохимических данных имеют весьма большое значение.

Наибольшие изменения химического состава речных вод, особенно в количественном выражении, происходят под влиянием поступления подземных вод в русла рек. Последние, как уже указывалось в главе 2, представляют основную, а часто и единственную составляющую речного стока в меженный период. В этот период на реках ЕТС величина минерализации вод изменяется в 15—20 раз с севера на юг. Наименьшие ее значения наблюдаются в зоне избыточного увлажнения, а наибольшие — в зоне недостаточного увлажнения. В этом же направлении увеличивается глубина залегания водоносных горизонтов, дренируемых реками, и величина эрозионного вреза их русел, повышается минерализация подземных вод. Представление о величине минерализации и ее распределении по территории СССР для среднего по водности года можно получить по карте на рис. 51. Карта составлена автором по данным о величине минерализации воды в лимитирующий сезон. При этом в полной мере использованы карты минерализации речных вод, составленные для ЕТС П. П. Воронковым и В. И. Зубаревой [16], а также материалы, приведенные в справочнике «Ресурсы поверхностных вод СССР» (Кавказ и Средняя Азия не рассматривались).

Принятая методика гидрохимических обобщений (по данным о местном стоке химических ингредиентов [50]) не позволяет осуществить необходимых построений для рек Восточной Сибири и Северо-Востока СССР, поскольку в зимний сезон, являющийся лимитирующим для этой территории, почти все малые и средние реки промерзают на длительный срок.

Согласно принятой оценке качества питьевой воды (табл. 24), по величине минерализации вода большей части рек СССР в маловодный период может быть отнесена к категории «хорошей». Изолиния 600 мг/л проходит по южным районам ЕТС и Западной Сибири (рис. 51, см. на вклейке в конце книги). Однако южнее этой изолинии происходит резкое увеличение минерализации воды и на небольшом расстоянии она быстро достигает 1000 мг/л и больше, и вода рек становится мало пригодной для питья. В отношении химического состава вод наблюдается подобная же картина. В зоне малой минерализации (до 600 мг/л) отмечается преобладание анионов HCO_3^- и катионов Ca^{2+} , а в зоне повышенной минерализации происходит смена анионов HCO_3^- на SO_4^{2-} и Cl^- , а катионов Ca^{2+} — на Na^+ и Mg^{2+} . Последние, правда, присутствуют в значительном количестве и в маломинерализованных водах севера.

Величина минерализации воды в лимитирующий сезон является тем пределом, которого могут достичь воды реки в наименее благоприятный для своего формирования период. Поэтому данные о химическом качестве воды в лимитирующий сезон, характеризующий период, когда питание рек осуществляется главным образом глубокими грунтовыми водами, позволяют производить предварительную оценку качества воды в другие сезоны, когда реки питаются не только подземными, но и поверхностными водами, по принципу учета снижения минерализации воды с увеличением поступления поверхностных вод. С этих позиций изучение гидрохимического режима рек в лимитирующий сезон (или в зависимости от территории в зимний или летне-осенний меженный период) представляет наибольший интерес.

Наличие достаточно тесной связи между величиной минерализации и содержанием главных ионов для рек, имеющих одинаковый химический состав воды, например преобладание гидрокарбонатных или сульфатных ионов, позволяет производить ориентировочные расчеты общей минерализации воды по известному содержанию одного из ионов, и наоборот. На рис. 52 (заимствованном из работы [137]) показан пример связи величины минерализации с основными ионами речных вод сульфатного характера для рек бассейна Верхней Волги.

Величина общей минерализации воды для данного неизученного речного бассейна может быть установлена по картам изолиний (для рек с площадью бассейна до 10 000—12 000 км²) или по районным графикам связи этой характеристики с величиной расхода воды в маловодный период. Последняя определяется способами, изложенными в главе 5.

Сведения о минерализации воды имеют большое значение при оценке пригодности речных вод для орошения сельскохозяйственных культур. Обычно вода считается пригодной

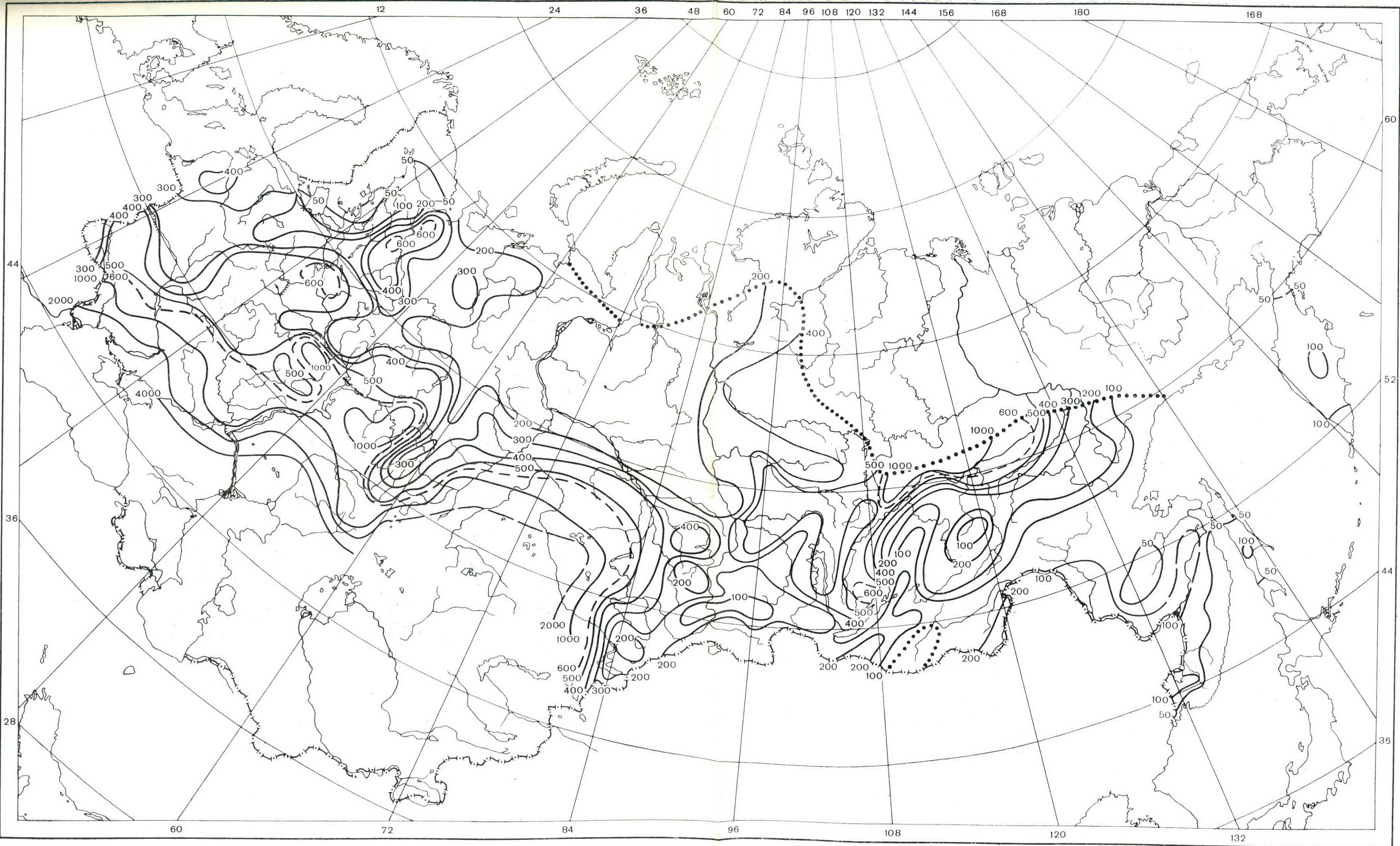


Рис. 51. Карта минерализации вод (мг/л) в лимитирующий сезон.

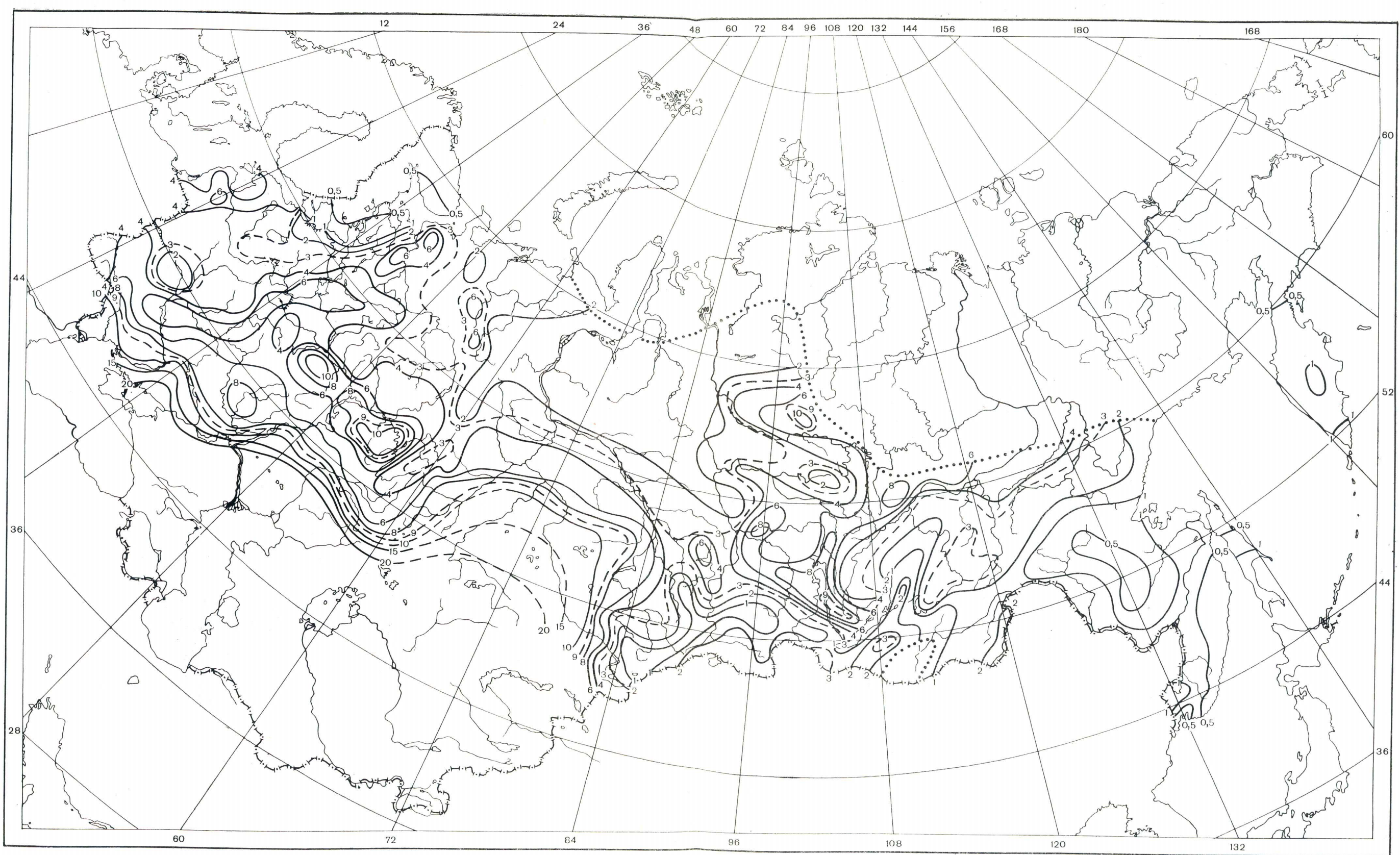


Рис. 53. Карта общей жесткости речных вод (мг-экв/л) в лимитирующий сезон.

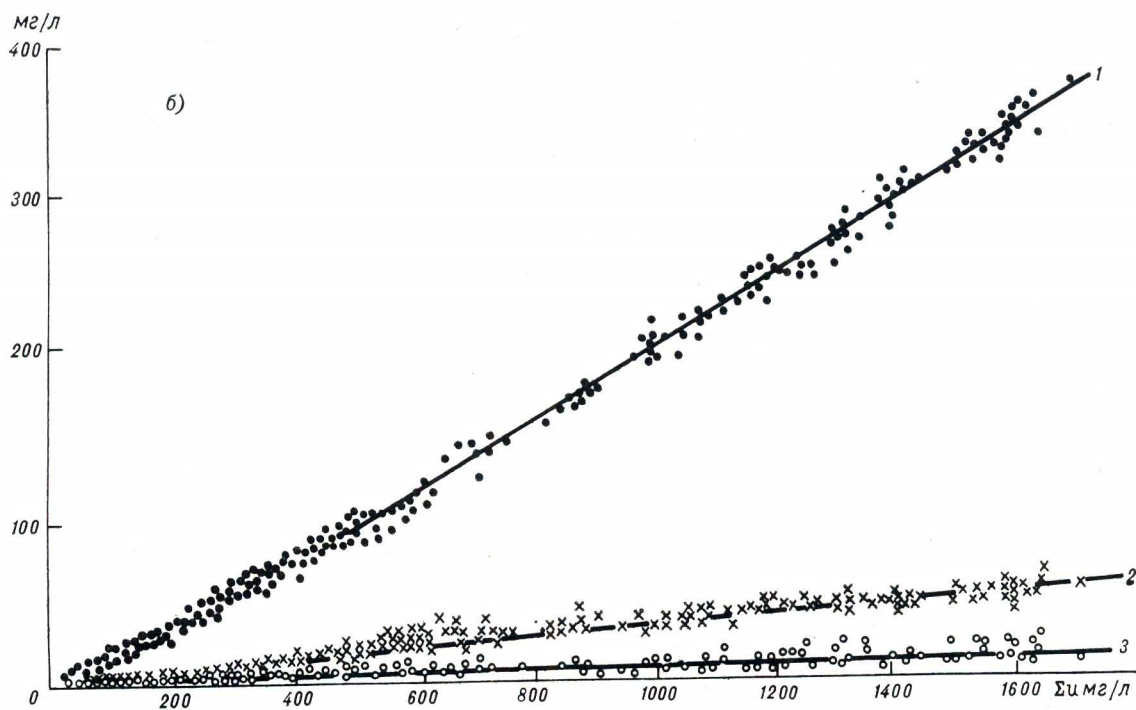
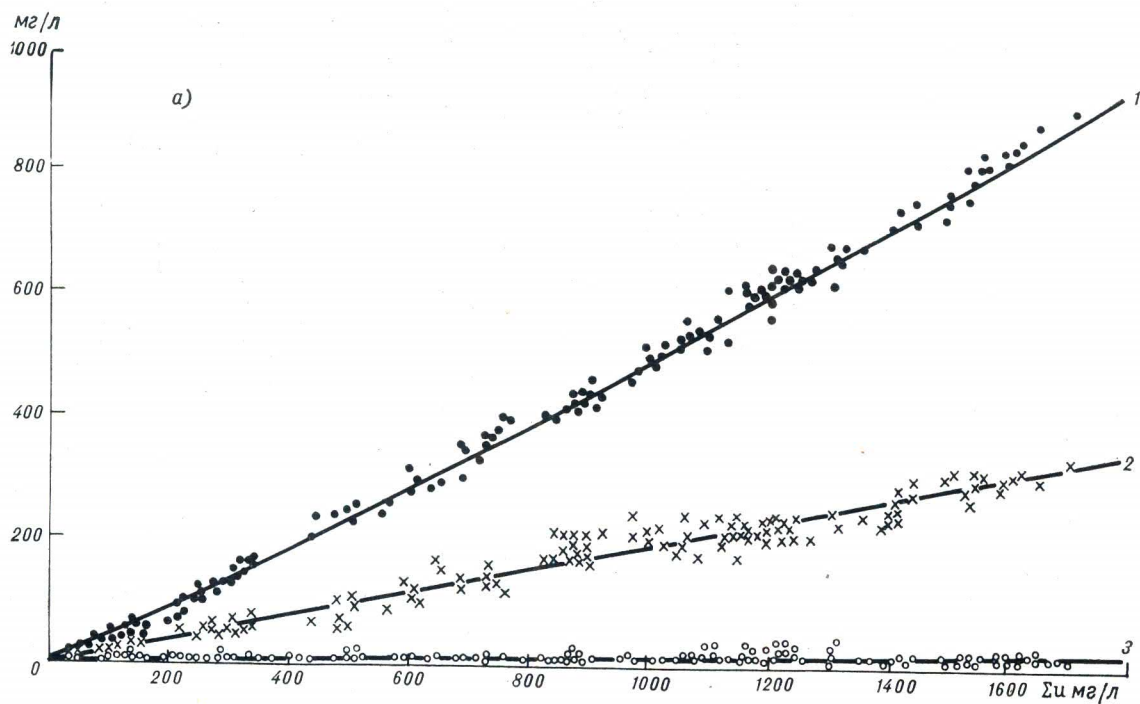


Рис. 52. Связь общей минерализации $\Sigma \text{и}$ и содержания основных анионов (а) и катионов (б) в речных сульфатных водах в бассейне Верхней Волги.

а) 1 — HCO_3^- , 2 — SO_4^{2-} , 3 — Cl^- ; б) 1 — Ca^{2+} , 2 — Mg^{2+} , 3 — $\text{Na}^+ + \text{K}^+$.

для орошения, если количество растворенных в ней солей не превышает 1000 мг/л. Следовательно, пригодность воды для питья и для орошения при оценке ее по величине минерализации территориально совпадает. Трудности с использованием речных вод для орошения возникают в меженный период в южной части зоны недостаточного увлажнения, хотя именно здесь они особенно необходимы. Высокая минерализация вод, наряду с их недостаточным количеством, обуславливает необходимость переброски сюда стока из других районов.

Образующиеся в результате орошения возвратные воды содержат повышенное количество солей, вымываемых из почвогрунтов при орошении, а также ядохимикаты. По исследованиям ГГИ, для некоторых оросительных систем минерализация коллекторно-дренажных вод, сбрасываемых с орошаемой территории в водотоки, превышает их естественную минерализацию в 5—10 раз. Поэтому в районах интенсивного орошения минерализация воды в реках постоянно повышается.

При использовании воды в промышленных и хозяйственно-бытовых целях, в том числе и для питья, большое значение имеет величина ее жесткости, измеряемая количеством Ca^{2+} и Mg^{2+} , выраженных в мг-экв/л. Общая жесткость складывается из устранимой (удаляемой кипячением) и постоянной. Последняя в свою очередь делится на остаточную и неустраняемую. Условно вода считается мягкой при величине жесткости до 3 мг-экв/л (а до 1,5 мг-экв/л очень мягкой), жесткой — до 9 мг-экв/л (от 3 до 6 мг-экв/л умеренно жесткой) и очень жесткой, мало пригодной для практического использования, при превышении 9 мг-экв/л. Помимо общей жесткости, определенное значение имеет устранимая и постоянная жесткость и их соотношение. Общая жесткость, как правило, повышается с ростом минерализации воды. Поэтому характер ее распределения по территории СССР в целом совпадает с распределением минерализации вод. На рис. 53 (см. на вклейке в конце книги) показана карта распределения общей жесткости воды в лимитирующий сезон, в основу которой положены исследования, выполненные П. П. Воронковым [16, 50] и материалы «Ресурсов поверхностных вод СССР». Карта составлена для среднего по водности года. Для Восточной Сибири и Северо-Востока СССР изолинии не наведены по тем же причинам, что и при обобщении данных о минерализации воды (рис. 51). Эта карта, как и карта минерализации, в значительной мере генерализована и может быть использована лишь для предварительной оценки величины общей жесткости воды.

Если по величине естественной минерализации вода рек на основной части территории СССР относится к категории «хорошей», то по общей жесткости этой категории удовлетворяют лишь реки северной части страны (исключая карстовые районы). На рис. 53 эта территория ограничена с юга изолинией

3 мг-экв/л. На большей части территории ЕТС и в обширных районах Западной и Восточной Сибири речные воды имеют умеренную жесткость.

Связь общей жесткости воды с ее минерализацией обычно весьма тесная и может быть использована для расчета. Пример такой связи для рек бассейна Верхней Волги приводится на рис. 54. Остаточная и неустраняемая жесткость, как правило, невелики, постоянны во времени и не изменяются с изменением минерализации.

Величина общей жесткости воды значительно уменьшается, когда питание рек осуществляется поверхностными водами. По-

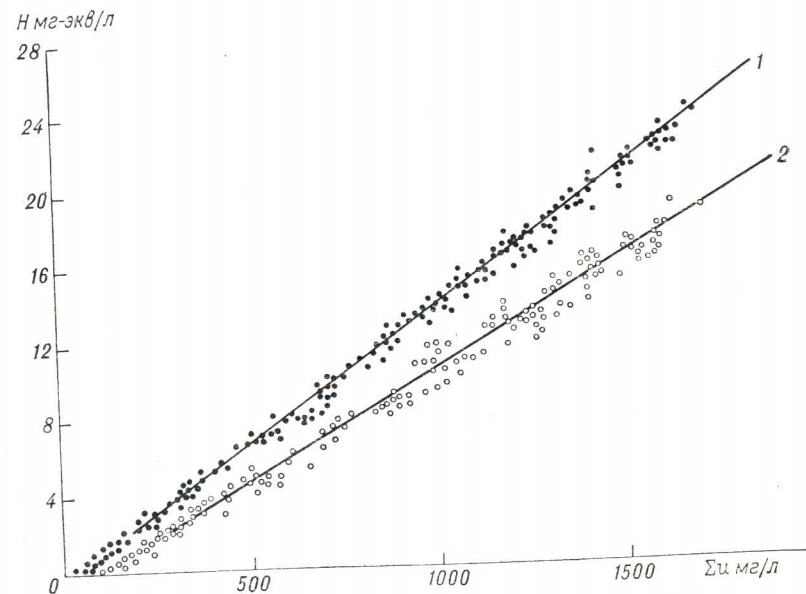


Рис. 54. Связь минерализации с общей (1) и постоянной (2) жесткостью речной воды.

этому в лимитирующий сезон (меженный период) жесткость рек является предельно возможной. В остальные сезоны года она значительно меньше (в период половодья в 3—4 раза и более).

Вода является прекрасным природным растворителем. При ее соприкосновении с гидротехническими сооружениями происходит растворение химических веществ, входящих в состав материалов, из которых эти сооружения сложены. При длительных воздействиях воды на сооружение может произойти интенсивное растворение слагающего его материала, например бетона, вплоть до разрушения сооружения. Такое свойство воды называют ее агрессивностью.

Степень агрессивности воды устанавливается для конкретных водотоков, исходя из ее химического состава и условий воздействия на сооружение (скорость течения, величина напора, мощность сооружения, площадь соприкосновения воды и сооружения, длительность этого соприкосновения и др.). В целом агрессивность воды в значительно меньшей мере проявляется в меженный период. Однако в зоне мягких вод она весьма значительна и должна учитываться в отношении применяемых строительных материалов, конструкции гидротехнического сооружения и характера его эксплуатации.

При инфильтрации поверхностных вод в почвенно-грунтовую толщу происходит уменьшение количества растворенных в них органических веществ, изменение цвета воды и ее окисляемости. Цветность воды зависит от количества вымываемых из почвы органических веществ гумусового происхождения и продуктов распада растительности (дубильные вещества).

Наименьшую цветность речные воды имеют в зимний меженный период (обычно меньше 25°). Уменьшается и количество легко окисляющегося органического вещества, характеризуемого перманганатной окисляемостью. На основной части территории СССР величина перманганатной окисляемости не превышает 10 мгО/л. Однако в районах с развитыми болотными водами (северная и северо-западная части ЕТС, Полесье, Западная Сибирь и др.) она весьма высокая. Анализ пространственного распределения перманганатной окисляемости и цветности воды рек ЕТС [16] в различные сезоны года показывает, что в бассейне р. Волхова и в Полесье значения перманганатной окисляемости практически остаются постоянными в зимнюю и летнюю межень, а в южной части Приволжской возвышенности в период летней межени она даже меньше. В среднем же перманганатная окисляемость в летний сезон выше, чем в зимний, на 3—5 мгО/л и имеет наибольшую величину (свыше 30 мгО/л) в лесной зоне (бассейн р. Северной Двины). В меженный период отмечается большее, чем в половодье, количество локальных районов, отличающихся по составу растворенных органических веществ. Это несколько снижает надежность широких территориальных обобщений и увеличивает необходимость полевых исследований конкретных водных объектов.

Таким образом, при оценке минерализации и химического состава воды, а также ее жесткости в первую очередь необходимо рассматривать меженный период, соответствующий лимитирующему сезону, как период с наиболее высокими показателями этих компонентов. Оценку же агрессивности воды и количества органических веществ в ней целесообразно производить, наоборот, за многоводную фазу, поскольку в меженный период их величина обычно меньше или их воздействие не столь существенно.

Большое значение для характеристики вод при промыш-

ленно-бытовом водоснабжении имеют биогенные соединения, хотя их количество обычно невелико и связано с жизнедеятельностью водных организмов. Основное значение имеют нитриты, нитраты, общее железо, фосфаты, кремний. Наибольшее количество нитритов наблюдается в зимний сезон, особенно к началу половодья. Самые низкие концентрации этих соединений отмечаются в летний сезон, когда особенно интенсивна деятельность фитопланктона, питающегося им.

Нитраты содержатся в воде в значительно большем количестве, в среднем от 0 до 5 мг/л, поскольку они являются конечным продуктом процесса минерализации органического вещества. Они также потребляются фитопланктоном, поэтому в летний меженный период их очень мало в воде, зато в зимнюю межень их количество возрастает в десятки раз.

Наиболее устойчивы из биогенных элементов фосфаты и их соединения. Содержание растворенного минерального фосфора в различных водах обычно колеблется мало (0—0,2 мгР/л), с максимумом в зимний сезон. Содержание железа меняется во времени в значительно большей степени. В летнюю межень его количество в воде рек наименьшее вследствие интенсивного фотосинтеза и хорошей аэрации воды. В зимнюю межень потребление железа растительностью прекращается, образования окисного железа из закисного в результате прекращения аэрации практически не происходит и поэтому содержание железа заметно возрастает.

Содержание кремния в водах рек достигает максимального значения в зимний меженный период, когда реки питаются грунтовыми водами, вносящими этот элемент в речную воду, а его потребление диатомовыми водорослями, как в летний сезон, отсутствует. При этом разница между содержанием кремния в зимнюю и летнюю межень достигает весьма большой величины. Например, в р. Шаче у г. Приволжска в зимнюю межень количество кремния составляет 6,0 мгSi/л, весной — 2,6 мгSi/л, а летом падает до 0,4 мгSi/л.

Немаловажное значение имеет комплексная оценка природного качества воды рек СССР в меженный (лимитирующий) период по таким основным показателям, как минерализация воды, ее общая жесткость и перманганатная окисляемость. Эти показатели являются тем естественным фоном, на котором формируется качество воды данного водотока в случае природных аномалий или вмешательства человека, точнее его хозяйственно-бытовой деятельности. Следует отметить, что увеличение числа показателей качества воды при производстве широких территориальных обобщений значительно осложняет осуществление последних и даже может неверно ориентировать потребителя, поскольку, как уже отмечалось, качество воды в значительной мере определяется целями ее использования.

На основе вышеприведенных карт минерализации и общей

жесткости, а также карт перманганатной окисляемости и агрессивности воды рек СССР (составленных Воронковым для ЕТС и автором для АТС), с учетом критериев, указанных в табл. 24, для лимитирующего сезона были выделены районы с различным природным качеством воды (рис. 55). Оценка качества воды осложнялась различием в характере изменения во времени выбранных показателей. Так, если минерализация воды и ее жесткость взаимосвязаны и прямо пропорциональны им. Например, на реках нижней части бассейна р. Припяти минерализация и жесткость вод в меженный период невысокие, качество вод по этим показателям хорошее, но их перманганатная окисляемость в связи с большой заболоченностью территории и наличием мощных гумусовых отложений очень высокая. Поэтому последний показатель не позволяет отнести речные воды данной территории даже к категории удовлетворительных по качеству.

В связи с изложенным при оценке качества воды в лимитирующий сезон в первую очередь учитывался показатель, наименее удовлетворяющий предъявляемым критериям качества. В результате такого подхода основное число рек на территории СССР, особенно на ЕТС, отнесено по качеству воды в лимитирующий сезон к категории удовлетворительных (район 2 на рис. 55). Выделение на территории района 2 локальных районов с неудовлетворительным качеством воды связано главным образом с наличием высокой величины перманганатной окисляемости (в основном на ЕТС) или общей жесткости (главным образом на АТС). Наиболее качественные воды отмечаются в реках северных и горных районов СССР, а также в реках Дальнего Востока и Камчатки (горные районы Кавказа и Средней Азии не рассматривались), где количественный состав указанных трех показателей является наименьшим. Мало пригодны или совсем не пригодны для хозяйственно-питьевого использования воды рек юга ЕТС и южных районов Западной Сибири. Это связано главным образом с их весьма высокой минерализацией и жесткостью. Естественно, что для отдельных рек и даже районов указанное качество воды может значительно отличаться в худшую сторону в результате более сложного химического состава природных вод или наличия в них загрязняющих веществ в результате сброса отработанных вод.

Оценивая качество воды по количеству химических ингредиентов в маловодный период года, необходимо учитывать колебания этого количества от года к году, которые, как отмечалось выше, весьма значительны. Поскольку при расчете количественных характеристик низкого стока чаще всего определяются не средние многолетние значения, а сток конкретной (расчетной) обеспеченности, необходимо и при оценке качества воды за тот или иной отрезок маловодного периода (лимитирующий сезон,

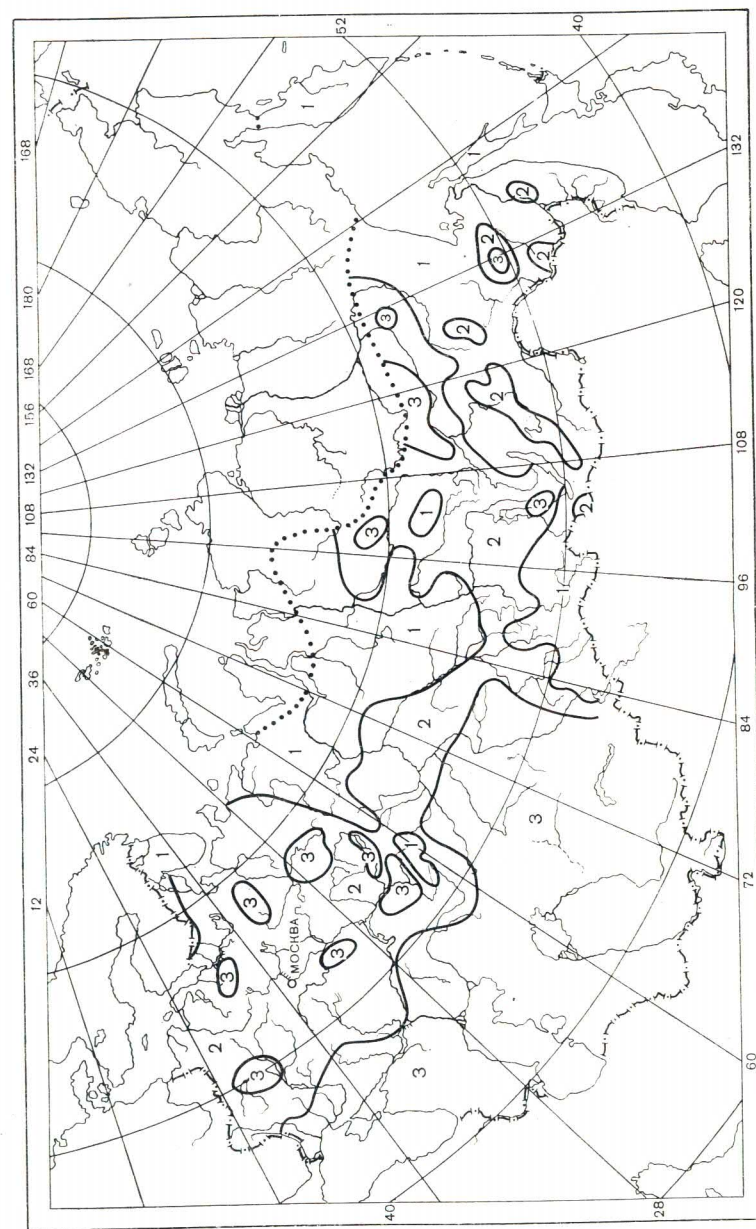


Рис. 55. Карта природного качества речных вод в лимитирующий сезон.

Качество воды для питьевых целей: 1 — хорошее, 2 — удовлетворительное, 3 — неудовлетворительное.

меженный период, 30-дневный период минимального стока и др.) использовать величины химических ингредиентов, отвечающие стоку данной обеспеченности.

Содержания химических ингредиентов в речных водах являются столь же случайными и независимыми величинами в многолетнем разрезе, как и сток рек, поскольку их изменение во времени зависит от большого числа факторов случайного

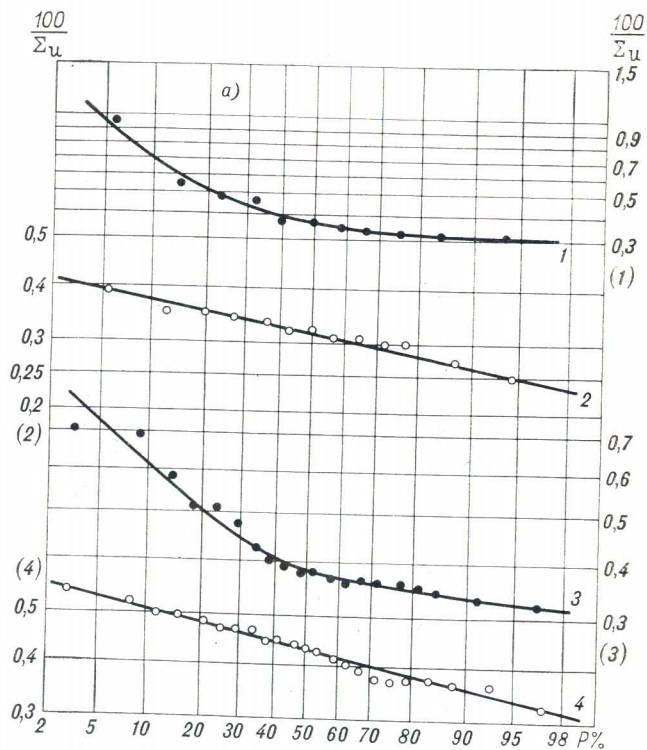


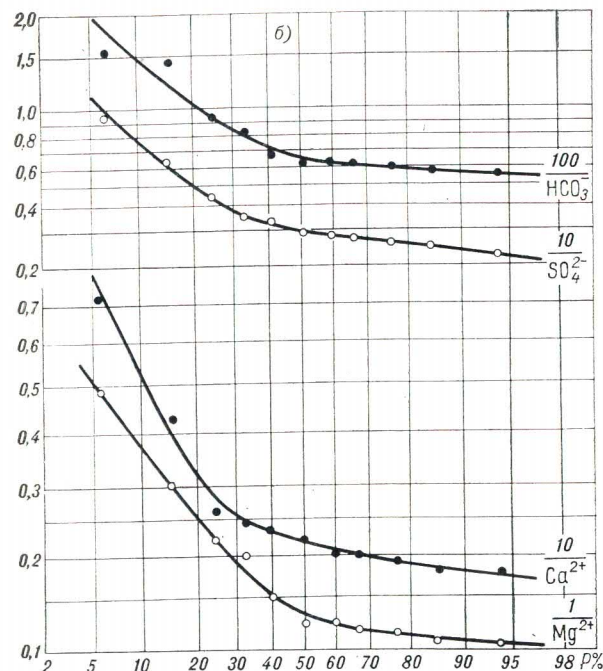
Рис. 56. Кривые обеспеченности общей минерализации во

а — реки Сура (1, 2) и Березина (3, 4), 1, 3 — зимний пе

характера. Поэтому для анализа распределения во времени этих характеристик с не меньшим основанием, чем для стока, могут использоваться вероятностно-статистические методы. Следует отметить, что до последнего времени эти методы весьма слабо применялись для указанных целей, что отмечалось и на IV Всесоюзном гидрологическом съезде.

Автором сделана попытка применить кривые обеспеченности для расчета содержания основных химических ингредиентов — анионов, катионов, суммы ионов — в водах рек в меженный период и лимитирующий сезон. При этом учитывалось, что наи-

меньшему расходу воды в реке соответствует наибольшая минерализация воды. Поэтому при построении эмпирических кривых обеспеченности использовалась величина минерализации (количество анионов, катионов), обратная естественной, т. е., например, $1/Mg^{2+}$, $10/Ca^{2+}$ или $100/\Sigma u$ (чем больше величина ингредиента или их суммы, тем больше числитель, что удобно для построения кривых обеспеченности). Величина обеспеченности эмпирических точек рассчитывается по формуле (1). Значения, снятые с кривых обеспеченности данных ингредиентов,



ции (а) и содержания анионов и катионов (б) в речде (мг/л).

риод, 2, 4 — летне-осенний; б — р. Сура, зимний период.

преобразуются в естественные величины. На рис. 56 показаны сглаженные эмпирические кривые обеспеченности общей минерализации воды рек Суры и Березины в зимний и летне-осенний сезоны, а также кривые для анионов HCO_3^- и SO_4^{2-} и катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , находящихся в водах р. Суры в зимний период (лимитирующий сезон). Для построения кривых использовались средние для данного сезона года величины. Построение кривых обеспеченности производилось на клетчатке Бровковича.

При расчетах общей минерализации воды и отдельно содержания анионов и катионов кривые обеспеченности необходимо

строить за единый период времени, иначе могут не совпасть величина общей минерализации и содержание составляющих ее ингредиентов.

Наличие таких кривых обеспеченности позволяет определить содержание химических ингредиентов, соответствующее расходу воды расчетной обеспеченности, а обобщение химических характеристик данной (фиксированной) обеспеченности по территории в виде карт изолиний или районных зависимостей и использование переходных коэффициентов к другим обеспеченностям позволит установить необходимые характеристики (ингредиенты) для неизученных рек.

При построении кривых обеспеченности содержания химических ингредиентов за период низкого стока основное внимание необходимо обращать на соответствие эмпирических точек линии осреднения в нижней части кривой обеспеченности, соответствующей наибольшим величинам химических составляющих.

Исследование естественного качества речных вод в связи с водным режимом водотоков необходимо не только для оценки их практического использования, но и для изучения изменения этого качества под влиянием загрязнения рек сточными водами. Оно в определенной мере позволяет осуществлять расчет предельно допустимой концентрации веществ в данном водном объекте при загрязнении его сточными водами, а также производить прогноз возможной степени загрязнения рек.

Весьма важным показателем загрязнения природных вод является наличие в них растворенного кислорода, который влияет на биохимические процессы, протекающие в водной среде. Как отмечалось в указанном выше докладе Зенина и Лозанского, степень загрязнения воды в каком-либо пункте может характеризоваться биологическим показателем загрязнения (БПЗ), представляющим собой отношение количества биологического потребления кислорода за пентаду (БПК₅) к перманганатной окисляемости, которая в меженный период имеет наименьшую величину при возрастающем БПК. Содержание кислорода в воде в значительной мере зависит от площади открытой водной поверхности, скорости течения воды и турбулентного перемешивания водных масс, от температуры воды, помимо биохимических и других факторов. Именно в меженный период большинство этих характеристик имеет наименьшие значения и, следовательно, не способствует повышению содержания кислорода в воде, особенно в зимний сезон. Поэтому в период зимней межени количество кислорода максимально сокращается. Чем длительнее меженный период, тем острее чувствуется недостаток кислорода в воде, тем строже надо следить за состоянием водотоков, используемых в народном хозяйстве. К тому же, снижение концентрации кислорода

в воде увеличивает восприимчивость организмов к воздействию токсических веществ, попадающих в водотоки, и резко уменьшает способность воды к самоочищению.

При недостаточном количестве кислорода в воде в несколько раз снижается скорость биохимического разложения нефтепродуктов, попадающих в реки. Допустимое содержание нефтепродуктов в воде не должно превышать 0,05 мг/л. Следовательно, оно в значительной мере зависит от количества воды в реке (при прочих равных условиях), которое бывает наименьшим в лимитирующий сезон, особенно в период минимального стока. Для большей части рек СССР это происходит зимой, когда температура воды очень низкая, что тоже не способствует разложению нефтепродуктов. Поэтому в зимний меженный период влияние нефтепродуктов как загрязняющего компонента будет наибольшим.

Значительно нарушают биологические процессы в воде и ухудшают ее качество фенолы, попадающие в реки со сточными водами, сбрасываемыми предприятиями химической промышленности (лесохимическая, коксохимическая, сланцевая, анилинокрасочная и др.). Наиболее токсичны одноатомные фенолы. Их предельно допустимая концентрация (ПДК) в воде не должна превышать 1 мкг/л. Наиболее интенсивный распад фенолов происходит при высокой температуре воды и резко снижается при температуре воды меньше 7°C. Поэтому в летний меженный период, когда глубины на реках небольшие и речные воды хорошо прогреваются, содержание фенолов уменьшается. Однако снижение концентрации кислорода в воде задерживает этот процесс. Скорость распада фенолов зависит также от целого ряда причин, включающих качественный и количественный состав фенолов, наличие в воде органических веществ, сероводорода, кислых смол и других химических веществ. Следовательно, в летний меженный период содержание фенолов в воде рек может значительно колебаться. В зимний период, когда температура воды и содержание в ней кислорода становятся весьма низкими, концентрация фенолов может достичь большой величины и сохраняться такой длительное время. В этом отношении зимняя межень является наиболее неблагоприятным периодом.

При сбросе в реки шахтных и рудничных вод, а также сточных вод рудообогатительных фабрик и предприятий электрохимической и химической промышленности происходит загрязнение воды цинком и медью. При их значительной концентрации (медь до 0,5 мг/л, а цинк более 1,0 мг/л) задерживается процесс самоочищения воды от органических веществ. Ионы меди и цинка могут удаляться из воды лишь в результате химических реакций, процессов сорбирования и потребления их водной растительностью. Однако полностью они, как правило, не удаляются из воды, поэтому основное значение для снижения их

концентрации имеет процесс разбавления сточных вод. Он тем интенсивнее, чем в большей мере количество речных вод превышает количество сточных. Понятно, что в меженный период соотношение этих вод наименьшее, если размеры сброса сточных вод постоянны. Следовательно, в этот период происходит наибольшее загрязнение речных вод, и это необходимо учитывать путем резкого сокращения или прекращения сброса сточных вод.

В последнее десятилетие начали интенсивно применяться моющие синтетические вещества (синтетические поверхностно-активные вещества). При попадании в воду они придают ей неприятный привкус и запах, ухудшают ее биохимическую очистительную способность, угнетают или совсем прекращают развитие водной растительности, а иногда при большой концентрации даже образуют стойкие скопления пены на поверхности воды. Скорость разложения этих веществ зависит, помимо их химического строения и концентрации в воде, от температуры воды и дефицита растворенного в ней кислорода, т. е. в основном от тех же факторов, что и скорость распада фенолов. Поэтому условия и время их наибольшей возможной концентрации в воде рек совпадают.

Нарушение теплового режима воды рек происходит при сбросе промышленных вод с повышенной температурой. Основными поставщиками таких вод являются тепловые электростанции. Речная вода, используемая для охлаждения агрегатов станции, нагревается по сравнению с первоначальной в среднем на 7—8° летом и 12—14° зимой [66]. При сбросе в водоток температура воды не должна превышать температуру источника водоснабжения более чем на 3—5°. Иначе в водотоке начинается интенсивное развитие биологических организмов и растительности, особенно сине-зеленых водорослей, увеличивается потребление кислорода, замедляются процессы самоочищения и пр. Все это ведет к ухудшению качества воды. Понятно, что в меженный период влияние сбрасываемых теплых вод на качество воды данного водотока может быть наибольшим, особенно в летний сезон, когда достаточно высока естественная температура воды.

Загрязнение водных объектов сточными водами может происходить постоянно и эпизодически. Последнее происходит при разовых выпусках промышленных стоков в водотоки. Они могут регулироваться во времени и приурочиваться к многоводным периодам. Однако в отдельных случаях при аварийных сбросах загрязненных вод природным водам может быть нанесен весьма большой ущерб, особенно в меженный период. В этом плане такие сбросы в определенной мере можно сравнить с катастрофическими паводками и, несмотря на всю нежелательность подобных явлений, их возможность должна учитываться при составлении ответственных проектов водоснабжения.

Постоянное загрязнение рек может происходить при сбросе не только неочищенных, но и не полностью очищенных вод (поскольку полная очистка, т. е. до природного состояния, практически невозможна) в результате накопления различных загрязняющих компонентов. Это накопление происходит тем быстрее, чем ближе их концентрация к предельно допустимой. Немалое значение при этом имеет длительность маловодного периода, точнее соотношение величины меженного и особенно минимального стока и количества сточных вод (при данном их химическом составе) с учетом длительности меженного периода и его устойчивости.

При прерывистой межени, т. е. когда меженный период прерывается паводками различной величины и продолжительности, происходит промывка русла реки, в результате чего обычно снижается величина загрязнения вод. Подобный фактор весьма важен при учете динамики химического состава и загрязнения природных вод. Основное значение для рек Советского Союза он имеет в летне-осенний период, когда в результате выпадения дождей на реках формируются дождевые паводки. В зимний сезон подобное может происходить лишь в западных и южных районах ЕТС, где нередко случаются оттепели, создающие паводки в результате снеготаяния и выпадения дождей. В главе 3 показаны районы с различным характером меженного периода на реках СССР в зимний и летне-осенний сезоны, что может быть в полной мере использовано при анализе водного режима рек в меженный период на предварительной стадии оценки потенциальных возможностей рек в отношении разбавления сточных вод. Величина меженного (лимитирующего) и минимального расхода воды определяется согласно рекомендациям, изложенным в главах 4 и 5.

Наряду с химическим составом сточных вод и величиной соотношения их объема с количеством воды, содержащейся в водном объекте во время сброса, немаловажное значение имеют гидродинамические условия этого объекта, особенно в период межени. Они определяют процесс разбавления и перемешивания сточных вод и способствуют повышению самоочищающей способности реки, влияя на скорость протекания физико-химических и биологических процессов, снижающих концентрацию загрязняющих веществ в водотоках. Гидродинамический процесс разбавления сточных вод в значительной мере определяется величиной расхода воды в реке, скоростью течения, шириной и глубиной потока, а также некоторыми другими гидравлическими характеристиками потока.

При стоке загрязненных вод в реку образуется зона разбавления, состоящая из зоны загрязнения и зоны влияния этого загрязнения. Пространственные размеры этих зон в значительной мере определяются величиной естественного расхода воды в районе сброса. Величина расхода воды зависит от водного

режима реки, т. е. от характера питания и его изменчивости по сезонам и годам, а также по территории. Поэтому большой интерес представляет изучение зависимости размеров вышеуказанных зон от величины расхода воды различной обеспеченности для водотоков с разными условиями формирования стока в меженный период и разными гидравлическими условиями протекания воды при постоянной величине сточных вод (установившийся режим загрязнения). В этом случае одновременно учитывается изменчивость стока во времени и по территории. При исследованиях целесообразно использовать характеристики стока маловодного периода той же обеспеченности, что и при гидрохимических расчетах.

Исследование зависимости размеров зоны загрязнения, зоны влияния, скорости распада загрязняющих веществ и в целом скорости самоочищения водных объектов от вышеуказанных гидравлических элементов потока с учетом их изменчивости во времени позволяет выделить реки, сходные по разбавляющей способности и условиям самоочищения в меженный период. На основании этого возможно выделить районы, в перспективе не благополучные в отношении использования водотоков для сброса сточных вод, а также районы с различной степенью загрязненности водных объектов в маловодный период.

Учет разбавляющей способности реки, основанный на гидрологических и гидродинамических данных, ее самоочищающей способности позволяет установить режим сброса загрязненных вод в реки и оценить величину допустимого количества сбрасываемых вод (критическая нагрузка). Естественно, что при этом в полной мере учитывается величина природного стока в реке и химический состав речных и сбрасываемых вод.

Использование малых и частично средних рек как приемников сточных вод весьма быстро приводит к их загрязнению на больших пространствах, поскольку способности таких рек к разбавлению и самоочищению своих вод весьма невелики, особенно в меженный период. Полное смешение сточных и речных вод на малых реках происходит довольно быстро — через 0,1—0,5 км ниже выпуска сточных вод [34], в то время как на больших реках оно в десятки раз больше.

Следует отметить, что вопросы изменения химического состава вод в результате происходящих в потоке химических процессов, равно как и процессы самоочищения, смешения и разбавления вод, являются в известной мере самостоятельными, изучаемыми в гидрохимическом, гидробиологическом и гидродинамическом аспектах и поэтому здесь не рассматриваются.

Предельно допустимая величина расхода сточных вод, возможного для сброса в водоток в меженный период, определяется с учетом величины расхода воды в реке в период сброса и интенсивности процессов разбавления и самоочищения речных вод. Происходящие при этом изменения качества воды

оцениваются определенным показателем. Однако в связи с разнообразием целей водопользования до настоящего времени не имеется единого показателя качества воды, хотя оценка качества воды находится в непосредственной зависимости от того, что принимается за эту характеристику. В таком аспекте большой интерес представляют исследования, осуществляемые в НИИ водных проблем БССР и, в частности, работы П. Д. Гатилло [54—56]. За показатель качества воды им приняты БПК_{полн} и содержание растворенного кислорода в речной воде. Предельную величину сбросного расхода воды он рекомендует устанавливать по уравнению, учитывающему процессы разбавления и самоочищения вод, которое можно представить в следующем виде:

$$Q_{ст\ n} \leq \left[\left(Q_{р\ n+1} - \sum_1^n Q_{заб\ i} + \sum_1^n Q_{усл\ i} \right) (L_{доп} - L_p) - \sum_1^{n-1} Q_{ст\ i} (mr_i L_{ст\ i} - L_{доп}) \right] (mr_n L_{ст\ n} - L_{доп})^{-1}, \quad (20)$$

где $Q_{ст\ n}$ — предназначенный (возможный) к сбросу расход загрязненных сточных вод в м³/с; i — номер створа сброса сточных вод при счете от верховья вниз по течению с учетом притоков ($n-1$ — створ выше рассматриваемого, n — рассматриваемый, $n+1$ — створ первого по течению расчетного водопользователя, находящегося ниже рассматриваемого створа); $Q_{р\ n+1}$ — расход водотока в месте сброса (расчетный створ) в м³/с (без учета водозаборов и сбросов сточных вод); $Q_{усл\ i}$ — расход сбросов условно чистых сточных вод в м³/с; $Q_{заб\ i}$ — забор речных вод для водоснабжения, м³/с; $L_{ст}$, L_p , $L_{доп}$ — БПК_{полн} соответственно сточных, незагрязненных речных вод, а также предельно допустимое в расчетном створе реки в гО₂/м³; m — коэффициент, учитывающий поступление сточных вод с городской территории, принимаемый автором равным 1,54; r_i — редуцированный коэффициент, зависящий от естественных процессов биохимического окисления сточных вод на участке от сброса до расчетного створа:

$$r_i = 10^{-K_{1\tau} t_i};$$

t_i — время прохождения воды от створа сброса сточных вод до расчетного створа в сутках; $K_{1\tau}$ — постоянная скорости биохимического окисления при температуре воды $\tau^\circ\text{C}$, устанавливаемая в зависимости от величины постоянной при температуре воды 20°C по уравнению

$$K_{1\tau} = K_1 1,047^{\tau-20};$$

величина K_1 в практике расчетов для хозяйственно-бытовых вод принимается равной 0,1.

Среднюю концентрацию растворенного кислорода Гатилло [55] предлагает определять по выражению

$$C_{n+1} = \left[C_p \left(Q_{p, n+1} - \sum_1^n Q_{заб, i} + Q_{усл, i} \right) + \sum_1^n C_{ст, i} Q_{ст, i} - \sum_1^n Q_{ст, i} L_{ст, i} (1 - r_i) \right] \left[Q_{p, n+1} - \sum_1^n Q_{заб, i} + \sum_1^n Q_{усл, i} + \sum_1^n Q_{ст, i} \right]^{-1}, \quad (21)$$

где C_p , $C_{ст, i}$ — концентрация растворенного кислорода соответственно в чистых речных и очищенных сточных водах в $гО_2/м^3$; r_i — коэффициент редукции загрязнений на участках от места сброса сточных вод до расчетного створа; $L_{ст, i} (1 - r_i)$ — удельное потребление кислорода на биохимическое окисление загрязнений, сбрасываемых со сточными водами в $гО_2/м^3$.

Наибольшее внимание концентрации растворенного кислорода необходимо уделять в период ледостава и в летний сезон, когда температура воды превышает $20^\circ C$.

Вышеуказанные расчеты целесообразно осуществлять в первую очередь применительно к минимальному 30-дневному зимнему и летне-осеннему расходу воды. В случае превышения количества предназначенных к сбросу вод над величиной предельно допустимой нагрузки водотока сточными водами производится перерасчет сбрасываемой величины и остаток отводится в специальные накопители для его последующего сброса в период паводка или половодья.

В районе городов необходимо учитывать возможность дополнительного загрязнения речных вод в результате стока дождевых и мочевых вод с городской территории, содержащих значительное количество минеральных и органических веществ. Загрязненность вод взвешенными веществами может колебаться в больших пределах ($500—5000$ $мг/л$), а величина БПК₅ изменяться в десятки раз [131, 188]. Поступление таких вод ухудшает органолептические свойства воды, ее кислородный режим и способствует заилению водотоков вследствие большого количества взвесей и крупных частиц, содержащихся в них. Правда, использование отстойников на водосточной сети значительно уменьшает количество наносов (до 80%), но снижение количества растворенных органических веществ происходит в значительно меньшей степени (лишь до 40%) [131, 188]. При этом чем лучше осуществляется очистка промышленно-бытовых сточных вод, сбрасываемых в реки, тем значительнее влияние, оказываемое водами, стекающими с городской территории и не подвергающихся такой очистке. Их значение возрастает в летний сезон в периоды длительного отсутствия осадков, когда меженный сток снижается до наименьших величин, а интенсивность поливомоечных работ на городской территории резко увеличивается.

На качество речных вод большое влияние могут оказывать значительные по размеру заборы воды для обеспечения промышленных и коммунально-бытовых потребностей городов, а также удовлетворения запросов сельского хозяйства, особенно для орошения. Интенсивный забор речных вод может привести к существенному изменению происходящих в них биохимических процессов, повлиять на температурный режим, вызвать перегрузку реки сточными водами. Поэтому при осуществлении водозаборов из рек в меженный период необходимо оставлять в них определенную величину расхода воды, отвечающую санитарным требованиям. Г. П. Калинин отмечал [76], что при изъятии из реки стока, близкого по величине к размерам поверхностного стока, и оставления в ней расхода воды, близкого к естественному меженному, река сохранит свои природные свойства. Поэтому для сохранности рек необходимо оставлять в них сток, составляющий четвертую или третью часть общего годового стока, т. е. расход воды, соответствующий величине устойчивого подземного питания реки. В этом плане представляет особый интерес анализ естественного состояния реки в самые маловодные годы при наименьших величинах стока в маловодный период.

Основное водоснабжение промышленных центров нередко осуществляется из рек. Так, г. Воронеж обеспечивается водой, 75% количества которой поставляет р. Воронеж и лишь 25% — подземные воды [66]. Поэтому напряженное положение с водоснабжением города возникает даже в средние по водности меженные периоды. В такой период вопросы качества речных вод и размеры оставляемого в них стока приобретают наибольшее значение.

Определение величины минимально допустимого расхода воды, оставляемого в реке при ее хозяйственном использовании, является комплексной проблемой, до настоящего времени еще слабо разработанной. Величина оставляемого расхода воды должна удовлетворять целому ряду требований и, прежде всего, санитарным нормам и потребностям водопользователей, расположенных ниже по реке.

При расчете минимально допустимого расхода воды, оставляемого в водотоке, необходимо учитывать водный режим последнего в маловодный период и величину минимального стока. Наиболее существенным при этом является характер меженного периода и его длительность. При продолжительной и устойчивой межени создаются самые неблагоприятные условия для значительных заборов воды из рек. Поэтому расчет минимально допустимого расхода воды в реке должен производиться по величине минимального (при недопустимости существенных изменений качества воды) или меженного расхода воды и длительности его наличия.

Определенного внимания в этом направлении заслуживает предложение А. Г. Каска [35, 81] принимать за расчетный минимальный расход воды, или, как его называет автор, лимитирующий минимальный расход воды $Q_{\text{лим}}$, устанавливаемый по графической зависимости величины минимального расхода воды от продолжительности T и повторяемости P маловодных периодов. При этом под продолжительностью маловодного периода Каск понимает суммарную длительность периодов, когда величина расхода воды в реке меньше заданной. Последняя принимается такой, чтобы этот период был не менее 50—100 суток, что для условий Эстонии (район исследований автора) соответствует полутора-двухкратной величине минимального месячного расхода воды, наименьшего за весь период наблюдений, т. е. $Q_{\text{зад}} = (1,5 \div 2,0) Q_{\text{мин}}$. Для данного $Q_{\text{зад}}$ строится зависимость $T = f(P)$. Значение T устанавливается по этой зависимости по принятой величине P . Затем по графику $Q_{\text{лим}} = f(T)$ определяется значение $Q_{\text{зад}}$ при постоянной величине P . В расчетах обычно используется максимально допускаемая продолжительность маловодного периода и минимально возможная ее повторяемость.

На основе определенного значения $Q_{\text{лим}}$ устанавливается величина расчетного (санитарного) минимального расхода воды путем введения коэффициента, учитывающего комплекс различных факторов, характеризующих хозяйственное значение реки, ее гидрохимический и биохимический режим, способность к самоочищению, вид загрязнений и другие условия, влияющие на качество воды, т. е. $Q_p = K Q_{\text{лим}}$.

Исследования, выполненные Каском, являются одной из первых попыток разработать способы расчета минимально допустимого расхода воды, оставляемого в водотоке, с учетом ее качества, в основу которых положены данные о водном режиме реки и величине ее стока в меженный период.

Следует отметить, что большое значение при оценке качества воды имеет непрерывная длительность маловодного (меженного) периода, когда относительно стабилен (по сравнению с паводочным периодом) естественный химический состав воды и генетически однородно питание рек. При использовании горизонтальной срезки гидрографа по заданному расходу воды, как это рекомендуется Каском, происходит смешение вод, формирующихся как подземными, так и поверхностными водами, следовательно, их химический состав также резко меняется во времени, что существенно осложняет расчет. Поэтому в расчетах целесообразно использовать генетически однородный сток, т. е. меженный (в том понимании, как он трактуется в данной работе). В этом случае более стабильной становится продолжительность периода и определенными даты его появления в многолетнем разрезе (см. главу 3). К тому же, ранее изложенные методы расчета меженного и минимального стока позволяют

определять необходимые характеристики не только для рек с наличием наблюдений за стоком, но и для неизученных рек.

Таким образом, естественная минерализация, ионный состав и количество органических веществ, содержащихся в водных объектах, равно как и процесс загрязнения и самоочищения водотоков и разбавления сточных вод в определенной мере зависят от основных характеристик низкого стока и водного режима в маловодный период. Качество воды — явление многофакторное, и при его исследовании необходимо рассматривать большой комплекс составляющих с выяснением их взаимосвязи. Успешное решение этого вопроса возможно лишь при тесном сочетании количественных характеристик стока и качественных показателей воды во времени и по территории с учетом динамики водного режима водных объектов. Это обуславливает необходимость тесного сотрудничества специалистов различных областей знаний (гидрологов, гидрохимиков, гидробиологов и др.).

ВЛИЯНИЕ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА СТОК РЕК В МАЛОВОДНЫЙ ПЕРИОД

В настоящее время при расчетах естественной величины низкого стока рек все в большей мере приходится учитывать существующее или возможное в перспективе влияние на нее хозяйственной деятельности человека. В маловодный период это влияние может быть столь существенно, что коренным образом изменит режим и величину стока. Резкое уменьшение стока, а тем более его прекращение в меженный период в результате вмешательства человека, неучтенное ранее, может создать аварийное положение, например на тепловой электростанции, так как для обеспечения ее работы требуется бесперебойная подача необходимого количества воды.

Влияние хозяйственной деятельности человека на режим и величину низкого стока рек может проявляться в нескольких видах. В результате строительства в русле реки и на ее водосборе прудов и водохранилищ для орошения и водоснабжения, а также крупных водозаборов естественный речной сток в меженный период может значительно уменьшиться. Однако при сбросе шахтных и карьерных вод из глубоких водоносных горизонтов, а также промышленных вод, забираемых вне данной речной системы, а также в результате работы ГЭС величина низкого стока может существенно увеличиться. При сбросах промышленных, коммунально-бытовых и сельскохозяйственных вод происходит изменение качества природных вод, даже если их величина заметно не изменяется. Большие изменения стока, особенно в меженный период, происходят при переброске вод из одной речной системы в другую.

На практике нередко одновременно проявляется воздействие на сток рек в меженный период большого количества разнообразных типов водопотребления и водопользования, обуславливающих различное соотношение указанных трех видов влияния. Это значительно осложняет изучение проблемы воздействия человека на речной сток в маловодный период, когда оно проявляется в наиболее яркой форме как в отношении изменения количества воды, так и ее качества.

Орошение сельскохозяйственных угодий и обратный про-

цесс — их осушение, водозабор для питьевых и промышленных целей и сброс отработанных вод, размеры загрязнений природных вод прямым образом связаны с вопросами определения количественных и качественных характеристик низкого стока рек. Соотношение их величины и естественного стока определяет необходимость регулирования речного стока и вид этого регулирования (сезонное или многолетнее), величину затрат на гидротехническое строительство и в значительной мере общую эффективность использования водных ресурсов данной территории.

Из всех отраслей народного хозяйства по объему потребляемой воды на первом месте находится сельское хозяйство. В настоящее время на орошение, обводнение и водоснабжение в сельском хозяйстве приходится более $\frac{3}{4}$ всего безвозвратного водопотребления в нашей стране. Вместе с тем оно включает процессы водоотведения в виде осушения заболоченных земель, сброса дренажных вод после промывки засоленных земель и т. п. Основная часть воды используется на орошение. Заметных размеров достигает водопотребление в животноводстве. Экономика сельского хозяйства в значительной мере зависит от эффективности использования водных ресурсов, обуславливающих его продуктивность.

Наибольшее значение орошаемое земледелие имеет в зоне недостаточного увлажнения, где расположено около 65% пахотных угодий страны и наблюдаются наиболее длительные теплые периоды. Орошение является важнейшим и наиболее действенным средством повышения урожайности сельскохозяйственных культур и роста экономики этих районов.

Влияние орошения на речной сток носит в основном сезонный характер и проявляется главным образом в период вегетационного развития растений, который совпадает с летним меженным периодом на реках. Причем чем раньше начинается межень и больше ее продолжительность, тем больше влияние на сток оказывает забор воды для орошения. Это влияние повышается при систематическом орошении. Однако оно существенно различно для малых и больших рек. Как отмечалось на IV Всесоюзном гидрологическом съезде в докладе К. П. Воскресенского, С. И. Харченко и И. А. Шикломанова, степень изменения водных ресурсов речных систем «определяется соотношением энергетического показателя территории и влагообеспеченности испаряющей поверхности». При соответствии этих показателей орошение слабо влияет на объем водных ресурсов. При интенсивном испарении, когда забираемые на орошение воды в конечном итоге все затрачиваются на испарение, влияние орошения становится наибольшим и может обусловить прекращение стока на малых и части средних рек, что и происходит в летний сезон на многих реках засушливых территорий (бассейны рек Кавказа — Аракс, Кума, Терек, реки предгорий Средней Азии

и др.). Крайним случаем этого влияния является полный разбор речных вод крупных водотоков для удовлетворения сельскохозяйственных нужд. Последнее наблюдается в основном в степных и полупустынных районах. При значительном снижении безвозвратных потерь воды, используемой для орошения, уменьшение стока в реке отмечается в меньшей мере в результате сработки накопленных при орошении запасов подземных вод. При этом происходит перераспределение меженного стока по длине реки — резкое снижение в месте водозабора и последующее увеличение ниже по течению реки по мере выклинивания подземных вод. Подобное же перераспределение вод может происходить и во времени, т. е. интенсивный возврат вод из почво-грунтов по окончании орошения (конец лета — осень).

В некоторой мере потери подземных вод на испарение могут компенсироваться путем осушения заболоченных участков, уничтожения влаголюбивой дикорастущей растительности, сокращения площади разливов рек. Однако дальнейшее увеличение водозаборов может привести к заметному уменьшению низкого стока даже больших рек (Днепр, Дон, Терек, Сырдарья и др.).

Наиболее сильное уменьшение меженного стока рек под воздействием орошения происходит в маловодные годы (сезоны). При этом его влияние возрастает по территории, поскольку, наряду с систематическим, начинает действовать и периодическое орошение.

Количественная оценка влияния орошения на величину меженного стока рек в большой степени зависит от точности расчета количества возвратных вод, попадающих в реки в результате орошения. Эта величина определяется характером оросительной системы (способ полива, дренаж, расположение относительно водотока), строением почво-грунтов и гидрогеологическими условиями орошаемой территории, объемом водоподдачи и другими факторами. Соотношение этих факторов в значительной мере бывает индивидуальным, поэтому величина возвратных вод для различных оросительных систем колеблется в больших пределах.

Возвратные воды не всегда могут использоваться повторно, так как на сильно минерализованных почво-грунтах происходит возрастание минерализации поливных вод. В результате этого они приобретают высокое содержание ионов различных солей, к тому же загрязняются ядохимикатами, применяющимися при обработке полей.

Орошение значительных территорий, вызывая снижение меженного стока в первой половине летнего сезона, обычно обуславливает его возрастание в конце лета, осенью и даже зимой, когда сначала сокращается, а потом и прекращается забор воды из рек на орошение и начинается усиленный приток на-

копившихся подземных вод в речную сеть, конечно, если основная их часть не ушла на испарение.

Таким образом, оценка влияния орошаемого земледелия на величину низкого стока должна осуществляться в локальном плане с учетом местных физико-географических особенностей территории, характера орошения, а также норм и сроков полива. Расчетной величиной низкого стока обычно является минимальный 30-дневный расход воды 80%-ной обеспеченности за вегетационный период (летний меженный период). Способы определения его величины и сроков появления изложены в главах 3—5.

Обратная картина наблюдается при производстве осушительных работ в бассейне реки. Степень влияния этих работ проявляется по-разному и зависит от местных особенностей территории, однако в целом обычно происходит увеличение сезонного стока рек после осушения. В первые годы оно бывает наиболее значительным вследствие уменьшения суммарного испарения в теплый период и увеличения сработки запасов грунтовых вод. Как отмечается в вышеуказанном докладе Воскресенского и др., влияние осушения наиболее существенно сказывается на величине меженных и минимальных расходов воды, которые могут возрасти в 1,5—2 раза. Однако впоследствии, при интенсивном освоении мелиорируемых земель, низкий сток несколько снижается по сравнению с его первоначальной величиной. В некоторых случаях, как указывалось в главе 2, минимальный сток может уменьшаться при производстве осушительных работ.

Объем промышленного и бытового потребления воды значительно уступает количеству воды, используемой в сельском хозяйстве. Однако значение этой воды в жизни человеческого общества является наибольшим. Население страны должно быть в первую очередь обеспечено водой высокого качества, при этом перерывы в водоснабжении не допускаются. На долю промышленно-бытового водопотребления приходится меньше 10% общего потребления воды, поэтому в целом его количественное влияние на низкий сток невелико, к тому же, большая часть использованных вод возвращается в водотоки. Безвозвратное водопотребление в промышленности и коммунально-бытовом хозяйстве составляет в среднем 10—20%. Однако наибольшее влияние промышленно-бытовое водопользование оказывает на качество воды, о чем уже говорилось в предыдущей главе.

В локальных районах промышленно-бытовое водопотребление может существенно изменять величину стока в меженный период в результате его перераспределения по длине реки или по территории (водозабор из одной реки, а сброс в другую). Для водотоков, протекающих в районе крупных промышленных центров, влияние забора воды на отдельных участках реки

очень велико. Длина таких участков может составлять несколько километров, поскольку город с населением 1 млн. человек потребляет в среднем около 3,5 м³/с воды, если же учесть еще долю промышленного водопотребления, то эта величина может существенно возрасти. Например, забор воды из р. Москвы в районе с. Павшино составляет около 10 м³/с при среднемноголетнем меженном стоке около 11 м³/с [159]. В ряде городов и поселков Московской области размеры водозаборов составляют 2—12% годового стока рек Клязьмы, Пахры, Поли. В табл. 25 приводятся сведения о соотношении меженного стока и сбрасываемых в реки вод, установленные исследованиями ГГИ в районе Курской магнитной аномалии.

Таблица 25

Доля сбросных вод в меженном стоке рек

Река — пункт	Средний много- летний меженный сток, м³/с	Расход сбрасывае- мых вод, м³/с	Доля сброса, %
Свапа — г. Старый Город	3,74	0,31	8,3
Тускарь — г. Курск	3,06	0,19	6,2
Чернь — с. Остапово	0,78	0,31	39,8
Северский Донец — г. Белгород	0,69	0,40	58,0
Сейм — г. Райково	8,51	6,3—8,5	74—100

Небольшая величина стока малых и средних рек в меженный период и возможность их быстрого загрязнения обостряют вопрос об экономном использовании и расходовании воды для промышленных нужд и необходимости изменения технологического процесса производства на всех или основной части предприятий путем широкого введения оборотного водоснабжения с неоднократным использованием технической воды.

Таким образом, при расчетах количества воды, необходимой для удовлетворения потребностей промышленности и коммунально-бытового хозяйства основным является оценка возможной величины водозабора из данного водотока с последующим учетом изменения качества воды после возвращения в него отработанных вод.

Вместе с тем промышленно-бытовое водоснабжение крупных городов может существенно повлиять на величину стока на отдельных участках рек даже при отсутствии водозаборов из них. Питание многих городов в большой мере осуществляется за счет подземных вод, которые после их использования сбрасываются в речную сеть, повышая величину стока. Однако

длительная и интенсивная эксплуатация подземных вод приводит к созданию депрессионной воронки и прекращению питания рек подземными водами в зоне ее действия. Чем больше такая воронка, тем существеннее сказывается ее отрицательное влияние. Например, в больших масштабах производится отбор подземных вод для водоснабжения городов и поселков на территории Московского артезианского бассейна. Суммарный дебит водозабора ориентировочно составляет 100—110 м³/с. Превышение величины водозабора над размерами пополнения подземных вод приводит к образованию депрессионных воронок, занимающих на поверхности площадь от нескольких квадратных километров до 10 000—20 000 км² и более. Размеры депрессионных воронок уровня подземных вод бывают весьма различны и определяются не только величиной отбора подземных вод, но и продолжительностью эксплуатации водоносного пласта, гидрогеологическими условиями района и используемых водоносных горизонтов (мощность, водообильность, водоотдача, глубина залегания), характером связи этих горизонтов с подземными и поверхностными водами.

Питание рек подземными водами, которое обычно превалирует в период низкого стока, зависит от положения уровня грунтовых вод по отношению к поверхности воды в русле реки. Если он ниже последней, то начинается фильтрация речных вод в берега, а при падении уровня ниже тальвега реки происходит отток воды из реки в почвенно-грунтовую толщу и величина речного стока уменьшается. Чем ниже опускается горизонт подземных вод, тем интенсивнее происходит фильтрация из реки и тем больше участок, на котором происходят потери стока. Наиболее интенсивно такие процессы развиваются в местах производства водопонизительных работ, осуществляемых горно-рудными предприятиями при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. Так, производство подобного рода работ при освоении Старо-Оскольской группы железорудных месторождений на территории КМА привело к понижению уровня подземных вод в центре осушения на 93 м и образованию депрессионной воронки площадью 1260 км² при наибольшем радиусе влияния около 20 км. В результате изменился водный режим р. Осколец, протекающей в районе месторождения. С 1957 по 1967 г. подземное питание реки сократилось на 24% среднемноголетнего естественного годового стока [158]. В бассейне реки возникли две зоны интенсивной фильтрации речных вод, направленной к железорудным карьерам. Если бы не происходил сброс подземных вод, изъятых при осушении карьеров, обратно в р. Осколец, то в ней полностью прекратился бы сток в меженный период.

Другим ярким примером влияния эксплуатации подземных вод на величину речного стока в сторону ее снижения является уменьшение стока р. Поли (МАН) и соседних рек. Питание этих

рек в меженный период происходит за счет вод четвертичных и меловых водоносных горизонтов, гидравлически связанных с рекой. В естественном состоянии воды каменноугольных отложений были напорными (на 4—6 м выше земной поверхности в долине р. Поли). По данным работы [159], в результате длительного (с 1915—1920 гг.) и интенсивного водозабора уровень подземных вод в каменноугольных водоносных горизонтах понизился на 15—30 м, что привело к развитию депрессионных

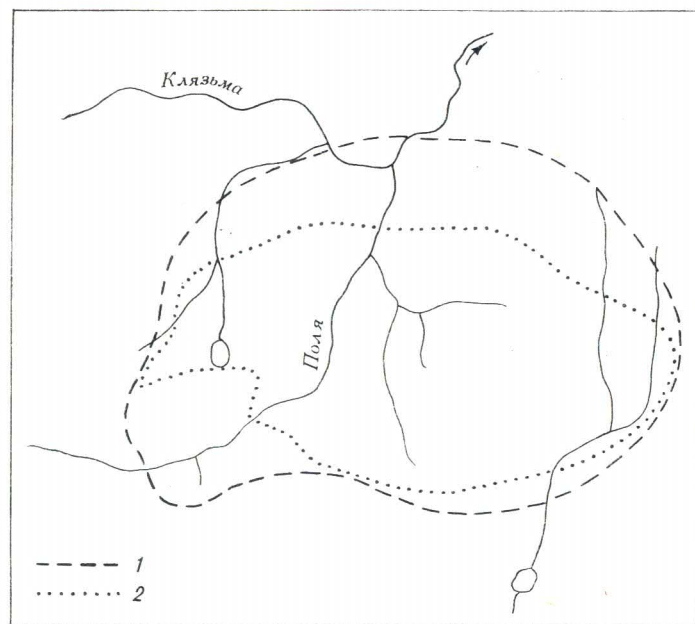


Рис. 57. Схема современного расположения депрессионных воронок в бассейнах р. Поля и соседних рек.

1 — граница депрессионной воронки в касимовском водоносном горизонте; 2 — граница этой воронки в нижерасположенном клязьминском водоносном горизонте.

воронок, распространившихся к 1969 г. почти на весь бассейн р. Поля и соседних рек. Общая площадь депрессионной воронки составила 2400 км² (рис. 57). Использованные подземные воды в основном отводятся за пределы бассейна р. Поля. В связи со значительным изъятием подземных вод величина меженного стока рек в пределах депрессионной воронки сократилась на 50%, а годового — на 15—20%.

Однако крупные водозаборы подземных вод, снижающие величину подземного питания рек в районе водозабора, могут привести к увеличению речного стока, особенно в меженный период, если забираемые воды сбрасываются в эту же речную систему. По этой причине на уже упоминавшейся р. Осколец

ниже участка депрессионной воронки наблюдается постепенное увеличение стока, происходящее за счет сброса рудничных вод из глубоких водоносных горизонтов, обычно не участвующих в питании реки. Например, доля сбросных вод в меженном стоке р. Осколец у г. Старый Оскол составляет 317%, а на р. Ворскле у п. Яковлево, находящейся в подобных же условиях, еще больше — 447%.

Таким образом, в пределах депрессионных воронок, образующихся за счет подземного водозабора на промышленно-бытовые нужды или производства осушительных работ, наблюдается два противоположных процесса: сокращение подземного питания рек и возникновение потерь русловых вод на фильтрацию в эксплуатируемый водоносный горизонт; увеличение речного стока в результате сброса глубоких подземных вод, обычно не дренируемых или слабо дренируемых рекой. Эти процессы могут происходить одновременно в одном и том же речном бассейне, но в разных его частях, и в результате в замыкающем створе не будет наблюдаться изменения величины стока в многолетнем разрезе. Если же количество воды, забираемой для водоснабжения из не дренируемых рекой водоносных горизонтов, превышает потери речного стока в зоне депрессионной воронки и безвозвратные потери при водопользовании, то сброс отработанных вод в ту же речную систему может привести к значительному увеличению меженного стока. Последнее наблюдается также в случае сброса шахтных и карьерных вод ниже зоны депрессионной воронки. Однако в зоне развития этой воронки процесс является однонаправленным и вызывает лишь снижение речного стока, причем в наибольшей мере в меженный период.

По данным работы [159], на реках Мещерской низменности в пределах развития депрессионных воронок величина меженного стока, формирующегося подземными водами, уменьшилась до 60% по сравнению с естественными среднееголетними значениями.

Большое влияние на величину низкого стока оказывает создание в руслах и на водосборах рек различного рода водохранилищ (для гидроэнергетики, водоснабжения, орошения), причем в значительной мере это влияние зависит от назначения искусственного водоема. Создаваемые на больших реках крупные водохранилища обуславливают перераспределение речного стока по сезонам, приводя к значительному увеличению меженного стока рек в результате дополнительного сброса воды из водохранилища. Например, из Можайского водохранилища в р. Москву сбрасывается в среднем 8,2 м³/с воды, а из Истринского в р. Истру — 3,9 м³/с при среднееголетнем минимальном месячном стоке р. Москвы у с. Павшино 9,25 м³/с зимой и 11,1 м³/с в летне-осенний сезон. Сопоставление указанных цифр наглядно показывает степень и характер влияния

крупных водохранилищ на величину стока рек в маловодный период. При этом в зависимости от режима работы гидроэлектростанций или сбросов из водохранилищ величина добавочного стока в меженный период может быть различна по сезонам.

На таких больших реках, как Волга, Днепр, Дон, полностью или частично зарегулированных водохранилищами, величина меженного стока по сезонам определяется главным образом режимом регулирования. Так, летний сток Волги у г. Волгограда в результате регулирования уменьшился, а зимний меженный сток удвоился.

Создание водохранилищ для ГЭС, особенно в зоне недостаточного увлажнения, вызывает увеличение потерь стока на испарение, однако это сказывается в основном на годовом водном балансе, поскольку в период маловодья сток обычно увеличивается за счет пусков из водохранилища и работы ГЭС.

На малых реках, как правило, создаются лишь небольшие водохранилища и пруды. Однако их значительное количество на водосборе реки обуславливает существенное изменение стока не только в непосредственной близости от пруда, но и в целом по бассейну. На территории пяти областей центральной черноземной полосы (Орловская, Курская, Белгородская, Липецкая и Воронежская) к концу 60-х годов насчитывалось более 8000 прудов, имеющих суммарную площадь поверхности 261,5 км² и объем наполнения 454,7 млн. м³ [124]. Свыше 50% прудов использовались для водоснабжения и орошения, 6% — для рыбоводства и птицеводства и 9% — для получения электроэнергии.

Влияние прудов на величину низкого стока рек в значительной мере определяется их устройством. Непроточные пруды перехватывают весь сток в межень. Они создаются обычно на малых реках, а также в верховьях речного бассейна на логах и балках. Проточные пруды пропускают часть стока, однако в меженный период могут задерживать весь сток. Нередко подобные пруды и водохранилища осуществляют суточное и недельное регулирование стока.

Использование прудов для орошения обуславливает наибольшее безвозвратные потери стока и, следовательно, максимальное его снижение в вегетационный период. И наоборот, использование небольших водохранилищ для выработки электроэнергии приводит к увеличению минимального стока.

Забор воды из прудов для водоснабжения вызывает тем большее снижение меженного стока, чем больше величина безвозвратных потерь воды. Последнее определяется местными условиями использования стока.

Наименьшее влияние на величину низкого стока оказывают пруды, создаваемые для рыбоводства и птицеводства, если они являются проточными, поскольку основные потери воды в та-

ких прудах происходят на испарение летом и ледообразование зимой.

При значительных фильтрационных способностях грунтов пруды могут служить источником пополнения подземных вод верхних водоносных горизонтов, особенно в начале летнего сезона после наполнения их весенними водами, а также при значительных дождевых паводках. В подобных случаях в замыкающем створе может отмечаться увеличение минимального стока. Однако в целом наличие прудов на малых реках чаще всего приводит к снижению величины меженного стока, особенно в летний сезон.

Таким образом, влияние водохранилищ и прудов на низкий сток рек определяется характером их эксплуатации, местом расположения и объемом аккумулированной ими воды, а также климатическими условиями территории. В зависимости от указанных факторов и их соотношения влияние прудов на величину низкого стока будет положительным или отрицательным, к тому же, оно может быть неоднозначным по сезонам года. Его количественная оценка является весьма сложной, так как требует учета большого числа разнообразных данных (величина речного стока, объем аккумуляции, размеры испарения и водозабора, фильтрация и прочие факторы, изменяющиеся во времени).

Сооружение водохранилищ производится для перераспределения стока не только во времени, но и по территории — для переброски воды из одного бассейна в другой. Производство гидротехнических работ в целях перераспределения речного стока по территории направлено на преобразование гидрологического режима и водных ресурсов. Следовательно, исходные цели уже предопределяют изменение режима и величины низкого стока рек. Переброска воды относится к одному из важнейших факторов, влияющих на сток. Однако пока она осуществляется главным образом лишь в отношении больших рек (канал Москва—Волга, Иртыш—Караганда, Северо-Крымский канал и др.). Но с возрастанием потребностей в воде, особенно в связи с ухудшением ее качества в районе крупных промышленных центров, все в большей мере в этот процесс будут вовлекаться средние и даже малые реки, используемые как транзитный путь.

При современном развитии городов, обуславливающим увеличение площади застроенных и асфальтированных территорий на водосборе реки, величина низкого стока может существенно изменяться как в черте города, так и на большом протяжении от него вниз по реке. В настоящее время происходит постоянный рост урбанизированных территорий. Размеры площади, занимаемой крупными городами, достигают нередко 100 км², а для наиболее крупных городов даже 1000 км². Естественно, что оказываемое ими влияние сказывается на значительно

большую территорию. На режим и величину меженного стока рек урбанизация влияет в двух противоположных направлениях, что отмечается и в работе [104]. Большой процент территории городов имеет твердое покрытие (крыши зданий, асфальтированные дороги, площади, дворы), к тому же, из городов вывозится снег, в результате чего на городских территориях резко уменьшается инфильтрация осадков в почво-грунты, что вызывает уменьшение питания подземных вод. При этом последние интенсивно используются для городского водоснабжения. Все это способствует образованию различных размеров депрессионных воронок под городскими территориями. В связи с вышеизложенным меженный сток рек в черте города и ниже его может значительно уменьшиться (по данным иностранных авторов, до 30%).

Однако в определенных обстоятельствах урбанизированные территории могут способствовать увеличению меженного стока рек. Это происходит в случае водообеспечения города из глубоких водоносных горизонтов, не дренируемых протекающими в его черте водотоками, а также при подаче воды в город из источников, находящихся вне данного речного бассейна. В последнем случае речь идет уже о переброске вод из одного речного бассейна в другой. Заметное увеличение минимального стока рек в летний сезон может происходить за счет интенсивного полива и мытья городских территорий водами, забираемыми из источников, не связанных с данной рекой. По данным работы [187], до 10—20% общего объема используемой в городе воды теряется из водораспределительных и канализационных систем в почво-грунты, обеспечивая дополнительное питание рек.

В связи с изложенным водный режим рек в районе урбанизированных территорий также изменяется. Колебания водности рек становятся более резкими вследствие неравномерного сброса различного рода сточных вод и производства водозаборов. Выпадающие на городскую территорию в теплый период даже относительно небольшие осадки почти полностью стекают в водотоки, создавая кратковременное увеличение стока, не наблюдающееся для остальной, неурбанизированной территории.

Таким образом, влияние урбанизированных территорий на величину меженного стока рек проявляется в зависимости от климатических и гидрогеологических условий территории и особенностей городского водоснабжения, включая устройство водораспределительной и канализационно-сбросной сети. Однако основное влияние урбанизация оказывает на качество речного стока в меженный период, о чем уже говорилось в главе 6.

На водосборах средних, а тем более больших рек обычно одновременно действует большой комплекс видов хозяйственной деятельности, нередко имеющих противоположную направленность. Они находятся в сложной взаимосвязи с поверхност-

ными и подземными водами, которая определяется уровнем хозяйственного освоения территории и физико-географическими условиями формирования речного стока. Поэтому определить индивидуальное влияние каждого фактора бывает чрезвычайно сложно, особенно в связи с недостатком необходимой информации.

В будущем в результате интенсификации развития промышленности и сельского хозяйства изменение низкого стока рек под влиянием хозяйственной деятельности будет увеличиваться, захватывая все большие территории. По данным исследований ГГИ, изложенным в уже упоминавшемся докладе Воскресенского и др., к 1990—2000 гг. ожидается уменьшение суммарного стока рек СССР почти на 4%, при этом основное снижение стока произойдет на реках южных районов страны, где он уменьшится до 30%. Уже к 1985 г. годовой сток рек наиболее развитых районов страны, особенно в районах интенсивного развития орошения, может уменьшиться на 30—40%, а к 2000 г. будут использованы водные ресурсы в бассейнах рек Терека, Куры, Кубани, Дона, Днепра. Естественно, что в первую очередь это отразится на меженном стоке рек, особенно в летний сезон. Так, сезонный сток р. Терека за последние 10 лет уменьшился на 25%, а при сохранении тех же тенденций развития хозяйственной деятельности он снизится к 1985 г. еще на 50% [169]. Наиболее напряженное положение с водными ресурсами ожидается в ближайшем будущем на юге ЕТС, на Кавказе, в Средней Азии и Казахстане.

Изложенные выше сведения о характере влияния тех или иных видов хозяйственной деятельности на низкий сток рек позволяют более уверенно подойти к решению вопросов количественной оценки степени этого влияния.

Количественная оценка влияния различных видов хозяйственной деятельности на величину низкого стока рек связана с решением целого комплекса вопросов и требует большого объема информации как о величине естественного стока рек в меженный период, так и о характере и размерах воздействия человека в этот период. Трудность расчета количественного изменения стока рек обусловлена нередко не только отсутствием необходимых данных, но и наличием большого числа антропогенных факторов, оказывающих различное влияние на сток при значительной неопределенности их количественной величины.

Чтобы установить степень влияния того или иного хозяйственного фактора или их комплекса на величину стока необходимо иметь достаточно надежные данные о природном стоке рек рассматриваемого района с учетом его циклических колебаний. Сопоставление происшедших изменений естественных условий формирования стока и динамики развития хозяйственной деятельности на водосборе реки позволяет количественно оценить влияние последних на величину низкого стока рек.

Как отмечается в работе [167], в настоящее время существует два направления в разработке способов оценки влияния хозяйственной деятельности на гидрологические характеристики:

1) исследование многолетних колебаний стока с одновременным анализом изменения метеорологических факторов и развития хозяйственной деятельности в бассейнах рек;

2) изучение отдельных элементов водного и теплового балансов тех участков рек (водосборов), где происходит непосредственное взаимодействие поверхностных и подземных вод с антропогенными факторами.

В первом случае производится исследование многолетних колебаний стока в рассматриваемом створе реки, происходящих под влиянием естественных (природных) факторов, и на их фоне осуществляется количественная оценка наблюдающихся в бассейне реки изменений стока и водного режима реки под влиянием хозяйственной деятельности человека. Во втором случае изучается водный, тепловой и при необходимости солевой балансы участков водосбора, на которых производится орошение или осушение и другие виды хозяйственной деятельности, а также участки русел рек, находящихся в зоне влияния депрессионных воронок, водозаборов, сбросов и т. п.

Первый способ можно условно назвать способом сравнения, а второй — балансовым. Способ сравнения позволяет определить результирующее влияние хозяйственной деятельности, ее направление и величину непосредственно на данном водосборе реки или в отдельных крупных районах. Правда, при этом требуется иметь пункты с длительным периодом наблюдения за стоком рек в естественных и нарушенных условиях.

Балансовый метод позволяет установить индивидуальное влияние конкретного фактора хозяйственной деятельности на речной сток, вскрыть физическую сущность этого процесса и определить его влияние в будущем. Использование балансового метода требует производства специальных трудоемких и длительных полевых исследований. К тому же, еще недостаточна точность определения отдельных элементов водного и теплового балансов (особенно подземной составляющей). Отсутствует опыт переноса локальных исследований (отдельные орошаемые массивы, опытные лога и небольшие водосборы) на большие территории и крупные речные бассейны. При этом, как отмечает И. А. Шикломанов [167], балансовые исследования производятся обычно на одном или нескольких небольших участках водосбора и могут не учитывать противоположных процессов, происходящих в других его частях, особенно если водосбор имеет большие размеры. Так, одновременно с развитием орошения может производиться осушение заболоченных участков поймы, уничтожение влаголюбивой растительности и пр. Все это может компенсировать безвозвратные потери воды при оро-

шении. Однако при локальных исследованиях подобные факты могут быть упущены. Особенно сложно производить обобщения на основе балансовых исследований для больших речных водосборов, на которых имеются крупные оросительные системы, расположенные в различных физико-географических условиях и обладающие неодинаковыми водохозяйственными характеристиками.

Таким образом, при количественной оценке влияния хозяйственной деятельности на сток рек в маловодный период целесообразно производить комплексные работы, учитывающие как данные балансовых исследований, так и величины, полученные при сравнении многолетних колебаний водности рек и динамики хозяйственного развития на водосборе.

Наиболее простым и довольно широко применяемым при использовании способа сравнения является метод восстановления естественного стока реки, находящейся в нарушенных условиях, по связи с рекой-аналогом, сток которой не испытал хозяйственного влияния. Сопоставляемые реки должны иметь достаточно длительный период одновременных наблюдений за стоком в нарушенных и ненарушенных условиях. Чем ближе условия формирования стока исследуемой реки и реки-аналога, тем надежнее полученные результаты. Определение характера влияния хозяйственной деятельности (положительное или отрицательное) и величины этого влияния возможно путем построения графиков связи между интегральными, последовательно суммированными значениями стока реки с нарушенным режимом и реки-аналога, как это было сделано, например, при исследовании нарушений стока под влиянием водопонизительных работ на территории КМА [65] и МАБ [159].

Построение графиков связи позволяет довольно легко выделить периоды естественного и нарушенного водного режима исследуемой реки. Период нарушений выделяется на графике связи как зона однозначного отклонения эмпирических точек от общего направления линии связи. Естественно, что связь исследуемой реки и реки-аналога в ненарушенный период должна иметь прямолинейный вид, иначе анализ значительно затрудняется. Применительно к низкому стоку рек подобный прием оценки изменения речного стока в период его нарушений является наиболее чувствительным, поскольку нарушения стока имеют обычно наибольший вес именно в меженный период. На рис. 58 показаны такие графики для рек Осколец (территория КМА) и Поли (территория МАБ), приведенные в вышеуказанных работах. Графики достаточно ясно показывают, что нарушение водного режима этих рек происходит в основном в меженный период, когда соотношение между величиной сбрасываемых в реку (Осколец) или забираемых из реки (Поля) вод и стоком реки является наибольшим. Время начала нарушений, выделяемое на этих графиках, совпадает с периодом

интенсификации хозяйственной деятельности в бассейнах рассматриваемых рек.

Определив соотношение стока (переходный коэффициент) исследуемой реки и реки-аналога в ненарушенный период, можно распространить его величину на период нарушений, что позволит установить величину естественного стока реки с нару-

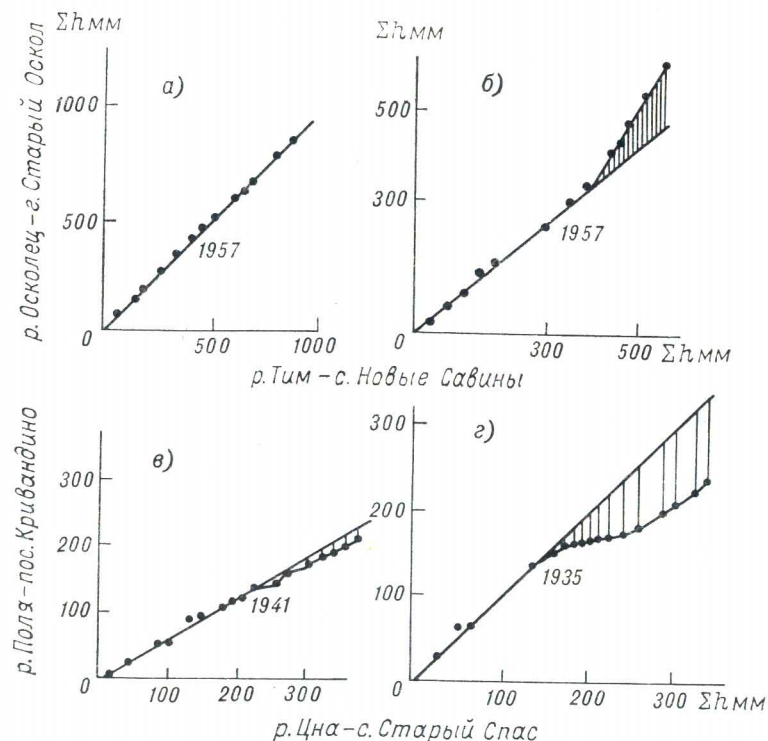


Рис. 58. Связь между интегральными суммами стока рек-аналогов и рек с нарушенным водным режимом для весеннего (а, в) и межженного (б, г) периодов.

шенным водным режимом, а следовательно, и саму величину нарушений.

Использование нескольких рек-аналогов (при величине парного коэффициента корреляции меньше 0,8) повышает точность оценки величины нарушений. При этом расчеты осуществляются с применением метода множественной линейной корреляции. Значения восстановленного стока рассчитываются по уравнению

$$Q_b = K_1 Q_{a_1} + K_2 Q_{a_2} + \dots + K_n Q_{a_n} \pm \Delta Q, \quad (22)$$

где Q_b — восстановленный сток реки с нарушенным водным режимом; Q_a — сток рек-аналогов при числе аналогов n ; ΔQ — разность между средними значениями стока исследуемой реки и рек-аналогов; K — коэффициент регрессии, устанавливаемый в зависимости от величины среднего квадратического отклонения стока восстанавливаемого пункта и пункта-аналога.

Использование интегральных кривых для оценки величины нарушений стока рек в результате воздействия на них хозяйственной деятельности позволяет определить лишь размеры общих нарушений, но не величину влияния каждого из антропогенных факторов. Поэтому наиболее целесообразно этот способ применять при явно выраженном одном виде влияния, например в зоне влияния депрессионной воронки, орошения или при четко выделяющихся зоне формирования стока, где водный режим является естественным, и зоне нарушений стока. Последнее использовано при исследованиях, осуществленных ГГИ в Средней Азии, Казахстане и на реках Северного Кавказа [167, 169], где сток формируется в горах (верховья рек), а используется на равнине (среднее и нижнее течение рек).

При оценке интегрального влияния комплекса хозяйственной деятельности на величину изменения стока рек Куры и Терека Шикломановым были использованы зависимости стока в замыкающем створе от величины притока воды из зоны формирования стока для частного бассейна, т. е. $Q_{зам} = f(Q_{пр})$ [168], а также от характеристики суммарного естественного притока с горной части водосбора для замыкающего створа, т. е. $\sum Q_{зам} = f(\sum (\sum Q_{пр}))$ [167]. Последняя зависимость, построенная для годового стока, показана на рис. 59. В бассейне р. Куры хозяйственная деятельность не оказывает заметного влияния на величину годового стока, поэтому зависимость имеет вид прямой линии. В бассейне р. Терека речные воды используются более интенсивно, поэтому отмечается прогрессирующее уменьшение величины годового стока в замыкающем створе, что отражается на характере зависимости, изменяющей свой угол наклона. Это изменение начинается с 1950—1951 гг., когда произошло интенсивное увеличение площади орошаемых земель в рассматриваемом бассейне реки.

Для восстановления нормы стока может быть использована разработанная автором и указанная в главе 5 зависимость расхода воды от площади бассейна реки $Q = f(F)$, построенная для районов, однородных по основным физико-географическим условиям формирования стока данного сезона. Подобный прием использован Б. С. Устюжаниным при оценке величины естественной нормы межженного (подземного) стока рек территории МАБ [160]. Пример такой зависимости, построенной в логарифмических координатах, для двух районов МАБ (бассейн р. Москвы и верхняя часть бассейна р. Оки) показан на рис. 60.

При достаточно тесном характере зависимости $Q=f(F)$ необходимые данные могут быть получены весьма быстро и про-

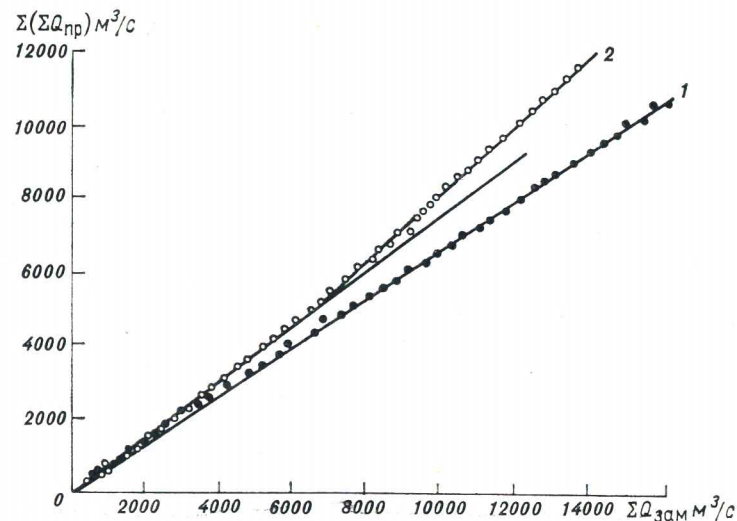


Рис. 59. Интегральные кривые связи стока в замыкающем створе $\Sigma Q_{\text{зам}}$ с суммарным естественным притоком с горной части водосбора $\Sigma(\Sigma Q_{\text{пр}})$.

1 — р. Кура — г. Мингечаур; 2 — р. Терек — ст-ца Каргалинская.

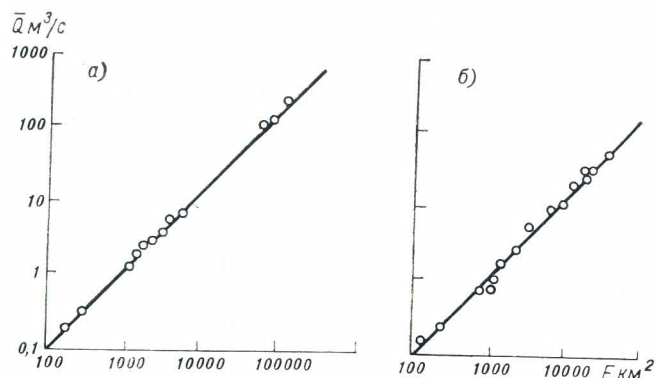


Рис. 60. Зависимость среднегодового расхода воды за меженный период от площади бассейна реки.

а — бассейн р. Москвы; б — верховья р. Оки.

стым путем. При этом применительно к маловодному периоду в полной мере используется осуществленное автором районирование территории СССР для расчета низкого стока малых рек (см. главу 5).

Для изучения локальных изменений естественного стока в результате нарушения его режима и выявления самостоятельной роли каждого влияющего фактора необходимы более детальные исследования с привлечением дополнительного объема информации как о климатических и гидрогеологических условиях, так и о динамике развития хозяйственной деятельности в зоне использования речного стока. Это возможно сделать как с привлечением метода линейной множественной корреляции, так и путем составления руслового водного баланса.

Метод множественной корреляции требует значительного объема счетных работ, поэтому расчеты обычно осуществляются на ЭВМ. Опыт его применения при оценке влияния хозяйственной деятельности на сток изложен в работе [167]. При большом числе факторов хозяйственной деятельности, каждый из которых влияет на сток относительно слабо, но в комплексе существенно, получить достаточно надежное уравнение регрессии чаще всего невозможно, тем более что используемые переменные могут иметь недостаточную точность и взаимно коррелироваться. К тому же, как отмечается в работах [21, 167] для надежной оценки роли каждого фактора в случае использования метода множественной корреляции число членов выборки должно превышать не менее чем в десять раз число независимых переменных. Об особенностях применения метода линейной множественной корреляции говорилось в главе 4.

Наиболее детально изменение речного стока по длине реки, происходящее в результате отбора и сброса вод, может быть определено при составлении руслового водного баланса. Правда, при этом в целях сбора наибольшей информации необходимо осуществить комплекс полевых работ, включающих сбор сведений об объеме хозяйственного использования речных вод и проведения гидрометрических съемок на исследуемых участках рек. Так, данные подобных съемок послужили основой для расчета баланса речных вод по участкам р. Осколец, находящимся в зоне влияния сбросов промышленных и дренажных вод Лебединского и Стойленского рудников, водозабора из реки, снижения питания реки подземными водами на краевых участках депрессии уровня подземных вод и фильтрации поверхностных вод через русло реки в зону депрессионной воронки на участке максимального снижения этого уровня [65]. Гидрометрическая съемка на изучаемом участке р. Осколец производилась в период отсутствия или чрезвычайно малых значений величины боковой приточности поверхностных вод, изменения запасов воды в русловой сети и величины испарения с водной поверхности, а также при отсутствии осадков. Применительно к поставленной задаче уравнение баланса речных вод для участка реки имело вид

$$Q_{\text{вх}} + \Sigma Q_{\text{сбр}} + Q_{\text{п.б}} - Q_{\text{вых}} - \Sigma Q_{\text{заб}} - Q_{\text{ф}} = 0, \quad (23)$$

где $Q_{\text{вх}}$ — приток речных вод через входной створ; $Q_{\text{вых}}$ — отток с участка через выходной створ; $\sum Q_{\text{сбр}}$, $\sum Q_{\text{заб}}$ — расходы сбросов и водозаборов; $Q_{\text{п.б}}$ — боковая приточность подземных вод; $Q_{\text{ф}}$ — фильтрация речных и сбросных вод из русла реки.

Составляющие уравнения водного баланса обычно меняются для разных территорий, определяясь характером хозяйственной деятельности. Так, для зоны орошения Куро-Араксинской низменности это уравнение будет иметь уже несколько иные составляющие [169]:

$$\sum Q_{\text{пр}} - Q + X - Z_{\text{нп}} = Q_{\text{хоз}} + Z_{\text{суш}}, \quad (24)$$

где $\sum Q_{\text{пр}}$ — поверхностный приток в зону орошения; Q — сток в замыкающем створе; X — осадки в зоне орошения; $Z_{\text{нп}}$ — непродуктивное испарение при разливах рек и транспирация влаголюбивой дикорастущей растительностью с заболоченных массивов; $Z_{\text{суш}}$ — испарение с неорошаемых (богарных) земель; $Q_{\text{хоз}}$ — безвозвратное водопотребление на хозяйственные нужды (орошение, обводнение, промышленно-коммунальное водопотребление).

Таким образом, влияние хозяйственной деятельности человека на режим и величину низкого стока рек проявляется весьма разносторонне и зависит от вида хозяйственной деятельности, климатических условий района и гидрологического режима рек, используемых в хозяйственных целях. Способы количественной оценки этого влияния разработаны еще недостаточно и требуют дальнейших исследований.

Глава 8

ПЕРЕСЫХАНИЕ И ПЕРЕМЕРЗАНИЕ РЕК

Прекращение стока в русле реки происходит в результате наличия определенного комплекса физико-географических условий, главными из которых являются климатические и гидро-геологические. Поэтому прекращение стока наблюдается либо на ограниченном числе рек, либо в определенных районах. Большое разнообразие физико-географических условий на территории СССР обуславливает значительный диапазон (по величине площади бассейна) рек, на которых наблюдается отсутствие стока в тот или иной период.

Сведения о возможности отсутствия стока как фактора, ограничивающего водопотребление, и продолжительности этого явления имеют весьма большое практическое значение. На реках СССР прекращение стока наблюдается в теплый и холодный периоды года, причем оно может происходить как эпизодически (в отдельные годы), так и ежегодно. В теплый период реки пересыхают вследствие истощения питающих их водоносных горизонтов, обычно обусловленного недостаточными запасами подземных вод, слабым пополнением их в весенне-летний сезон и интенсивным испарением, связанным с наличием большого дефицита влажности воздуха из-за длительного отсутствия осадков и наличия высоких температур воздуха. В случае отсутствия стокообразующих осадков в осенний сезон пересыхание реки может продлиться до зимнего сезона.

Перемерзание рек происходит в зимний сезон, когда весьма низкие температуры воздуха, наблюдающиеся очень продолжительное время, вызывают интенсивное охлаждение водных масс и промерзание почво-грунтов на большую глубину, обуславливающее резкое сокращение притока подземных вод и их быстрое истощение. В наиболее суровые годы может происходить полное промерзание всей водной толщи на большом протяжении. Следует отметить, что при перемерзании реки в ней нередко наблюдается сток выше и ниже места перемерзания, поскольку на указанном участке русловые воды переходят в подрусловые и затем опять выклиниваются в русло реки. В этом случае неправомерно говорить о полном истощении питающих реку водоносных горизонтов. Одним из видов

перемерзания рек является образование наледей, когда большая часть руслового стока выходит на поверхность льда.

Промерзание реки на больших участках связано, как правило, с прекращением поступления подземных вод в ее русло в связи с истощением или промерзанием водоносных горизонтов. Это наиболее характерно для рек, расположенных в зоне многолетней мерзлоты, где происходит смыкание верхнего промерзшего горизонта почвенно-грунтовой толщи с ниже расположенными мерзлыми породами. В этом случае прекращение стока наступает даже при достаточном летне-осеннем увлажнении почво-грунтов.

Прекращению стока в реке в засушливые годы способствует наличие поглощающего карста или мощных аллювиальных отложений в русле и долине реки, которые переводят поверхностные воды в подземные и подрусловые. Поэтому, несмотря на значительные запасы подземных вод, сток в русле может отсутствовать, так как поступающие к руслу воды поглощаются в приречной зоне (мощность аллювиальных отложений даже на малых реках иногда достигает десятков метров). Подтверждением этого является наличие подрусловых потоков на пересыхающих реках, например в Казахстане. На шести водотоках Кустанайской области, обследованных В. Е. Водогрецким [48], наблюдались расходы подрусловых вод до 136 м³/сутки. Правда, по этим же причинам сток в русле может сохраниться, если хорошо водопроницаемые породы гидравлически связаны с рекой и с более глубокими водоносными горизонтами, особенно содержащими напорные воды.

Значительное влияние на пересыхание и перемерзание оказывает хозяйственная деятельность человека в русле и на водосборе реки, особенно в зоне недостаточного увлажнения. Создание прудов и водохранилищ с глухими плотинами, обеспечивающими полный перехват стока в меженьный период, приводит к его прекращению на нижерасположенном участке реки. Чаще всего это наблюдается на малых реках, причем прекращение стока происходит обычно раньше, а возобновляется сток позже, чем на реках с естественным режимом. Так, в засушливые годы на притоках р. Шегарки (бассейн р. Оби), находящихся под влиянием искусственных сооружений, сток прекращается в летний сезон и начинается лишь весной. Увеличение количества земляных плотин на реках Обско-Иртышского междуречья с начала 60-х годов резко повысило число пересыхающих и перемерзающих рек и вызвало увеличение размеров (площадей бассейна) рек с отсутствием стока.

Прекращение стока в реке может произойти в результате работы водозаборных скважин в пойме реки, когда их производительность превышает величину речного стока и последний расходуется на фильтрацию к водозабору.

Пересыхание и перемерзание, будучи явлениями одного плана — отсутствия стока в русле реки, имеют существенное различие в генетическом отношении. При пересыхании сток в реке отсутствует вследствие истощения подземного питания реки, а при перемерзании — подземные воды могут сохраняться, но в зоне питания реки переходят в твердое состояние в результате промерзания почво-грунтов или образования наледей. Поэтому для возобновления стока в теплый сезон необходимо выпадение стокообразующих осадков, а в холодный сезон достаточно повышения температуры воздуха. Так, в верхней части бассейна Амура сток на перемерзающих (промерзающих) реках начинается при переходе среднесуточной температуры воздуха через -5°C в сторону повышения.

Сроки пересыхания и перемерзания рек в значительной мере определяются географическим положением водосбора, высотой местности, размерами речного бассейна. При средних климатических и сходных гидрогеологических условиях начало пересыхания рек раньше отмечается в более южных районах, расположенных в зоне недостаточного увлажнения. Окончание пересыхания наблюдается позже также в южных районах. Перемерзание рек раньше наступает на Крайнем Севере страны и в районах с резко континентальным климатом, поскольку определяющим в этом процессе является не только запас подземных вод, но и температура воздуха, осадки.

С повышением высоты водосбора увеличивается увлажненность территории, поэтому в теплый период вероятность пересыхания рек уменьшается. Однако в холодный период происходит более раннее и значительное понижение температуры воздуха, что способствует перемерзанию рек горных, особенно высокогорных районов.

Величина площади бассейна реки в сходных физико-географических условиях выступает как показатель водоносности реки, определяющей климатическими и гидрогеологическими факторами. Как отмечалось в главе 2, увеличение площади бассейна непосредственно связано с усилением дренирования рекой водоносных горизонтов при одновременном возрастании площади питания подземных вод. Однако интенсивность проявления этих закономерностей различна по территории и в значительной мере определяется увлажненностью данного района. По мере перехода от северных, увлажненных районов к южным, засушливым происходит уменьшение количества осадков, увеличение испарения и глубины залегания подземных вод, снижаются запасы воды в бассейне реки. В этих условиях постоянный сток наблюдается в бассейнах рек с большими площадями, чем в увлажненных районах. В последних могут вообще отсутствовать пересыхающие и перемерзающие реки. Следовательно, чем меньше площадь бассейна реки и меньше увлажненность территории, тем длительнее будет период

отсутствия стока. Эта же закономерность сохраняется и в случае перемерзания реки вследствие длительного наличия низких температур воздуха, поскольку чем меньше река, тем большее значение для ее питания имеют самые верхние водоносные горизонты, испытывающие наибольшее воздействие температур. Естественно, что эти закономерности нарушаются в случае питания рек глубокими трещинными, напорными или карстовыми водами.

Однако достаточно четкую закономерность между продолжительностью отсутствия стока на реке и величиной ее площади бассейна можно установить обычно лишь для ежегодно пересыхающих или перемерзающих рек. Причем анализ целесообразно производить по данным о средней или наибольшей продолжительности отсутствия стока, поскольку в этом случае

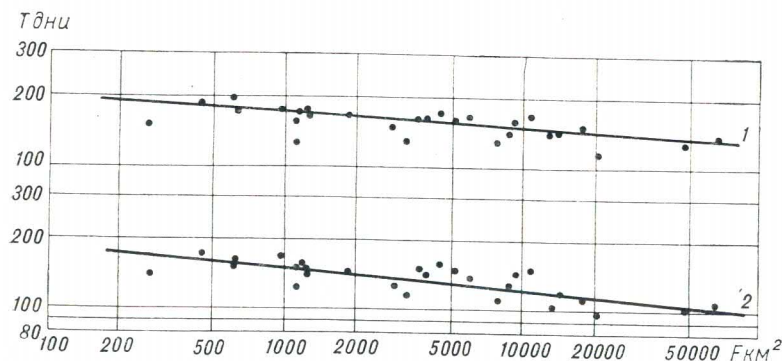


Рис. 61. Зависимость продолжительности ежегодного промерзания рек от размеров бассейна (бассейны рек Витим, Оленек).

Продолжительность промерзания; 1 — наибольшая, 2 — средняя.

рассматриваемый физический процесс более устойчив по территории, чем при оперировании данными о наименьшей продолжительности, когда влияние локальных условий сказывается в наибольшей мере. На рис. 61 показана зависимость продолжительности ежегодного промерзания рек бассейнов Витим и Оленек от размеров площади бассейна при различных условиях прекращения стока. В наиболее суровые годы отмечается наибольшая продолжительность промерзания рек при сохранении того же характера зависимости от площади бассейна, что и в годы со средними гидрометеорологическими условиями. Однако в менее суровые по климатическим условиям годы продолжительность промерзания резко сокращается и при этом изменяется характер ее зависимости от площади бассейна.

Эпизодическое отсутствие стока на реках в значительной мере обуславливается сугубо местными причинами, поэтому

анализ пространственного распределения явлений пересыхания и перемерзания рек только в маловодные годы показывает их большую пестроту как по продолжительности отсутствия стока, так и по размерам бассейна рек с временными перерывами в стоке. Более устойчивой характеристикой в распределении по территории является наибольшая продолжительность эпизодического отсутствия стока. Она отмечается в самые засушливые или морозные годы и охватывает значительные территории.

Сложность взаимодействия гидрометеорологических процессов, вызывающих пересыхание или перемерзание рек, иногда обуславливает отсутствие функциональной зависимости между характером воздействия климатических факторов и его результатами. Поэтому не всегда, например, длительное отсутствие осадков и высокие температуры воздуха могут привести к пересыханию рек. Так, летний сезон 1972 г. на ЕТС отличался исключительно малым количеством осадков и высокими температурами воздуха. В центральных областях ЕТС в июле—августе температура воздуха превышала норму на 5—6°С, а осадков выпало лишь 15—20% нормы. Необычайно жаркая и сухая погода обусловила отсутствие поверхностного питания рек и повлияла на величину подземного стока в реки, приведя к образованию длительной и устойчивой межени. Однако, благодаря значительным запасам подземных вод в районах, подвергнувшихся засухе, пересыхание рек наблюдалось не столь широко, как этого можно было ожидать. Анализ данных о стоке рек в 1300 пунктах показал, что пересыхание части рек на период от нескольких суток до месяца и более происходило лишь в бассейне оз. Ильмень, в среднем течении р. Оки, в низовьях р. Камы, в бассейнах рек Мокши, Хопра и, конечно, на юге и юго-востоке ЕТС, где ежегодно пересыхают реки. Величина площади бассейна пересохших рек была весьма различной. На Северо-Западе ЕТС пересохли некоторые реки с площадью бассейна 10—300 км², в центральных районах — 500—2000 км², в низовьях р. Камы — до 200 км². На юге ЕТС наблюдалось отсутствие стока почти на всех реках с площадью бассейна до 1500—2500 км², а в Прикаспии — до 8000 км² [44].

Подобное разнообразие условий эпизодического прекращения стока затрудняет производство обобщений количественных характеристик пересыхания или перемерзания рек.

Для решения практических задач основное значение имеют сведения о возможности перерывов в стоке рек и длительности этого перерыва. При наличии наблюдений установить возможность пересыхания или перемерзания реки и их повторяемость не представляет труда, однако длительность этих явлений может быть весьма различной. Так, за 17 лет наблюдений на р. Чульман у пос. Чульман перемерзание отмечалось в 11-ти годах и имело продолжительность 24—127 дней. На р. Витиме у п. Еленинского в течение 20 лет отмечается промерзание реки

на 87—170 дней, на р. Мархе у с. Малыкай перемерзание наблюдалось в 4-х годах из 27 и имело продолжительность от 16 до 174 дней. Таким образом, встает вопрос об определении расчетной продолжительности пересыхания или перемерзания реки, поскольку вариация продолжительности может быть весьма большой: она изменяется в 3—6 раз для рек с ежегодными перерывами в стоке и в 10 раз и более для эпизодически перемерзающих и пересыхающих рек. В подобных случаях величина средней продолжительности прекращения стока будет весьма относительно характеризовать явление.

В зависимости от поставленных практических задач и повторяемости периодов отсутствия стока (ежегодно или эпизодически) продолжительность этих периодов можно установить, применяя кривые обеспеченности или с помощью расчетных уравнений. При ежегодном пересыхании (перемерзании) реки возможно построение эмпирических кривых обеспеченности по данным о длительности пересыхания или перемерзания (промерзания) за каждый год. В этом случае наименьшая продолжительность периода с отсутствием стока будет соответствовать менее суровым гидрометеорологическим условиям, а наибольшая — самому засушливому (морозному) сезону. Поэтому фактические данные должны располагаться в возрастающем порядке, а построение эмпирической кривой обеспеченности целесообразно осуществлять аналогично построению кривой обеспеченности продолжительности меженного периода, т. е. с использованием величины, обратной значению продолжительности отсутствия стока (см. раздел 3.4). На рис. 62 приводится пример построения таких кривых. Расчетную обеспеченность целесообразно назначать в зависимости от важности проекта и в соответствии с величиной обеспеченности расчетных характеристик меженного (или минимального) стока.

Для рек с эпизодическим отсутствием стока в расчетах целесообразно применять наибольшие величины продолжительности пересыхания или перемерзания, но с учетом реальных условий практического использования реки, например принимать за расчетный естественный год (точнее сезон) в данном ранжированном по меженному (или минимальному) стоку ряду, соответствующий или наиболее близкий расчетной обеспеченности рассматриваемой стоковой характеристики. Естественно, что речь идет о диапазоне больших обеспеченностей, соответствующих событиям редкой повторяемости.

При отсутствии наблюдений возможность перерыва в стоке реки устанавливается по данным полевых обследований, включающих опрос местных жителей, или расчетным путем. В последнем случае используется уравнение (17), в котором параметр f (при его отрицательном значении) характеризует площадь с ежегодным отсутствием стока. Следовательно, если величина площади бассейна реки находится в пределах значе-

ния f для данного района, то на ней постоянно происходит перерыв в стоке. При f , равном нулю, т. е. когда сток может отсутствовать на очень малых реках, производится дополнительный расчет: в формуле (17) подбирается площадь бассейна, при которой величина минимального расхода воды не превышает 1 л/с. При использовании этой формулы необходимо сделать следующее допущение: при расходе воды, равном или меньшем 1 л/с, считается, что сток в реке отсутствует

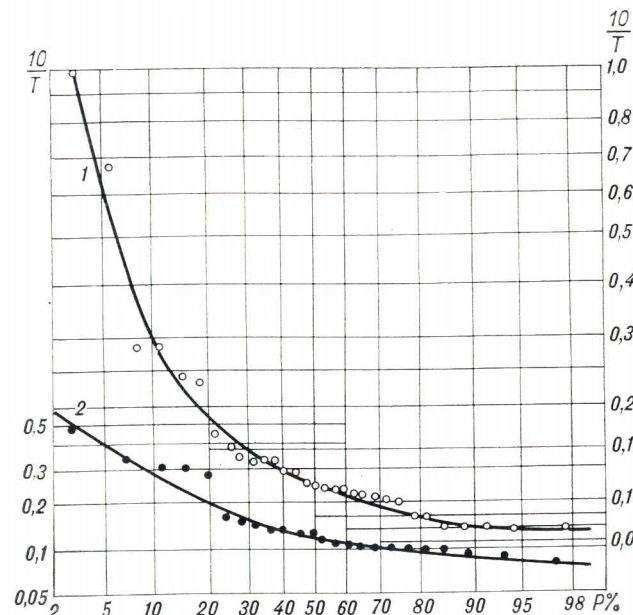


Рис. 62. Кривые обеспеченности продолжительности промерзания для рек Джабай у с. Атбасар (1) и Ишим у г. Целинограда (2).

и она принимается за пересыхающую или перемерзающую, если соответствующая этому расходу воды площадь бассейна не меньше 10 км² (меньшая величина не оправдывается точностью расчета, обеспечиваемой данным методом). Таким образом, если в данном районе расход воды превышает 1 л/с при площади бассейна 10 км², то река считается непересыхающей или неперемерзающей. Подобные расчеты целесообразны лишь для рек с площадью бассейна меньше 100 км², поскольку при расходе воды 1 л/с и модуле 0,01 л/(с·км²), имеющем практическое значение, по известной формуле модуля стока после ее преобразования относительно площади бассейна получим соответствующую этим наименьшим величинам стока вышеуказанную площадь. Следовательно, при больших размерах площади

бассейна и значении модуля стока, превышающем $0,01 \text{ л/(с} \cdot \text{км}^2)$, величина расхода воды будет практически значимой, т. е. явление отсутствия стока не будет наблюдаться.

Анализ распределения по территории явлений пересыхания и перемерзания (промерзания) рек показывает, что систематическое отсутствие стока на части рек в летний сезон наблюдается только в зоне недостаточного увлажнения. В зимний сезон малые реки постоянно перемерзают на территории с устойчивыми зимами, отличающимися весьма продолжительным периодом с низкими температурами воздуха.

На ЕТС ежегодно пересыхают реки в тех районах, где величина минимального 30-дневного стока средних рек не превышает $0,1\text{--}0,2 \text{ л/(с} \cdot \text{км}^2)$. Размеры бассейна пересыхающих рек в среднем по району составляют $200\text{--}500 \text{ км}^2$, увеличиваясь до $5000\text{--}10000 \text{ км}^2$ в бассейнах Нижней Волги, Урала, Кумы, где в летний сезон сток на малых реках вообще отсутствует. В маловодные годы указанные величины площадей с отсутствием стока могут значительно увеличиваться.

На территории Западно-Сибирской низменности систематически пересыхают реки в районах, где величина минимального 30-дневного стока не превышает $0,5 \text{ л/(с} \cdot \text{км}^2)$. Только в юго-восточной части низменности наблюдается пересыхание части рек с площадью бассейна, равной в среднем 200 км^2 , при обводненности территории до $3 \text{ л/(с} \cdot \text{км}^2)$. В Северном Казахстане постоянно пересыхают реки с площадью бассейна около $900\text{--}1000 \text{ км}^2$. Далее к югу эта величина возрастает до 10000 км^2 .

Еще одна обширная территория с наличием систематически пересыхающих рек с площадью бассейна до $150\text{--}300 \text{ км}^2$ находится в Центральной Якутии в бассейнах рек Вилюя, Средней Лены и Алдана, где величина минимального 30-дневного стока не превышает $2 \text{ л/(с} \cdot \text{км}^2)$. На рис. 63 показаны районы с различным характером пересыхания рек.

В зимний сезон перемерзание (промерзание) рек наблюдается в основном в тех же районах, в которых в летний сезон реки пересыхают. Это в известной мере связано с тем, что отсутствие значительного увлажнения территории в летне-осенний сезон приводит к быстрому истощению стока в зимний сезон. На юго-востоке ЕТС перемерзание отмечается на реках с площадью бассейна от $300\text{--}500$ до 1000 км^2 . В северных и центральных районах Казахстана, как и в летний сезон, прекращается сток на реках с площадью бассейна до 5000 км^2 . Районы с постоянным перемерзанием части рек в зимний сезон, имеющиеся на юго-западе Западной Сибири, в основном совпадают с районами, в которых наблюдается пересыхание рек в летний сезон. Перемерзание характерно здесь для рек с площадью бассейна до $500\text{--}900 \text{ км}^2$. На севере и северо-востоке Западной Сибири, в Восточной Сибири и на Северо-

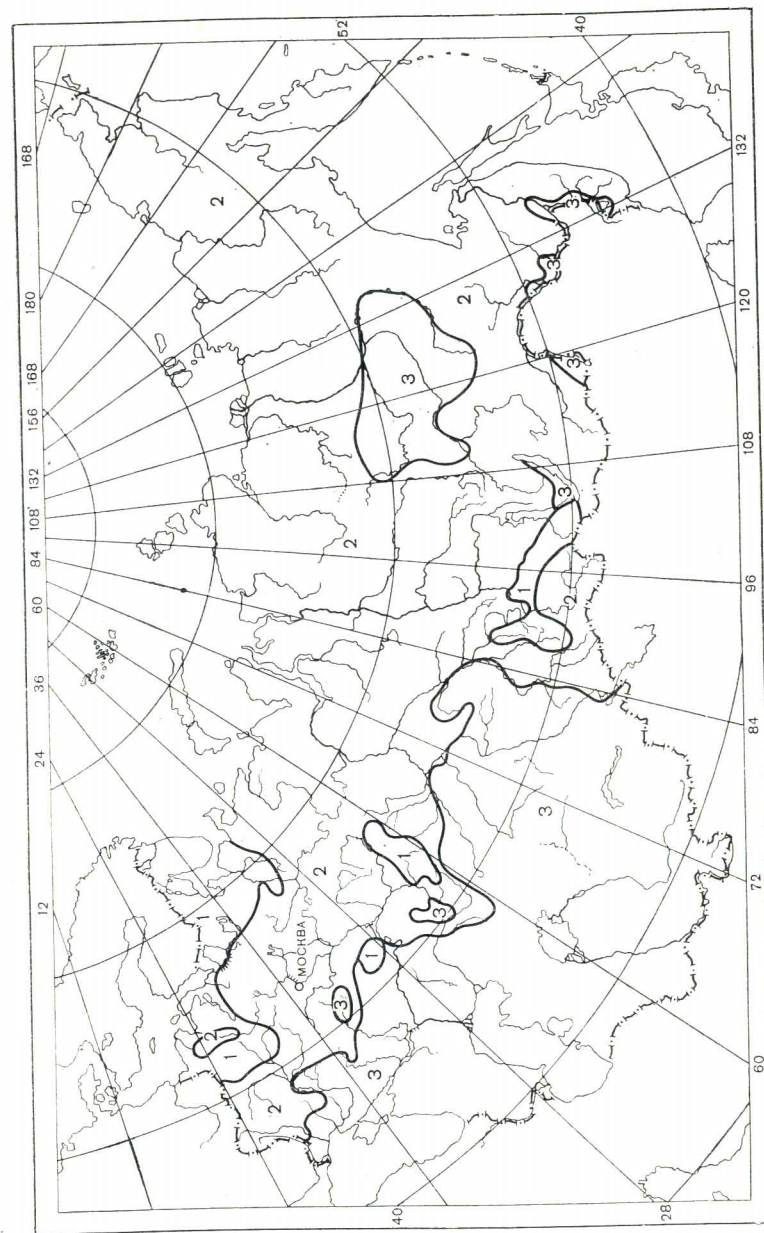


Рис. 63. Карта районов с наличием явлений пересыхания рек в летне-осенний сезон.

Районы: 1 — с отсутствием явлений пересыхания рек, 2 — с наличием эпизодически пересыхающих малых рек, 3 — с постоянным пересыханием части малых рек и эпизодическим пересыханием некоторых средних рек.

Востоке СССР реки с площадью бассейна до 5000 км², как правило, не имеют стока в зимний сезон, причем весьма длительное время. Это связано с особенностями территории — наличием многолетней мерзлоты и длительным стоянием низких температур воздуха при небольшом количестве зимних осадков. На рис. 64 показаны районы с постоянным и эпизодическим перемерзанием части рек в зимний сезон.

Эпизодическое перемерзание рек, равно как и пересыхание, развито на значительно больших пространствах. К тому же, оно наблюдается на реках, имеющих размеры бассейна, намного превышающие те, на которых постоянно отсутствует сток. Правда, поскольку эпизодическое пересыхание или перемерзание рек происходит в наиболее маловодные годы, то длительность перерыва в их стоке обычно значительно меньше, чем у постоянно пересыхающих или перемерзающих рек. Размеры бассейнов рек с эпизодическим отсутствием стока могут быть весьма различны и определяются климатическими и гидрогеологическими условиями данного района, а также метеорологическими условиями конкретного сезона. Так, в бассейне р. Шилки систематически промерзают реки с площадью бассейна до 5000 км², а эпизодическое перемерзание было отмечено для реки с площадью бассейна 175 000 км². Постоянного пересыхания рек на этой территории не наблюдается, но в отдельные годы сток прекращается на реках с площадью бассейна около 4000 км². Еще большая разница в размерах бассейнов постоянно и эпизодически перемерзающих рек существует в северных районах зоны многолетней мерзлоты. Там постоянно перемерзают реки с площадью бассейна до 5000 км², а в особо морозные сезоны сток прекращается на реках, имеющих площадь бассейна до 200 000 км² и более: на р. Оленек (181 000 км²) из 12 лет наблюдений сток прекращался два раза на 25 и 31 день, а р. Яна (216 000 км²) за 30 лет перемерзала 8 раз на период от 20 до 82 дней.

Естественно, что подобное разнообразие в продолжительности отсутствия стока и размерах рек, а также недостаточная длительность наблюдений за стоком и малое количество пунктов наблюдений, особенно в северных и восточных районах СССР, значительно осложняют обобщение данных об эпизодических перерывах в стоке рек.

Поскольку не только само явление отсутствия стока, но и его продолжительность зависят от водности реки, то существует определенная связь между среднемноголетней величиной стока за маловодный период и длительностью его отсутствия в отдельные годы. Для практических расчетов целесообразно использовать связь продолжительности пересыхания или перемерзания рек данного однородного по гидрогеологическим и климатическим условиям района с величиной минимального 30-дневного модуля стока соответствующего сезона или величи-

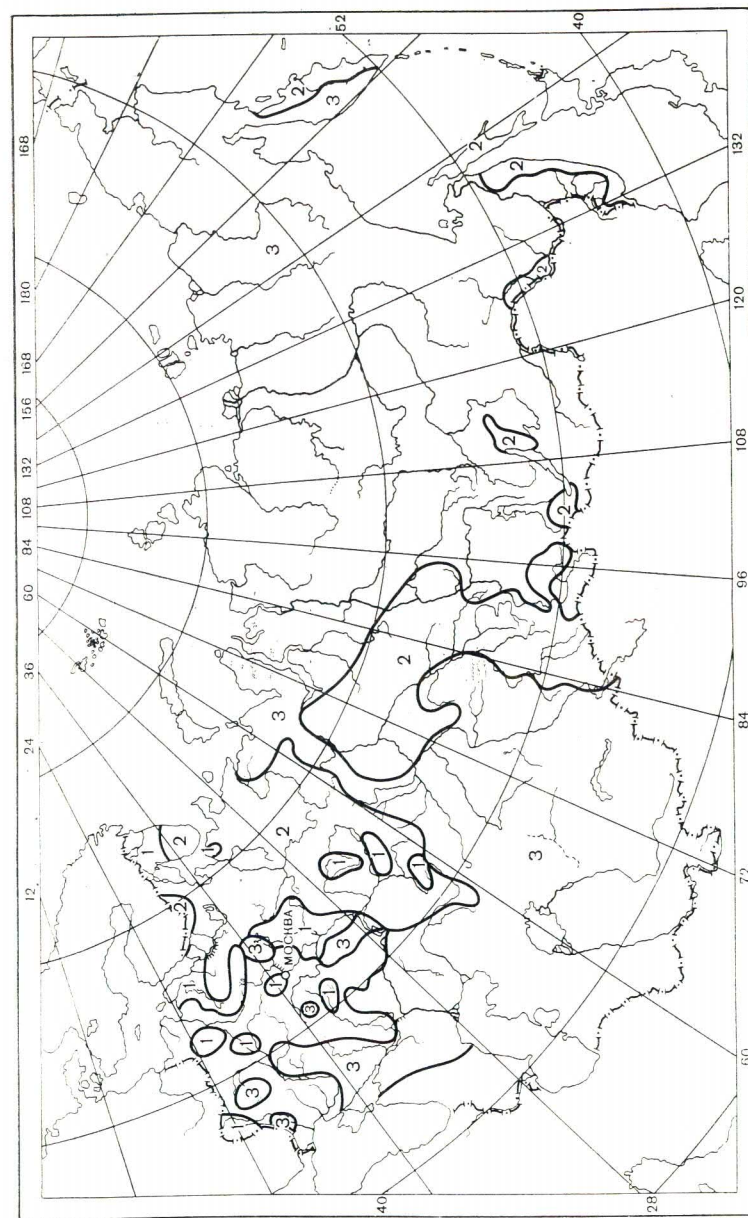


Рис. 64. Карта районов с наличием явлений перемерзания рек в зимний сезон.

Районы: 1 — с отсутствием явлений перемерзания рек, 2 — с наличием эпизодически перемерзающих рек, 3 — с постоянным перемерзанием части малых рек и эпизодическим перемерзанием некоторых средних рек.

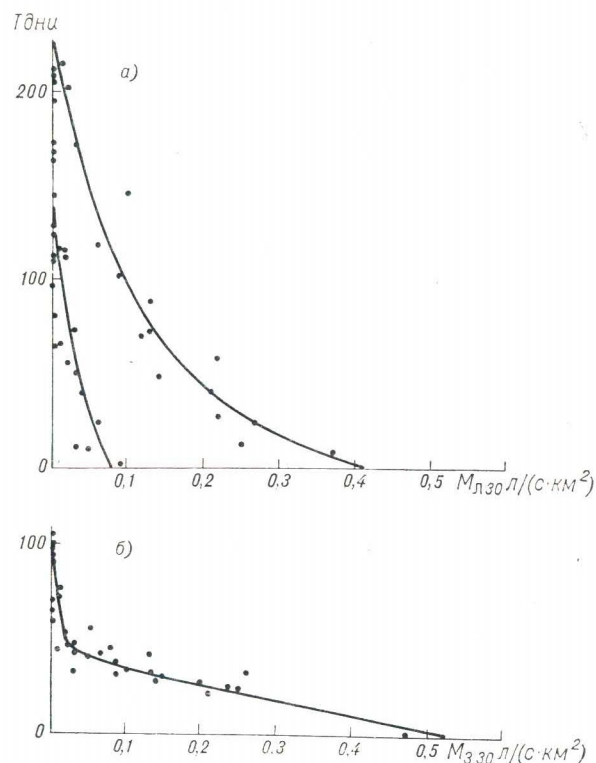


Рис. 65. Зависимость продолжительности эпизодического отсутствия стока от модуля минимального 30-дневного стока в летне-осенний (а) и зимний (б) сезоны для рек бассейна Дона.

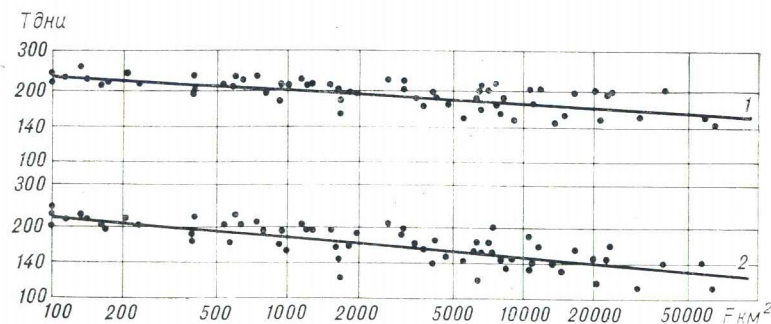


Рис. 66. Зависимость наибольшей (1) и средней (2) продолжительности ежегодного промерзания рек от площади бассейна для рек Якутии.

ной меженного стока (при длительном отсутствии стока). Известно, что чем меньше сток, тем больше вероятность его прекращения, при этом длительность отсутствия стока обратно пропорциональна его величине. На рис. 65 показаны зависимости, связывающие среднюю продолжительность отсутствия стока в отдельные годы за период наблюдений с величиной модуля минимального 30-дневного стока за этот же период эпизодически пересыхающих и промерзающих рек бассейна Дона. Подобные зависимости описываются уравнением вида

$$T_{\text{ср}} = b M_{\text{мин}}^{-n},$$

где $T_{\text{ср}}$ — средняя продолжительность промерзания или пересыхания реки; $M_{\text{мин}}$ — модуль минимального 30-дневного (или меженного) стока реки с эпизодическими явлениями отсутствия стока; b, n — районные параметры, характеризующие условия отсутствия стока.

Для определения продолжительности отсутствия стока на ежегодно пересыхающих или промерзающих реках может быть использована зависимость продолжительности отсутствия стока в тот или иной сезон от площади бассейна реки, построенная для районов со сходными условиями истощения речного стока. Эта зависимость имеет гиперболический вид, поскольку, как уже отмечалось, с увеличением размеров реки уменьшается период отсутствия стока на ней. Расчетное уравнение имеет вид

$$T = c F^{-m},$$

где T — продолжительность пересыхания или промерзания реки; F — площадь бассейна реки; c, m — районные параметры, характеризующие интенсивность промерзания рек.

Построение указанной зависимости осуществляется как по данным о средних, так и о наибольших величинах продолжительности пересыхания и промерзания рек. При этом, как правило, более тесная связь наблюдается при использовании величин наибольшей продолжительности отсутствия стока. На рис. 66 показан пример такой зависимости для рек Якутии.

При построении зависимостей продолжительности отсутствия стока от величины модуля стока или площади бассейна реки отдельные точки могут значительно отклоняться от общего направления как вследствие влияния местных природных особенностей, указанных выше, так и в результате разбора воды на орошение, водоснабжение (увеличение продолжительности) или сбросов промышленных и шахтных вод (уменьшение продолжительности).

Заключение

В настоящей работе впервые в обобщенном виде рассмотрен столь обширный вопрос, как исследование условий формирования низкого стока рек, его расчет и оценка качества воды в маловодный период, осуществляемые с учетом влияния хозяйственной деятельности человека. Естественно, что достаточно полно осветить все затронутые вопросы не представилось возможным ввиду их обширности, тем более что многие из них находятся в начальной стадии изучения.

Можно отметить, что в настоящее время наиболее исследованы как в отношении условий формирования, так и определения временных и расчетных характеристик минимальный и лимитирующий сток. Однако желательно дальнейшее усовершенствование существующих методов их расчета, главным образом в отношении уточнения локальных значений расчетных параметров и коэффициентов на основе привлечения дополнительного материала по мере его накопления, особенно для слабоизученных районов Севера и Северо-Востока СССР.

Большого внимания требуют вопросы оценки качества воды в межень для неизученных рек в связи с ее малым количеством и влиянием сточных вод. Практически они находятся еще в начальной стадии изучения и могут быть решены лишь совместными усилиями исследователей различных отраслей науки (гидрологами, гидрохимиками, гидробиологами, гидроинженерами). В аналогичном состоянии находятся вопросы учета влияния хозяйственной деятельности человека на количество и качество воды рек в маловодный период года, хотя определенные работы в этом направлении уже ведутся.

Исследования низкого стока рек — один из важнейших разделов проблемы взаимодействия общества и природы. С развитием общества все в большей степени обостряются вопросы его водообеспечения. Наиболее остро они встают в маловодный период, когда естественный сток рек резко уменьшается на длительное время. Количество природных вод, пригодных к употреблению, лимитирует экономическое развитие не только отдельных районов, но и целых областей. Недостаток воды снижает эффективность производства многих отраслей народного

хозяйства, а ее неудовлетворительное качество непосредственно отражается на здоровье человека. Поэтому весьма актуально не только изучение низкого стока рек, но и их охрана в период маловодья от загрязнения, засорения и истощения. Последнее требует интенсивных исследований в различных научных направлениях.

Комплексное решение проблемы обеспечения водой необходимого качества всех отраслей народного хозяйства позволит значительно повысить производство общественного продукта. Чем полнее будут исследованы вопросы расчета низкого стока рек с учетом качества воды и влияния хозяйственной деятельности человека, тем лучше и надежнее будет обеспечено народное хозяйство данными о необходимых ему характеристиках стока в наиболее напряженный по водности период года, потребности в которых с каждым годом возрастают.

Характеристика меженных периодов

Год	Зимний период									
	начало	число дней от даты отсчета D_H (1/X)	конец	число дней от даты отсчета D_K (30/IV)	продолжительность T дни	средний расход воды $Q_{ср}$ м ³ /с	$Q_{ср}$ в убывающем порядке	T в возрастающем порядке	$1/T$	D_K в убывающем порядке
1928	—	—	—	—	—	—	19,6	21	0,048	93
1929	5/I	96	16/IV	14	102	—	16,3	30	0,033	70
1930	3/I	94	18/III	53	65	—	15,9	41	0,024	60
1931	14/I	105	15/IV	15	92	—	15,8	47	0,021	60
1932	1/II	123	2/IV	28	62	—	14,8	47	0,021	56
1933	26/I	117	18/III	43	52	—	14,2	52	0,019	53
1934	18/XII	78	15/III	46	88	—	12,9	62	0,016	53
1935	2/XI	32	19/II	70	110	—	11,4	65	0,015	48
1936	13/VII	73	1/III	60	80	—	10,6	79	0,013	46
1937	1/II	123	13/III	48	41	7,44	10,4	80	0,012	43
1938	18/XI	48	8/III	53	111	6,68	9,31	88	0,011	42
1939	12/XII	72	27/I	93	47	2,46	9,16	92	0,011	41
1945	—	—	—	—	—	—	9,00	94	0,011	40
1946	1/I	92	20/III	41	79	9,00	8,49	102	0,011	39
1947	3/XII	63	19/III	42	107	4,60	8,42	105	0,0095	39
1948	1/XI	31	30/III	31	151	16,3	8,26	107	0,0093	38
1949	22/XII	82	21/III	40	120	12,9	8,18	107	0,0093	37
1952	3/I	94	4/IV	26	94	4,42	7,44	110	0,0090	36
1953	21/II	143	22/III	39	30	11,4	7,37	110	0,0090	35
1954	8/XII	68	22/III	39	105	9,31	7,08	111	0,0090	34
1955	27/XI	57	7/IV	23	131	14,8	6,68	120	0,0083	32
1956	1/XII	61	15/IV	15	137	7,08	6,20	120	0,0083	31
1957	18/XI	48	8/XII	—	—	—	—	—	—	—
1958	2/I	109	27/III	34	107	14,2	4,60	125	0,0080	28
1959	18/I	109	5/III	56	47	15,8	4,42	127	0,0078	26
1960	20/XI	50	24/III	37	125	19,6	3,17	131	0,0076	26
1960	24/X	23	23/III	38	152	3,17	2,46	137	0,0072	25
1961	9/II	131	1/III	60	21	10,6	—	138	0,0072	23
1962	15/XI	45	5/IV	25	142	15,9	—	139	0,0071	20
1963	26/XII	86	14/IV	16	110	9,16	—	142	0,0070	18
1964	24/XI	54	10/IV	20	139	6,20	—	146	0,0068	18
1965	8/XI	38	12/IV	18	157	8,18	—	151	0,0066	16
1966	12/XI	42	29/III	32	138	10,4	—	152	0,0065	15
1967	1/XI	31	26/III	35	146	7,37	—	157	0,0063	15
1968	26/XI	56	25/III	36	120	8,42	—	166	0,0060	14
1969	29/X	28	12/IV	18	166	8,26	—	—	—	—
1970	29/XI	59	4/IV	26	127	8,49	—	—	—	—

на р. Ловати у г. Великие Луки

Год	Летне-осенний период									
	начало	число дней от даты отсчета D_H (1/V)	конец	число дней от даты отсчета D_K (31/XII)	продолжительность T дни	средний расход воды $Q_{ср}$ м ³ /с	$Q_{ср}$ в убывающем порядке	T в возрастающем порядке	$1/T$	D_K в убывающем порядке
1928	17/VII	77	9/XI	52	116	—	24,1	13	0,077	181
1929	23/VI	53	7/VII	24	168	—	11,9	40	0,025	165
1930	27/V	26	19/VII	160	54	—	9,32	43	0,023	135
1931	24/VI	54	22/X	70	121	—	9,05	47	0,021	131
1932	1/VIII	92	3/X	89	64	—	8,67	54	0,018	130
1933	24/VI	54	23/VIII	130	61	—	8,51	61	0,016	125
1934	20/IX	142	1/XI	60	43	—	8,50	63	0,016	121
1935	3/VII	63	19/X	73	109	—	7,81	64	0,016	114
1936	5/VI	35	20/X	72	138	4,66	7,43	71	0,014	113
1937	10/VI	40	14/XI	47	158	4,18	7,27	71	0,014	103
1938	8/VI	38	11/XI	50	157	3,32	7,23	72	0,014	89
1939	16/VII	76	22/XI	39	130	1,50	7,12	84	0,012	83
1945	21/VI	51	3/VII	181	13	5,84	6,61	93	0,011	82
1946	19/VI	49	19/IX	103	93	6,57	6,57	107	0,0093	73
1947	16/VII	76	30/X	62	107	6,10	6,29	109	0,0091	73
1948	14/VI	44	19/X	73	128	6,29	6,18	109	0,0091	72
1949	11/VI	41	23/X	69	135	8,50	6,10	114	0,0087	70
1952	23/VI	53	1/IX	121	71	3,31	5,99	116	0,0086	69
1953	23/VII	83	8/IX	114	47	9,32	5,87	121	0,0082	69
1954	19/VI	49	28/VIII	125	71	6,18	5,84	124	0,0080	65
1955	11/VII	71	27/X	65	109	7,43	5,47	125	0,0080	64
1956	9/VII	69	9/IX	113	63	8,67	4,66	128	0,0078	62
1957	14/VII	74	22/VIII	131	40	11,9	4,18	130	0,0076	61
1958	19/VII	79	10/X	82	84	7,23	3,98	135	0,0074	60
1959	21/VI	51	23/X	69	125	3,80	3,80	138	0,0072	59
1960	18/VI	48	9/X	83	114	9,05	3,32	140	0,0071	54
1961	8/VI	38	18/III	135	72	8,51	3,41	143	0,0069	52
1962	8/VI	38	12/XI	49	158	24,1	1,50	145	0,0068	50
1963	11/VI	41	23/XI	38	166	6,61	—	150	0,0066	50
1964	11/VI	41	7/XI	54	150	3,98	—	157	0,0063	49
1965	11/VII	71	11/XI	50	124	7,81	—	158	0,0063	47
1966	11/VI	41	31/X	61	143	7,12	—	158	0,0063	39
1967	1/VI	31	25/XI	36	178	5,47	—	160	0,0062	38
1968	11/VI	41	28/X	64	140	7,27	—	166	0,0060	36
1969	22/VI	52	28/XI	31	160	5,99	—	168	0,0059	31
1970	10/VI	40	2/XI	59	145	5,87	—	178	0,0056	24

Значения коэффициентов асимметрии C_s и скошенности S для биномиальной и логарифмически-нормальной кривых
обеспеченности

C_s	Отклонения ординат кривой обеспеченности													
	относительные							нормированные						
	$\Phi 5\%$	$\Phi 10\%$	$\Phi 20\%$	$\Phi 50\%$	$\Phi 80\%$	$\Phi 90\%$	$\Phi 95\%$	$\psi 5\%$	$\psi 10\%$	$\psi 20\%$	$\psi 50\%$	$\psi 80\%$	$\psi 90\%$	$\psi 95\%$
0,0	1,64	1,28	0,84	0,00	-0,84	-1,28	-1,64	1,64	1,28	0,84	-0,00	-0,84	-1,37	-1,64
0,1	1,67	1,29	0,84	-0,02	-0,85	-1,27	-1,61	1,67	1,30	0,84	-0,02	-0,85	-1,36	-1,62
0,2	1,70	1,30	0,83	-0,03	-0,85	-1,26	-1,58	1,70	1,31	0,83	-0,04	-0,85	-1,34	-1,59
0,3	1,72	1,31	0,82	-0,05	-0,85	-1,24	-1,55	1,72	1,32	0,82	-0,06	-0,85	-1,31	-1,56
0,4	1,75	1,32	0,82	-0,07	-0,85	-1,23	-1,52	1,75	1,32	0,81	-0,07	-0,85	-1,30	-1,53
0,5	1,77	1,32	0,81	-0,08	-0,85	-1,22	-1,49	1,77	1,33	0,80	-0,09	-0,85	-1,28	-1,49
0,6	1,80	1,33	0,80	-0,10	-0,85	-1,20	-1,45	1,79	1,33	0,79	-0,10	-0,85	-1,26	-1,46
0,7	1,82	1,33	0,79	-0,12	-0,85	-1,18	-1,42	1,81	1,33	0,78	-0,11	-0,85	-1,24	-1,43
0,8	1,84	1,34	0,78	-0,13	-0,86	-1,17	-1,38	1,82	1,32	0,77	-0,13	-0,84	-1,21	-1,40
0,9	1,86	1,34	0,77	-0,15	-0,85	-1,15	-1,35	1,84	1,32	0,76	-0,14	-0,84	-1,19	-1,37
1,0	1,88	1,34	0,76	-0,16	-0,85	-1,13	-1,32	1,85	1,31	0,75	-0,15	-0,84	-1,17	-1,34
1,1	1,89	1,34	0,74	-0,18	-0,85	-1,10	-1,28	1,86	1,31	0,73	-0,16	-0,83	-1,15	-1,31
1,2	1,91	1,34	0,73	-0,19	-0,84	-1,08	-1,24	1,87	1,31	0,72	-0,17	-0,82	-1,13	-1,29
1,3	1,92	1,34	0,72	-0,21	-0,84	-1,06	-1,20	1,88	1,30	0,71	-0,18	-0,82	-1,11	-1,26

1,4	1,94	1,34	0,71	-0,22	-0,83	-1,04	-1,17	1,88	1,30	0,69	-0,19	-0,81	-1,09	-1,23
1,5	1,95	1,33	0,69	-0,24	-0,82	-1,02	-1,13	1,89	1,29	0,68	-0,20	-0,81	-1,08	-1,21
1,6	1,96	1,33	0,68	-0,25	-0,81	-0,99	-1,10	1,89	1,28	0,67	-0,21	-0,80	-1,05	-1,18
1,7	1,97	1,32	0,66	-0,27	-0,81	-0,97	-1,06	1,89	1,28	0,65	-0,22	-0,79	-1,04	-1,16
1,8	1,98	1,32	0,64	-0,28	-0,80	-0,94	-1,02	1,89	1,27	0,64	-0,22	-0,78	-1,02	-1,14
1,9	1,99	1,31	0,63	-0,29	-0,79	-0,92	-0,98	1,89	1,26	0,63	-0,23	-0,78	-1,01	-1,12
2,0	2,00	1,30	0,61	-0,31	-0,78	-0,90	-0,95	1,89	1,25	0,61	-0,24	-0,77	-0,99	-1,10
2,1	2,01	1,29	0,59	-0,32	-0,76	-0,87	-0,91	1,89	1,24	0,60	-0,24	-0,76	-0,97	-1,08
2,2	2,02	1,27	0,57	-0,33	-0,75	-0,84	-0,88	1,89	1,23	0,59	-0,25	-0,76	-0,96	-1,06
2,3	2,01	1,26	0,55	-0,34	-0,74	-0,82	-0,85	1,88	1,23	0,58	-0,25	-0,75	-0,94	-1,04
2,4	2,00	1,25	0,52	-0,35	-0,72	-0,79	-0,82	1,88	1,21	0,57	-0,26	-0,74	-0,93	-1,02
2,5	2,00	1,23	0,50	-0,36	-0,71	-0,77	-0,79	1,88	1,20	0,56	-0,26	-0,74	-0,91	-1,00
2,6	2,00	1,21	0,48	-0,37	-0,70	-0,75	-0,76	1,87	1,19	0,55	-0,26	-0,73	-0,90	-0,99
2,7	2,00	1,19	0,46	-0,38	-0,68	-0,72	-0,74	1,87	1,18	0,54	-0,27	-0,72	-0,89	-0,97
2,8	2,00	1,18	0,44	-0,39	-0,67	-0,70	-0,71	1,86	1,17	0,53	-0,27	-0,72	-0,88	-0,96
2,9	1,99	1,15	0,41	-0,39	-0,65	-0,68	-0,69	1,86	1,16	0,52	-0,27	-0,71	-0,87	-0,95
3,0	1,97	1,13	0,39	-0,40	-0,64	-0,66	-0,66	1,85	1,15	0,51	-0,28	-0,71	-0,86	-0,93
3,2	1,96	1,09	0,35	-0,41	-0,61	-0,62	-0,62	1,84	1,13	0,49	-0,28	-0,69	-0,83	-0,90
3,4	1,94	1,06	0,31	-0,41	-0,58	-0,59	-0,59	1,83	1,11	0,47	-0,29	-0,68	-0,81	-0,88
3,6	1,93	1,03	0,28	-0,42	-0,55	-0,56	-0,56	1,81	1,09	0,46	-0,29	-0,67	-0,80	-0,86
3,8	1,90	1,00	0,24	-0,42	-0,52	-0,53	-0,53	1,80	1,08	0,44	-0,29	-0,66	-0,78	-0,84
4,0	1,90	0,96	0,21	-0,41	-0,50	-0,50	-0,50	1,78	1,06	0,42	-0,29	-0,65	-0,76	-0,82
4,5	1,85	0,89	0,14	-0,40	-0,44	-0,44	-0,44	1,75	1,01	0,39	-0,30	-0,63	-0,73	-0,78
5,0	1,78	0,78	0,07	-0,38	-0,40	-0,40	-0,40	1,71	0,98	0,37	-0,30	-0,62	-0,70	-0,74

C_s	S_Φ при обеспеченности первой ординаты			S_Φ при обеспеченности первой ординаты			$\Phi_{5\%} - \Phi_{5\%}$	$\Phi_{10\%} - \Phi_{90\%}$	$\Phi_{20\%} - \Phi_{80\%}$	$\Phi_{5\%} - \Phi_{95\%}$	$\Phi_{10\%} - \Phi_{90\%}$	$\Phi_{20\%} - \Phi_{80\%}$
	5%	10%	20%	5%	10%	20%						
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,28	2,56	1,69	3,29	2,66	1,69
0,1	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	3,28	2,56	1,69	3,29	2,66	1,69
0,2	0,05	0,04	0,02	0,06	0,04	0,04	3,28	2,56	1,68	3,29	2,65	1,68
0,3	0,08	0,07	0,04	0,09	0,05	0,05	3,27	2,55	1,67	3,28	2,63	1,67
0,4	0,11	0,09	0,06	0,11	0,06	0,06	3,27	2,55	1,67	3,28	2,62	1,66
0,5	0,13	0,10	0,07	0,14	0,09	0,08	3,26	2,54	1,66	3,26	2,61	1,65
0,6	0,17	0,13	0,09	0,16	0,10	0,08	3,25	2,53	1,65	3,25	2,59	1,64
0,7	0,20	0,16	0,11	0,19	0,12	0,09	3,24	2,51	1,64	3,24	2,57	1,63
0,8	0,22	0,17	0,11	0,21	0,15	0,12	3,22	2,51	1,64	3,22	2,53	1,61
0,9	0,25	0,20	0,14	0,23	0,16	0,12	3,21	2,49	1,62	3,21	2,51	1,60
1,0	0,28	0,21	0,14	0,25	0,18	0,13	3,20	2,47	1,61	3,19	2,48	1,59
1,1	0,30	0,24	0,16	0,27	0,20	0,14	3,17	2,44	1,59	3,17	2,46	1,56
1,2	0,33	0,26	0,17	0,29	0,21	0,16	3,16	2,42	1,57	3,16	2,44	1,54
1,3	0,36	0,29	0,19	0,31	0,23	0,16	3,14	2,40	1,56	3,14	2,41	1,53
1,4	0,39	0,31	0,21	0,33	0,25	0,17	3,12	2,38	1,54	3,11	2,39	1,50
1,5	0,42	0,34	0,23	0,35	0,26	0,18	3,09	2,35	1,51	3,10	2,37	1,49

1,6	0,44	0,36	0,25	0,37	0,28	0,20	3,07	2,32	1,49	3,07	2,33	1,47
1,7	0,48	0,39	0,26	0,38	0,29	0,21	3,04	2,29	1,47	3,05	2,32	1,44
1,8	0,50	0,42	0,28	0,39	0,30	0,21	3,01	2,26	1,44	3,03	2,29	1,42
1,9	0,53	0,43	0,30	0,41	0,31	0,22	2,98	2,23	1,42	3,01	2,27	1,41
2,0	0,57	0,46	0,32	0,42	0,33	0,23	2,95	2,20	1,39	2,99	2,24	1,38
2,1	0,59	0,49	0,35	0,44	0,34	0,24	2,92	2,16	1,35	2,97	2,21	1,36
2,2	0,62	0,52	0,36	0,45	0,35	0,24	2,89	2,11	1,32	2,95	2,19	1,35
2,3	0,64	0,54	0,38	0,46	0,36	0,25	2,86	2,08	1,29	2,92	2,17	1,33
2,4	0,67	0,57	0,40	0,48	0,37	0,25	2,82	2,04	1,24	2,90	2,14	1,31
2,5	0,69	0,59	0,42	0,49	0,38	0,26	2,79	2,00	1,21	2,88	2,11	1,30
2,6	0,72	0,61	0,44	0,50	0,39	0,26	2,76	1,96	1,18	2,86	2,09	1,28
2,7	0,74	0,64	0,47	0,51	0,40	0,28	2,74	1,91	1,14	2,84	2,07	1,26
2,8	0,76	0,67	0,50	0,51	0,40	0,28	2,71	1,88	1,11	2,82	2,05	1,25
2,9	0,78	0,68	0,51	0,52	0,41	0,28	2,68	1,83	1,06	2,81	2,03	1,23
3,0	0,80	0,71	0,53	0,53	0,42	0,30	2,64	1,79	1,03	2,78	2,01	1,22
3,2	0,83	0,75	0,57	0,55	0,44	0,30	2,59	1,71	0,96	2,74	1,96	1,18
3,4	0,86	0,78	0,62	0,58	0,46	0,32	2,53	1,65	0,89	2,71	1,92	1,15
3,6	0,89	0,83	0,69	0,57	0,46	0,33	2,48	1,58	0,83	2,67	1,89	1,13
3,8	0,91	0,86	0,74	0,58	0,47	0,33	2,43	1,53	0,76	2,64	1,86	1,10
4,0	0,92	0,88	0,75	0,59	0,48	0,33	2,40	1,46	0,71	2,60	1,82	1,07
4,5	0,96	0,93	0,86	0,62	0,50	0,35	2,30	1,34	0,58	2,53	1,74	1,02
5,0	0,98	0,97	0,91	0,64	0,52	0,35	2,18	1,18	0,47	2,45	1,68	0,99

Список литературы

1. Алекин О. А. Гидрохимические типы рек СССР.— «Тр. ГГИ», 1948, вып. 25, с. 25—40.
2. Алекин О. А. Ионный сток и средний состав речной воды для территории СССР.— «Тр. ГГИ», 1951, вып. 33, с. 32—50.
3. Алекин О. А. Гидрохимия. Л., Гидрометеиздат, 1968. 262 с.
4. Алексеев Г. А. Графоаналитические способы определения и приведения к длительному периоду наблюдений параметров кривых распределения.— «Тр. ГГИ», 1960, вып. 73, с. 3—21.
5. Алексеев Г. А. Определение стандартных параметров логарифмически-нормальной кривой распределения по трем опорным ординатам.— «Тр. ГГИ», 1962, вып. 99, с. 261—273.
6. Алексеев Г. А. Объективные методы выравнивания и нормализации корреляционных связей. Л., Гидрометеиздат, 1971. 363 с.
7. Амосья А. З. Минимальный сток горных рек Средней Азии.— «Тр. ГГИ», 1972, вып. 188, с. 283—304.
8. Андреянов В. Г. Гидрологические расчеты при проектировании малых и средних гидроэлектростанций. Л., Гидрометеиздат, 1957. 524 с.
9. Андреянов В. Г. Методические основы исследования и расчета внутригодового распределения стока.— «Тр. ГГИ», 1957, вып. 61, с. 71—105.
10. Андреянов В. Г. Циклические колебания годового стока, их изменение по территории и учет при расчетах стока.— В кн.: Тр. III Всесоюз. гидр. съезда. Т. 2. Л., Гидрометеиздат, 1959, с. 253—260.
11. Андреянов В. Г. Внутригодовое распределение речного стока. Л., Гидрометеиздат, 1960. 327 с.
12. Андреянов В. Г. Об исследовании влияния физико-географических факторов на характеристики речного стока.— «Метеорология и гидрология», 1969, № 8, с. 98—105.
13. Андреянов В. Г. Методические указания по расчетам внутригодового распределения стока при строительном проектировании. Л., Гидрометеиздат, 1970. 77 с.
14. Антонов Н. Д. Минимальный сток рек СССР.— «Тр. НИУ ГУГМС. Сер. 4», 1941, вып. 2, с. 65—89.
15. Артемьева Н. П. Применение статистических критериев для проверки гипотезы о законе распределения минимальных в году суточных расходов воды рек Полесья.— «Тр. ГГИ», 1973, вып. 196, с. 169—184.
16. Атлас гидрохимических характеристик местного стока Европейской территории СССР. Л., Гидрометеиздат, 1972. 46 с.
17. Бабкин В. И. Исследование внутригодовой зарегулированности стока рек БССР и Верхнего Поднепровья в зависимости от физико-географических факторов методом множественной корреляции.— «Сб. работ по гидрологии», 1970, № 9, с. 40—51.
18. Балков В. А. Влияние карста на сток рек Европейской территории СССР. Л., Гидрометеиздат, 1970. 215 с.
19. Баранов В. А., Петерсен З. И., Попов Л. Н. Карты минимального стока рек Азиатской территории СССР.— «Тр. ГГИ», 1967, вып. 139, с. 24—35.
20. Баранов В. А., Попов Л. Н. Карты минимального стока рек Европейской территории СССР.— «Тр. ГГИ», 1966, вып. 133, с. 112—147.
21. Батырева О. В. Расчет зависимости коэффициента множественной корреляции и выбор максимального числа предсказателей.— «Метеорология и гидрология», 1960, № 3, с. 49—57.
22. Беличенко Ю. П. Использование и охрана водных ресурсов.— В кн.: Рациональное использование и охрана водных ресурсов. М., Россельхозиздат, 1970, с. 3—8.
23. Бефани А. Н. Основные положения теории стока подземных вод.— «Сб. работ по гидрологии», 1959, № 1, с. 3—18.
24. Блохинов Е. Г. Исследование повторяемости дождевых паводков.— «Тр. Гидропроекта», 1960, вып. 4, с. 43—62.
25. Блохинов Е. Г. Новые приемы для оценки параметров случайных колебаний речного стока по данным многолетних наблюдений.— «Тр. ГГИ», 1968, вып. 143, с. 85—104.
26. Боголюбов С. Н., Богомазова З. П. Вертикальная зональность подземных вод как основной фактор формирования стока.— «Метеорология и гидрология», 1955, № 6, с. 28—49.
27. Бровкович Г. Н. О кривых распределения вероятностей, применяемых в гидрологии.— В кн.: Труды первого совещания по регулированию стока. М., 1946, с. 12—22.
28. Булавко А. Г. Водный баланс речных водосборов. Л., Гидрометеиздат, 1971. 302 с.
29. Быдин Ф. И. Меженные паводки в связи с атмосферными осадками.— «Изв. Казанск. фил. АН СССР. Сер. энерг. и водн. хоз-ва», 1961, вып. 3, с. 38—45.
30. Быков В. Д. Сток рек Урала. М., изд. МГУ, 1963. 268 с.
31. Быков В. Д., Калинин Г. П., Картвелишвили Н. А. Исследования и расчеты речного стока. М., изд. МГУ, 1970. 150 с.
32. Валльнер Л. К. О применении гидрометрической съемки для уточнения результатов оценки естественных ресурсов подземных вод зоны интенсивного водообмена.— В кн.: Материалы междоуведомственного семинара по методике гидрометрической оценки подземного стока в реки. Валдай, 1966, с. 69—81.
33. Великанов М. А. Ошибки измерения и эмпирические зависимости. Л., Гидрометеиздат, 1962. 302 с.
34. Вельнер Х. А., Айтсам А. М., Пааль Л. Л. О методике инженерного расчета допустимой нагрузки водоемов.— В кн.: Научные доклады по вопросам самоочищения водоемов и самоочищения сточных вод. Таллин, 1965, с. 56—78.
35. Вельнер Х. А., Каск А. Г. Предварительная методика установления допустимого минимального расхода воды рек с учетом качества воды.— В кн.: Материалы IV Всесоюз. симпозиума по современным проблемам самоочищения и регулирования качества воды. Таллин, 1972, с. 23—28.
36. Вендров С. Л. Проблемы преобразования речных систем. Л., Гидрометеиздат, 1970. 234 с.
37. Владимиров А. М. Связь минимального стока малых рек Севера ЕТС с подземным питанием.— «Тр. ГГИ», 1964, вып. 114, с. 119—136.
38. Владимиров А. М. Особенности формирования и расчет минимального стока малых рек ЕТС.— «Тр. ГГИ», 1966, вып. 133, с. 148—175.
39. Владимиров А. М. Минимальный сток малых рек Азиатской территории СССР.— «Тр. ГГИ», 1967, вып. 139, с. 4—23.
40. Владимиров А. М. Минимальный сток рек СССР. Л., Гидрометеиздат, 1970. 214 с.
41. Владимиров А. М. Расчетные минимальные расходы воды.— Тр. ГГИ», 1972, вып. 188, с. 244—272.

42. Владимиров А. М. Основные задачи гидрологических исследований при оценке качества воды.— «Метеорология и гидрология», 1973, № 10, с. 82—86.
43. Владимиров А. М. Оценка взаимосвязи поверхностных и подземных вод в период низкого стока рек.— В кн.: Взаимодействие поверхностных и подземных вод. М., изд. МГУ, 1973, с. 108—111.
44. Владимиров А. М. Необычайное маловодье на реках Европейской территории Советского Союза летом 1972 г.— «Метеорология и гидрология», 1974, № 10, с. 75—80.
45. Владимиров А. М., Хмаладзе Г. Н. Минимальный сток рек Кавказа.— «Тр. ГГИ», 1972, вып. 188, с. 273—282.
46. Владимиров А. М., Чеботарев А. И. Расчет вероятностных величин низкого стока неизученных рек.— В кн.: Материалы симпозиума по водным ресурсам при недостаточности данных наблюдений. Т. 2 (на англ. яз.). Мадрид, 1973, с. 561—570.
47. Владимиров Л. А. Исследование закономерностей минимального стока в горных областях.— «Тр. Тбилисс. ин-та географии», 1955, т. 6, с. 170—190.
48. Водогрецкий В. Е. Опыт измерения подруслового стока рек.— «Метеорология и гидрология», 1968, № 10, с. 68—71.
49. Вольфцун И. Б. Расчеты элементов баланса грунтовых вод. Л., Гидрометеоздат, 1972. 272 с.
50. Воронков П. П. Гидрохимия местного стока Европейской территории СССР. Л., Гидрометеоздат, 1970. 187 с.
51. Воронцов А. И., Харитонов Н. З. Охрана природы. М., «Высшая школа», 1971. 359 с.
52. Воскресенский К. П. Гидрологические расчеты при проектировании сооружений на малых реках, ручьях и временных водотоках. Л., Гидрометеоздат, 1956. 326 с.
53. Воскресенский К. П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. Л., Гидрометеоздат, 1962. 247 с.
54. Гатилло П. Д. К вопросу определения расчетных характеристик речных вод в естественном состоянии.— В кн.: Водоотведение и очистка вод. Минск, 1969, с. 37—65.
55. Гатилло П. Д. Эксплуатационные ресурсы речных вод для технического водоснабжения промышленных центров БССР в ближайшем десятилетии.— В кн.: Использование водных ресурсов. Минск, 1969, с. 24—51.
56. Гатилло П. Д., Плужников В. Н., Правошинский Н. А. Опыт прогноза качества речных вод Белоруссии и научно-технические проблемы их охраны.— В кн.: Использование и охрана водных ресурсов Белоруссии. Минск, 1967, с. 24—51.
57. Герасименко В. П. Применение множественной линейной корреляции к анализу и расчету минимального стока рек Западно-Сибирской равнины.— «Тр. ГГИ», 1973, вып. 196, с. 185—205.
58. Гидрологические расчеты при осушении болот и заболоченных земель. Под ред. К. Е. Иванова. Л., Гидрометеоздат, 1963. 447 с.
59. Гидрометрическая оценка взаимодействия речных и подземных вод. Под ред. О. В. Попова. Л., 1973. 77 с.
60. Данович В. А. Анализ минимального стока и обуславливающих его факторов на примере рек БССР.— «Тр. ГГИ», 1950, вып. 27, с. 121—147.
61. Де Уист Р. Гидрогеология с основами гидрологии суши. М., «Мир», 1969. 287 с.
62. Доброумов Б. М. К оценке подземного питания рек на территории ЦЧО.— «Сб. работ по гидрологии», 1968, № 8, с. 112—121.
63. Доброумов Б. М. Методика расчета норм подземного стока в малые реки.— «Сб. работ по гидрологии», 1970, № 10, с. 89—96.
64. Доброумов Б. М. Некоторые закономерности многолетних колебаний минимального стока рек ЕТС в зимний период.— «Тр. ГГИ», 1970, вып. 182, с. 160—183.
65. Доброумов Б. М., Образцов И. Н., Устюжанин Б. С. Оценка влияния эксплуатации железорудных месторождений КМА на режим стока р. Осколец.— «Тр. ГГИ», 1967, вып. 139, с. 206—223.
66. Долгополов К. В., Федорова Е. Ф. Вода — национальное достояние. М., «Мысль», 1973. 255 с.
67. Дрозд В. В. О приближенных расчетах подземного стока в реки.— «Сб. работ по гидрологии», 1968, № 8, с. 131—136.
68. Езекиел М., Фокс К. А. Методы анализа корреляций и регрессий. М., «Статистика», 1966. 559 с.
69. Железняк И. А. Внутригодовое распределение стока малых рек и временных водотоков на юге Украинской ССР.— «Изв. Ин-та гидрологии и гидротехники АН УССР», 1953, т. 10, с. 135—157.
70. Жук В. А. Кривые распределения минимального стока.— В кн.: Сообщение по применению математических методов и электронно-вычислительных машин в мелиорации и водном хозяйстве. М., изд. Сельхозпроекта, 1969, с. 72—83.
71. Загрязнение и самоочищение природных водоемов, распад органических веществ и методы анализа. Под ред. В. Т. Каплина. Л., Гидрометеоздат, 1968. 268 с.
72. Зайков Б. Д. Средний сток и его распределение в году на территории СССР.— «Тр. НИУ ГУГМС. Сер. 4», 1946, вып. 24, с. 67—95.
73. Зонов Б. В. Особенности зимнего режима рек Северо-Востока Азиатской части СССР.— В кн.: Тр. науч. конференции по изучению и освоению производственных сил Сибири. Т. 3. Иркутск, 1942, с. 76—98.
74. Исследование повторяемости и продолжительности периодов различной водности на реках СССР.— «Тр. ГГИ», 1965, вып. 127, с. 227—276. Авт.: В. Г. Андреев, К. П. Воскресенский, Н. Я. Глушенко, Н. Ф. Панова.
75. Калинин Г. П. Проблемы глобальной гидрологии. Л., Гидрометеоздат, 1968. 377 с.
76. Калинин Г. П. О гидрологических основах управления режимом вод суши.— «Метеорология и гидрология», 1970, № 4, с. 112—120.
77. Каменский Г. Н. Основы динамики подземных вод. М., Госгеол-издат, 1943. 287 с.
78. Карта распространения закарстованных пород и карстовых явлений Европейской части СССР, Урала и Кавказа. М., «Недра», 1965.
79. Карты подземного стока СССР. М., изд. ГУГК, 1965.
80. Каск А. Г. Исследование минимального стока рек севера Эстонии в связи с карстовым питанием.— «Сб. работ по гидрологии», 1963, № 3, с. 83—88.
81. Каск А. Г. О методике определения лимитирующего минимального стока при прогнозировании качества воды водоемов.— В кн.: Материалы Всесоюз. науч.-техн. конференции по охране поверхностных и подземных вод от загрязнения. Таллин, 1967, с. 67—75.
82. Квасов Д. Д., Левин И. Я. Применение в гидрологических расчетах составных кривых распределения.— «Тр. ГГИ», 1960, вып. 73, с. 87—99.
83. Келлер Р. Воды и водный баланс суши. М., «Прогресс», 1965. 357 с.
84. Ключева К. А. Районирование территории БССР по однотипным условиям формирования минимального стока.— «Сб. работ по гидрологии», 1961, № 2, с. 47—58.
85. Ключева К. А. Влияние осушительной мелиорации на гидрологический режим ряда рек Белоруссии.— «Тр. ГГИ», 1973, вып. 208, с. 187—212.
86. Ковалев Л. М. Частный случай построения кривой обеспеченности низкого стока в зоне маловодных лет.— «Тр. ГГИ», 1972, вып. 200, с. 69—87.
87. Колесов Г. П., Гуревич А. Е. О методах оценки напорного питания рек.— «Тр. ГГИ», 1972, вып. 188, с. 114—129.
88. Колпачева М. П. Об определении сезонного стока заданной обеспеченности при расчете внутригодового распределения стока рек ЦЧО.— «Сб. работ по гидрологии», 1970, № 9, с. 62—70.

89. Комлев А. М. Основные результаты расчета корреляционных связей зимнего стока с обуславливающими его факторами.—*Тр. Новосибирск. регион. гидрометцентра*, 1971, вып. 4, с. 110—115.
90. Комлев А. М. Исследования и расчеты зимнего стока рек. М., Гидрометеониздат, 1973. 200 с. (Тр. Зап.-Сиб. регион. НИГМИ. Вып. 9).
91. Конаржевский Л. М. О несоответствии эмпирических кривых обеспеченности некоторых гидрологических характеристик теоретической форме кривых Пирсона III типа.—В кн.: *Тр. III Всесоюз. гидролог. съезда*. Т. 2. Л., Гидрометеониздат, 1959, с. 163—169.
92. Коноплянец А. А., Ковалевский В. С. К вопросу о региональных закономерностях режима грунтовых вод.—В кн.: *Доклады к собранию Международной ассоциации гидрогеологов 1960 г.* М., Гостехиздат, 1960, с. 25—29.
93. Кочерин Д. И. Низкие и наименьшие расходы воды на территории Европейской части СССР.—*Тр. Московск. ин-та инженеров транспорта*, 1929, вып. 11, с. 67—85.
94. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. О некоторых приемах статистического анализа гидрологических рядов.—*Тр. ГГИ*, 1968, вып. 143, с. 110—133.
95. Крюков В. Ф. Статистические методы разграничения территорий на однородные участки.—*Сб. работ по гидрологии*, 1973, № 11, с. 48—73.
96. Крюков В. Ф. Методика территориального обобщения статистических характеристик минимального стока рек.—*Тр. ГГИ*, 1974, вып. 213, с. 102—126.
97. Куделин Б. И. Современное состояние вопроса о подземном питании рек и задачи дальнейших исследований.—В кн.: *Тр. III Всесоюз. гидролог. съезда*. Т. 9. Л., Гидрометеониздат, 1959, с. 6—23.
98. Куделин Б. И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М., изд. МГУ, 1960. 342 с.
99. Кузин П. С. Классификация рек и гидрологическое районирование СССР. Л., Гидрометеониздат, 1960. 348 с.
100. Кузин П. С. Принципы изучения пространственных гидрологических закономерностей.—*Изв. АН СССР. Сер. географ.*, 1968, № 2, с. 88—93.
101. Кузин П. С. Циклические колебания стока рек северного полушария. Л., Гидрометеониздат, 1970. 175 с.
102. Кузнецов Н. Т., Львович М. И. Проблемы комплексного использования и охраны водных ресурсов.—В кн.: *Природные ресурсы Советского Союза и их использование и воспроизводство*. М., 1963, с. 3—25.
103. Кузник И. А. Обоснование гидрологических расчетов при проектировании водохозяйственных мероприятий в Поволжье. Саратов, изд. Гипроводхоза, 1958. 120 с.
104. Куприянов В. В. Гидрологические аспекты урбанизации.—*Тр. ГГИ*, 1973, вып. 206, с. 122—133.
105. Курганова Н. М. Асинхронность колебаний меженного и минимального среднего месячного стока рек Белоруссии.—В кн.: *Вопросы водохозяйственного строительства*. Минск, 1970, с. 76—93.
106. Лебедев А. Н., Писарева Г. П. Климатические сезоны СССР.—*Тр. ГГО*, 1956, вып. 62 (124), с. 67—84.
107. Лившиц И. М. Сезонное и месячное распределение стока на территории Полесья.—*Тр. Ин-та мелiorации, водного и болотного хоз-ва АН БССР*, 1955, т. 6, с. 78—95.
108. Лысенко К. А. Подземный сток рек Украины.—*Тр. УкрНИГМИ*, 1965, вып. 50, с. 75—108.
109. Львович М. И. Опыт классификации рек СССР.—*Тр. ГГИ*, 1938, вып. 6, с. 12—30.
110. Макаренко Ф. А. О подземном питании рек. М., Гостехиздат, 1948. 148 с. (Тр. Лаборатории гидрогеол. проблем АН СССР. Т. 1).
111. Маркова О. Л. Влияние карста на минимальный сток равнинных рек.—*Тр. ГГИ*, 1968, вып. 163, с. 112—126.
112. Материалы междуведомственного семинара по методике гидрометрической оценки подземного стока в реки. Валдай, изд. ГГИ, 1966. 266 с.
113. Материалы по минимальному стоку рек СССР. Л., Гидрометеониздат, 1971. 110 с.
114. Мильков Ф. Н. Природные зоны СССР. М., 1964. 345 с.
115. Мильков Ф. Н. Ландшафтная география и вопросы практики. М., «Мысль», 1966. 187 с.
116. Минкин Е. Л. Взаимосвязь подземных и поверхностных вод и ее значение при решении некоторых гидрогеологических и водохозяйственных задач. М., Стройиздат, 1973. 103 с.
117. Народецкая Р. Я. К расчету меженного и минимального стока рек летнего периода при проектировании мелиоративных мероприятий на территории центрального района РСФСР.—*Сб. работ по гидрологии*, 1970, № 9, с. 46—57.
118. Норватов А. М. Минимальный сток малых рек в связи с подземным питанием.—*Тр. ГГИ*, 1950, вып. 27 (81), с. 58—95.
119. Норватов А. М. Минимальный сток малых рек Европейской территории СССР.—*Тр. ГГИ*, 1956, вып. 52 (106), с. 112—137.
120. Норватов А. М. Условия формирования летнего меженного стока рек Прибалтики и прогноз их с большой заблаговременностью.—*Тр. ГГИ*, 1962, вып. 97, с. 87—114.
121. Об исследовании многолетних колебаний речного стока. Многолетние колебания стока и вероятностные методы его расчета. М., изд. МГУ, 1967. 125 с. Авт.: С. Н. Крицкий, М. Ф. Менкель, Г. П. Калинин, В. Д. Быков.
122. Островский Г. М. Факторы формирования и расчет минимального стока рек Урала.—*Сб. работ Свердловской ГМО*, 1968, вып. 7, с. 3—41.
123. Парсон Р. Природа предъявляет счет. М., «Прогресс», 1969. 268 с.
124. Пашнев Г. С. К вопросу аккумуляции стока прудами.—В кн.: *Комплексное использование водных ресурсов*. М., «Наука», 1972, с. 46—48.
125. Петерсен З. И. Минимальный сток рек Забайкалья.—*Тр. ГГИ*, 1968, вып. 163, с. 68—83.
126. Петров Г. Н. Меженный сток и его изучение. Казань, 1956. 220 с. (Тр. Казанск. фил. АН СССР. Сер. энерг. и водн. хоз-ва. Вып. 1).
127. Подземный сток на территории СССР. Под ред. Б. И. Куделина. М., изд. МГУ, 1966. 292 с.
128. Поляков Б. В. Определение связи между подземными водами и поверхностным стоком.—*Тр. ЦИП*, 1947, вып. 2 (29), с. 25—43.
129. Попов О. В. Подземное питание рек. Л., Гидрометеониздат, 1968. 291 с.
130. Попов О. В. Некоторые элементы анализа взаимодействия речных и подземных вод.—*Тр. ГГИ*, 1970, вып. 182, с. 5—25.
131. Правовинский Н. А., Смольянинов В. М., Гречухина Т. Д. О мерах охраны водоемов в городской черте от загрязнения стоком дождевых, талых и поливочных вод.—В кн.: *Проблемы использования водных ресурсов*. Минск, 1971, с. 109—117.
132. Практические рекомендации по расчету разбавления сточных вод в реках, озерах и водохранилищах. Л., 1970. 87 с.
133. Региональная оценка подземного питания рек СССР. Под ред. А. И. Чеботарева, О. В. Попова. Л., Гидрометеониздат, 1968. 220 с. (Тр. ГГИ. Вып. 154).
134. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 5. Гл. 8. Л., Гидрометеониздат, 1966, с. 40—42.
135. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2. Ч. 1. Гл. 7. Л., Гидрометеониздат, 1972, с. 302—359.
136. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3. Гл. 7. Л., Гидрометеониздат, 1972, с. 168—221.
137. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 10. Кн. 1. Гл. 7. Л., Гидрометеониздат, 1973. 475 с.

138. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 11. Гл. 13. Л., Гидрометеоздат, 1973, с. 566—596.
139. Рождественский А. В. О несоответствии эмпирических и аналитических кривых распределения некоторых стоковых рядов.— «Тр. ЛГМИ», 1964, вып. 26, с. 113—126.
140. Рождественский А. В., Чеботарев А. И. Статистические методы в гидрологии. Л., Гидрометеоздат, 1974. 422 с.
141. Рош М. Гидрология суши. Л., Гидрометеоздат, 1971. 183 с.
142. Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик. Л., Гидрометеоздат, 1973, с. 64—69.
143. Соколов А. А. Влияние озерного регулирования на величину минимального стока рек.— «Тр. ГГИ», 1954, вып. 43 (97), с. 89—99.
144. Соколов А. А. О зональных и азональных факторах стока.— «Сб. работ по гидрологии», 1961, № 2, с. 17—25.
145. Соколов А. А. К теории гидрологического картирования.— «Изв. Всесоюз. географ. о-ва», 1968, т. 100, вып. 1, с. 38—43.
146. Соколов Б. Л. Расчет наледного стока.— «Метеорология и гидрология», 1970, № 9, с. 82—87.
147. Соколов Б. Л. Влияние наледей на речной и подземный сток.— «Тр. ГГИ», 1972, вып. 167, с. 66—78.
148. Соколов Б. Л. Методика приведения единичных измерений расходов воды к среднему расходу за меженный период.— «Тр. ГГИ», 1974, вып. 213, с. 171—181.
149. Соколовский Д. Л. Гидрологические и водохозяйственные расчеты при проектировании малых ГЭС. М., Гидрометеоздат, 1946. 125 с. (Тр. НИУ ГУГМС. Сер. 4. Вып. 36).
150. Соколовский Д. Л. Речной сток. Л., Гидрометеоздат, 1968. 539 с.
151. Соломон С. Статистические связи между гидрологическими переменными.— В кн.: Статистические методы в гидрологии. Л., Гидрометеоздат, 1970, с. 18—73.
152. Стеженская И. Н. Сезонный сток рек Западно-Сибирской равнины. Л., Гидрометеоздат, 1971. 67 с.
153. Субботин А. И. О взаимосвязи подземных вод и речного стока.— «Тр. ЦИП», 1948, вып. 9(36), с. 118—135.
154. Уайт Г. Водные ресурсы США: проблемы использования. М., «Прогресс», 1973. 189 с.
155. Указания по определению расчетных гидрологических характеристик. СН 435-72. Л., Гидрометеоздат, 1972. 17 с.
156. Указания по определению расчетных минимальных расходов воды рек при строительном проектировании. СН 346-66. Л., Гидрометеоздат, 1966. 17 с.
157. Урываев В. А. Обеспеченность расходов в году рек Европейской части СССР.— «Тр. НИУ ГУГМС. Сер. 4», 1941, вып. 2, с. 53—71.
158. Устюжанин Б. С. Об исследовании влияния интенсивной эксплуатации подземных вод на сток рек.— «Тр. ГГИ», 1970, вып. 182, с. 113—127.
159. Устюжанин Б. С. Оценка изменения стока рек и восполнения запасов подземных вод в районах интенсивной эксплуатации последних.— «Тр. ГГИ», 1972, вып. 188, с. 86—104.
160. Устюжанин Б. С. Оценка изменений стока рек центральной части Московского артезианского бассейна под влиянием интенсивной эксплуатации крупных водозаборов подземных вод.— «Тр. ГГИ», 1974, вып. 213, с. 83—113.
161. Федоров Е. К. Взаимодействие общества и природы. Л., Гидрометеоздат, 1972. 88 с.
162. Харченко С. И. Исследование влияния орошения на водные ресурсы и водный баланс речных бассейнов, разработка методики определения возвратных вод и безвозвратных потерь.— «Тр. ГГИ», 1973, вып. 208, с. 9—47.
163. Хмаладзе Г. Н. Закономерности изменения минимального стока горных рек Армении и методика его расчета.— «Тр. ЗакНИГМИ», 1965, вып. 18 (24), с. 68—85.
164. Чеботарев А. И. Гидрологический словарь. Л., Гидрометеоздат, 1970. 306 с.
165. Чекаловский Е. Ф. К вопросу о методике измерения меженных расходов малых рек.— «Сб. работ Куйбышевской ГМО», 1965, вып. 2, с. 67—78.
166. Шевелев М. Э. Метод расчета обеспеченных минимумов речного стока.— «Метеорология и гидрология», 1937, № 8, с. 31—39.
167. Шикломанов И. А. О методах оценки влияния комплекса факторов хозяйственной деятельности на водные ресурсы и водный режим водосборов.— «Тр. ГГИ», 1973, вып. 206, с. 3—21.
168. Шикломанов И. А. О влиянии орошения на годовой сток рек Кумы, Терека и Кубани.— «Тр. ГГИ», 1973, вып. 208, с. 60—79.
169. Шикломанов И. А., Смирнова Л. Е. Оценка влияния хозяйственной деятельности на сток крупных рек Кавказа.— «Тр. ГГИ», 1973, вып. 206, с. 92—121.
170. Шульц В. Л. Реки Средней Азии. Л., Гидрометеоздат, 1965. 328 с.
171. Boulton A. G. Minimum acceptable flow.— «G. of the Inst. of Water Eng.», 1965, vol. 19, N 1, p. 15—31.
172. Clark W. E. Evapotranspiration and the relation of ground water to surface water in the Pond Creek basin, Oklahoma.— «Geol. Sur. Prof. Paper», 1963, 450-E, p. 142—145.
173. Dohanson E. A. Effects of multiple use on peak flows and low flows.— «Intern. Symp. on Forest Hydrol.», 1967, p. 545—550.
174. Fiering M. B. A Markov model for low-flow analysis.— «Intern. Assoc. Sci. Hydrol. Bull.», 1964, vol. 9, N 2, p. 37—47.
175. Gannon I. Definition of river drought flow characteristics.— «Intern. Assoc. Sci. Hydrol. Publ.», 1964, N 3, p. 137—150.
176. Ginster E. V. A relation between floods and drought flows in the Piedmont Province in Virginia.— «Geol. Sur. Prof. Paper», 1962, N 450, p. 128—129.
177. Handbook of applied hydrology. Red. Ven Te Chow. New-York, San-Francisco, Toronto, London, 1964. 635 p.
178. Hatalas N. C. Probability distribution of low flows. Wash., 1963, vol. 4, 27 p.
179. Hudson H. E., Hasen R. Droughts and low stream flow. Handbook of applied hydrology. New-York, McGraw-Hill, 1964, p. 18—26.
180. Huff F. A., Changnon I. A. Relation between precipitation deficiency and low stream flow.— «J. Geophys. Res.», 1964, vol. 9, N 4, p. 605—613.
181. Ishihara T., Takage E. A study on the variation of low flow.— «Bull. Disaster Prevent. Res. Inst.», 1965, N 2, p. 75—98.
182. Piper A. M. Has the United States enough water? — «Geol. Sur. Watersupply Paper», 1965, N 1797, p. 1—27.
183. Riggs H. C. Rainfall and minimum flows along the Tallapoosa River, Alabama.— «Geol. Sur. Prof. Paper», 1961, 424-B, p. 96—98.
184. Riggs H. C. Regional low flow frequency analysis.— «Geol. Sur. Prof. Paper», 1961, 424-B, p. 21—23.
185. Riggs H. C. Effect of land use on the low flow of streams in Rappahannock country, Virginia.— «Geol. Sur. Prof. Paper.», 1965, N 525, p. 15—27.
186. Riggs H. C. Low flow investigations.— «Techn. of Water Resour. Invest. of the U. S. Geol. Sur.», 1972, vol. 4, 18 p.
187. Sheaffer J. R., Zeizel A. J. The water resource in Northeastern Illinois: Planning its use.— «Northeastern Illinois Planning Commission Tech. Rep.», 1966, N 4, p. 38—53.
188. Weibel S. R., Anderson R. I., Woodward R. L. Urban land runoff as a factor in stream pollution.— «Water Pollution Control Federation», 1964, vol. 36, N 7, p. 914—924.

Содержание

189. Зяпков Л., Русев Р. Исследования върху генезиса и режима на речния отток в Западните Родопи.— «Изв. Географ. ин-т», 1966, т. 10, с. 127—152 (София).
190. Иванов К. Средногодична минерализация на речните води в България.— «Изв. Ин-т хидрологии и метеорологии», 1967, т. 11, с. 135—148.
191. Маринов И. Пересыхание на реките в НР България.— «Тр. Ин-т хидрологии и метеорологии», 1958, т. 4, с. 103—128.
192. Маринов И. Върху маловоднот на реките в България.— «Хидрология и метеорология», № 4, 1962, с. 3—17.
193. Пенчев П. Основни генетични съставки на речния отток в България.— «Изв. Географ. ин-т», 1970, т. 14, с. 195—212.
194. Сотиров А. Външногодишно разпределение на оттока в НР България.— «Тр. Ин-т хидрологии и метеорологии», 1959, т. 4, с. 27—99.
195. Szigyarto Z. A csapadékes időszak hossza.— „Vizügyi Közlemények“, 1961, N 2, p. 183—195.
196. Glos E., Lauterbach D. Regionale Verallgemeinerung von Niedrigwasserdurchflüssen mit Wahrscheinlichkeitsansage.— „Mitteilungen des Inst. für Wasserwirtschaft“, 1972, N 37, 88 p.
197. Visentine M. Les grands etages du Po.— In: Assamblée générale de Helsinki. 1960, p. 215—219.
198. Zanovello A. Sugli eventi estremi di Magra dei corsi d'acqua conapplicazioni al fiume Bacchiglione.— „Lenergia elettrica“, 1964, N 8, p. 545—555.
199. Arkuszewski A. W sprawie najmniejszego dopuszczalnego przepływu w wrekach.— „Gospod. Wodna“, 1968, N 4, p. 133—135.
200. Mikulski Z. Nizówki rzek polskich.— „Gazeta ofserwatora PIHM“, 1959, r. 12, N 10, p. 3—6.
201. Punzet J. Metoda wyznaczania minimalnych przepływów rzek przy braku obserwacji wodowskazowych.— „Gospod. Wodna“, 1964, r. 24, N 10, p. 372—375.
202. Stolarski A. W sprawie pojęcia i roli minimalnego przepływu pozostawianego w ciekach.— „Gospod. Wodna“, 1966, N 12, p. 454—457.
203. Zielinska M. Nizówki letnie rzek polskich.— „Gospod. Wodna“, 1963, r. 23, N 4, p. 133—136.
204. Zielinska M. Metody obliczenia i prognozowania nizówek w ujęciu probabi listycznym.— „Wiadomości służby Hydrolog. i Meteorolog.“, 1964, r. 58, N 3, p. 31—72.
205. Zielinska M. Statystyczne metody opracowywania nizówek.— „Przegląd geofizyc.“, 1964, r. 9 (17), N 2, p. 105—120.
206. Diaconu C. Unele rezultate ale studierii scurgerii minime a riurilor R. P. Romine.— „Studii de hidrologie“, 1961, vol. 1, p. 95—115.
207. Nitulescu M., Păduraru A. Secarea riurilor în bazinul riului Motru.— „Studii de hidrologie“, 1961, vol. 1, p. 13—21.
208. Siren A. Occurence of low discharge periods in rivers in Finland.— In: Assemblée generale de Helsinki. 1960, p. 211—214.
209. Bernier J. La prévision statistique des bas debits.— „Publ. Assoc. Intern. Hydrol.“, 1964, N 63, p. 340—351.
210. Dub O., Dzuba'k M. La definition des defits détiage et l'illustration de superficie de lew extension.— In: Assemblée generale de Helsinki. 1960, p. 151—156.
211. Hock B. A Kapos vizminósége és szeennyvizterhelése.— „Hydrol. közlöny“, 1967, N 10, p. 468—471.
212. Sochree R., Richter V. Prispěvek k metodice spracování minimálních průtoků.— „Vodohosp. časop“, 1965, r. 13, N 3, p. 305—329.

Введение	7
Глава 1. Основные определения и исходные положения	—
1.1. Характеристики речного стока в маловодный период	—
1.2. Существующие направления в исследованиях низкого стока рек	11
Глава 2. Формирование стока рек в маловодный период	24
2.1. Классификация физико-географических факторов, формирующих низкий сток рек	—
2.2. Стокообразующие факторы	26
2.3. Косвенные факторы	35
2.4. Условные факторы	51
Глава 3. Временные характеристики маловодного периода	58
3.1. Принципы выделения временных составляющих маловодного периода	—
3.2. Меженный и минимальный периоды	61
3.3. Лимитирующий период	101
3.4. Расчет вероятностных величин временных характеристик меженного периода	109
Глава 4. Определение расчетных характеристик стока рек в маловодный период при наличии гидрометрических наблюдений	120
4.1. Оценка репрезентативности ряда наблюдений	—
4.2. Определение нормы основных характеристик низкого стока	126
4.3. Расчет расходов воды различной обеспеченности в маловодный период	130
Глава 5. Расчет стока рек в маловодный период при отсутствии гидрометрических наблюдений	142
5.1. Теоретические основы приемов расчета низкого стока рек и принципы обобщения его основных характеристик	—
5.2. Определение низкого стока средних рек	165
5.3. Расчет низкого стока малых рек	195
5.4. Оценка низкого стока горных рек	209
Глава 6. Характеристика качества речной воды в маловодный период	217
Глава 7. Влияние хозяйственной деятельности на сток рек в маловодный период	246
Глава 8. Пересыхание и перемерзание рек	265
Заключение	278
Приложения	280
Список литературы	286
	295

Анатолий Михайлович Владимиров
СТОК РЕК В МАЛОВОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА

Редактор Т. С. Шмидт

Художник Ю. Н. Васильев

Худ. редактор В. А. Баканов

Техн. редактор Г. В. Ивкова

Корректор Л. Б. Бахар

Сдано в набор 27/VIII 1975 г. Подписано к печати
25/XII 1975 г. М-17465. Формат 60×90¹/₁₆, бум. тип. № 1.
Печ. л. 20,5 в т. ч. вкл. Уч.-изд. л. 22,15. Тираж 1700 экз.
Индекс ГЛ-103. Заказ № 454. Цена 2 руб.
Гидрометеониздат, 199053, Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Ленинградская типография № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
190000, Ленинград, Прачечный пер., 6.

2p.

1217 PONTIFICAL STATE 1970