

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

**РЕГИОНАЛЬНАЯ
ОЦЕНКА
РЕСУРСОВ
ПОДЗЕМНЫХ
ВОД**

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

551.49.

РЕГИОНАЛЬНАЯ
ОЦЕНКА
РЕСУРСОВ
ПОДЗЕМНЫХ
ВОД

1562



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

МОСКВА

1975



УДК 551.49

В книге рассматривается методика региональной оценки ресурсов подземных вод, необходимая при планировании их использования для водоснабжения, орошения, обводнения в различных гидрогеологических условиях; рассматривается методика прогнозирования изменений режима подземных вод, характеризуются особенности использования подземных вод повышенной минерализации; рассмотрены условия формирования эксплуатационных ресурсов подземных вод под влиянием хозяйственной деятельности человека, в частности вопросы искусственного восполнения запасов подземных вод, влияния отбора подземных вод на речной сток.

Табл. 6, илл. 7, библи. 91 назв.

ПРЕДИСЛОВИЕ

При разработке Генеральной и региональных схем комплексного использования и охраны водных ресурсов СССР одной из важнейших проблем является прогноз перспектив использования ресурсов подземных вод для водоснабжения, орошения и обводнения. Этот прогноз должен быть гидрогеологически обоснованным. Разработка основных научных положений методики этого обоснования и составляет задачу данной работы.

Гидрогеологическое обоснование прогноза целесообразного использования подземных вод заключается в оценке их эксплуатационных ресурсов, т. е. ресурсов подземных вод, эксплуатация которых технически возможна, экономически целесообразна и не создает угрозы их истощения.

Формирование эксплуатационных ресурсов подземных вод происходит в основном за счет использования естественных запасов подземных вод в земной коре и питания подземных вод в естественных условиях. Вместе с тем следует подчеркнуть, что оно теснейшим образом связано с хозяйственной деятельностью человека. Сама эксплуатация подземных вод приводит не только к сработке запасов, но и к усилению питания подземных вод, т. е. к некоторому восполнению запасов.

В некоторых районах важным фактором формирования эксплуатационных ресурсов подземных вод служит также водохозяйственное строительство (гидротехническое, ирригационное), при котором усиливается питание и формируются новые «искусственные» запасы подземных вод. В ряде случаев в благоприятных для этого природных условиях осуществляются инженерные мероприятия, специально направленные на усиление питания подземных вод и формирование их запасов.

Еще 10—15 лет назад при относительно небольшом использовании подземных вод и значительных расстояниях между эксплуатируемыми их водозаборами прогноз обеспеченности того или иного объекта подземными водами на перспективу можно было решать независимо от величины эксплуатационных ресурсов намеченного к эксплуатации водоносного горизонта в целом.

Методика оценки производительности водозаборов на отдельных участках достаточно освещена в гидрогеологической литературе. В работе Ф. М. Бочевера (1968) приведены теоретические основы этой методики.

Интенсивная эксплуатация подземных вод многочисленными водозаборами уже не позволяет обоснованно решать вопрос обеспеченности водой того или иного объекта или района без учета эксплуатационных ресурсов подземных вод намечаемого к эксплуатации водоносного горизонта в целом, т. е. без оценки его ресурсов в региональном плане. Так, например, в Московском артезианском бассейне в настоящее время под влиянием усиленной эксплуатации подземных вод напоры последних ежегодно снижаются более чем на 1 м на значительной территории бассейна, что требует особой осторожности при оценке перспектив использования подземных вод на длительный срок. В связи с этим при разработке схем комплексного использования водных ресурсов оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод должна быть региональной, охватывать обширные территории с определением величины эксплуатационных ресурсов подземных вод гидрогеологических районов в границах, выделенных по балансовому признаку.

Региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод имеет некоторые существенные особенности, отличающие ее от оценки производительности водозаборов на отдельных участках. В данной работе отражены особенности региональной оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод в различных гидрогеологических условиях: артезианские и грунтовые воды платформенных областей, подземные воды речных долин, пролювиальных шлейфов и конусов выноса, подземные воды повышенной минерализации и др.; даются рекомендации по оценке естественных ресурсов подземных вод и прогнозу их изменения (режима) в многолетнем разрезе; характеризуется влияние водохозяйственной деятельности человека на эксплуатационные ресурсы подземных вод. В работе приводятся также методы, позволяющие определить влияние эксплуатации подземных вод на величину речного стока, т. е. рассматривается вопрос об условиях допустимости суммирования ресурсов подземных и поверхностных вод в водохозяйственном балансе региона; освещаются также вопросы искусственного восполнения запасов подземных вод.

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ РЕГИОНАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

*

ПОНЯТИЕ О ВИДАХ ЗАПАСОВ И РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Подземные воды, пригодные для использования в народном хозяйстве, можно рассматривать как полезное ископаемое. Однако подземные воды являются специфическим полезным ископаемым, так как представляют собой одновременно элемент природы, важный для жизни человека. Поэтому при решении вопроса об использовании подземных вод необходимо считаться не только с технико-экономической целесообразностью, но и с задачами охраны природы, причем последние в конечном итоге решающие. В соответствии с водным законодательством СССР использование подземных вод питьевого качества для нужд, не связанных с питьевым или бытовым обслуживанием населения, разрешается только в исключительных, особо обоснованных случаях. Кроме того, как известно, в отличие от других полезных ископаемых (твердых, нефти и газа) подземные воды имеют целый ряд специфических особенностей, которые необходимо учитывать при оценке перспектив их использования в народном хозяйстве.

Отличительная и главная особенность запасов подземных вод по сравнению с запасами других полезных ископаемых — их возобновляемость. Подземные воды — это единственное полезное ископаемое, в процессе эксплуатации которого происходит не только его расходование, но во многих случаях дополнительное формирование, вызванное усилением питания подземных вод при эксплуатации. Источниками такого дополнительного питания могут служить: а) поверхностные воды; б) подземные воды смежных с эксплуатируемым водоносных горизонтов; в) уменьшение испарения подземных вод при понижении их уровня и др. Формирование запасов подземных вод может происходить также в результате различных водохозяйственных мероприятий (гидротехническое строительство, орошение), а также при создании специальных «фабрик» подземных вод.

Другая существенная особенность подземных вод как полезного ископаемого связана с их подвижностью и тесной взаимосвязью подземных вод с окружающей средой. Эта взаимосвязь отражается в граничных условиях, т. е. условиях на границах водоносного пласта в плане и разрезе. Граничные условия (взаимосвязь подземных и поверхностных вод, условия питания и разгрузки подземных вод) во многом определяют возможность

их использования, в то время как влияние внешней среды на месторождения твердых полезных ископаемых проявляется лишь в течение длительного «геологического» времени.

Следует отметить еще одну важную особенность подземных вод при оценке перспектив их использования. Эта особенность заключается в том, что рациональный отбор подземных вод зависит не только от запасов воды в пласте и питания подземных вод, но и от фильтрационных свойств водовмещающих пород, определяющих сопротивление движению подземных вод к водозаборным сооружениям, что принципиально отличает использование подземных вод от поверхностных (Биндеман, 1972).

Перечисленные основные особенности подземных вод предопределили необходимость выделения нескольких понятий, характеризующих: а) количество воды, находящейся в водоносном горизонте; б) количество воды, поступающей в водоносный горизонт; в) количество воды, которое может быть отобрано рациональными в технико-экономическом отношении водозаборами.

Другими словами, если при оценке перспектив использования твердых полезных ископаемых, а также нефти и газа достаточно одного понятия — «запас полезного ископаемого», то для подземных вод одно это понятие не может полностью охарактеризовать возможность их рациональной эксплуатации.

Напомним, что под запасами полезных ископаемых понимается весовое количество полезного ископаемого, заключенного в земных недрах.

Для подземных вод следует кроме запасов, как уже говорилось, учитывать их питание, на что указывал еще в начале 30-х годов один из основоположников отечественной гидрогеологии Ф. П. Саваренский. Он предложил различать понятия «запасы» подземных вод и «ресурсы» подземных вод, понимая под последними обеспечение в водном балансе данного района питания подземных вод.

Размерность запасов — объем подземных вод, а содержащих ценные компоненты (промышленные воды) — весовые единицы, размерность ресурсов — их расход.

Вопросам классификации запасов и ресурсов подземных вод посвящена обширная гидрогеологическая литература. Наиболее полные сводки по этим вопросам содержатся в работах Ф. М. Бочера (1957, 1968) и Б. И. Куделина (1960). В настоящей работе мы не будем обсуждать классификации, предложенные различными авторами, тем более что различия между многими из них в сущности носят чисто терминологический характер. Остановимся только на характеристике основных понятий, входящих в эти классификации, следуя основному положению, принципиально различающему понятия «запасы» и «ресурсы».

Запасы и ресурсы подземных вод могут быть в свою очередь подразделены на (Биндеман, Язвин, 1970): 1) естественные; 2) искусственные; 3) привлекаемые; 4) эксплуатационные.

К естественным запасам относится масса гравитационной воды в пласте в естественных условиях. Та часть этой массы, которая может быть извлечена из напорного горизонта за счет упругих свойств воды и горных пород, называется упругими запасами.

Естественные ресурсы — поступление воды в водоносный горизонт в естественных условиях путем инфильтрации атмосферных осадков, фильтрации из рек, перетекания из выше- и нижележащих горизонтов, притока со смежных территорий. Естественные ресурсы водоносного горизонта равны сумме всех приходных элементов баланса данного горизонта. Они выражаются в единицах расхода и могут быть также определены по сумме всех расходных элементов баланса (испарение, транспирация растительностью, родниковый сток, фильтрация в реки, озера, перетекание в смежные горизонты).

Искусственные запасы — это объем подземных вод в пласте, образовавшийся в результате орошения, фильтрации из водохранилищ, искусственного восполнения подземных вод (магазинирование).

Искусственные ресурсы — поступление воды в водоносный горизонт при фильтрации из каналов и водохранилищ, на площадях орошения, а также при проведении мероприятий, связанных с усилением питания подземных вод.

Привлекаемые ресурсы — усиление питания подземных вод при эксплуатации водозаборов, вызывающей возникновение или усиление фильтрации из рек, озер, перетекание из смежных, обычно выше расположенных, водоносных горизонтов, уменьшение испарения с поверхности грунтовых вод вследствие увеличения глубины ее от поверхности земли в тех случаях, когда площади питания и разгрузка подземных вод совпадают.

Понятия «эксплуатационные запасы» и «эксплуатационные ресурсы» в сущности синонимы, так как выражают то количество воды, которое может быть получено рациональными в технико-экономическом отношении водозаборами подземных вод при качестве воды, отвечающем условиям (Инструкция по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод, 1962). Различия в терминологии заключаются в следующем. Если рассматривать подземную воду как полезное ископаемое, то предпочтителен геологический термин «эксплуатационные запасы» (этот термин принят Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых); если подземные воды рассматривать как часть общих водных ресурсов, то предпочтительнее термин «эксплуатационные ресурсы». При разработке водохозяйственных схем комплексного использования водных ресурсов (Генеральной, региональных) термин «эксплуатационные ресурсы подземных вод» более уместен, им мы и пользуемся в данной работе.

В общем случае эксплуатационные ресурсы подземных вод связаны с другими видами запасов и ресурсов следующим балан-

совым соотношением:

$$Q_0 = \alpha_1 Q_e + \alpha_2 \frac{V_e}{t} + \alpha_3 Q_{\text{и}} + \alpha_4 \frac{V_{\text{и}}}{t} + Q_{\text{пр}}, \quad (I.1)$$

где Q_0 — эксплуатационные ресурсы; Q_e и $Q_{\text{и}}$ — соответственно естественные и искусственные ресурсы; V_e и $V_{\text{и}}$ — соответственно естественные и искусственные запасы; $Q_{\text{пр}}$ — привлекаемые ресурсы; t — время, на которое рассчитывается эксплуатация; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ — соответственно коэффициенты использования естественных ресурсов, естественных запасов, искусственных ресурсов и искусственных запасов.

В зависимости от гидрогеологических условий того или иного региона в формировании эксплуатационных ресурсов будут превалировать различные виды запасов или ресурсов, в связи с чем некоторые члены в правой части уравнения (I.1) могут быть равными нулю. Так, при работе инфильтрационных водозаборов, расположенных вдоль рек со значительным меженным расходом, основным источником формирования эксплуатационных ресурсов будут привлекаемые ресурсы (фильтрация из реки), а роль естественных ресурсов и запасов будет относительно ничтожной. С другой стороны, эксплуатационные ресурсы подземных вод замкнутых структур, не связанных с поверхностным стоком, будут формироваться в основном за счет сработки естественных запасов и естественных ресурсов. Для глубоко залегающих артезианских водоносных горизонтов в бассейнах платформенного типа основную роль будут играть естественные запасы подземных вод, в то время как для менее глубоких горизонтов, хорошо связанных с вышележащими, наибольшее значение приобретают привлекаемые ресурсы (перетекание из вышележащих горизонтов грунтовых вод). В районах интенсивного орошения значительную роль могут играть искусственные ресурсы (инфильтрация оросительных вод, возвратных вод, формирующих подземный сток).

Эксплуатационные ресурсы могут быть обеспечены на определенный срок эксплуатации или на неограниченное время. В последнем случае источники формирования эксплуатационных ресурсов — это естественные и искусственные ресурсы, а также привлекаемые ресурсы (если они обеспечены на неограниченный срок эксплуатации). Так, при $t \rightarrow \infty$ второй и четвертый члены в правой части уравнения I.1 стремятся к нулю.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ РЕГИОНАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Как отмечалось, одна из отличительных особенностей подземных вод как полезного ископаемого — их тесная взаимосвязь с окружающей средой, и в первую очередь с поверхностными водами.

Поэтому оценку эксплуатационных ресурсов подземных вод следует производить с учетом влияния их отбора на изменение природных условий региона (режима поверхностного стока, условий произрастания лесов и сельскохозяйственных культур, возможного оседания земной поверхности и пр.). Необходимо учитывать также увеличение запасов и ресурсов подземных вод под влиянием намечаемого гидротехнического строительства, орошения, их уменьшение при водоотливе из шахт, а также запасы и ресурсы подземных вод, которые могут быть созданы специальными мероприятиями, направленными на усиление питания подземных вод поверхностными водами.

Прогнозная региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод — это основа гидрогеологического обоснования схем комплексного использования и охраны водных ресурсов.

Необходимость региональной оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод возрастает в связи с непрерывным увеличением отбора подземных вод и усилением в связи с этим взаимодействием водозаборов. В таких условиях обеспеченность эксплуатационных запасов подземных вод на каждом отдельном участке уже нельзя рассматривать независимо от общих эксплуатационных ресурсов водоносного горизонта в целом в пределах всего рассматриваемого региона. Региональная оценка не только позволяет устанавливать потенциальную возможность использования подземных вод в отдельных регионах, но и служит научным обоснованием плана разведочных на воду работ в целях решения вопросов водоснабжения и орошения отдельных объектов. Региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод сводится к определению возможной величины отбора подземных вод при условии, что к концу периода, охватываемого разрабатываемой схемой использования водных ресурсов, величина понижения уровня подземных вод не превысит допустимого значения и качество воды будет удовлетворять условиям.

В отношении использования естественных запасов подземных вод и учета их при региональной оценке существуют различные точки зрения. Так, например, имелись предложения о недопустимости вообще отбора подземных вод с использованием их естественных запасов. Неправомерна и противоположная крайняя точка зрения о допустимости полного использования естественных запасов подземных вод.

К решению вопроса о допустимости использования естественных запасов подземных вод следует подходить с учетом перспектив использования всех водных ресурсов района, возможности переброски речного стока в обозримой перспективе из других районов и т. п.

Временное использование естественных запасов подземных вод в ряде случаев может позволить на достаточно длительный срок отказаться от крупных капиталовложений в строительство плотин,

каналов и т. д. (как было, например, с развитием водоснабжения Джезказганского промышленного района). Кроме того, следует учитывать, что при осушении водоносных горизонтов во многих случаях увеличивается питание подземных вод за счет привлекаемых ресурсов.

Следует обратить внимание на тот факт, что величина отбора подземных вод зависит не только от их естественных запасов, но и от фильтрационных сопротивлений в водоносном пласте, возникающих при движении воды к водозаборным сооружениям, в чем и заключается коренное различие гидравлики подземных и поверхностных вод (Биндеман, 1972).

В связи с этим нельзя на основании только балансовых соотношений учитывать возможность полного использования естественных запасов подземных вод. Подобные балансовые построения, не учитывающие специфики движения подземных вод в пласте (фильтрационные сопротивления), приводят к таким «эффектным», но неудачным в научном отношении терминам, как «подземное море». В водоносном горизонте, особенно при распространении его на площади нескольких тысяч квадратных километров, воды может быть очень много, но если водоносные породы слабопроницаемы, то возможности использования подземных вод могут быть весьма ограничены.

Таким образом, при региональной оценке эксплуатационных ресурсов подземных вод следует учитывать возможное использование их естественных запасов в каждом конкретном случае, устанавливая рациональную в технико-экономическом отношении степень их сработки.

Естественные ресурсы подземных вод являются одним из основных источников формирования их эксплуатационных ресурсов. Практическая возможность их использования определяется местом расположения водозаборов по отношению к областям питания и разгрузки, что следует учитывать при региональной оценке эксплуатационных ресурсов.

Привлекаемые ресурсы подземных вод в определенных гидрогеологических условиях могут играть ведущую роль в формировании эксплуатационных ресурсов. Привлечение поверхностного стока происходит главным образом при эксплуатации водозаборов, расположенных вблизи рек. Эти ресурсы должны учитываться как отдельная статья баланса только в той мере, в которой они формируются за счет эксплуатации подземных вод в данном районе.

Привлекаемые ресурсы, поступающие в водоносный горизонт из смежных горизонтов при усилении перетекания, формируются за счет естественных запасов и естественных ресурсов этих смежных горизонтов (учитываются в том случае, если эксплуатационные ресурсы этих горизонтов не оцениваются). Условия формирования привлекаемых ресурсов в каждом конкретном случае определяются особенностями геологического строения и гидро-

геологических условий оцениваемого региона, а также системой расположения водозаборных сооружений. Наибольшее значение для формирования эксплуатационных ресурсов подземных вод в артезианских бассейнах имеют процессы перетекания, особенно из грунтовых вод. Значение процессов перетекания подтверждается опытом эксплуатации большого количества водозаборов в Московском, Днепровско-Донецком, Прибалтийском и других артезианских бассейнах, хотя сами процессы фильтрации через глинистые слабопроницаемые отложения, разделяющие водоносные горизонты, еще очень мало исследованы. По-видимому, взаимосвязь горизонтов осуществляется в отдельных зонах, где породы имеют повышенную трещиноватость (в зонах тектонических разломов) или происходит фациальное замещение глинистых пород песчаными.

Большое значение для взаимосвязи водоносных горизонтов имеют так называемые гидрогеологические окна.

Возможная степень использования источников формирования эксплуатационных ресурсов определяется не только гидрогеологическими условиями региона, но и схемой эксплуатации — размещением водозаборов, расстояниями между ними и т. д. В пределе при размещении водозаборов по всей площади распространения водоносного горизонта и при условии, что расстояния между водозаборами будут стремиться к нулю, эксплуатационные ресурсы, выражаемые балансовым уравнением (I.1), будут предельными при заданном допустимом понижении уровня подземных вод и принятой длительности периода эксплуатации.

Эти ресурсы будем называть потенциальными эксплуатационными ресурсами подземных вод. Однако в связи с фильтрационными сопротивлениями водовмещающих пород реальная возможность отбора подземных вод меньше потенциальных эксплуатационных ресурсов и зависит от системы расположения водозаборов. Поэтому оценка потенциальных эксплуатационных ресурсов необходима, но недостаточна для суждения о реальных перспективах использования подземных вод; для этого необходимо производить оценку перспективных или прогнозных (Биндеман и др., 1973) эксплуатационных ресурсов, учитывающую принимаемую схему размещения водозаборов.

Региональная оценка перспективных эксплуатационных ресурсов может проводиться в двух аспектах:

1) для выявления общих прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод с условным расположением водозаборов либо по равномерной сетке скважин на всей площади оцениваемого горизонта (артезианские воды, грунтовые воды платформенных областей), либо при расположении скважин в линейном ряду (грунтовые воды речных долин, конусов выноса);

2) для оценки возможного водоотбора по схеме размещения конкретных водопотребителей и заявленных ими потребностей в воде.

Условимся называть долю возможного использования потенциальных эксплуатационных ресурсов подземных вод при той или иной заданной схеме расположения водозаборов и принятых условиях и сроке эксплуатации коэффициентом перспективного использования подземных вод (Биндеман и др., 1973).

Следовательно, перспективные эксплуатационные ресурсы Q_p связаны с потенциальными $Q_{п}$ следующим соотношением¹:

$$Q_p = \eta Q_{п}. \quad (1.2)$$

Определенной величине потенциальных эксплуатационных ресурсов подземных вод ($Q_{п}$) данного района в зависимости от принятой схемы размещения водозаборов будут соответствовать разные значения коэффициента перспективного использования η , а следовательно, и различные перспективные эксплуатационные ресурсы.

При картировании потенциальных эксплуатационных ресурсов их удобно характеризовать величиной модуля эксплуатационных ресурсов, под которым понимается расход воды ($л/сек$), получаемый в среднем с $1 км^2$ площади распространения водоносного горизонта.

$$Q_{п} = M_{п} \cdot F, \quad (1.3)$$

где $M_{п}$ — модуль потенциальных эксплуатационных ресурсов, $л/сек \cdot км^2$; F — площадь распространения водоносного горизонта, $км^2$.

В некоторых случаях эксплуатационные ресурсы лучше относить не к площади водоносного горизонта, а к протяженности линии, по которой их наиболее целесообразно использовать (в речных долинах — по линии, параллельной берегу реки, в конусах выноса — по линии, огибающей его подошву). В таких случаях удобно отображать эксплуатационные ресурсы «линейным» модулем ($л/сек$ на $1 км$ длины).

Региональную оценку эксплуатационных ресурсов подземных вод целесообразно проводить в два этапа. На первом этапе (до выявления конкретных потребителей) следует оценить потенциальные эксплуатационные ресурсы и определить коэффициент их перспективного использования применительно к той или иной условной схеме размещения водозаборов (например, по сетке) с вариацией расстояний между водозаборами, при этом расстояние между ними следует выбирать исходя из технико-экономических со-

¹ Формулы, по которым рекомендуется производить расчет эксплуатационных ресурсов подземных вод, приведенные в данной работе, основаны на линейном уравнении движения подземных вод, что допустимо и для безнапорных водоносных горизонтов, так как возможная погрешность при определении средней мощности водоносного горизонта существенно меньше погрешности определения коэффициентов фильтрации и усреднения их значений по площади.

ображений по согласованию с организацией, которой поручено составление схемы.

На втором этапе региональную оценку следует производить с учетом схемы существующего и планируемого водопотребления и заявленных потребностей в воде на перспективу.

При региональной оценке эксплуатационных ресурсов подземных вод как на первом, так и на втором этапе целесообразно принимать следующие условия.

Перспективные эксплуатационные ресурсы целесообразно оценивать на срок эксплуатации подземных вод, предусматриваемый той или иной схемой комплексного использования водных ресурсов (20—50 лет). Поскольку при проведении расчетов на первом этапе оценки ресурсов предполагается, что все водозаборы включаются в эксплуатацию одновременно, а на практике они вступают в строй в течение всего срока, охватываемого схемой, то ресурсы оказываются обеспеченными фактически на значительно больший срок. При оценке перспективных эксплуатационных ресурсов на втором этапе следует учитывать намечаемый срок пуска каждого водозабора в отдельности.

В СССР первый этап региональной оценки по существу был выполнен в начале 1960-х годов Гидрогеологической службой Министерства геологии СССР на основе разработанной для этого методики (Биндеман, Бочевер, 1964). В результате этой работы была составлена карта модулей эксплуатационных ресурсов подземных вод СССР масштаба 1 : 5 000 000. В связи с малым «шагом» сетки (расстояние между условными водозаборами принималось 5 км) при этой оценке были практически подсчитаны потенциальные эксплуатационные ресурсы, однако не учитывались вследствие мелкого масштаба картирования привлекаемые ресурсы подземных вод речных долин и горных районов.

Примерно в эти же годы для центральной части Московского артезианского бассейна под руководством Ф. М. Бочевера впервые в СССР была проведена региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод с учетом намечаемого расположения водозаборов и потребности в воде на перспективу в конкретных пунктах.

Региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод на первом этапе проводится методами балансовым, гидродинамическим и гидрогеологической аналогии.

Балансовый метод используется главным образом для оценки потенциальных эксплуатационных ресурсов. При применении этого метода отдельные источники формирования эксплуатационных ресурсов оцениваются раздельно, а затем суммируются. В некоторых случаях (например, в ограниченных структурах с высокой водопроницаемостью водовмещающих пород) балансовый метод может быть использован и для оценки перспективных эксплуатационных ресурсов. Следует иметь в виду, что балансовый метод оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод может применять-

ся только для тех водоносных горизонтов, где опытными откачками доказана возможность отбора подземных вод рациональными в технико-экономическом отношении водозаборными сооружениями.

Гидродинамический метод на первом этапе применяется для оценки перспективных эксплуатационных ресурсов применительно к заданной, однородной для всего балансового района системе расположения водозаборов по сетке.

При расположении водозаборов по сетке и при одновременном вводе их в эксплуатацию через некоторое, относительно непродолжительное время вследствие взаимодействия водозаборов между их депрессионными воронками образуются водоразделы, которые можно рассматривать как водоупорное ограничение каждой воронки (блока) (Биндеман, Бочеве, 1964). В таком случае можно определять перспективные эксплуатационные ресурсы в одном блоке и, умножив их на число блоков в пределах всего водоносного горизонта, оценить эксплуатационные ресурсы водоносного горизонта в целом.

При оценке эксплуатационных ресурсов подземных вод в речных долинах, где основным источником формирования являются привлекаемые ресурсы, а водозаборы располагаются в виде линейных рядов, гидродинамический метод применяется для оценки как потенциальных, так и перспективных эксплуатационных ресурсов. Потенциальные ресурсы оцениваются как возможная производительность условной галереи, а перспективные — как производительность линейного ряда скважин, суммарный расход которых зависит от их количества и расстояния между ними.

Подсчет эксплуатационных ресурсов подземных вод по гидрогеологической аналогии заключается в определении модуля эксплуатационных ресурсов (или отдельных его составляющих) на единицу площади (в долинах рек — на единицу длины) оцениваемого водоносного горизонта, устанавливаемого в пределах наиболее изученных участков по данным детальных разведочных работ или эксплуатации действующих водозаборов. По рассчитанному модулю устанавливаются эксплуатационные ресурсы в соответствии с оцениваемой площадью водоносного горизонта или длиной рассматриваемого участка (в долинах рек).

Для обоснованного подсчета эксплуатационных ресурсов методом аналогии важно, чтобы гидрогеологические условия и источники формирования эксплуатационных ресурсов подземных вод в пределах рассматриваемой площади и эталонного участка были идентичны. Возможность использования этого метода определяется наличием детально разведанного участка или участка, где проводится эксплуатация подземных вод. Для обоснования возможности проведения аналогии между опорным аналогом и оцениваемой территорией должны быть сопоставлены основные факторы, определяющие условия формирования эксплуатацион-

ных ресурсов подземных вод и их величину (условия залегания водоносного горизонта, граничные условия, состав водовмещающих пород, условия питания, возможность использования привлекаемых ресурсов, характер перекрытия и состав перекрывающих отложений и пр.). При изменении некоторых расчетных параметров по сравнению с их значениями на эталонных участках (водопроводимости, допустимого понижения) в величину модуля эксплуатационных ресурсов (или его составляющей) необходимо ввести коэффициент пропорциональности между величиной параметра на оцениваемом и эталонном участках по соответствующим формулам динамики подземных вод.

Метод аналогии может быть применен практически в любых гидрогеологических условиях при наличии эталонного водозаборного или разведанного участка.

На втором этапе региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод, когда учитывается расположение конкретных потребителей и заявленная потребность в воде, производится гидродинамическими методами, применяемыми в двух модификациях — аналитические расчеты и математическое (аналоговое) моделирование. Применение аналитических расчетов целесообразно только в относительно простых гидрогеологических условиях, характеризующихся достаточно однородными фильтрационными и емкостными свойствами горных пород и простыми граничными условиями, а также при небольшом количестве действующих водозаборов. Кроме того, аналитические методы целесообразно применять в слабо изученных районах, где возможности моделирования не могут быть реализованы в связи с отсутствием необходимого фактического материала.

В сложных гидрогеологических условиях (особенно при слоистом залегании водоносных горизонтов, неоднородном строении водовмещающей среды, неравномерности питания по площади, наличии «гидрогеологических окон», сложных конфигурациях границ и изменении во времени граничных условий, большом и неравномерно распределенном по площади количестве водозаборов) региональную оценку целесообразно проводить методом математического моделирования (Жернов, Шестаков, 1971). В настоящее время это моделирование достаточно широко применяется при оценке эксплуатационных запасов на локальных участках (Гавич, 1970). В последние годы этот метод стал использоваться и при региональной оценке эксплуатационных ресурсов, в частности, для центральной части Московского артезианского бассейна (Крашин и др., 1970), краевой части Днепровско-Донецкого артезианского бассейна, района КМА (Бабушкин и др., 1967), Тахта-Купырского артезианского бассейна (Пашковский, 1969). Методы моделирования позволяют повысить достоверность гидрогеологических прогнозов при региональной оценке, так как принятая расчетная схема может быть откорректирована в результате решения обратных и инверсионных задач.

В ближайшее время должно начаться комплексное моделирование на гибридных машинах, использующее как аналоговую, так и цифровую вычислительную технику. При этом можно будет создать постоянно действующие модели крупных артезианских бассейнов и других гидрогеологических структур и осуществлять оперативную переоценку эксплуатационных ресурсов и управление этими ресурсами.

В данной работе рассматривается методика оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод расчетами по формулам динамики подземных вод, что во многих случаях оказывается вполне достаточным для практических целей. Эти же расчеты служат обоснованием целесообразности в тех или иных случаях выполнения моделирования.

При оценке эксплуатационных ресурсов величина допустимого понижения уровня воды в эксплуатационных скважинах к концу намеченного периода эксплуатации должна приниматься с учетом гидрогеологических и технико-экономических предпосылок, в частности с учетом возможности в обозримой перспективе переключения водоснабжения на другой источник, если возникает опасение истощения естественных запасов подземных вод. Как правило, понижение уровня в безнапорных водах не должно превышать половины мощности водоносного пласта, а в напорных — величины напора над кровлей пласта плюс половина его мощности.

Для глубоко залегающих напорных горизонтов глубина динамического уровня при намечаемой эксплуатации не должна превышать 200—250 м, что примерно соответствует максимальной высоте подъема большей части серийно выпускаемого насосного оборудования.

Расчетные гидродинамические параметры (водопроницаемость, коэффициент фильтрации) определяются преимущественно по данным ранее проведенных опытных и эксплуатационных откачек, а также в результате анализа работы действующих водозаборов.

При выборе расчетных значений водопроницаемости экстраполяцией данных, полученных на отдельных участках при опытных откачках, следует учитывать изменения мощности и литологии оцениваемого водоносного пласта в регионе.

При расчетах коэффициент гравитационной водоотдачи принимается по данным опытных работ, по наблюдениям за режимом подземных вод, по лабораторным данным. При отсутствии таких данных ориентировочно коэффициент водоотдачи может быть принят для песков 0,10—0,20; для гравийно-галечных отложений — 0,20—0,25; для скальных пород — 0,005—0,02. Для трещиноватых и закарстованных пород величину водоотдачи наиболее целесообразно определять по аналогии, используя опыт эксплуатации водозаборов.

Коэффициент упругой водоотдачи может быть определен по данным опытно-фильтрационных работ и анализа действующих

водозаборов (как отношение проводимости к пьезопроводности горизонта); этот коэффициент обычно измеряется очень малыми значениями ($10^{-3} \cdot 10^{-4}$), т. е. в сотни и тысячи раз меньшими, чем коэффициент гравитационной водоотдачи.

Следует обратить внимание на следующее важное обстоятельство.

В связи с тем что региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод в конечном итоге служит оценкой баланса подземных вод в условиях их эксплуатации, региональной оценке ресурсов должно предшествовать соответствующее районирование территории по балансовому признаку.

Крупные территории, в пределах которых распространены и формируются оцениваемые эксплуатационные ресурсы подземных вод, целесообразно называть балансовыми районами первого порядка (регионами). Как правило, границы этих регионов совпадают с границами крупных геологических структур. Так, например, балансовым гидрогеологическим районом первого порядка (регионом) является артезианский бассейн платформенного типа, межгорная впадина, предгорная равнина с пролювиальными шлейфами (начиная от гор, где происходит питание подземных вод, и кончая собственно равниной, где осуществляется полное расходование подземных вод).

1562
Внутри каждого крупного балансового региона могут быть в свою очередь выделены балансовые районы второго порядка двух видов: 1) районы, где заложение водозаборов по гидрогеологическим и технико-экономическим соображениям целесообразно; 2) районы, где заложение водозаборов по этим соображениям нецелесообразно (большая глубина скважин в связи с глубоким залеганием уровня подземных вод, незначительные их дебиты вследствие низкой водопродности пластов; качество воды, удаленность от потребителя и др.).

Оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод проводится только для районов первого вида. Граничащие с ними районы второго вида рассматриваются только как области формирования эксплуатационных ресурсов района первого вида.

В пределах крупного региона (балансового района первого порядка) может быть несколько районов второго порядка. Сумма эксплуатационных ресурсов подземных вод районов второго порядка первого вида составляет величину эксплуатационных ресурсов подземных вод региона. Выделение районов второго порядка должно обязательно учитывать технико-экономические критерии (близость к потребителю и т. п.).

В качестве примера можно привести балансовый гидрогеологический регион, приуроченный к крупному пролювиальному шлейфу. Здесь, как известно, в предгорной и равнинной частях могут быть выделены три района второго порядка:

а) предгорный с очень глубоким залеганием подземных вод (100 м и более в галечниках);



б) средний (до области выклинивания), где уровень подземных вод залегает на сравнительно небольших глубинах (до 20—30 м), а водовмещающие породы представлены гравийно-галечниковыми отложениями, переслаивающимися с суглинками;

в) равнинный (нижний), где единый водоносный горизонт глинистыми (или суглинистыми) отложениями расчленяется на несколько водоносных горизонтов, причем гравийно-галечниковые отложения замещаются песками. В этом районе происходит частичная разгрузка подземных вод, очень часто в результате испарения, что приводит к увеличению минерализации подземных вод в верхних горизонтах этой зоны.

Эксплуатация подземных вод в описываемых условиях наиболее целесообразна в среднем районе, который можно рассматривать как район первого вида. В предгорном (из-за большой глубины залегания) и в равнинном (в связи с худшими фильтрационными свойствами и повышенной минерализацией в верхних горизонтах) районах водозаборы размещать нецелесообразно. Ресурсы, формирующиеся в предгорном районе, следует учитывать при оценке эксплуатационных ресурсов среднего района.

В балансовом гидрогеологическом регионе может быть выделено несколько районов второго порядка, относящихся к первому виду, отличающихся условиями формирования эксплуатационных запасов. Эти районы можно рассматривать независимо один от другого. Так, например, в артезианских бассейнах платформенного типа могут быть выделены: а) краевые зоны, в которых формирование эксплуатационных ресурсов происходит в основном за счет привлечения поверхностного стока и осушения вышележащих неосновных горизонтов; б) участки, где возможно перетекание подземных вод из неогниваемых горизонтов через слабопроницаемые разделяющие слои; в) участки, где формирование эксплуатационных ресурсов будет происходить только за счет сработки упругих запасов.

В пределах каждого балансового района следует выделять один или несколько водоносных горизонтов, оптимальных по совокупности признаков для использования, для которых и проводится оценка эксплуатационных ресурсов (Никитин, 1973б). При наличии нескольких водоносных горизонтов могут быть встречены следующие условия.

а) В районе выделяются два водоносных горизонта, гидравлически связанных один с другим (иногда через слабопроницаемый слой). В этом случае водозаборные скважины оборудуются на горизонт, обладающий более высокими фильтрационными свойствами. Если один из горизонтов (обычно верхний) характеризуется большой емкостью, но плохими фильтрационными свойствами, то оцениваются эксплуатационные ресурсы хорошо проницаемого водоносного горизонта, а естественные запасы другого (обычно верхнего) горизонта рассматриваются только как источник формирования (привлекаемые ресурсы) ресурсов оцениваем

мого водоносного горизонта. Такие условия весьма характерны для краевых частей артезианских бассейнов, долин рек, где эксплуатируется водоносный горизонт в коренных отложениях, характеризующихся большой водопроницаемостью и т. д.

б) В районе выделяется несколько водоносных горизонтов, в разрезе имеющих примерно одинаковое значение, и водозаборные скважины оборудуются на все горизонты. В этих условиях проводится оценка эксплуатационных ресурсов каждого горизонта.

Внутри районов, выделенных по условиям формирования эксплуатационных ресурсов, выделяются участки с различием по водопроницаемости пласта и составляются карты гидрогеологических параметров.

При региональной оценке эксплуатационных ресурсов следует учитывать современное использование подземных вод. В тех случаях, когда современный отбор происходит при практически стабильном режиме, все дальнейшие прогнозы следует проводить от сформировавшейся уровневой или пьезометрической поверхности подземных вод и подсчитанные ресурсы суммировать с величиной современного водоотбора.

В тех случаях, когда эксплуатация происходит при неустановившемся режиме, суммирование подсчитанных ресурсов и величины современного водоотбора недопустимо. В таких случаях следует прогнозировать дополнительное понижение от существующего водоотбора на расчетный срок эксплуатации и в дальнейшем рассчитывать от уровня подземных вод, сформировавшегося к концу этой эксплуатации с расходом, равным современному потреблению.

Гидрогеологическое районирование, результаты оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод, а также исходный фактический материал для их подсчета отображаются на соответствующих гидрогеологических картах. Масштабы карты определяются этапом исследований, гидрогеологическими условиями и степенью изученности района. При оценке потенциальных и перспективных ресурсов на первом этапе (по «сетке» или по линии) наиболее целесообразен масштаб от 1 : 500 000 до 1 : 1 500 000, а при оценке прогнозных ресурсов на втором этапе (с учетом размещения конкретных потребителей) — от 1 : 200 000 до 1 : 500 000 (с более крупномасштабными врезками для отдельных районов).

На картах потенциальных и перспективных ресурсов на первом этапе основной картируемый параметр — модуль эксплуатационных ресурсов; на картах второго этапа оценки прогнозных ресурсов показываются допустимые дебиты конкретных водозаборов.

ПРИНЦИПЫ РЕГИОНАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ
ЕСТЕСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Под естественными ресурсами подземных вод, по Куделину (1960), понимается обеспеченный питанием расход подземных вод, т. е. та их часть, которая непрерывно возобновляется в процессе общего круговорота влаги на земле. Естественные ресурсы характеризуют величину питания подземных вод инфильтрацией атмосферных осадков, поглощением речного стока и перетеканием из других водоносных горизонтов, суммарно выраженную величиной расхода потока. Естественные ресурсы подземных вод служат, таким образом, показателем восполнения подземных вод, отражая их основную особенность как возобновляемого полезного ископаемого. В среднемноголетнем значении величина питания подземных вод за вычетом испарения равна подземному стоку. Поэтому в практике гидрогеологических исследований естественные ресурсы подземных вод обычно выражаются среднегодовыми или минимальными значениями модулей подземного стока ($л/сек$ с $1 км^2$) или величиной слоя воды ($мм$ за год), поступающей в водоносный горизонт в области его питания. Для подземных вод зоны интенсивного водообмена, находящихся в сфере дренирующего воздействия речной сети и питающихся главным образом за счет инфильтрации атмосферных осадков, важна характеристика коэффициентов подземного стока (отношение подземного стока к выпадающим атмосферным осадкам) и подземного питания рек (отношение дренируемого подземного стока к общему речному стоку).

Следует отметить, что эквивалентность понятий «питание подземных вод» и «подземный сток» справедлива только для среднемноголетних данных при изучении крупных территорий, например в пределах какой-либо гидрогеологической структуры, всей площади распространения водоносного горизонта и т. д. При детальных исследованиях отдельных участков могут быть выделены случаи, когда подземный сток существует, хотя питание подземных вод на данном участке практически отсутствует (например, так называемый транзитный подземный сток в районах развития на поверхности мощных водоупорных толщ). Отсюда принципиально важен вывод о том, что оценку естественных ресурсов подземных вод следует проводить применительно к отдельным выделенным балансовым районам, которые могут быть разными в зависимости от поставленной цели исследований.

Балансовые районы бывают разного порядка.

В качестве балансовых районов первого порядка могут быть приняты отдельные гидрогеологические структуры — артезианские бассейны, горно-складчатые массивы, щиты. Балансовыми районами второго порядка могут быть площади распространения того или иного водоносного горизонта, включающие его области питания, стока и разгрузки. При более детальных исследованиях выделяются балансовые районы третьего и более низких порядков, например речные бассейны, участки развития подземных вод различных типов (воды карстовых массивов, аллювиальных отложений, флювиогляциальных равнин) и т. д.

Как уже было показано, величина естественных ресурсов — один из основных членов, входящих в балансовое уравнение величины эксплуатационных ресурсов подземных вод, используемых или намечаемых к использованию. В начальный период эксплуатации того или иного водозабора эксплуатационные ресурсы обычно превышают естественные за счет сработки естественных (гравитационных и упругих) запасов подземных вод. При неограниченном сроке эксплуатации и отсутствии притока воды из других водоносных горизонтов или поверхностных водоемов и водотоков, который возникает при откачке, эксплуатационные ресурсы по величине будут приближаться к естественным. Таким образом, последние представляют собой верхний предел дебита водозабора подземных вод при неограниченном сроке их эксплуатации (за исключением приречных водозаборов, дебиты которых формируются за счет инфильтрации речных вод) (Подземный сток..., 1966; Зекцер и др., 1972). По количественной оценке естественных ресурсов подземных вод в региональном плане возможно представить обеспеченность того или иного региона подземными водами, установить соотношение ресурсов подземных и поверхностных вод и роль подземного стока в общем водном балансе.

В тех случаях, когда невозможно достаточно надежно определить гидрогеологические параметры водоносных горизонтов (например, в сильно закарстованных районах), величина естественных ресурсов — основной критерий при оценке эксплуатационных ресурсов подземных вод. Исследование закономерностей формирования подземного стока и его количественная оценка имеют также важное значение при изучении роли подземного стока в формировании земной коры. По результатам таких исследований можно судить о миграции химических элементов в земной коре, гипергенных процессах, образовании и разрушении месторождений полезных ископаемых, формировании геотермического режима земной коры.

В начале 60-х годов большим коллективом гидрогеологов и гидрологов была выполнена работа по региональной оценке и картированию естественных ресурсов пресных подземных вод для территории СССР, в результате которой были составлены карты

подземного стока СССР масштаба 1 : 5 000 000 (1965) и опубликована монография «Подземный сток на территории СССР» (1966). На картах отражены среднемноголетние значения модулей и коэффициентов подземного стока и подземного питания рек. Основные принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод, использованные при составлении этих карт, а также выявленные закономерности формирования и распределения естественных ресурсов подземных вод по территории страны освещены в литературе (Подземный сток..., 1966; Зекцер и др., 1972). Результаты выполненных исследований использовались для гидрогеологического обоснования Генеральной схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов СССР, составленной в начале 60-х годов, и послужили основой для региональной оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод. Карты подземного стока позволяют: решать практические задачи, связанные с комплексным использованием водных ресурсов; определять естественные ресурсы пресных подземных вод исследуемого региона, как основного компонента их эксплуатационных ресурсов, для перспективного планирования использования подземных вод; определять величину подземного стока для характеристики подземной составляющей речного стока, как наиболее устойчивой части расхода рек, и оценки соотношений ресурсов поверхностных и подземных вод в различных регионах; определять величину подземного стока, как элемента водного баланса территорий.

За последнее время в ряде районов страны (Московском, Прибалтийском, Западно-Сибирском, Терско-Кумском артезианских бассейнах и других регионах) более детально исследованы естественные ресурсы подземных вод, позволившие усовершенствовать методы их оценки и картирования и более полно раскрыть закономерности формирования естественных ресурсов пресных подземных вод основных водоносных комплексов, используемых для водоснабжения (Зекцер, 1968; Лебедева, 1972; Всеволожский, 1973; Джамалов, 1973; Зеленин, 1972, и др.). Важное значение имеет внедрение в практику гидрогеологических съемок среднего масштаба оценки естественных ресурсов подземных вод. Первый опыт таких работ, проведенных в Костромской области и некоторых районах Урала (Кийко и др., 1969; Куделин и др., 1969), показал, что в процессе гидрогеологических съемок без значительного увеличения объема полевых работ и удорожания их стоимости можно провести оценку естественных ресурсов подземных вод исследуемого региона. При этом определяется величина ресурсов подземных вод для выделенного балансового района, охватывающего обычно достаточно крупные территории в целом, а не для отдельных локальных участков распространения подземных вод. Поэтому методы определения величины питания подземных вод, по данным лизиметрических наблюдений, оказываются практически неприемлемыми для региональных исследований ввиду ма-

дочисленности таких наблюдений для многих районов и сложности их экстраполяции на значительные площади. Следовательно, указанные методы могут использоваться лишь для контроля региональных величин питания подземных вод. Исключение составляют, естественно, районы, где сеть таких наблюдений столь значительна, что может быть использована и для региональной оценки естественных ресурсов подземных вод определенного балансового района.

Основные методы определения естественных ресурсов подземных вод в региональном плане заключаются: в расчленении гидрографов рек по генетическим видам питания за многолетний период; в расчете подземного стока по приращению меженного расхода реки на участке между двумя гидрометрическими створами; в расчете величины питания подземных вод по данным наблюдений за режимом их уровней в естественных условиях; в расчете расхода потока подземных вод методами гидродинамики; в определении родникового стока; в методе общего водного баланса областей питания или разгрузки подземных вод.

Указанные методы могут быть типизированы в зависимости от того, где оцениваются естественные ресурсы подземных вод (на участках питания, транзита или разгрузки подземных вод):

Области питания подземных вод	Области транзита	Области разгрузки подземных вод
1. Метод расчета инфильтрации по данным наблюдений за режимом уровня подземных вод 2. Метод среднеегодового водного баланса областей питания подземных вод	1. Гидродинамический метод расчета расхода потока	1. Метод генетического расчленения гидрографов рек 2. Метод расчета изменений меженного расхода реки на участке между двумя гидрометрическими створами 3. Метод среднеегодового водного баланса областей разгрузки подземных вод 4. Метод оценки естественных ресурсов подземных вод по родниковому стоку

Следует иметь, однако, в виду, что само выделение областей питания, транзита и разгрузки подземных вод весьма условно.

В ряде случаев и в областях транзита подземных вод происходит их частичное питание на возвышенностях и разгрузка в речных долинах. Тем не менее такая типизация методов оценки естественных ресурсов подземных вод весьма полезна для выяснения возможности их применения в тех или иных природных условиях.

Остановимся кратко на характеристике этих методов.

Для гумидной зоны с хорошо развитой речной сетью широко используется комплексный гидролого-гидрогеологический метод расчленения гидрографов рек за многолетний период, разработанный советскими учеными. Возможность применения этого метода обусловлена тем, что подземный сток зоны интенсивного водообмена в районах с постоянной речной сетью формируется под

дренирующим воздействием речных систем. Следовательно, ресурсы пресных подземных вод для гумидной зоны могут быть охарактеризованы величиной подземного стока в реки, определяемой на основе генетического расчленения гидрографа (гидрограммы) общего стока рек, и путем выделения на нем той части, которая формируется за счет дренирования водоносных горизонтов и комплексов. При применении этого метода необходим учет режима и динамики стока воды в реки из отдельных водоносных горизонтов, дренируемых речной сетью, что определяется условиями залегания и питания грунтовых и артезианских вод и положением мест разгрузки по отношению к урезу реки.

Различный характер гидравлической взаимосвязи подземных и речных вод, формирующий режим подземного стока в реки из дренируемых горизонтов, обуславливает разные схемы расчленения гидрографов рек (методика расчленения гидрографов рек и расчета среднегоголетних величин подземного стока изложена в литературе: Куделин, 1960; Подземный сток..., 1966).

Метод расчленения гидрографа реки и определения подземного стока позволяет получить среднегодовую величину естественных ресурсов подземных вод, формирующихся в бассейне реки или его части. Минимальное значение величины естественных ресурсов можно получить, не прибегая к расчленению гидрографов рек, приняв за подземный сток минимальный среднемесячный расход реки. Как показывает опыт региональной оценки подземного стока, в центральных частях Европейской части СССР минимальные величины естественных ресурсов подземных вод меньше среднегодовых величин примерно в полтора раза.

В некоторых случаях величину естественных ресурсов подземных вод целесообразно определять по изменению меженного расхода реки на участке между двумя гидрометрическими створами. Величина изменения расхода реки на бесприточном участке за вычетом суммы расхода притоков реки, определенная в период устойчивой межени, характеризует подземный сток из дренируемых водоносных горизонтов или величину питания подземных вод за счет поглощения речного стока. Гидрометрические створы для расчета должны выбираться таким образом, чтобы разность в расходах реки в первом и во втором створах превышала суммарную величину возможных погрешностей измерения расходов реки.

В полупустынных и пустынных районах, где питание подземных вод осуществляется в основном за счет поглощения поверхностного стока, а также в районах широкого развития карста указанный метод позволяет рассчитать годовые величины естественных ресурсов подземных вод.

Важное преимущество указанных методов определения подземного стока естественных ресурсов подземных вод — возможность получения их среднегоголетних характеристик в результате использования уже имеющихся гидрометрических данных по расхо-

дам рек без производства специальных дорогостоящих разведочных и опытных гидрогеологических работ. Эти методы — основные при оценке подземного стока и естественных ресурсов подземных вод в областях с хорошо развитой речной сетью при наличии длительных наблюдений за расходами реки. Следует отметить, что величины подземного стока, полученные указанными методами, характеризуют естественные ресурсы подземных вод всей зоны дренирования, включающей обычно несколько водоносных горизонтов и комплексов. Для того чтобы оценить естественные ресурсы каждого из основных водоносных горизонтов зоны дренирования, необходимо проанализировать гидрогеологические условия рассматриваемого района — распространение, мощность, литологический состав и проницаемость отдельных водоносных слоев — и охарактеризовать степень участия основных водоносных горизонтов в подземном питании рек.

В ряде случаев применение рассмотренных методов затруднено или невозможно (отсутствие представительных гидрометрических наблюдений, значительное развитие искусственного орошения, искажающего естественные условия речного стока и питания подземных вод, зарегулированность речного стока, существенное песовпадение поверхностного и подземного водоразделов вследствие особенностей геологического строения речных долин и др.). Особенно важно иметь в виду такой фактор, как искусственное регулирование речного стока, практически исключающий возможность использования указанных методов для оценки естественных ресурсов подземных вод. Поэтому метод расчленения гидрографов рек в настоящее время можно рекомендовать в основном для небольших речных бассейнов, находящихся в естественных условиях. На зарегулированных реках при наличии длинных рядов наблюдений для расчленения гидрографов следует использовать данные измерения расходов рек до начала регулирования стока. Учитывая эти обстоятельства, метод расчленения гидрографов рек, а также метод расчета изменения меженного расхода реки на участке между двумя гидрометрическими створами рекомендуется применять в сочетании с другими методами.

При наличии достаточно длительных наблюдений за режимом подземных вод в естественных условиях величина питания подземных вод может быть определена путем обработки и анализа данных этих наблюдений. При этом величина питания подземных вод рассчитывается не по среднегодовой амплитуде колебания уровня (за многолетний период) в отдельных скважинах, а с учетом вида режима подземных вод и по значению недостатка насыщения или водоотдачи (Ковалевский, 1967). Значения величины водоотдачи или недостатка насыщения выбираются по литературным данным с корректировкой их применительно к конкретным гидрогеологическим условиям. По возможности используются данные экспериментальных наблюдений.

Для оценки естественных ресурсов подземных вод могут быть широко использованы гидродинамические методы расчета расхода подземного потока по известным аналитическим зависимостям. Работа заключается в сборе и обработке имеющихся данных по гидрогеологическим параметрам. Точность расчета зависит от количества и достоверности информации о значениях водопроводимости водоносных пластов. В горных районах, где разгрузка подземных вод происходит главным образом через родники, оценку подземного стока целесообразно производить путем определения среднегодовых значений родникового стока за многолетний период.

Естественные ресурсы глубоких артезианских водоносных горизонтов, расположенных ниже зоны дренирования речной сетью, могут быть оценены по уравнению среднемноголетнего водного баланса для речного бассейна или его части. При этом существенно, в какой части артезианского бассейна расположен исследуемый район — в области питания, транзита или разгрузки. Поэтому начальный этап исследований этим методом заключается в структурно-гидрологическом анализе территории для выделения областей преимущественно питания и разгрузки подземных вод. Затем эти области разбиваются на расчетные балансовые участки, соответствующие речным бассейнам. Оценку естественных ресурсов глубоких артезианских вод можно выразить уравнением водного баланса речного бассейна (*мм/год*)

$$W_0 = \pm (x_0 - y_0 - z_0), \quad (II.1)$$

где W_0 — среднемноголетняя величина инфильтрации в глубокие водоносные горизонты в области питания или величина артезианского стока в области разгрузки; x_0 — среднемноголетняя величина атмосферных осадков; y_0 — среднемноголетняя величина речного стока; z_0 — среднемноголетняя величина испарения.

В тех случаях, когда собственные ресурсы глубоких вод оцениваются в области их питания, в правой части уравнения перед скобкой принимается знак «плюс», а если в области разгрузки — знак «минус».

Основное условие применения этого метода оценки естественных ресурсов глубоких вод — определение всех основных элементов уравнения водного баланса (x_0 , y_0 , z_0) независимыми методами и использование среднемноголетних величин осадков, речного стока и испарения. При использовании метода водного баланса следует, разумеется, учитывать, что естественные ресурсы подземных вод одного и того же горизонта или комплекса, подсчитанные для области транзита, нельзя суммировать с естественными ресурсами, оцененными в области питания водоносного горизонта и в области его разгрузки. В засушливых районах, где разгрузка подземных вод происходит в основном путем испарения, естественные ресурсы подземных вод можно ориентировочно оценивать по величине испарения.

Приведенная краткая характеристика основных методов региональной оценки естественных ресурсов подземных вод показывает, что каждый из этих методов имеет и преимущества, и недостатки. Выбор метода оценки зависит прежде всего от природных условий того или иного балансового района, а также от цели и масштаба исследований. Определяющими при этом будут особенности формирования и движения подземных вод. Так, для грунтовых вод могут быть использованы методы расчленения гидрографов реки и расчета по данным наблюдений за режимом подземных вод, для артезианских вод платформенных областей — гидродинамические методы расчета расхода потока, методы расчленения гидрографов в районах дренирования подземных вод и среднесуточного водного баланса для участков питания или разгрузки подземных вод. В карстовых районах естественные ресурсы подземных вод могут быть оценены по изменению меженичного расхода реки на участке между двумя гидрометрическими створами, по родниковому стоку, а в некоторых случаях — по расчленению гидрографов рек. В конусах выноса основной метод оценки естественных ресурсов подземных вод — расчет расхода потока или определение суммарной величины родникового стока в зоне их выклинивания. При оценке естественных ресурсов подземных вод аллювиальных отложений речных долин необходимо различать питание (расход), которое поступает к долине из коренного ложа (это питание может быть оценено различными методами, в основном гидродинамическими), и то питание, которое формируется за счет инфильтрации атмосферных осадков непосредственно в аллювиальные отложения (последняя величина может быть определена по данным наблюдений за режимом грунтовых вод).

Общая величина естественных ресурсов подземных вод речных долин может быть приближенно определена по приращению меженичного расхода реки. Как показано Н. Н. Биндеманом (1960), на участках долины, где геологическое строение в плане однотипно, расход грунтового потока в период межени может быть определен на основании данных о водопроницаемости пласта аллювия по поперечному разрезу долины и уклону реки. Рассматривая речную долину в качестве самостоятельного балансового района, необходимо отдельно оценивать поступление воды из коренного берега.

При оценке естественных ресурсов подземных вод региона в целом, включающего речные долины и междуречные пространства, приток воды в аллювиальные отложения речных долин из коренных пород не должен учитываться, так как он учтен в величине естественных ресурсов подземных вод междуречных пространств.

Методы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод не конкурируют, а взаимно контролируют и дополняют один другой. При наличии необходимых исходных данных следует

стремиться к комплексному применению нескольких методов, что значительно повышает достоверность проводимых расчетов.

Исследования по региональной оценке естественных ресурсов подземных вод могут быть условно разбиты на несколько последовательных этапов.

На первом этапе анализируются общие природные условия исследуемой территории. Выделяются балансовые районы первого, второго и более низких порядков. Устанавливаются основные водоносные горизонты и комплексы пресных подземных вод, естественные ресурсы которых должны быть оценены, и определяются основные методы такой оценки.

Второй этап, наиболее трудоемкий и продолжительный, включает сбор и анализ исходных фактических материалов, необходимых для оценки естественных ресурсов подземных вод (многолетних данных наблюдений за расходом рек, дренирующих основных водоносных горизонты, данных наблюдений за режимом уровня подземных вод, определения гидрогеологических параметров водоносных слоев, данных наблюдений за режимом опорных родников, данных по отдельным элементам общего водного баланса и т. д.). Проводится анализ гидрогеологических условий формирования подземного стока по выделенным балансовым районам и исследуется характер гидравлической связи подземных и поверхностных вод в разные сезоны года. В ряде случаев при недостатке исходных материалов могут быть организованы межвенная гидрометрическая съемка или измерения межвенного расхода на характерных участках реки в целях оценки приращения или потерь речного стока.

На третьем этапе рассчитываются минимальные и среднегодовые многолетние величины подземного стока выбранными методами, оцениваются величины подземного стока различной обеспеченности, определяется количественное соотношение поверхностного и подземного стока и отношение подземного стока к атмосферным осадкам.

На четвертом, заключительном, этапе составляется карта естественных ресурсов подземных вод, на которой они характеризуются величиной модуля естественных ресурсов подземных вод ($л/сек \cdot км^2$) или слоем воды ($мм/год$). На карте должны быть отображены также гидрогеологические условия формирования ресурсов, возраст и состав водовмещающих пород, участки интенсивного развития карста, поглощения речного стока, районы влияния хозяйственной деятельности человека на формирование подземного стока.

УЧЕТ ЕСТЕСТВЕННОГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД
ПРИ ПЕРСПЕКТИВНОМ ПЛАНИРОВАНИИ
ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

*

Естественные ресурсы подземных вод непостоянны во времени, так как непосредственно зависят от неравномерности питания подземных вод как в годовом, так и в многолетнем разрезе. Это отражено в изменениях напоров и уровней подземных вод, а следовательно, и мощностей безнапорных водоносных горизонтов, а также дебитов источников, температуры и химического состава подземных вод. Использование для оценки ресурсов подземных вод случайных «разовых» замеров уровней подземных вод, дебитов источников и т. п. без учета возможных их изменений в течение года и за многолетие может приводить в некоторых случаях к существенным ошибкам при оценке эксплуатационных ресурсов подземных вод, при прогнозе времени возможного подтока загрязненных или соленых вод к водозаборам и выделении зон санитарной охраны, при оценке ущерба речному стоку при эксплуатации подземных вод.

Учет режима подземных вод необходим при оценке эксплуатационных запасов подземных вод как при проектировании конкретных водозаборов, так и при составлении схем комплексного использования водных ресурсов, т. е. при перспективном планировании использования подземных вод в региональном плане.

Учет режима подземных вод особенно важен при оценках естественного восполнения запасов подземных вод и расчетах сработки этих запасов во времени. Даже в напорных водах можно отметить сезонное их восполнение, значительно замедляющее темпы снижения уровней подземных вод, рассчитываемые по схеме изолированного напорного пласта. Еще резче ежегодное периодическое восполнение запасов подземных вод проявляется в грунтовых водах. Однако и здесь им чаще всего пренебрегают, относя в «запас прочности» расчетов, занижая тем самым эксплуатационные запасы. Особенно важно оценивать изменчивость во времени ресурсов грунтовых вод в карстовых районах, как наиболее динамичных во времени, в речных долинах с периодически прерывающимся поверхностным стоком и вообще в водоносных горизонтах небольшой мощности, соизмеримой с амплитудами колебаний уровней подземных вод. Так, например, годовые колебания суточных значений уровней карстовых вод в районе Силурийского плато достигают 10—29 м. Дебиты карстовых ис-

точников, широко использующихся для водоснабжения, в годы низкой водности уменьшаются в 30—100 раз по сравнению с их средними за многолетие расходами, вплоть до полного их иссякания. Аналогичная картина наблюдается и с источниками в области распространения молодых эффузивных отложений (Армения, Грузия, Камчатка). Естественно, наибольшие за многолетие колебания уровней или дебитов подземных вод фиксируются по суточным их значениям, несколько меньшие — по среднемесячным и наименьшие — по среднегодовым уровням или дебитам. Порядок возможных изменений этих величин иллюстрируется результатами наблюдений по отдельным точкам (табл. 1).

Таблица 1

Величины многолетних амплитуд колебаний уровней грунтовых вод

Гидрогеологическая станция, изучающая режим подземных вод	Литология водо-вмещающих пород	Средняя глубина залегания подземных вод, м	Год начала наблюдений	Амплитуда колебаний за многолетие по замерам, м		
				суточным	среднемесячным	среднегодовым
Воркутинская	Пески, песчаники	12,7	1965	19,57	18,74	12,3
Северо-Западная	Известняки	14,3	1951	10,3	9,54	4,62
Латвийская	Супеси	1,8	1959	4,6	3,32	1,44
Белорусская	Пески	2,5	1947	3,92	3,37	1,56
Северо-Украинская	Суглинки	3,9	1952	5,17	4,53	3,66
Львовская	Галечники	2,4	1953	5,5	4,73	1,11
Южно-Украинская	Пески	2,2	1953	2,6	1,96	1,13
Крымская степная	Супеси	15,5	1954	5,79	5,63	2,68
ЦЧП	Суглинки	6,1	1917	5,95	5,67	3,15
КМА	Песок глинистый	39,0	1958	7,27	7,20	6,75
Горьковская	Известняки	20,5	1950	4,91	2,28	1,3
Южно-Якутская	Песчаники	83,7	1962	80,95	62,01	15,85

Как видно по данным табл. 1, амплитуды колебаний уровней подземных вод, определенные по среднегодовым данным, могут оказаться в 2—4 раза меньше, чем по суточным и даже среднемесячным значениям за многолетие. Поэтому наиболее важно оценить именно такие амплитуды.

Размеры годовых и многолетних колебаний уровней и дебитов подземных вод зависят от следующих факторов:

а) от литологического состава пород зоны аэрации и водоносного пласта, от которых зависит водопроницаемость пород зоны аэрации; недостатка насыщения или водоотдачи пород, влияю-

щих на скорость инфильтрации атмосферных осадков и испарение; урвнеспроводности (пъезопроводности) водоносного пласта, определяющей скорость передачи изменений уровня воды (давления) в пределах водоносного горизонта; б) от граничных условий водоносного пласта; в) от глубин залегания подземных вод, определяющих расходование части инфильтровавшейся в зону аэрации влаги на испарение; г) от климатической зоны, определяющей интенсивность питания подземных вод атмосферными осадками и их расходование на испарение.

Определенную роль в формировании ресурсов подземных вод играет степень расчлененности рельефа, микрорельеф, степень заселенности и пр. (Коноплянцев и др., 1963).

Соотношение внутригодовых, суточных и многолетних изменений среднегодовых значений уровней подземных вод в различных по климату районах и при разных глубинах залегания грунтовых вод не одинаково. Так, в гумидных областях при неглубоком залегании грунтовых вод сезонные колебания уровней значительно превосходят многолетние изменения среднегодовых уровней. С увеличением глубин залегания грунтовых вод, а также в районах с засушливым климатом сезонные колебания уровней уменьшаются и могут стать значительно меньше многолетних колебаний. Другими словами, на больших глубинах внутригодовой режим подземных вод во многих случаях практически не проявляется, а наблюдаются лишь плавные многолетние изменения уровней или напоров подземных вод. Однако амплитуды колебаний уровней в этих случаях бывают обычно невелики (не превосходят 1 м) и поэтому пренебрежение ими допустимо, так как они не могут существенно повлиять на величину оцениваемых ресурсов подземных вод.

Наибольшее практическое значение имеет учет внутригодовых колебаний, оцениваемых по суточным или среднемесячным значениям уровней подземных вод за многолетие при сравнительно неглубоком их залегании и в условиях весьма активной связи подземных вод с атмосферой и поверхностными водами. Это позволит определить обоснованность правильности принятых в расчет мощностей подземных вод на заданный срок оценки их естественных запасов, а также изменчивость амплитуд сезонных колебаний уровней подземных вод, характеризующих неравномерность их питания в годовом цикле. Обзор материалов о режиме подземных вод СССР показал, что наиболее высокие многолетние амплитуды колебаний уровней подземных вод наблюдаются при однородном строении зоны аэрации и водоносного горизонта в хорошо пронизываемых трещиноватых изверженных породах, характеризующихся малой водоотдачей массива пород в целом, несколько меньшей в закарстованных известняках, затем в галечниках и, наконец, в песках.

Такие колебания следует учитывать даже при самых приближенных оценках ресурсов подземных вод, особенно в районах

с дефицитом водных ресурсов, где следует ориентироваться не на минимально возможные ресурсы подземных вод (как это часто делается при отнесении естественного их сезонного восполнения и многолетней изменчивости в питании в «запас прочности» расчета), а на реально возможные для использования ресурсы с учетом неравномерности питания и регулирующей емкости водоносного горизонта.

Оценка возможных изменений уровней (мощностей) водоносных горизонтов может производиться в двух планах.

1. Составление временных прогнозов, т. е. прогнозов колебаний уровней подземных вод в течение какого-то определенного расчетного календарного срока (соответствующего, например, сроку, на который планируется использование подземных вод), с указанием конкретных изменений уровней по годам или с определением возможных периодов маловодных или многоводных лет в пределах этого срока.

2. Составление невременных, вероятностных прогнозов, т. е. определение статистическим путем максимально и минимально возможных значений уровней подземных вод без установления конкретного времени их наступления, но с характеристикой вероятности их появления.

Первая задача может ставиться при оценках ресурсов подземных вод на ограниченный срок их эксплуатации, особенно когда этот срок соизмерим с продолжительностью периодов группировок маловодных и многоводных лет, а также при определенной многолетней тенденции к увеличению или истощению запасов подземных вод, т. е. когда можно учесть конкретные изменения водности года или условий восполнения запасов подземных вод по годам. Подобные прогнозы целесообразно составлять в районах с напряженным водным балансом, так как они могут служить основой для выработки мероприятий, связанных с рациональным использованием подземных вод и возможным увеличением или ограничением водоотбора на отдельных этапах расчетного срока эксплуатации подземных вод.

Вторая задача ставится при оценках ресурсов подземных вод на длительный (30—50 лет) или неограниченный срок их эксплуатации. В этом случае, с одной стороны, определяются уровни подземных вод или дебитов источников 95%-ной обеспеченности, позволяющих рассчитать минимальные величины ресурсов подземных вод за многолетие. С другой стороны, при оценках минимального стока поверхностных вод определяются многолетние вариации мощностей водоносных горизонтов и восполнения запасов подземных вод в районах водозаборов инфильтрационного типа.

Расчеты обеспеченностей минимальных уровней и расходов рек, когда они определяются разгрузкой подземных вод, используются также для расчетов естественных ресурсов подземных вод или подземного стока, изменения которого также учитываются в водохозяйственных балансах территорий.

СОСТАВЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ПРОГНОЗОВ

Составление временных или календарных прогнозов режима подземных вод на сроки свыше нескольких месяцев связано со значительными трудностями, так как питание подземных вод в основном зависит от изменений метеорологических условий (количества выпадающих атмосферных осадков), прогнозы которых на такие сроки не составляются. Поэтому в основу многолетних гидрогеологических прогнозов могут быть положены либо крупномасштабные гелиогеофизические процессы, которые прямо или косвенно определяют изменения метеорологической обстановки на Земле, либо выявление статистическим путем закономерностей многолетних колебаний уровней или расходов подземных вод и использование этих закономерностей для прогнозов.

Учитывая косвенность и недостаточную изученность гелиогеофизических связей с режимом подземных вод, говорить о каких-либо точных календарных прогнозах изменений ресурсов подземных вод трудно. Здесь правильнее будет говорить об определении вероятного числа и продолжительности маловодных и многоводных периодов в пределах расчетного срока перспективной оценки ресурсов подземных вод. В отдельных случаях при этом может быть примерно определено во времени положение многоводных и маловодных периодов.

Многолетние временные или календарные прогнозы режима подземных вод могут составляться различными методами (Ковалевский, 1972): а) на основе корреляционных связей режима подземных вод с различными гелиогеофизическими факторами; б) на основе выявления трендов¹ или цикличности в режиме подземных вод и экстраполяции их в будущее; в) на основе экстраполяции закономерностей уровней или дебитов подземных вод как стационарного случайного процесса.

Как известно (Дугинов, Коробейников, 1957; Коноплянцев, 1967; Ковалевский, 1972, 1973а, б, и др.), между режимом подземных вод и различными гелиогеофизическими факторами существуют определенные физические связи. Не останавливаясь на механизме этих связей, еще не изученных, можно отметить наличие связей многолетних колебаний уровней и дебитов подземных вод с солнечной активностью, геомагнитной возмущенностью, атмосферной циркуляцией, нутационными колебаниями полюса Земли, приливными силами Луны и с другими макропроцессами, определяющими общую увлажненность и температуру воздуха отдель-

¹ Трендом называется направленная многолетняя тенденция к подъему или спаду уровней подземных вод, которая определяется либо крупномасштабными природными изменениями, например изменениями климата под воздействием векового цикла солнечной активности, либо какими-нибудь искусственными факторами (распашка целины, снегозадержание, мелиорация земель, вырубка леса и т. п.), определившими изменение баланса подземных вод.

ных территорий. Последние (осадки и температура) в свою очередь определяют основные статьи баланса подземных вод, т. е. размеры инфльтрационного питания подземных вод и их расходование на испарение. В настоящее время составляются долгосрочные прогнозы лишь солнечной активности, выраженной в числах Вольфа, атмосферной циркуляции, выраженной в индексах Вангенгейма, и суммарных индексов нутационных колебаний полюса Земли и приливных сил Луны. Именно с этими тремя процессами (по отдельности или в сумме) возможно установление корреляционных связей колебаний уровней или дебитов подземных вод.

Методы расчета уравнений парной и множественной корреляции, а также оценки их достоверности и качества рассмотрены в многочисленной специальной литературе по математической статистике (Венцель, 1969; Дуин-Барковский, Смирнов, 1955, и др.), а также в гидрогеологической литературе (Кац, 1967; Ковалевский, 1972; Коноплянцев, 1967; Методическое руководство по изучению режима подземных вод, 1954; Руководство по изучению режима и баланса подземных вод..., 1968, и др.).

Опыт установления корреляционных связей между режимом уровней и расходом подземных вод и гелиогеофизическими факторами показал, что теснота парных связей изменяется в довольно широких пределах (с коэффициентами корреляции от нескольких первых десятых долей единицы до 0,9). Наиболее отчетливые связи режима подземных вод устанавливаются с атмосферной циркуляцией (с коэффициентом корреляции свыше 0,6 в 54% случаев). Значительно ниже процент высоких связей режима подземных вод отмечается с солнечной активностью и индексами нутационных колебаний полюса Земли и приливных сил Луны. Здесь лишь в единичных случаях коэффициент корреляции достигает 0,6—0,8. Чаще же всего коэффициенты корреляции колеблются в пределах 0,2—0,5 с учетом сдвига в проявлениях данных факторов в режиме подземных вод, достигающего 2—5 лет.

Учитывая трудности составления сверхдолгосрочных прогнозов режима подземных вод, а также достаточность для перспективного планирования использования ресурсов подземных вод приближенных оценок возможных колебаний уровней подземных вод во времени, в качестве удовлетворительных связей при корреляции могут быть приняты связи с коэффициентами корреляции свыше 0,6.

Выявив подобную связь и располагая прогнозом соответствующего гелиогеофизического фактора, можно по уравнению регрессии рассчитать прогнозные колебания уровней подземных вод.

Теснота корреляционных связей режима подземных вод с различными режимиобразующими факторами зависит от природных условий: географического положения изучаемого района, степени изолированности водоносного горизонта от поверхности земли (глубин залегания воды, литологического строения водовмещающей толщи, зоны аэрации и других причин) (Ковалевский, 1973в).

Во многих случаях парных корреляционных связей для прогнозов режима подземных вод оказывается недостаточно, поскольку режим подземных вод формируется под воздействием комплекса факторов, каждый из которых, каким бы обобщенным он ни был, не может отразить всех изменений, наблюдаемых в подземных водах. Поэтому в тех случаях, когда парная корреляционная связь характеризуется коэффициентами менее 0,6, необходимо увеличить тесноту связей одновременным учетом нескольких факторов методом множественной корреляции.

Связи, достаточно удовлетворительные для данных прогнозов, могут быть получены далеко не всегда при использовании как парной, так и множественной корреляции. Поэтому довольно часто прогнозы режима подземных вод, основанные на генетических связях с режимообразующими факторами, не обеспечивают необходимой достоверности и могут рассматриваться лишь как весьма приближенные, характеризующие в сущности только качественно возможные изменения ресурсов подземных вод. В таких случаях необходимы другие методы прогнозов, среди которых, в частности, могут быть рассмотрены методы, базирующиеся на раскрытии закономерностей колебаний уровней и дебитов подземных вод за период предыдущих многолетних наблюдений, без установления причин, их определяющих.

Один из наиболее распространенных методов учета истории предыдущих колебаний — выделение тренда в режиме подземных вод и его экстраполяция в будущее.

Тренды могут быть линейными и нелинейными.

Выделение линейного тренда осуществляется составлением уравнения парной корреляции, в которой в качестве зависимой переменной принимаются уровни или дебиты подземных вод, а в качестве независимой переменной — порядковые их значения начиная с начала наблюдений.

Выделение нелинейного тренда осуществляется в результате сглаживания многолетних колебаний уровней подземных вод различными способами (Ковалевский, 1973в) и аппроксимацией сглаженных кривых полиномов вида

$$y(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_mt^m. \quad (\text{III.1})$$

Подобрав уравнение тренда нахождением эмпирических коэффициентов полинома, при котором обеспечивается наилучшая сходимость с фактическими наблюдениями, можно экстраполировать данный тренд в будущее, определив тем самым изменения расчетных мощностей водоносного горизонта на прогнозный период. При этом допускается, что тенденция в режиме подземных вод в будущем сохранится той же, как и за период предшествующих наблюдений.

Такого рода прогнозы (хотя и весьма приближенные, позволяющие оценить лишь порядок возможных колебаний уровней и дебитов подземных вод в многолетнем разрезе) тем не менее имеют

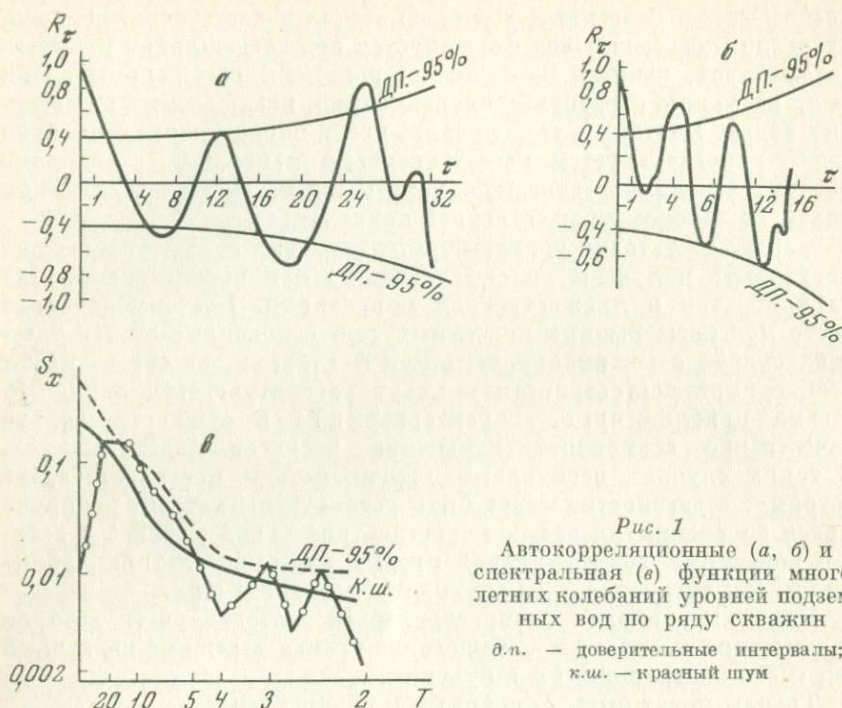


Рис. 1
 Автокорреляционные (а, б) и
 спектральная (в) функции много-
 летних колебаний уровней подзем-
 ных вод по ряду скважин
 д.п. — доверительные интервалы;
 к.ш. — красный шум

практическое значение для региональных оценок ресурсов под-
 земных вод на перспективу.

Другая форма учета закономерностей колебаний уровней под-
 земных вод — выявление цикличности в режиме подземных вод
 за период имеющихся наблюдений и экстраполяция этой циклич-
 ности в будущее.

Исследования показывают, что цикличность свойственна мно-
 гим природным явлениям. В частности, квазидвухлетние (в сред-
 нем 26 месяцев) циклы отмечаются в стратосферных ветрах; в сред-
 нем 3,6-, 6,6-, 11,4- и 17,7-летние циклы характерны для различ-
 ных типов атмосферной циркуляции; 4-летние циклы наблюдаются
 в скоростях вращения Земли; 5,5-, 11-летние и вековые цик-
 лы — в солнечной активности, 6-летние циклы — в ритмах враще-
 ния Земли и т. д. Отмечается тенденция к цикличности и в коле-
 баниях уровней подземных вод (Коробейников, 1965; Коноплян-
 цев, 1970; Ковалевский, 1973а, б, в, и др.). Анализ многочислен-
 ных материалов наиболее длительных рядов наблюдений за
 режимом подземных вод показывает, что в различных случаях
 в колебаниях уровней и дебитов подземных вод также устанавли-
 ваются 2-, 4-, 5—7-, в среднем 6-, 9—12-, 11-, 16-, 19-, 22- и 30-лет-
 ние циклы. Цикличность в режиме подземных вод обнаруживается

как визуально по хронологическим, сглаженным по n -летиям или интегральным графикам (Коробейников, 1965), так и более объективными методами — на основе расчета автокорреляционных или спектральных функций (Венцель, 1969). Наиболее простой способ выявления цикличности — это построение корреляционной или автокорреляционной функции, расчет которой сводится к определению коэффициентов корреляции между соседними членами ряда, разделенными последовательно увеличивающимся интервалом времени (Брукс, Карузерс, 1963).

Анализ многолетних колебаний уровней подземных вод с помощью автокорреляционных функций способствует решению двух взаимосвязанных задач.

1. Выявление цикличности в колебаниях уровней. Так, по наличию на графике автокорреляционной функции точек перегиба корреляционной функции можно установить наличие ритмичности в исследуемом ряду наблюдений, а по положению положительных экстремальных значений относительно оси абсцисс — определить длину периодов ритмов (рис. 1, а, б).

2. Установление степени взаимосвязанности уровней соседних лет, разделенных интервалом времени τ . Высокие коэффициенты корреляции свидетельствуют о наличии связи между уровнями или дебитами (минимальными, максимальными или среднегодовыми), разделенными интервалом τ , и могут быть использованы для прогнозов с заблаговременностью τ лет по уравнению простой парной корреляции:

$$h_{n+\tau} = \bar{h}'_{n-\tau} + R_{\tau} \frac{\sigma'_{h'_{n-\tau}}}{\sigma_{h_{n-\tau}}} (\bar{h}_{n-\tau} - \bar{h}_{n-\tau}), \quad (\text{III.2})$$

где $h_{n+\tau}$ — прогнозируемый уровень, отстоящий от последнего наблюдававшегося уровня h_n на τ лет; $\bar{h}'_{n-\tau}$; $\sigma'_{h'_{n-\tau}}$; $\sigma_{h_{n-\tau}}$ — среднесезонные уровни и среднеквадратические отклонения, рассчитанные по рядам длиной $n = \tau$ лет соответственно без первых и последних τ лет; R_{τ} — коэффициент корреляции между уровнями, отстоящими на τ лет.

Составление подобных уравнений целесообразно при R_{τ} не менее (0,6) — (0,7).

Цикличность в колебаниях уровней подземных вод по анализируемой скважине можно экстраполировать (рассчитать) на будущее, допустив, что характер этой цикличности на прогнозном отрезке времени существенно не изменится.

Достоверность выделяемых по коррелограммам периодов циклов определяется оценкой случайности (ε) их появления по уравнению

$$\varepsilon\% = [1 - \Phi(x)] \cdot 100, \quad (\text{III.3})$$

где $\Phi(x)$ — функция распределения анализируемой случайной переменной x , определяемая по таблицам (Венцель, 1969, и др.).

Значение x рассчитывается по формуле

$$x = \frac{R_\tau}{\sigma_{R_\tau}}, \quad (\text{III.4})$$

где R_τ — коэффициент автокорреляции в момент максимума положительного всплеска функции

$$\sigma_{R_\tau} = \frac{1}{\sqrt{n - \tau}}, \quad (\text{III.5})$$

n — длина всего анализируемого ряда; τ — сдвиг, соответствующий максимуму положительного всплеска.

Длина периодов цикличности, а также амплитуда возможных многолетних колебаний уровней или дебитов подземных вод зависит от климатических и гидрогеологических условий территории, и прежде всего от климатической зональности, глубин залегания подземных вод от поверхности земли и литологического состава водовмещающих пород и пород зоны аэрации. В частности, малые (2—7-летние) циклы прослеживаются в рыхлых отложениях чаще всего при небольших (до 5 м) глубинах до воды, а также независимо от глубины в хорошо пронизываемых горных породах при наличии интенсивного питания подземных вод атмосферными осадками через зону аэрации, например в сильно трещиноватых или закарстованных породах, а также на участках сосредоточенной инфильтрации (в районе лиманов, подов и других понижениях микрорельефа). С увеличением глубины залегания грунтовых вод, а также с ухудшением условий инфильтрации атмосферных осадков малые циклы в режиме подземных вод прослеживаются хуже. В этих условиях отмечены главным образом циклы с большими периодами (11-летними и более продолжительными).

Самые продолжительные циклы (30-летний и вековой) могут быть четко отмечены лишь в глубоко залегающих грунтовых водах на участках с большой площадью водосбора и с сильно зарегулированными условиями инфильтрации атмосферных осадков, т. е. в условиях с максимальной интегрирующей «памятью» бассейна подземных вод. При коротких рядах наблюдений эта цикличность проявляется в виде многолетнего тренда.

Следует отметить, что закономерность увеличения периода циклов с глубиной выражена не строго и проявляется скорее в виде общей тенденции. При этом на малых глубинах могут встретиться нередко любые циклы, а на больших — лишь циклы со сравнительно большими периодами. В целом с увеличением глубин залегания подземных вод от поверхности земли многолетняя цикличность в их режиме прослеживается более четко, чем при малых (менее 2—3 м) глубинах. Лучше прослеживается цикличность и при ухудшении фильтрационных свойств водовмещающих пород и пород зоны аэрации.

Синхронности в наступлении экстремальных в многолетнем значении уровней подземных вод по всей территории СССР не отмечается. Так, при минимальных значениях уровней подземных вод в Прибалтике уровни подземных вод на Урале, в Западной Сибири и Северном Казахстане приближаются к максимуму, а на Дальнем Востоке и в центральных районах Европейской части СССР находятся около средне многолетних норм. Это предопределяется относительным постоянством влаги, находящейся в кругообороте на Земле, в результате чего увеличение запасов влаги на одной части территории неизбежно приводит к уменьшению этих запасов на другой, что влечет площадное перераспределение интенсивности восполнения запасов подземных вод в многолетнем разрезе. Неравномерность питания подземных вод по площади и во времени, наряду с аналогичной неравномерностью в меженных расходах рек, позволяет поставить вопрос о принципиально возможном закольцевании основных потребителей водных ресурсов страны в целях покрытия водного дефицита в отдельные годы одних районов за счет других.

Использование вскрытой автокорреляцией цикличности режима подземных вод для долгосрочных прогнозов связано с рядом трудностей:

а) коэффициенты автокорреляции максимальных всплесков, соответствующих длине периода цикличности, часто бывают очень низкими, не обеспечивающими достоверность прогнозов;

б) увеличение коэффициента автокорреляции при больших (временных) сдвигах часто не связано с увеличением тесноты связей между уровнями, разделенными промежутком времени τ , а определены сопоставимостью интервала сдвига с длиной имеющегося ряда наблюдений. В результате с учетом коротких рядов наблюдений за режимом подземных вод для многолетних прогнозов могут быть использованы данные автокорреляции лишь по короткопериодным циклам (до 10—11 лет) и, естественно, лишь в тех случаях, когда коэффициенты автокорреляции достигают существенных величин (не менее 0,6);

в) отсутствие четкой ритмичности по всем циклам не дает гарантии в том, что каждый последующий цикл будет идентичным предыдущему (или средним из нескольких, уже наблюдавшихся ранее); это вносит значительный элемент случайности в простую экстраполяцию циклов на будущее.

Отсутствие строгой цикличности в режиме подземных вод определяется не только отсутствием таковой в определяющих его факторах, но и суммарным воздействием последних на подземные воды. Поэтому при наличии явных тенденций существования периодических составляющих в режиме подземных вод (см. рис. 1, *е*) принципиально возможен прогноз режима подземных вод, основанный на разложении «незакономерных» колебаний уровней или дебитов подземных вод на сумму нескольких периодических составляющих (Брукс, Карузерс, 1963; Пановский, Брайер, 1972,

и др.) и экстраполяции этих колебаний в будущее. Однако точность таких прогнозов не велика из-за изложенных причин, и прежде всего из-за отсутствия в природных процессах строгих периодических колебаний. Тем не менее выявленная тенденция к цикличности любым из рассмотренных методов может быть учтена при перспективном планировании возможного увеличения или сокращения водоотбора подземных вод в течение определенных периодов.

Прогнозы режима подземных вод, основанные на представлениях о режиме подземных вод как стационарном случайном¹ процессе, разработаны еще весьма слабо.

Строго говоря, ряды основных характеристик режима подземных вод (минимальных, максимальных годовых и среднегодовых) не стационарны, так как в их колебаниях в большинстве случаев отмечается если не цикличность в строгом понимании этого явления, то явное чередование группировок лет повышенной и пониженной водности. Приведение таких рядов к стационарным осуществляется выделением из них периодической составляющей (или тренда) с последующим анализом отклонений от этой составляющей, рассматриваемых уже как случайные колебания.

В ряде же случаев, особенно при небольших глубинах залегания грунтовых вод, в их режиме не прослеживается каких-либо тенденций к цикличности. Графики колебаний уровней грунтовых вод в этом случае имеют пилообразный вид с колебаниями, сильно зависящими от режима гидрометеорологических факторов. Многолетние амплитуды колебаний уровней подземных вод сопоставимы здесь с амплитудами сезонных колебаний, происходящих вокруг малоизменяющегося во времени среднего значения глубин. В таких случаях колебания уровней подземных вод могут рассматриваться как стационарные.

Один из методов прогноза режима подземных вод на основе стационарных случайных функций рассматривался С. М. Сидоркиной (1970). Прогноз осуществляется с помощью линейной экстраполяционной формулы

$$x_{\text{пр}}(t+m) = \alpha_1 x(t-1) + \alpha_2 x(t-2) + \dots + \alpha_n x(t-n), \quad (\text{III.6})$$

где $x_{\text{пр}}(t+m)$ — прогнозное значение уровня или дебита с заблаговременностью m от момента составления прогноза t ; α_1 — коэффициенты, определяемые по системе уравнений с учетом корреляционной функции наблюдавшегося ряда; $x(t-1)$ — значения

¹ «Стационарными случайными процессами называются такие процессы, которые имеют вид случайных колебаний, сосредоточенных вокруг некоторого среднего значения и при условии, что ни средняя амплитуда, ни характер этих колебаний не имеют существенных изменений во времени» (Вентцель, 1969). Другими словами, для стационарных случайных колебаний характерно относительное постоянство как среднегодовой нормы, так и дисперсии для различных по длине отрезков наблюдаемого ряда колебаний.

членов ряда в промежутки времени, отличающиеся на величину сдвига τ .

Охарактеризованные пути прогнозов режима подземных вод рассматривались применительно к прогнозам уровней в каждой наблюдательной скважине или источнике в отдельности. Перейти от таких точечных прогнозов к площадным можно на основе гидрогеологического районирования изучаемой территории по условиям формирования режима подземных вод (Коноплянцев и др. 1963) и экстраполяции прогнозных данных, полученных по опорным точкам, на площадь. Однако можно составлять и сразу площадные прогнозы. Для этого существуют два способа: либо использовать для вышеописанного анализа ряды наблюдений за подземным стоком, оцениваемым, например, по гидрологическим данным и относимым к определенной площади водосбора, либо использовать для составления прогнозов обобщенные площадные характеристики режима подземных вод, выраженные в процентах обеспеченности уровней. Получить такие характеристики можно следующим образом. Ряды наблюдений за режимом подземных вод представляются не в глубинах залегания уровней от поверхности земли, а в процентах обеспеченности уровней (за каждый год в отдельности). После этого рассчитывается средняя величина или норма обеспеченности уровней в целом для всех скважин района также отдельно для каждого года наблюдений. Изменения этой нормы во времени и будут обобщенной площадной характеристикой режима подземных вод. Постоянные отклонения от этой нормы с одними и тем же знаком уровней отдельных скважин свидетельствуют о нарушении режима подземных вод в районе таких скважин.

Прогнозы режима в обобщенных площадных показателях осуществляются теми же методами, что и для отдельных скважин. Вместе с тем для региональных оценок изменений ресурсов подземных вод во времени представление данных режима подземных вод в обобщенных показателях более удобно, наглядно и позволяет исключить аномальные скважины с «нетипичным режимом».

Из изложенного видно, что в большинстве случаев все методы временных или календарных прогнозов режима подземных вод весьма приближенные и могут отразить главным образом многолетние тенденции в колебаниях уровней или расходов подземных вод. Однако и такие «прикидочные» расчеты могут иметь практическое значение при перспективном планировании использования подземных вод.

СОСТАВЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ НЕВРЕМЕННЫХ ПРОГНОЗОВ

Причинно-следственные связи режима подземных вод, как уже указывалось, могут быть установлены далеко не всегда. Более того, даже в тех случаях, когда в анализируемом ряду наблюдений прослеживаются какие-либо детерминированные составляющие

(тренд или цикличность), значительная роль в колебаниях принадлежит случайным компонентам. Анализируя временные ряды гидрологических данных, Ч. Кайсл (1972), ссылаясь на Бунге, указывает, что совершенная случайность, по-видимому, является такой же абстракцией, как совершенная причинность, и все же ни та, ни другая не мыслится по отдельности. Количество факторов, участвующих в формировании природных процессов, включая режим подземных вод, так велико, что учесть их все в прогнозах невозможно. Поэтому в любой модели ставится лишь задача наиболее полно отразить влияние основных процессов и проанализировать возможную ошибку, определяемую пренебрежением учета остальных факторов. В результате составление временных прогнозов, основывающихся либо на однозначных связях режима подземных вод с какими-либо факторами, либо на экстраполяции детерминированных составляющих во времени, возможно лишь тогда, когда прогностическая (математическая) модель с достаточной для практики точностью отражает фактические изменения анализируемого ряда. В тех же случаях, когда подобрать такую модель не удастся или когда в анализируемом ряду случайная компонента преобладает над детерминированной, единственно возможно составление невременных или вероятностных прогнозов.

Вероятностные прогнозы, позволяющие оценить минимальные или максимальные за многолетие уровни или дебиты подземных вод без указания конкретного срока их наступления, также вполне могут удовлетворить запросы практики.

За основу составления таких прогнозов берется расчет обеспеченности заданных значений уровней или дебитов подземных вод.

Обеспеченность выражается обычно в процентах и характеризует гарантированность существования соответствующих уровней за многолетие. Например, 5%-ная обеспеченность того или иного уровня свидетельствует о том, что на меньших глубинах он может быть встречен лишь в течение 5 лет из 100, а в остальные 95 лет он будет находиться глубже.

Учитывая, что для практических целей чаще всего требуется знать максимальные, минимальные и среднегодовые уровни подземных вод или дебитов источников, их обеспеченность целесообразнее всего определять именно для этих характеристик раздельно. Одновременно при этом оцениваются и возможные изменения амплитуд колебаний уровней подземных вод в многолетнем разрезе. Для практических целей чаще всего требуется знать значения уровней или дебитов подземных вод 50-, 95- и 99%-ной обеспеченности.

Расчет обеспеченностей при оценках ресурсов подземных вод может производиться в следующих целях.

1. Для определения минимально возможных или заданной обеспеченности расчетных мощностей водоносного горизонта.

2. Для определения минимально возможных или средних (50%-ной обеспеченности) дебитов источников, запасы по которым оцениваются как эксплуатационные.

3. Для определения минимально возможных или заданной обеспеченности расходов рек, определяющих восполнение запасов подземных вод в процессе их эксплуатации.

4. Для определения минимальных или средних за многолетие амплитуд колебаний уровней подземных вод, характеризующих естественное восполнение запасов подземных вод за счет инфильтрационного их питания атмосферными осадками.

Одно из основных условий анализа распределения уровней или дебитов подземных вод — выбор из имеющегося ряда наблюдений соответствующих генетически или фазово-однородных значений уровней.

Учитывая практическую направленность рассматриваемого анализа, для построения графиков обеспеченности целесообразнее всего использовать срочные (суточные) значения максимальных и минимальных годовых уровней, а также среднегодовые уровни подземных вод.

В зависимости от решаемой задачи для построения графиков обеспеченности могут быть использованы и среднемесечные значения уровней подземных вод, особенно при коротких рядах наблюдений. Однако обеспеченность минимальных и других уровней при этом будет отличаться от построенной по ежегодным значениям и даст лишь приближенную характеристику обеспеченности, так как в этом случае анализироваться будут не независимые, а тесно взаимосвязанные величины с наличием четко выраженной годовой цикличности.

Изучение графиков обеспеченностей (P) и гистограмм распределения частот минимальных предвесенних, максимальных весенних и среднегодовых уровней подземных вод (H), построенных по массовым материалам наблюдений за режимом подземных вод в различных гидрогеологических и климатических условиях территории СССР, позволяет выделить пять основных типов распределений (рис. 2).

I. С нормальным законом распределения уровней, последовательное суммирование ранжированного ряда которых образует на простой вероятностной бумаге (клетчатке Хазена) прямую линию.

II. С логарифмически нормальным законом распределения уровней, образующих прямую линию на логарифмической вероятностной бумаге.

III. С левоасимметричным распределением уровней, образующих выпуклую кривую как на простой, так и на логарифмической клетчатке.

IV. С правоасимметричным распределением уровней, образующих вогнутую кривую как на простой, так и на логарифмической клетчатке.

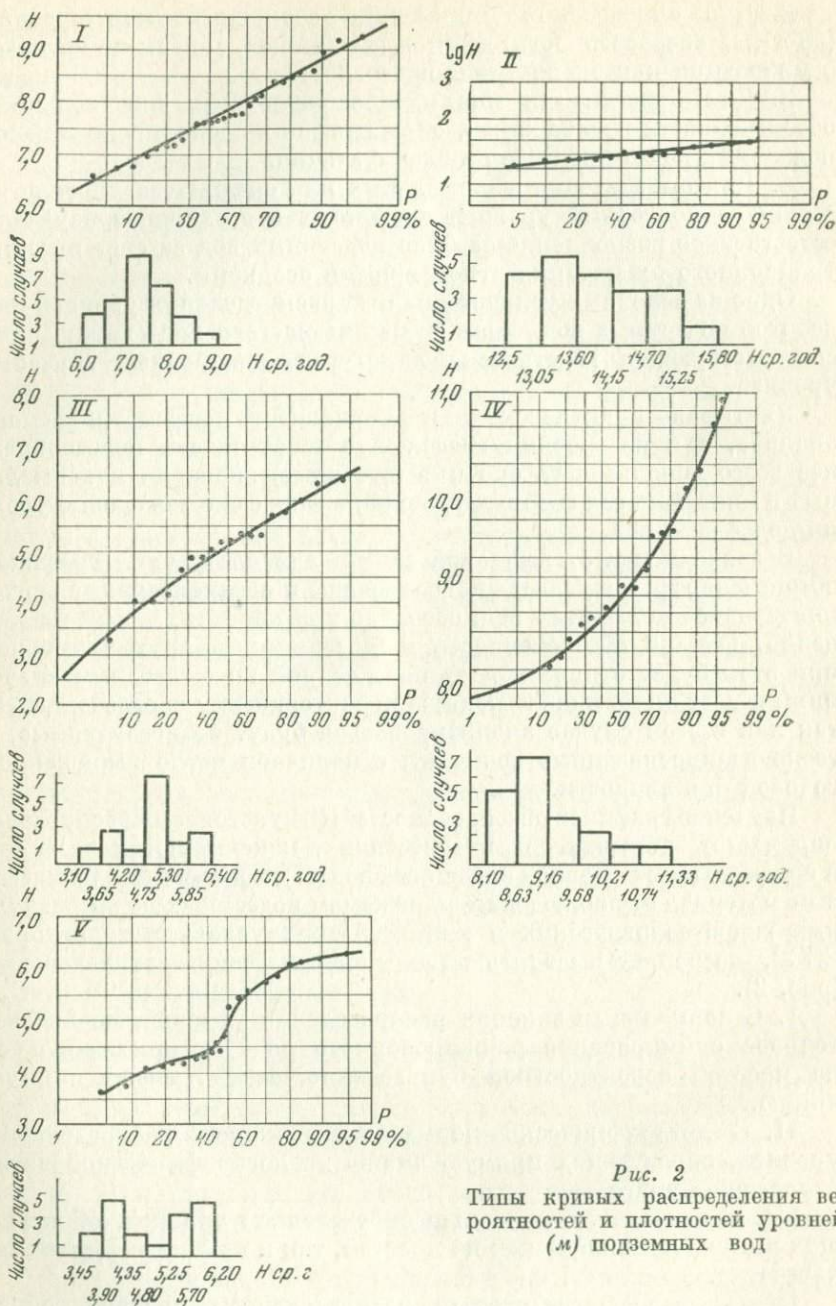


Рис. 2
Типы кривых распределения вероятностей и плотностей уровней (m) подземных вод

V. Со сложным законом распределения уровней, образующих вогнуто-выпуклую кривую как на простой, так и на логарифмической клетчатке.

Значительная роль в определении достоверности закона распределения принадлежит продолжительности имеющихся наблюдений за режимом подземных вод. Так, например, по одной из скважин в Тушине (Москва) для 7-летнего периода кривая обеспеченности получилась типа III, для 15-летнего — типа V, а для 30-летнего — типа IV.

Графики обеспеченности, построенные по фактическим наблюдениям, служат основой для снятия с них характеристик уровней с заданной для практических целей обеспеченностью. Экстраполяция этих графиков на высокие и низкие значения обеспеченностей — это своеобразный прогноз, позволяющий по коротким рядам наблюдений получить представления о возможных колебаниях анализируемых уровней. Так, например, чаще используемые для расчетов запасов подземных вод значения уровней 95%-ной обеспеченности могут быть зафиксированы (исходя из принципа расчета графиков обеспеченности) фактическими наблюдениями продолжительностью не менее 20 лет. Построив график обеспеченности по более короткому ряду и экстраполировав полученную кривую до ординаты, соответствующей 95%-ной обеспеченности, можно прямо с графика снять соответствующее значение уровней или дебитов подземных вод.

Наиболее надежная экстраполяция наблюдавшихся уровней подземных вод возможна, естественно, при I и II типах распределения. В этом случае уже 10-летние ряды позволяют достаточно точно оценить уровни 50-, 95- и 99%-ной обеспеченностей путем простой экстраполяции прямых на графиках до соответствующих значений обеспеченностей. Однако во многих случаях и при II, III и IV типах кривых разброс точек не бывает большим (особенно точек, построенных в логарифмическом масштабе), что также позволяет определить указанные значения уровней графическим путем с достаточной для практических целей точностью. Сравнительно надежная экстраполяция, как показали наши исследования, может быть при наличии не менее 15—20 лет наблюдений.

Во избежание субъективности в экстраполяции графиков обеспеченности последние могут быть теоретически рассчитаны на основании экспериментально полученных данных. Для этого по анализируемым рядам наблюдений необходимо рассчитать основные их статистические параметры: среднемноголетнюю норму (\bar{H}), среднеквадратическое отклонение (σ), коэффициент вариации (C_v) и коэффициент асимметрии (C_s).

Принципы расчета теоретических кривых рассмотрены в многочисленной литературе (Крицкий, Менкель, 1950, и др.). Наиболее сложна экстраполяция графиков V типа кривых обеспеченностей. Подобрать теоретическую кривую к ним не удается, и поэтому экстраполяция здесь может быть осуществлена лишь графическим

путем. Статистический анализ результатов наблюдений за режимом подземных вод, так же как и долгосрочные прогнозы, может быть произведен с необходимой достоверностью лишь при весьма длинных рядах наблюдений, которыми гидрогеолог, как правило, не располагает. В связи с этим гидрогеологу неизбежно приходится сталкиваться с проблемой приведения коротких рядов наблюдений к длинным, отыскания путей сравнения разнородных материалов и оценки их репрезентативности в многолетнем аспекте.

Для наращивания коротких рядов наблюдений могут быть применены различные приемы.

1. Метод парной корреляции между уровнями подземных вод в анализируемой скважине с коротким рядом наблюдений и уровнями подземных вод в другой скважине — аналоге, располагающейся в сходных гидрогеологических условиях и имеющей длинный ряд наблюдений. Идентичность режима подземных вод по скважинам-аналогам должна быть доказана не только высокими корреляционными связями между их уровнями за период совместных наблюдений, но и идентичностью гидрогеологических условий районов и законов распределения уровней подземных вод за тот же период.

Для скважин, характеризующихся приречным видом режима, для наращивания должны быть использованы связи уровней подземных вод с уровнями или расходами поверхностных вод.

Для скважин, в которых наблюдается междуречный, террасовый или склоновый вид режима, можно использовать связи уровней подземных вод с суммарными осадками холодного периода года как одного текущего года, так и сумм двух, трех и более предшествующих лет в зависимости от интенсивности водообмена водоносного горизонта.

2. Метод множественной корреляции, позволяющий установить взаимосвязь колебаний уровней подземных вод в анализируемой скважине с метео- и гидрологическими факторами, по которым имеются длинные ряды наблюдений. Составив уравнение регрессии по периоду совместных наблюдений за режимом подземных вод и этими факторами и зная последние за более длительный промежуток времени, можно рассчитать, т. е. нарастить уровни подземных вод в прошлое — на период, когда наблюдений за режимом подземных вод не проводилось.

По наращенным данными способами рядам наблюдений строятся графики обеспеченности, позволяющие составлять более достоверные вероятностные прогнозы.

3. Установление корреляционных связей между статистическими параметрами длинного и короткого рядов и построение графиков обеспеченности по приведенным к длинному ряду параметрам (C_v ; \bar{H} ; σ).

Следует отметить, что для любого способа наращивания коротких рядов также необходимо иметь, по нашим проработкам, минимум семь — десять лет наблюдений. При более же коротких рядах

наблюдений оценка возможных многолетних колебаний уровней подземных вод становится малодостоверной.

Наращивание рядов или составление прогнозов режима подземных вод может использоваться также для расчленения естественных и искусственных воздействий на подземные воды. Так, например, нередко на графиках многолетних колебаний уровней подземных вод можно наблюдать колебания уровней относительно какой-то среднемноголетней нормы (первый этап), после чего уровни начинают неуклонно возрастать или снижаться (второй этап). Даже не зная причин появившейся новой тенденции в режиме подземных вод, можно предположить искусственный характер ее происхождения. Подтвердить это можно установлением корреляционных связей (парных или множественных) между режимом уровней подземных вод первого этапа и режимом основных режимообразующих факторов. Затем по полученному уравнению регрессии с использованием выбранных факторов следует рассчитать колебания уровней на второй этап и сравнить их с фактическими. Резкое расхождение фактической и расчетной кривых будет свидетельствовать о влиянии дополнительного фактора. Его роль может быть определена путем выделения тренда (линейного или нелинейного) и вычитания из этого тренда фактических колебаний (относительно трендовой линии), которые определяются чисто естественными факторами. Прогноз уровней в данном случае должен складываться из прогноза трендовой линии и прогноза естественного режима. При этом прогноз тренда может производиться либо на основе его экстраполяции, либо по связи с определяющими его факторами (величиной водоотбора, нормами поливов и т. п.), что, однако, не всегда возможно, особенно если тренд вызван нарушением природной среды (вырубка леса, застройка территорий, распашка залежных земель и т. п.).

Оценив статистически (по графикам обеспеченности годовых амплитуд колебаний уровней) минимальное и среднемноголетнее восполнение запасов подземных вод, можно рассчитать сработку запасов с учетом изменяющегося питания подземных вод. Подобная оценка может быть проведена либо сочетанием балансовых и аналитических расчетов, либо аналитически при уменьшении расчетной производительности водозабора на величину среднего или минимального ежегодного восполнения запасов подземных вод. Особенно важен учет изменения питания подземных вод во времени в районах с дефицитом водных ресурсов, в замкнутых бассейнах, долинах с прерывающимся стоком в грунтовых водах между речных пространств.

Таким образом, форма учета режима подземных вод при гидрогеологических расчетах, связанных с перспективным использованием подземных вод, прямо зависит от решаемой задачи, масштаба и стадии исследований. Поэтому, суммируя изложенное, можно следующим образом сформулировать рекомендации по анализу

режима подземных вод на различных стадиях оценки их эксплуатационных ресурсов:

Тип оценки ресурса в

Виды анализа

I. Оценка потенциальных ресурсов

1. Определение минимальных естественных ресурсов подземных вод 95%-ной обеспеченности стока рек, характеризующего естественные ресурсы подземных вод и дебита родников.
2. Определение минимальных и средних многолетних амплитуд колебаний уровней подземных вод для оценки естественного питания подземных вод (естественных ресурсов) при наличии зарегулированного стока
3. Расчет минимальных или средних многолетних расчетных мощностей водоносных горизонтов

II. Оценка прогнозных эксплуатационных ресурсов

Помимо расчетов, предусматриваемых для оценок потенциальных ресурсов, рекомендуется:

1. Определение продолжительности периодов маловодных и многоводных лет.
2. Оценка обеспеченности естественных ресурсов подземных вод, установленных по величине подземного стока или дебиту родников, периодов возможного увеличения или сокращения водоотбора по сравнению с утвержденными запасами и размеров возможного изменения производительности водозаборов.
3. Определение 95- или 50%-ной обеспеченности инфильтрационного питания подземных вод и продолжительность маловодных лет, не обеспечивающих полного или планируемого расчетом восполнения запасов подземных вод.
4. Оценка изменений ресурсов подземных вод под влиянием их эксплуатации (за счет уменьшения испарения, транспирации и изменения баланса подземных вод).
5. Оценка возможных изменений ресурсов подземных вод за счет различных хозяйственных мероприятий в районах исследований (мелиорация земель, создание водохранилищ и т. д.).

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ ПЛАТФОРМЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ



АРТЕЗИАНСКИЕ ВОДЫ

Артезианские структуры характеризуются высокой обеспеченностью подземными водами, при этом между артезианскими бассейнами платформенных областей, с одной стороны, и межгорными и предгорными артезианскими бассейнами — с другой, имеются существенные различия, из которых главные — следующие.

В предгорных и межгорных артезианских бассейнах четко выделяются области питания подземных вод, где они безнапорные и где интенсивно поглощаются атмосферные осадки и поверхностный сток и вместе с тем нет дренажа, и области транзита, где водоносный горизонт перекрыт слабопроницаемыми породами.

Оценка эксплуатационных ресурсов межгорных и предгорных артезианских бассейнов аналогична оценке ресурсов пролювиальных шлейфов.

В артезианских бассейнах платформенного типа питание подземных вод происходит не только в краевых зонах, т. е. в зонах выхода горизонта на поверхность, но и во всей области распространения напора, где наблюдается также и разгрузка подземных вод. Как известно, в артезианских бассейнах, согласно теории А. Н. Мятиева (1947), питание артезианских вод формируется на тех участках, где свободная поверхность грунтовых вод находится выше пьезометрической поверхности, а разгрузка — на участках с противоположным соотношением уровней грунтовых вод и пьезометрической поверхности артезианских вод.

Первые условия свойственны водораздельным участкам, а вторые — долинам рек. Взаимосвязь грунтовых и артезианских вод осуществляется через слабо водопроницаемые разделяющие слои, которые во многих случаях нельзя рассматривать как идеальные водоупоры. Особенно благоприятные условия водообмена создаются на участках, где эти разделяющие слои размыты, т. е. имеются «гидрогеологические окна».

Питание напорных водоносных горизонтов из краевых зон артезианских бассейнов обычно имеет второстепенное значение, так как в краевых зонах происходит одновременно и разгрузка подземных вод в речные долины и балочно-овражную сеть. В связи с этим при оценке эксплуатационных ресурсов подземных вод артезианских бассейнов в области, где воды напорные, притоком из краевых зон обычно можно пренебрегать. Однако следует отметить,

что в краевых зонах формируются значительные эксплуатационные ресурсы подземных вод, которые должны оцениваться отдельно. Потенциальные эксплуатационные ресурсы артезианских бассейнов платформенного типа (без учета притока из краевых зон и эксплуатационных ресурсов, формирующихся в этих зонах) слагаются из сработки естественных (в том числе упругих) запасов (Q_0) и питания ($Q_{\text{п}}$) напорных вод перетеканием из выше- или ниже-расположенных горизонтов (в основном из грунтовых вод, получающих непосредственное пополнение инфильтрацией атмосферных осадков);

$$Q_a = Q_0 + Q_{\text{п}} \quad (\text{IV.1})$$

Величина эксплуатационных ресурсов подземных вод, формирующаяся за счет сработки естественных запасов, рассчитывается по формуле

$$Q_{0\text{д}} = \frac{\mu_{\text{пр}} S F}{t}, \quad (\text{IV.2})$$

где S — допустимое понижение уровня подземных вод; $\mu_{\text{пр}}$ — приведенная водоотдача, определяемая по выражению (IV.4); t — время эксплуатации; F — площадь распространения водоносного горизонта.

Как уже указывалось, величина допустимого понижения должна приниматься с учетом технической возможности откачки воды насосами и необходимости соблюдения условия

$$S \leq S_0 + \alpha m, \quad (\text{IV.3})$$

где S_0 — напор над кровлей артезианского водоносного горизонта; m — его мощность; α — коэффициент, выражающий допустимую долю осушения водоносного пласта при эксплуатации, причем $0 \leq \alpha \leq 1$.

При выборе значения α для оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод артезианских горизонтов следует подходить дифференцированно: в районах, где артезианские воды — единственный источник хозяйственно-питьевого водоснабжения и других возможностей в пределах обозримой перспективы для этого не имеется, целесообразно зарезервировать использование гравитационных запасов на более отдаленную перспективу (за пределы срока, охватываемого схемой), т. е. принимать α равным 0.

В районах, где такие перспективы имеются, коэффициент α можно принимать равным 0,5.

Входящая в формулу (IV.2) величина приведенной водоотдачи учитывает сработку как упругих, так и гравитационных запасов и рассчитывается по формуле

$$\mu_{\text{пр}} = \frac{\mu^* S_0 + \alpha \mu m}{S_0 + \alpha m}, \quad (\text{IV.4})$$

где μ^* — упругая водоотдача; μ — гравитационная водоотдача.

При сработке только упругих запасов ($\alpha = 0$) $\mu_{пр} = \mu^*$. Упругие запасы артезианских водоносных горизонтов в целом незначительны. Так, при понижении пьезометрического напора на 100 м за счет упругих свойств воды и горных пород с характерным значением коэффициента упругой водоотдачи порядка 0,001 при эксплуатации в течение 20—50 лет можно извлекать ежегодно слой воды толщиной не более 2—5 мм. Однако, как показывает анализ опыта эксплуатации для ряда напорных горизонтов в артезианских бассейнах платформенного типа, упругие запасы подземных вод по существу единственный источник формирования эксплуатационных ресурсов, так как роль процессов перетекания для этих бассейнов ничтожна. К таким горизонтам относятся, например, нижнекаменноугольный в центральной части Московского артезианского бассейна, киммерийский в центральной части Азово-Кубанского бассейна, нижнемеловой в Днепровско-Донецком артезианском бассейне и др. Эти горизонты залегают на больших глубинах (до 600—700 м) и отделяются от вышележащих регионально выдержанными толщами глин, практически водоупорных мергелей мощностью несколько десятков и более метров.

Несмотря на то что для таких горизонтов общие эксплуатационные ресурсы незначительны, для отдельных водозаборов использование упругих запасов имеет решающее значение. Ярким примером в этом плане может служить тот же нижнемеловой горизонт в Днепровско-Донецком артезианском бассейне, где прогнозные эксплуатационные ресурсы, формирующиеся за счет упругих запасов, составляют несколько сотен тысяч кубических метров в сутки и используются для водоснабжения ряда крупных городов.

Анализ эксплуатации большого количества водозаборов в артезианских бассейнах платформенного типа показывает, что в формировании эксплуатационных ресурсов подземных вод, как это уже отмечалось, во многих случаях весьма существенную роль играют процессы перетекания. При этом в питании подземных вод эксплуатируемого горизонта принимает участие не только приток из смежных водоносных горизонтов, формировавшийся в естественных условиях, но и усиление этого притока в связи с эксплуатацией. Как известно, при работе отдельного водозабора, расположенного в «неограниченном» потоке подземных вод, т. е. в условиях, когда пьезометрическая воронка не распространяется до границ водоносного горизонта, расход потока подземных вод в естественных условиях не влияет на производительность водозабора. Иное дело, если эксплуатация осуществляется системой из большого количества водозаборов, расположенных, например, по сетке в пределах всего водоносного горизонта. Каждый такой водозабор оказывается в центре участка, имеющего ограничение на контуре, где образуются водоразделы подземных вод между депрессионными воронками. Поскольку на

водоразделах между воронками градиенты равны нулю, можно рассматривать каждый участок как бы оконтуренным водоупорной границей. В этих условиях перетекание воды из смежных горизонтов при эксплуатации (W^*) должно учитываться, так как образуется система «ловчих» депрессионных воронок и отток воды за пределы балансового района прекращается.

Расчет питания подземных вод в артезианских бассейнах платформенного типа по усредненному региональному уклону пьезометрической поверхности от краевой зоны бассейна в направлении погружения пластов приводит к существенному занижению величины естественных ресурсов подземных вод. Этим методом можно пользоваться только для определения нижнего предела значения W^* в условиях артезианских бассейнов межгорного и предгорного типов, где, как отмечалось, основное питание сосредоточено в краевой зоне бассейна.

Наиболее надежным способом определения величины питания артезианских вод перетеканием из смежных водоносных горизонтов является гидродинамический метод — решение обратных задач путем моделирования на аналоговых машинах. Этим методом, в частности, решалась задача оценки баланса подземных вод в Московском артезианском бассейне и на территории КМА. Этот метод может применяться и при нарушенном режиме подземных вод, так как анализ работы действующих водозаборов служит источником получения информации о гидрогеологических параметрах водоносных горизонтов. Применение метода моделирования для определения питания артезианских вод требует, однако, высокого уровня гидрогеологической изученности района. Приблизительно расход потока подземных вод в артезианском пласте может определяться на отдельных участках по картам гидроизоэпез и усредненными значениями водопроницаемости.

При оценке эксплуатационных ресурсов подземных вод перетекание можно учитывать только из тех водоносных горизонтов, эксплуатационные ресурсы которых отдельно не оцениваются. В этом случае можно исходить из предположения, что уровень подземных вод в смежных горизонтах при эксплуатации практически не изменяется; происходит сработка естественных запасов в питающих горизонтах.

В том случае, когда питающий горизонт содержит грунтовые воды, процесс перетекания этих вод при расчетах эксплуатационных артезианских вод можно рассматривать как происходящий при мало изменяющемся («постоянном») уровне грунтовых вод по следующим соображениям.

1) Грунтовые воды имеют тесную гидравлическую связь с поверхностными водотоками и водоемами, поэтому при понижении свободной поверхности грунтовых вод происходит фильтрация поверхностных вод в грунтовые, что обуславливает стабилизацию их уровня.

2) При понижении уровня грунтовых вод усиливается их питание атмосферными осадками вследствие уменьшения испарения на участках, где они в естественных условиях залегают близко от поверхности.

По приведенным мотивам допущение постоянства уровня грунтовых вод при расчетах эксплуатационных ресурсов артезианских вод в гидрогеологическом отношении достаточно реалистично. В связи с этим в настоящей работе оценка эксплуатационных ресурсов с учетом перетекания рассматривается применительно к этой схеме.

Эксплуатационные ресурсы, формирующиеся за счет перетекания грунтовых вод, могут быть определены по следующей зависимости:

$$Q_{\text{пер}} = \frac{K_0 S_1}{m_0} F, \quad (\text{IV.5})$$

где K_0 и m_0 — соответственно коэффициент фильтрации и мощность слабопроницаемого слоя, лежащего в кровле водоносного пласта; S_1 — разность между уровнем грунтовых вод и динамическим уровнем артезианских вод.

При этом, так как принята предпосылка о постоянстве уровня грунтовых вод, рассчитанные по формуле (IV.5) эксплуатационные ресурсы не должны превышать сумму естественных ресурсов горизонта грунтовых вод и привлекаемых ресурсов, формирующихся за счет привлечения в грунтовые воды речного стока и уменьшения испарения.

Таким образом, потенциальные эксплуатационные ресурсы подземных вод артезианских бассейнов могут быть рассчитаны по формуле

$$Q_{\text{п}} = F \left(S \frac{\mu_{\text{пр}}}{t} + S_1 \frac{K_0}{m_0} \right), \quad (\text{IV.6})$$

а модуль потенциальных эксплуатационных ресурсов — по формуле

$$M = 31,7 \left(S \frac{\mu_{\text{пр}}}{t} + S_1 \frac{K_0}{m_0} \right) \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2, \quad (\text{IV.7})$$

где S , S_1 , m_0 выражены в м, K_0 — в м/год и t — в годах.

Проанализируем удельное значение каждой из двух составляющих эксплуатационных ресурсов, приняв условно $S = S_1$, а величину приведенной водоотдачи равной величине упругой водоотдачи, т. е. будем считать, что осушения водоносного горизонта не происходит. При значении $\mu^* = 10^{-3}$, $t = 2 \cdot 10^4$ сут. и $K_0/m_0 = 10^{-5} - 10^{-6}$ 1/сут, что соответствует наиболее часто встречающимся условиям, эксплуатационные ресурсы, формирующиеся за счет сработки упругих запасов, не будут превышать 5% величины, получаемой перетеканием. В связи с этим упругие запасы при региональной оценке эксплуатационных ресурсов

следует учитывать только в тех случаях, когда нет гидрогеологических предпосылок для перетекания из грунтовых вод. Перейдем к рассмотрению перспективных эксплуатационных ресурсов и коэффициента использования потенциальных ресурсов.

При оценке прогнозных эксплуатационных ресурсов, как уже отмечалось в главе I, на первой стадии оценки, когда еще не намечены пункты отбора воды, целесообразно задаться схемой размещения условных водозаборов, расположенных по сетке, на равных расстояниях один от другого.

Как известно, расход водозабора, помещенного в центре замкнутого кругового пласта, когда он формируется за счет сработки упругих запасов, выражается следующей формулой Маскета:

$$Q = \frac{2\pi K m S}{\frac{2Kmt}{\mu^* R_k^2} + \ln \frac{R_k}{r_0} - 0,75}, \quad (IV.8)$$

где Km — водопроводимость горизонта; K — коэффициент фильтрации; m — мощность водоносного горизонта; r_0 — радиус скважины. $R_k = 0,565 l$, где l — расстояние между скважинами, расположенными по сетке.

Для определения соотношения между перспективными и потенциальными эксплуатационными ресурсами в пределах элементарного участка радиусом R_k при сработке упругих запасов получим выражение коэффициента использования (η_1), поделив для этого выражение (IV.8) на выражение (IV.2); при этом учтем, что в формуле (IV.2) $F = \pi R_k^2$, а $\mu_{\text{ср}} = \mu^*$.

Тогда коэффициент перспективного использования η_1 может быть определен по следующему выражению:

$$\eta_1 = \frac{2Kmt}{2Kmt + \mu^* R_k^2 \left(\ln \frac{R_k}{r_0} - 0,75 \right)}. \quad (IV.9)$$

Величина коэффициента использования при различных расстояниях между водозаборами (т. е. радиусах блока — R_k) и при различных значениях величины водопроводимости приведена в табл. 2.

При расчетах принято $t = 2 \cdot 10^4$ сут (примерно 50 лет), $\mu^* = 10^{-3}$, $r_0 = 0,1$ м.

Как видно из формулы (IV.8) и табл. 2, коэффициент использования уменьшается с увеличением R_k , т. е. с увеличением расстояния между водозаборами, а с увеличением водопроводимости и времени эксплуатации стремится к единице. Так, при сроке эксплуатации 50 лет этот коэффициент даже при очень малой водопроводимости ($100 \text{ м}^2/\text{сут}$) близок к единице, и только для очень большого рассредоточения водозаборов он может уменьшаться до 60—80%.

Рассмотрим теперь изменение коэффициента использования для того случая, когда эксплуатационные ресурсы артезианских

Таблица 2

Значение коэффициента перспективного использования
потенциальных ресурсов подземных вод

$R_k, м$	$l, км$	Значение водопроницаемости (Km), $м^2/сут$		
		1000	500	100
		η_1		
5 000	≈ 9	0,99	0,99	0,97
10 000	≈ 18	0,98	0,97	0,87
20 000	≈ 35	0,94	0,89	0,63
		η_2		
5 000	≈ 9	0,98	0,86	0,6
10 000	≈ 18	0,73	0,63	0,25
20 000	≈ 35	0,42	0,27	0,03

вод формируются за счет перетекания из грунтовых вод, причем их уровень сохраняется постоянным.

Для таких условий для замкнутого кругового пласта Ф. М. Бочеве́ром (1968) предложена следующая формула:

$$Q = \frac{2\pi K m S}{\ln \frac{1,12B}{r_0} + f\left(\frac{R_k}{B}\right)}, \quad (IV.10)$$

где B — коэффициент перетекания,

$$B = \sqrt{\frac{K m m_0}{K_0}}; \quad (IV.11)$$

$f\left(\frac{R_k}{B}\right)$ — специальная функция, значения которой приведены в работе Ф. М. Бочеве́ра (1968).

Поделив выражение (IV.10) на зависимость (IV.5), приняв, как и прежде, $S = S_1$, получим выражение коэффициента использования эксплуатационных ресурсов (η_2), обеспечиваемых перетеканием из горизонта грунтовых вод:

$$\eta_2 = \left(\frac{B}{R_k}\right)^2 \frac{2}{\ln \frac{1,12B}{r_0} + f\left(\frac{R_k}{B}\right)}. \quad (IV.12)$$

Рассмотрим, как меняется величина коэффициента использования η_2 при изменении расстояния между скважинами и величина коэффициента перетекания. Напомним, что последний в свою очередь зависит от водопроницаемости эксплуатируемого горизонта (Km), коэффициента фильтрации (k_0) и мощности слабопроницаемого разделяющего слоя (m_0).

Результаты расчетов по формуле (IV.9) приведены в табл. 2. Эти расчеты проведены при $r_0 = 0,1 м$, $K_0/m_0 = 10^{-6}$, что при

принятых ранее значениях водопродимости (1000, 500 и 100 м²/сут) дает значения B , соответственно равные $3,2 \cdot 10^4$, $2,2 \cdot 10^4$ и 10^4 .

Как видно по данным табл. 2, коэффициент перспективного использования η_2 изменяется в широких пределах, причем он уменьшается с увеличением расстояний между скважинами. Сопоставление данных табл. 2 показывает, что при прочих равных условиях (расстояние между скважинами, водопродимость) значение коэффициента η_2 , отвечающего условиям формирования ресурсов в результате перетекания, меньше, чем при использовании только упругих запасов (η_1).

В формировании эксплуатационных ресурсов подземных вод во многих случаях основная роль принадлежит перетеканию из вышерасположенных горизонтов. Об этом свидетельствует, например, опыт эксплуатации среднекаменноугольного горизонта в Московском артезианском бассейне, ашшеронского горизонта в центральной части Азово-Кубанского бассейна, девонского водоносного горизонта в Прибалтийском бассейне и др. Сопоставление гидрогеологических прогнозов по этим водозаборам, проведенных без учета перетекания, с данными эксплуатации показало, что фактические понижения уровня оказываются значительно меньше расчетных, а значение обобщенного коэффициента пьезопроводности¹, определенного по данным многолетней эксплуатации, на один-два порядка меньше теоретических значений этого коэффициента, учитывающего только упругие свойства воды и пород. Все это говорит о необходимости учета перетекания, так как его игнорирование приводит к существенному занижению эксплуатационных ресурсов подземных вод.

В связи с этим оценку потенциальных эксплуатационных ресурсов в условиях перетекания следует проводить по уравнению (IV.5), определяя величину параметров B и K_0/m_0 по опыту эксплуатации на водозаборе-аналоге.

Однако оценка эксплуатационных ресурсов с учетом перетекания встречает пока во многих случаях непреодолимые затруднения в определении коэффициента фильтрации слабопроницаемого разделяющего слоя и коэффициента перетекания.

В связи с этим при оценке эксплуатационных запасов на локальных участках иногда пользуются обобщенным коэффициентом пьезопроводности, определенным на водозаборе-аналоге, что, как было показано М. Н. Колядой (1970), для локальных участков вполне допустимо. При использовании этого приема

¹ Под обобщенным коэффициентом пьезопроводности понимается параметр, характеризующий способность пласта передавать изменение напора в зависимости не только от упругих свойств, но и от гидрогеологической обстановки, в которой пласт находится. Обычно этот параметр определяется по зависимостям упругого режима по данным многолетней эксплуатации.

принимается, что обобщенный коэффициент пьезопроводности косвенно учитывает величину перетекания. Использование его приводит к определенному «запасу прочности» при оценках производительности водозаборов, работающих без взаимодействия с другими.

Рассмотрим применимость этого способа расчета при региональной оценке эксплуатационных ресурсов подземных вод. Допустим, как и ранее, постоянство напора в горизонте грунтовых вод.

Если приравнять расход скважины в неограниченном пласте, обеспеченный только сработкой упругих запасов (формула Тейса), и расход скважины, обеспеченный только перетеканием на площади депрессии (формула Хантуша), то получим

$$\frac{1,5 \sqrt{a_{об} t_B}}{r_0} = \frac{1,12B}{r_0}, \quad (IV.13)$$

где $a_{об}$ — обобщенный коэффициент пьезопроводности, учитывающий перетекание; t_B — период эксплуатации водозабора, по данным которого определяется $a_{об}$.

Из формулы (IV.13) следует, что

$$a_{об} = 0,56 \frac{B^2}{t_B}. \quad (IV.14)$$

$$\text{Учитывая, что } a_{об} = \frac{Km}{\mu_{об}^*}, \text{ а } B = \sqrt{\frac{Kmm_0}{K_0}},$$

получим

$$\mu_{об}^* = 1,8 \frac{K_0}{m_0} t_B, \quad (IV.15)$$

где $\mu_{об}^*$ — обобщенная упругая водоотдача, косвенно учитывающая перетекание подземных вод.

Как видно из формулы (IV.15), обобщенная водоотдача увеличивается с увеличением времени эксплуатации водозабора-аналога. Если период времени t , на который производится расчет потенциальных эксплуатационных ресурсов, превосходит по длительности период эксплуатации водозабора-аналога, то на основании формулы (IV.15) можно допустить, что

$$\mu_{об.р}^* = \mu_{об}^* \frac{t}{t_B}, \quad (IV.16)$$

где $\mu_{об.р}^*$ — расчетная обобщенная водоотдача на прогнозный срок эксплуатации.

Подставив значение $\mu_{об.р}^*$ в формулу (IV.2), получим

$$Q = \frac{\mu_{об}^* S \cdot F}{t_B}. \quad (IV.17)$$

Если теперь в формулу (IV.17) подставить значение $\mu_{об}^*$ из

формулы (IV.15), то получим выражение

$$Q = 1,8 \frac{K_0}{m_0} SF. \quad (IV.18)$$

Сравнивая это выражение с формулой (IV.5), можно увидеть, что обе зависимости отличаются одна от другой в 1,8 раза. Поэтому при использовании обобщенной расчетной водоотдачи и расчете потенциальных эксплуатационных ресурсов по формуле (IV.2) следует использовать понижающий коэффициент 0,5. Тогда формула (IV.2) изменится следующим образом:

$$Q = 0,5 \frac{\mu_{об.р}^S \cdot F}{t}. \quad (IV.19)$$

В практических расчетах обычно не учитывается изменение обобщенной водоотдачи во времени по зависимости (IV.16), и при оценке эксплуатационных ресурсов на расчетный период используется значение водоотдачи, полученное на конечный период эксплуатации водозабора. В этом случае, так как расчетный период обычно значительно превышает время эксплуатации водозабора, потенциальные эксплуатационные ресурсы оказываются заниженными, причем занижение может быть многократным, что следует учитывать при использовании такого приема.

В том случае, когда питание грунтовых вод при эксплуатации не усиливается, формирование эксплуатационных ресурсов подземных вод сопровождается осушением вышележащего горизонта. В этом случае член Q_n в уравнении (IV.1) следует записать следующим образом:

$$Q_n^1 = Q_e + \frac{\mu HF}{t}, \quad (IV.20)$$

где Q_e — естественные ресурсы грунтовых вод; H — мощность горизонта грунтовых вод.

Численный анализ второго члена в формуле (IV.20) показывает, что в большинстве случаев его величина значительно меньше естественных ресурсов. Поэтому осушением верхнего горизонта обычно можно пренебречь, получив некоторый «запас прочности».

Рассмотрим результаты региональной оценки эксплуатационных ресурсов артезианских вод хорошо изученного Московского артезианского бассейна, произведенной под руководством Ф. М. Бочевера и И. В. Ковалевой (Гидрогеология СССР, т. I, 1966).

Оценка выполнена применительно к намеченному на перспективу расположению водозаборов подземных вод конкретных объектов с учетом их потребности в воде, т. е. соответствовала второй стадии оценки.

Эксплуатационные ресурсы (по терминологии авторов — запасы) подземных вод в известняках карбона на площади около

216 тыс. км² авторами оценены около 33 млн. м³/сут (средний модуль эксплуатационных ресурсов близок к 1,8 л/сек·км²). Эксплуатационные ресурсы каменноугольных отложений, по мнению авторов, формируются за счет: 1) упругих запасов — 3,8 млн. м³/сут (11,8%); 2) естественных («статических») запасов, получаемых за счет осушения известняков, — 19,5 млн. м³/сут (59,5%); 3) естественных ресурсов («динамических запасов») — 4,0 млн. м³/сут (12,3%); 4) фильтрации из рек при образовании депрессий подземных вод — 5,3 млн. м³/сут (16,4%).

Расчет упругих запасов сделан на основании анализа работы действующих водозаборов, и, следовательно, величина упругой водоотдачи оказывается приведенной, косвенно учитывающей питание водоносного горизонта перетеканием грунтовых вод из вышерасположенных четвертичных и мезозойских отложений.

При расчете эксплуатационных ресурсов подземных вод каменноугольных водоносных горизонтов допустимое понижение принято 200—250 м.

К естественным («статическим») запасам отнесены запасы воды, содержащиеся в трещинах известняков; при оценке принято, что при эксплуатации будет осушено 50% мощностей пластов известняка.

Как известно, Московский артезианский бассейн эксплуатируется очень давно, и в настоящее время число крупных водозаборов достигло нескольких десятков, причем ежегодно региональное снижение динамических уровней составляет около 1—2 м.

Артезианские воды карбона — это единственный источник хозяйственно-питьевого водоснабжения многочисленных городов Московской области, причем привлечение других источников водоснабжения в ближайшей перспективе здесь не предвидится.

В этих условиях осторожнее было бы принять допустимое понижение в скважинах только в пределах напора, зарезервировав использование естественных запасов на более отдаленную перспективу.

Питание артезианских вод в естественных условиях (их естественные ресурсы) обычно весьма неравномерно распределено по площади. В одних районах воды известняков получают непосредственное питание инфильтрацией атмосферных осадков, в других — перетеканием из грунтовых вод покрывающих песчаных отложений, получающих инфильтрационное питание. Обычно на большей части территории артезианские воды карбона перекрыты слабопроницаемыми мезозойскими и четвертичными отложениями, к которым приурочены грунтовые воды. Перетекание этих вод в артезианский водоносный горизонт несомненно происходит, особенно на участках гидрогеологических «окоп». Однако количественно учесть перетекание в естественных условиях с достаточной обоснованностью пока невозможно.

Принимаемые авторами естественные ресурсы («динамические запасы») составляют 4,0 млн. $\text{м}^3/\text{сут}$, соответствуют питанию артезианского горизонта, выражаемому слоем в 5 $\text{мм}/\text{год}$, т. е. незначительной величиной.

В балансе артезианских вод авторы отводят значительную роль фильтрации воды из рек (16,4%) при создании депрессий артезианских вод. Эта составляющая баланса весьма условна, тем более что сток рек в меженный период частично формируется за счет подземного питания, уже учитываемого в другой статье баланса (как естественные ресурсы). По-видимому, надежнее определить эти две составляющие баланса (питание атмосферными осадками и фильтрацию из рек в условиях эксплуатации) совокушно, поскольку они отражаются гидрографом реки. В этом случае суммарную величину можно оценивать методом анализа гидрографа рек как естественные ресурсы водоносных горизонтов (метод Б. И. Куделина). По приведенным данным (Гидрогеология СССР, т. I, 1966), естественные ресурсы составляют на площади 216 тыс. км^2 26 957 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$, т. е. их модуль около 1,5 $\text{л}/\text{сек} \cdot \text{км}^2$. Вероятно, он несколько завышен вследствие того, что реки дренируют не только артезианские, но и грунтовые воды совместно.

Полученная авторами величина эксплуатационных ресурсов артезианских вод известняков карбона (33 млн. $\text{м}^3/\text{сут}$) представляется достаточно реальной, хотя некоторое перераспределение ресурсов по отдельным статьям баланса несомненно возможно. Так, например, принимаемое авторами повышение на 200 м в Московском артезианском бассейне, связанное со значительным осушением водоносных пластов, — чрезмерно. Вместе с тем питание артезианских вод с учетом перетекания и фильтрации из рек, по-видимому, в сумме занижено, так как модуль естественных ресурсов, определенный по гидрографу реки, в 3 раза больше, чем модуль естественных ресурсов («динамических запасов»), принятый авторами.

В настоящее время из водоносных горизонтов карбона на территории Московского артезианского бассейна используется 2,4 млн. $\text{м}^3/\text{сут}$, т. е. около 6% потенциальных эксплуатационных ресурсов подземных вод карбона.

Интересно определить, в какой мере рассредоточение водозаборов с одновременным увеличением производительности может влиять на величину перспективных эксплуатационных ресурсов.

Для расчета коэффициента использования подземных вод по формуле (IV.9) примем водопроницаемость пород каменноугольного водоносного горизонта равной 1000 $\text{м}^2/\text{сут}$; приведенное значение коэффициента пьезопроводности (a_{00}) — $5 \cdot 10^5$ $\text{м}^2/\text{сут}$, приведенную упругую водоотдачу (μ_{00}^*) — 0,002, радиус скважины (r_0) — 0,1 м; расстояния между скважинами 9 ÷ 35 км ($R_K = 5, 10, 20$ км). Время эксплуатации 50 лет.

В естественных условиях питание и разгрузка артезианских вод в результате перетекания компенсируются. Возможная ве-

личина перетекания зависит от гидрогеологических параметров слоя, разделяющего грунтовые и артезианские воды. Расход воды при перетекании выражается формулой (IV.5). Для того чтобы показать реальную возможность перетекания в условиях Московского артезианского бассейна при заданном понижении уровня ($S = 200$ м), определим порядок величины K_0 . Величину перетекания ($Q_{\text{п}}$) будем считать равной величине естественных ресурсов подземных вод (около 27 млн. $\text{м}^3/\text{сут}$).

Мощность разделяющих вышележащих слабопроницаемых слоев в среднем около 20 м, в этом случае $K_0 = 0,00001$ м/сут. Таким образом, даже при таком значении K_0 оцененные эксплуатационные ресурсы могут обеспечиваться перетеканием; коэффициент перетекания по формуле (IV.11) выражается величиной $4 \cdot 10^4$ м.

Задаваясь различными расстояниями между скважинами при расположении их по сетке, определим коэффициент перспективного использования эксплуатационных ресурсов с учетом перетекания (η_2) по формуле (IV.12). Приводим результаты расчетов коэффициента использования потенциальных ресурсов подземных вод:

$R_K, \text{ м}$	$l, \text{ км}$	η_1	η_2
5 000	≈ 9	0,99	0,97
10 000	≈ 18	0,95	0,79
20 000	≈ 35	0,81	0,45

Коэффициент перспективного использования эксплуатационных ресурсов, формирующихся за счет естественных запасов при эксплуатации в течение 50 лет, близок к единице, за исключением случая весьма рассредоточенных водозаборов, где он составляет около 80%. При неограниченном сроке использования и формирования ресурсов за счет перетекания коэффициент использования эксплуатационных ресурсов подземных вод только при малых расстояниях практически равен единице, а при значительных расстояниях (порядка 30—40 км) близок к 0,5.

В краевых частях артезианских бассейнов основной источник формирования эксплуатационных ресурсов — также перетекание из вышерасположенных горизонтов грунтовых вод, которые в свою очередь получают питание за счет атмосферных осадков и из поверхностных водотоков и водоемов. Однако в отличие от основной «напорной» части бассейна в краевых зонах обычно существуют более сложные условия взаимосвязи водоносных горизонтов одного с другим и с поверхностными водами. В этом плане краевые зоны как бы переходные от артезианских бассейнов с напорными водами к площадям развития грунтовых вод. Трудности в оценке эксплуатационных ресурсов напорных вод (учет перетекания) и грунтовых вод (учет их взаимосвязи с поверхностными водами) в краевых зонах совмещаются. Поэтому региональную оценку прогнозных эксплуатационных ресурсов в краевой зоне

предпочтительно выполнять методом математического моделирования.

В качестве примера рассмотрим результаты оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод в районе г. Киева, выполняемой на машине УСМ-1 во ВСЕГИНГЕО (Б. В. Боровский, И. И. Крашин, Д. Р. Литвак и др.) по материалам треста «Киевгеология». Рассматриваемый район расположен в прибортовой юго-западной части Днепровско-Донецкой впадины, на ее сочленении с Украинским кристаллическим щитом. Для района характерно переслаивание нескольких водоносных и слабопроницаемых слоев, а также наличие большого количества тектонических нарушений, приведших к нарушениям сплошности залегания как водоносных, так и слабопроницаемых разделяющих отложений.

Основные водоносные горизонты — горизонт сеноман-келловейских отложений и горизонт континентальных отложений средней юры, разделенные мощной алевроитисто-глинистой толщей. Верхний, сеноман-келловейский горизонт отделен от вышележащего бучакско-каневского горизонта слабопроницаемой мергельно-меловой толщей. В свою очередь бучакско-каневский водоносный горизонт от вышележащего горизонта грунтовых вод четвертичных отложений отделен толщей мергелей киевской свиты, которые в пределах долины Днепра размыты. В районах широко развита сеть рек, озер и водохранилищ. Анализ опыта эксплуатации водозаборов на сеноман-келловейском и юрском водоносных горизонтах показал, что в обоих горизонтах развились депрессионные воронки. Но если в нижнем горизонте радиус депрессионной воронки составляет 40—50 км, то для верхнего горизонта характерна ее локализация в пределах самого города и радиус воронки не превышает 10—15 км. Это объясняется более благоприятными условиями формирования эксплуатационных ресурсов подземных вод сеноман-келловейского горизонта, получающего питание перетеканием воды из вышележащих бучакско-каневских отложений, в которых также сформировалась воронка депрессии. Бучакско-каневский горизонт в свою очередь получает питание из четвертичных отложений и поверхностных водотоков.

Характерно, что значительная часть эксплуатационных ресурсов нижнего (юрского) водоносного горизонта, отделенного от сеноман-келловейского толщей глинистых отложений, также формируется за счет перетекания воды из вышележащих отложений (этому в значительной мере способствуют упомянутые тектонические нарушения).

Моделирование позволило исполнителям работы дать количественную оценку основных источников формирования эксплуатационных ресурсов подземных вод. При этом оказалось, что практически все эксплуатационные ресурсы (98%) формируются за счет естественных и привлекаемых (из поверхностных водотоков) ресурсов. Упругие запасы играют незначительную роль, хотя в первый период эксплуатации их значение может быть велико.

ГРУНТОВЫЕ ВОДЫ

При региональной оценке эксплуатационных ресурсов грунтовых вод платформенных областей допустима следующая схематизация: ресурсы грунтовых вод междуречных территорий, с одной стороны, и ресурсы грунтовых вод речных долин — с другой, рассматриваются независимыми балансовыми районами, как бы разделенными водоупорными «стенками». Поэтому при оценке ресурсов грунтовых вод региона в целом они могут суммироваться. Подобная схематизация целесообразна по следующим соображениям: эксплуатационные ресурсы грунтовых вод междуречных территорий формируются в основном в результате инфильтрации атмосферных осадков, при этом водозаборы рассредотачиваются по всей площади распространения водоносного горизонта, в частности по сетке; эксплуатационные ресурсы подземных вод речных долин в основном формируются фильтрацией из рек, водозаборы располагаются линейно вдоль рек для максимального привлечения поверхностного стока.

Оценка ресурсов подземных вод речных долин, имеющая особое значение для водоснабжения, излагается отдельно.

Потенциальные эксплуатационные ресурсы грунтовых вод междуречных территорий выражаются формулой

$$Q_{\pi} = \left(\frac{\mu S}{t} + W + \Delta W \right) F, \quad (IV.21)$$

где μ — гравитационная водоотдача водоносного пласта; W — инфильтрация атмосферных осадков на единицу площади распространения водоносного горизонта; ΔW — увеличение питания грунтовых вод вследствие уменьшения испарения при понижении уровня грунтовых вод при эксплуатации; F — площадь распространения водоносного горизонта.

Фильтрация из рек, возникающая при создании депрессии грунтовых вод, в балансовом уравнении не учитывается, так как межечный сток рек в значительной мере может формироваться за счет питания, которое получают грунтовые воды и которое уже учтено членом W . Речные долины при сооружениях в них водозаборов рассматриваются, как было указано, в качестве самостоятельных балансовых районов. Допустимое понижение (S) должно не превосходить половины мощности водоносного пласта, не вызывать подтока сильно ожелезненных и богатых органическим веществом болотных вод, а также не влиять отрицательно на растительность (не допускать переосушения почв).

Модуль потенциальных эксплуатационных ресурсов грунтовых вод выражается формулой

$$M = 31,7 \left(\frac{\mu S}{t} + W + \Delta W \right) \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2, \quad (IV.22)$$

где t — годы; величины W и ΔW — в м/год; S — в м.

Основной и неограниченный во времени источник формирования эксплуатационных ресурсов грунтовых вод — это их естественные ресурсы. Сработка естественных запасов грунтовых вод [первое слагаемое в скобке формулы (IV.22)] имеет некоторое значение только при использовании запасов грунтовых вод, приуроченных к пескам, галечникам и т. п., обладающих значительной водоотдачей ($\mu = 0,20 \div 0,25$). Так, например, при понижении уровня грунтовых вод в песках на 50 м ежегодно в течение 50 лет будет освобождаться из естественных запасов слой воды 200—250 мм, что не только соизмеримо с величиной инфильтрации атмосферных осадков, но даже существенно ее превосходит. Естественными запасами грунтовых вод, т. е. первым слагаемым в скобке формулы (IV.22), в трещиноватых породах вследствие их малой водоотдачи (0,01—0,03) при незначительной мощности пласта (менее 50 м) и длительном периоде использования (несколько десятков лет) при расчетах эксплуатационных ресурсов можно пренебрегать.

При расположении множества равнодебитных скважин по правильной «сетке» дебит каждой скважины определяется по формуле (IV.23), предложенной Ф. М. Бочевеком (1968):

$$Q \approx \frac{2\pi K h_{cp} \left(S + \frac{Wt}{\mu} \right)}{\frac{2K h_{cp} t}{\mu R_k^2} + \ln \frac{R_k}{r_0} - 0,75} \quad (IV.23)$$

Коэффициент перспективного использования естественных запасов грунтовых вод приближенно (с использованием средней мощности пласта h_{cp}) выражается следующей формулой, аналогичной формуле (IV.9) для напорных вод:

$$\eta = \frac{Q_0}{Q_{II}} = \frac{1}{1 + \frac{\mu R_k^2}{2K h_{cp} t} \left(\ln \frac{R_k}{r_0} - 0,75 \right)} \quad (IV.24)$$

Как видно из этой формулы, степень использования потенциальных эксплуатационных ресурсов тем больше, чем больше водопроницаемость пласта $K h_{cp}$ и время эксплуатации, и тем меньше, чем больше водоотдача и особенно расстояние между скважинами (l) (напомним, что $R_k = 0,565 l$). С увеличением времени эксплуатации коэффициент использования стремится к единице, а с увеличением расстояний между скважинами — к нулю.

Формула (IV.24) отвечает условию неустановившегося движения, когда происходит сработка естественных запасов грунтовых вод. При длительной эксплуатации (точнее, при расчетах ресурсов на неограниченно долгий срок) поступлением воды за счет сработки запасов можно пренебрегать. В этих условиях эксплуатационные ресурсы грунтовых вод обеспечиваются только их пита-

нием инфильтрацией и движение становится практически установившимся.

При установившемся движении между размерами блока, величиной инфильтрации и гидрогеологическими параметрами пласта существует зависимость (IV.25), приводимая многими авторами, но, по-видимому, впервые опубликованная в работе В. И. Аравина и С. Н. Нумерова (1955):

$$R_0^2 \left(\ln \frac{R_0}{r_0} - 0,5 \right) = \frac{2Kh_{cp}S}{W}, \quad (IV.25)$$

где S — понижение уровня воды в скважине, расположенной в центре блока — круга радиусом R_0 , обеспечивающее поступление в скважину всей воды, просачивающейся в пределах блока.

Величина R_0 может быть определена в формуле (IV.25) несложным подбором.

Коэффициент перспективного использования потенциальных эксплуатационных ресурсов грунтовых вод в условиях установившегося движения (η_y) выражается формулой

$$\eta_y = \left(\frac{R_0}{R_k} \right)^2. \quad (IV.26)$$

Эта формула применима при $R_k > R_0$; Если радиусы блоков R_k равны или меньше R_0 , то полное использование естественных ресурсов (питания) водоносного горизонта обеспечивается ($\eta_y = 1$). В противном случае ($R_k < R_0$) коэффициент использования $\eta_y < 1$, так как между блоками остаются неиспользованные «целики».

Для характеристики относительного значения естественных запасов и ресурсов грунтовых вод в формировании эксплуатационных ресурсов, а также влияния расстояния между водозаборами на коэффициент использования этих ресурсов приведем некоторые сопоставительные расчеты оценки эксплуатационных ресурсов грунтовых вод одного из типичных в этом отношении регионов — области распространения четвертичных отложений в Белоруссии. Здесь основной — водоносный горизонт, приуроченный к межморенным флювиогляциальным пескам. При расчетах на основании литературных данных приняты следующие усредненные значения величин: $K = 15 \text{ м/сут}$; $h_{cp} = 50 \text{ м}$; $\mu = 0,15$; $W = 0,0002 \text{ м/сут}$ (70 мм/год , т. е. $\sim 10\%$ величины атмосферных осадков); $r_0 = 0,1 \text{ м}$; допустимое понижение $S = 25 \text{ м}$. Расчеты сделаны применительно к длительности эксплуатации 50 лет и на неограниченный срок. Результаты расчетов, усредненные для района площадью около 300 км^2 , приведены в табл. 3

Из табл. 3 видно, что в формировании эксплуатационных ресурсов грунтовых вод участие сработки естественных запасов и естественных ресурсов примерно равно.

Таблица 3

Роль естественных ресурсов в формировании эксплуатационных ресурсов подземных вод

Срок эксплуатации	Модуль потенциальных эксплуатационных ресурсов, л/сек-км ²	Доля участия естественных ресурсов в формировании эксплуатационных ресурсов	Коэффициент использования при расстоянии между водозаборами, км	
			2	10
50 лет	1,40	0,53	0,90	0,28
Неограниченный	0,74	1,00	1,00	0,58

При расстояниях между водозаборами 2 км используется более 90% потенциальных эксплуатационных ресурсов, а с увеличением расстояний между водозаборами до 10 км коэффициент использования резко снижается (до 58% при расчете на неограниченный срок эксплуатации, до 28% при использовании подземных вод на срок 50 лет).

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НЕБОЛЬШИХ ОГРАНИЧЕННЫХ СТРУКТУР

В ряде районов СССР для централизованного водоснабжения используются подземные воды, приуроченные к небольшим, ограниченным по площади (от нескольких десятков до первых тысяч квадратных километров) структурам, которые сложены сильно трещиноватыми, иногда закарстованными породами и часто ограничены слабо трещиноватыми, а иногда практически водоупорными породами.

Подобные структуры встречаются в горно-складчатой стране Центрального Казахстана, в пределах Украинского щита, Урала, Забайкалья, в окраинных зонах платформ (Предкарпатье, восточный борт Днепровско-Донецкой впадины). Важная роль этих структур, как коллекторов подземных вод, определяется тем, что, несмотря на небольшие размеры, их подземные воды часто по существу единственный источник водоснабжения.

В отличие от артезианских бассейнов платформенного типа, где при оценке перспективных эксплуатационных ресурсов можно исходить из схемы размещения водозаборов по сетке в пределах обширного региона, оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод в районах распространения небольших ограниченных структур должна сводиться к определению ресурсов каждой структуры в отдельности с последующим суммированием их в пределах региона. При этом усредненный модуль эксплуатационных ресурсов региона в целом вследствие преобладания в нем слабопроницаемых пород может быть небольшим, но на участках распространения отдельных водообильных структур может достигать

значительной величины. Каждая структура может рассматриваться как самостоятельный балансовый район, в пределах которого происходит питание и разгрузка подземных вод. Возможный приток в водоносную структуру из окружающих слабопроницаемых пород, как правило, весьма незначителен и может не учитываться в водном балансе структуры при региональных оценках (этот учет возможен лишь в некоторых случаях на основе весьма детальных исследований на стадии проектирования конкретных водозаборов).

Основными источниками формирования подземных вод ограниченных структур служат инфильтрация атмосферных осадков и поглощение поверхностного стока (в том числе и транзитного) при понижении уровня грунтовых вод, вызванном эксплуатацией водоносного горизонта, когда отток воды за пределы структуры ликвидируется, а также в некоторых случаях уменьшается или прекращается вовсе испарение с поверхности грунтовых вод.

Модуль питания подземных вод в зависимости от климатических условий и литологического строения зоны аэрации колеблется в широких пределах — от десятых долей литров в секунду с 1 км^2 в аридных районах до нескольких литров в секунду с 1 км^2 в гумидных.

Осушение пласта, т. е. использование естественных запасов подземных вод при длительной эксплуатации в аридной зоне (незначительное питание водоносного горизонта), может иметь важное значение. Как известно, величина этих запасов определяется мощностью водоносных пород и их водоотдачей.

Благодаря ограничению водоносных структур практически водоупорными породами, использование естественных и привлекаемых ресурсов имеет благоприятные предпосылки. Поскольку питание подземных вод является важнейшим источником формирования их ресурсов, то термин «ограниченные структуры» предпочтительнее термина «закрытые» структуры.

Водоотдача трещиноватых и даже трещинно-карстовых пород обычно мала и изменяется от десятых долей процента до 2—3%, лишь изредка достигая 5—6%. Наибольшей водоотдачей характеризуются, как правило, кавернозные известняки и доломиты, меньшей — песчаники и алевролиты, наименьшей — сланцы, интрузивные, эффузивные и метаморфические породы.

Глубина относительно интенсивной трещиноватости, в пределах которой возможно осушение водоносных пород, колеблется от десятков до первых сотен метров. При большой мощности осушаемых пород, даже при их незначительной водоотдаче, сработка естественных запасов может оказаться существенной в формировании эксплуатационных ресурсов.

Так, например, при водоотдаче пород, равной 1%, что достаточно характерно для известняков, слагающих, например, карбонатные структуры Центрального Казахстана, при осушении пород

на глубину 100 м модуль эксплуатационных ресурсов составляет около $1 \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2$ при сроке эксплуатации 25 лет. Естественные запасы небольших ограниченных структур обычно могут обеспечить расход водозаборов 20—50 л/сек на этот срок.

Роль использования естественных запасов существенно возрастает при наличии обводненных песков, перекрывающих основной водоносный горизонт, что встречается довольно часто. Обводненные пески характеризуются мощностью от нескольких до первых десятков метров. Так, при мощности песков 10 м и водоотдаче 0,2 модуль эксплуатационных ресурсов за счет их осушения составит более $2 \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2$.

Транзитный поверхностный сток может полностью обеспечивать эксплуатационные ресурсы подземных вод некоторых ограниченных структур. При расчетах он может рассматриваться как элемент питания водоносного горизонта этой структуры в целом.

Потенциальные эксплуатационные ресурсы ограниченной структуры, имеющей площадь F , выражаются

$$Q_{\text{п}} = \frac{\mu S}{t} F + Q_{\text{пит}}, \quad (\text{IV.27})$$

где $Q_{\text{пит}}$ — расход, формируемый за счет питания водоносного горизонта (инфильтрация атмосферных осадков, выпадающих в пределах структуры и стекающих с прилегающих территорий, и поглощения речного стока).

Модуль эксплуатационных потенциальных ресурсов выражается формулой

$$M = \frac{\mu S}{t} + \frac{Q_{\text{пит}}}{F}, \quad (\text{IV.28})$$

где $\mu S/t$ — эксплуатационные ресурсы, формирующиеся за счет естественных запасов.

Значительная водопроницаемость водоносного горизонта и небольшие размеры структур обеспечивают практически полное использование эксплуатационных ресурсов подземных вод даже небольшим количеством скважин, т. е. перспективные ресурсы близки к потенциальным, а коэффициент использования около единицы.

Перспективные эксплуатационные ресурсы подземных вод могут быть определены по формуле Ф. М. Бочевера (1968). При расположении водозабора в центре пласта-круга дебит водозабора выражается формулой (IV.23), в которой W — величина, выражающая суммарное питание, отнесенное к единице площади.

Для выявления относительной роли сработки запасов ($Q_{\text{зап}}$) и ресурсов ($Q_{\text{рес}}$) в формировании эксплуатационных ресурсов подземных вод формулу (IV.23) удобно представить в форме двучлена

$$Q = Q_{\text{зап}} + Q_{\text{рес}} = \frac{\pi K h_{\text{ср}} S}{\frac{K h_{\text{ср}} t}{\mu R_k^2} + 0,5 \left(\ln \frac{R_k}{r_0} - 0,75 \right)} +$$

$$+ \frac{Q_{\text{пит}} \frac{K h_{\text{ср}} t}{\mu R_k^2}}{\frac{K h_{\text{ср}} t}{\mu R_k^2} + 0,5 \left(\ln \frac{R_k}{r_0} - 0,75 \right)}, \quad (\text{VI.29})$$

где $Q_{\text{пит}} = WF = \pi WR^2k$ — питание водоносного горизонта на площади его распространения F в процессе эксплуатации, состоящая из инфильтрации атмосферных осадков, поглощения поверхностного стока и уменьшения расходования подземных вод испарением в пределах структуры.

Обозначим долю использования сработки запасов подземных вод в формировании эксплуатационных ресурсов и естественных

Таблица 4

Модули эксплуатационных ресурсов подземных вод некоторых ограниченных структур Казахстана

№№ п.п.	Структура	Площадь структуры, км ²	Допустимое понижение уровня, м	Естественные запасы ($Q_{\text{зап}}$), л/сек	Естественные и привлекаемые ресурсы ($Q_{\text{рес}}$), л/сек
1	Жанайская	88	100	154	80
2	Уртекагыльская	112	60	118	101
3	Аяккагыльская	50	100	88	45
4	Бескагыльская	71	100	124	64
5	Таньшаадырская	157	80	220	141
6	Кзыладырская	110	60	116	99
7	Котуржалская	121	50	106	109

№№ п.п.	Структура	Потенциальные эксплуатационные ресурсы, л/сек	Модуль эксплуатационных ресурсов, л/сек-км ²	λ_1	λ_2
1	Жанайская	234	2,66	0,66	0,34
2	Уртекагыльская	219	1,95	0,54	0,46
3	Аяккагыльская	133	2,66	0,60	0,40
4	Бескагыльская	188	2,65	0,66	0,34
5	Таньшаадырская	361	2,30	0,61	0,39
6	Кзыладырская	215	1,95	0,54	0,46
7	Котуржалская	215	1,77	0,49	0,51

ресурсов соответственно λ_1 и λ_2 , т. е.

$$\lambda_1 = \frac{Q_{\text{зап}}}{Q} \quad \text{и} \quad \lambda_2 = \frac{Q_{\text{рес}}}{Q}.$$

Из формулы (IV.29) следует, что

$$\lambda_1 = \frac{1}{1 + \frac{Q_{\text{пит}}t}{\mu SF}} \quad \text{и}$$
$$\lambda_2 = 1 - \lambda_1 = 1 - \frac{1}{1 + \frac{Q_{\text{пит}}t}{\mu SF}}$$

коэффициент λ_1 изменяется от 0 до 1; при $t \rightarrow \infty$ или $S \rightarrow 0$ $\lambda_1 \rightarrow 0$; при $t \rightarrow 0$ или $S \rightarrow \infty$ $\lambda_1 \rightarrow 1$. Соответственно λ_2 изменяется от 1 до 0.

Как отмечалось, в аридной зоне сработка естественных запасов составляет существенную долю эксплуатационных ресурсов подземных вод. В табл. 4 приведены данные, характеризующие относительную роль сработки запасов (при использовании их в течение 25 лет) и питания подземных вод в формировании эксплуатационных ресурсов некоторых ограниченных брахиструктур Центрального Казахстана.

Как видно из табл. 4, более половины эксплуатационных ресурсов подземных вод этих брахиструктур формируется за счет сработки естественных запасов.

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ РЕЧНЫХ ДОЛИН

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
РЕЧНЫХ ДОЛИН

Речные долины были и еще в большей мере будут основными участками эксплуатации подземных вод. Целесообразность размещения водозаборов подземных вод в речных долинах определяется рядом причин. Наиболее существенный фактор — возможность привлечения речного стока как постоянного источника питания эксплуатируемого водоносного горизонта. В этих условиях в большинстве случаев появляется возможность проектировать водозаборы на неограниченный срок использования.

Второе важное обстоятельство — это хорошая водопроницаемость рыхлообломочных аллювиальных отложений и более высокие по сравнению с междуречными участками фильтрационные свойства трещиноватых коренных пород в бортах и днище долин.

Важный фактор также близость к потребителям, так как большинство городов и других крупных населенных пунктов приурочено к долинам рек.

Эксплуатация подземных вод в аллювиальных отложениях приводит, кроме того, к созданию емкостей, которые могут заполняться паводковыми водами. Это своеобразное, хотя и незначительное по сравнению с паводковыми расходами регулирование поверхностного стока может явиться полезным мероприятием, существенно увеличивающим производительность береговых (инфильтрационных) водозаборов.

Методика региональной оценки эксплуатационных ресурсов грунтовых вод речных долин имеет ряд специфических особенностей, отличающих ее от методики оценки эксплуатационных ресурсов грунтовых вод междуречных территорий и артезианских вод. Для обоснования методики оценки эксплуатационных ресурсов грунтовых вод речных долин целесообразно предварительно остановиться на методике расчета производительности береговых (инфильтрационных) водозаборов на отдельных участках речной долины. В последние годы методика такой оценки усовершенствована рядом исследователей (Григорьев, 1960; Бочевер, 1968; Шестаков, 1964; Минкин, 1973, и др.). Производительность береговых водозаборов определяется многими факторами.

Условия накопления аллювиальных отложений способствуют их неоднородности в плане и особенно в разрезе. Весьма часто в

разрезах аллювия отмечается чередование слоев различной водопроницаемости, что сообщает некоторую разобщенность отдельным водоносным горизонтам аллювия, причем часто нижний горизонт оказывается перспективнее для водоснабжения вследствие большей водопроницаемости.

Через слабопроницаемые толщи, разделяющие аллювиальные водоносные горизонты, при эксплуатации нижнего горизонта происходит перетекание из верхнего горизонта, гидравлически связанного с рекой. Это перетекание определяет возможность стабилизации уровней эксплуатируемого горизонта.

Во многих случаях слабопроницаемых слоев в толще аллювия нет и водоносный горизонт единый.

При оценке производительности береговых водозаборов помимо данных о фильтрационных свойствах водоносного горизонта требуется оценить и учесть фильтрационное сопротивление русловых отложений и связь процессов заиления с режимом речного стока. В русле и прирусловой зоне фильтрационная неоднородность, вообще характерная для разреза аллювиальных отложений и определяемая условиями их накопления, существенно усугубляется процессами кольятации и заиления русловых отложений.

При паводках обычно уровни воды в реке в течение некоторого времени оказываются выше уровней подземных вод на прилегающих к руслу участках. В эти периоды паводочные воды, несущие, как правило, большое количество взвешенных глинистых частиц, усиленно фильтруются в русле реки. При спаде паводка и обратной фильтрации в него глинистые частицы, профильтровавшиеся в русловый аллювий, обычно не возвращаются в реку, образуя под руслом зону кольятации. С другой стороны, следует отметить, что увеличение скорости течения реки в паводок приводит к усилению перемещения донных наносов и вызывает существенные изменения поперечного профиля русла, способствуя декольятации русловых отложений. Особенно заметно сказываются процессы декольятации в прибрежной части русла, что хорошо заметно на реках, где пойменная терраса в паводок не затопляется или затопляется не ежегодно. В этих условиях подъем уровня в паводок приводит лишь к расширению русла, причем отчетливо наблюдается резкое улучшение гидравлической связи подземных и поверхностных вод.

В результате ежегодной кольятирующей и декольятирующей деятельности поверхностного водотока за многолетний период создается определенное равновесное состояние, характеризующее ту или иную степень закольятированности русловых отложений. В ряде случаев она может быть весьма существенной.

Следует отметить, что на горных реках в большинстве случаев эрозионная деятельность потока настолько сильна, что многолетняя равновесная закольятированность оказывается весьма слабой, чему особенно способствует блуждание русла реки по пойме долины.

Оценивая фильтрационное сопротивление русловых отложений, следует учитывать возможность его усиления под влиянием эксплуатации водозабора.

Извилистость русла, особенно характерная для долин равнинных рек, также может влиять на характер кольматации и заиления русловых отложений. Для подмываемых участков берега реки характерны эрозионные процессы, препятствующие кольматации аллювия. На аккумулятивных участках излучин накапливается аллювий и усиливается кольматация русловых отложений, поэтому гидравлическая связь подземных и поверхностных вод здесь более затруднена, чем на подмываемых участках.

На величину фильтрационного сопротивления оказывает влияние «несовершенство» вреза речного русла, обуславливающее деформацию фильтрационного потока в прирусловой зоне. Хотя ширина этой зоны и не превышает обычно полуторной мощности пласта, некоторое удлинение пути фильтрации создает дополнительное сопротивление.

Режим речного стока определяет возможные изменения в характере гидравлической связи подземных и поверхностных вод во времени. В межпаводковый период эта связь наблюдается лишь в пределах русла, а в паводок при затоплении поймы усиленное питание подземных вод происходит на большой площади. Часто встречаются случаи, когда часть года сток в реку вообще отсутствует (река пересыхает или промерзает) или расход реки временно значительно ниже требуемой производительности водозабора. Поэтому для расчета производительности береговых водозаборов необходимо знать с заданной обеспеченностью (обычно 95%) продолжительность периода отсутствия стока в реке или его минимальных значений, ширину полосы затопления при разливах реки, их продолжительность и высоту подъема уровня.

При оценке производительности береговых водозаборов необходимо учитывать ширину долины особенно в тех случаях, когда имеются перспективы аккумуляции паводковых вод в аллювиальных отложениях поймы.

Поверхностный водоток, с которым эксплуатируемый водоносный горизонт гидравлически связан, стабилизирует процесс фильтрации. Если намечаемый водоотбор подземных вод сопоставим по величине или меньше количества поверхностных вод, могущих профильтроваться из реки через русловые отложения на участке линейного водозабора, в течение всего времени эксплуатации в его районе, то на этом участке будет сохраняться подпертый режим фильтрации, т. е. прямая гидравлическая связь подземных вод с рекой и положение депрессионной поверхности стабилизируются.

Если же водоотбор существенно больше количества речной воды, которое может профильтроваться через русловые отложения вдоль водозабора, то в его районе через некоторое время произойдет отрыв уровня подземных вод от подошвы слабопроницаемого слоя в русловых отложениях.

В этих условиях из реки будет происходить как бы подземное «дождевание» воды через слабопроницаемый слой под руслом, а режим фильтрации долгое время, а в ряде случаев и все время эксплуатации будет неустановившимся.

В первом случае, т. е. в условиях подпертого режима фильтрации, наличие поверхностного водотока может рассматриваться как граница постоянного напора, смещенная относительно уреза реки на некоторое расстояние ΔL , учитывающее сопротивление русловых отложений (Шестаков, 1964).

Это виртуальное смещение уреза определяется из условия, что фильтрационное сопротивление горизонтального однородного водоносного пласта на отрезке ΔL было равно суммарному сопротивлению русловых отложений, связанному с их заиленностью, наличием слабопроницаемых прослоев и несовершенством вреза русла в водоносный пласт.

Конечно, условие постоянства напора на смещенном урезе реки относительно, так как уровни воды в реке изменяются во времени. Тем не менее такое условие, характеризующее постоянство во времени и независимость горизонта воды в реке от работы водозабора, приемлемо для практики, если величина напора в реке принята равной среднеминимальному для данной реки значению.

Во втором случае, т. е. в условиях отрыва уровня подземных вод от подошвы слабопроницаемого слоя в русловых отложениях, поверхностный водоток может рассматриваться как граница постоянного расхода, равного расходу подземного «дождевания» из реки.

Как и условие постоянства напора, принимаемое в этом случае условие постоянства расхода относительное. Поэтому при определении расхода «дождевания» величина напора в русле также принимается равной среднеминимальному для данной реки значению.

Второй граничный контур аллювиального водоносного горизонта в плане — это линия причленения его к коренным отложениям в бортах речной долины. Характер этой границы определяется соотношением фильтрационных свойств аллювия и коренных пород. Если их водопродимости близки по величине, граница между ними не проводится и весь водоносный горизонт рассматривается как полуограниченный с одной границей — поверхностным водотоком.

Если же водопродимости аллювия существенно выше, линия его причленения к коренным породам для обеспечения некоторого «запаса надежности» должна рассматриваться как граница с нулевым расходом, т. е. как непроницаемый контур.

Если часть года сток в реке отсутствует или в межень существенно меньше водоотбора и возможного расхода «дождеванием», аллювиальный водоносный горизонт в этот период в зависимости от соотношения фильтрационных свойств аллювия и коренных пород может рассматриваться как неограниченный пласт (если

фильтрационные свойства близки) или как пласт-полоса с непроницаемыми границами (если фильтрационные свойства аллювия существенно выше). Ширина пласта-полосы принимается при этом равной удвоенному расстоянию водозабора относительно ближайшего борта долины.

Речные долины характеризуются большим разнообразием гидрогеологических условий и гидрологического режима.

Для унификации методов оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод в речных долинах представилось целесообразным для обоснования выбора расчетных схем произвести типизацию речных долин с учетом их гидрогеологических и гидрологических особенностей. Основным принципом этой типизации принят характер взаимосвязи намечаемого к эксплуатации водоносного горизонта с рекой. По этому признаку все речные долины или участки этих долин можно объединить в две группы — «А» и «Б».

К группе «А» отнесены речные долины, в пределах которых намечаемый к эксплуатации водоносный горизонт имеет непосредственную гидравлическую связь с рекой независимо от того, затруднена эта связь или совершенна. К долинам группы «А» может быть также отнесено большое число долин, в которых характер гидравлической связи периодически резко меняется. Так, например, в межпаводковый период эта связь может наблюдаться лишь в пределах русла, а в паводок затапливается вся пойма и происходит усиленное питание подземных вод на большой площади. Может оказаться, что и без затопления поймы расширение русла за счет подъема уровня в реке приводит к значительному увеличению фильтрации из русла.

К группе «Б» отнесены долины, в пределах которых намечаемый к эксплуатации водоносный горизонт не имеет непосредственной гидравлической связи с рекой.

Речные долины группы «Б» встречаются значительно реже долин группы «А». К ним относятся долины, в пределах которых намечаемый к эксплуатации основной наиболее водопроницаемый водоносный горизонт отделяется от реки другим, характеризующимся иными гидрогеологическими параметрами, отличными от основного (нижнего) горизонта. К долинам этой группы относится, например, долина Северского Донца, где эксплуатируемый мергельно-меловой водоносный горизонт отделяется от реки выдержанной толщей аллювиальных отложений; долина р. Нярис близ г. Вильнюса, где выше эксплуатируемого аллювиально-флювиогляциального водоносного горизонта, представленного песчано-гравийным материалом, залегает выдержанная толща мелкозернистых слабо-водоносных аллювиальных песков, перекрытых в свою очередь хорошо водопроницаемой грубообломочной толщей современного аллювия.

Следует отметить, что указанное деление речных долин может относиться не ко всей долине в целом. На разных участках одна и та же долина в зависимости от гидрогеологических условий мо-

жет быть отнесена к первой или ко второй группе. Примером могут служить речные долины Черноморского побережья Северного Кавказа, где зачастую водозаборы разведывают и создают вблизи границы выклинивания слабопроницаемых слоев, отделяющих нижний эксплуатируемый горизонт от верхнего.

Каждую из выделенных групп долин можно в свою очередь подразделить на два типа — речные долины, имеющие постоянный сток и не имеющие такого стока.

К последнему типу следует отнести и те речные долины, в которых в течение части года возможно прекращение стока в реке вследствие эксплуатации водозаборов подземных вод.

Основное отличие долин первого типа в том, что здесь независимо от степени гидравлической связи питание эксплуатируемого водоносного горизонта за счет поверхностных вод при эксплуатации водозабора происходит непрерывно. В долинах, относящихся ко второму типу, определенную часть года при эксплуатации такого подпитывания не наблюдается.

Оценка производительности водозаборов в долинах группы «А»

Из рассмотрения расчетных схем можно видеть, что для оценки производительности берегового водозабора прежде всего нужно выяснить, какое граничное условие составляет река, т. е. какой режим фильтрации будет наблюдаться при работе водозабора и наличии стока в реке.

С достаточной обоснованностью можно считать, что непосредственная гидравлическая связь с рекой будет происходить, т. е. режим фильтрации будет подпертым, если расход речной воды, фильтрующейся в подземные воды при работе водозабора, меньше того расхода, который может поступить из реки в подземные воды через русловые отложения.

Это условие может быть записано в виде соотношения

$$q < \left(\frac{H_0 - m}{A_0} \right) 2b, \quad (\text{V.1})$$

где q — единичная (на единицу длины) производительность равноприточной галереи, эквивалентной по дебиту рассматриваемому линейному водозабору и работающей в условиях подпертой фильтрации; H_0 — превышение среднеминимального уровня воды в реке над подошвой водоносного горизонта; m — мощность водоносного горизонта под руслом; $A_0 = m_0/K_0$ — обобщенный параметр, названный В. М. Григорьевым (1960) коэффициентом сопротивления русловых отложений фильтрации (m_0 и K_0 — соответственно приведенные мощность и коэффициент фильтрации слабопроницаемых отложений под руслом); $2b$ — ширина русла.

В условии (V.1) неизвестная величина — сама производительность водозабора при подпертом режиме фильтрации. Она определяется по следующей зависимости (Минкин, Зильберштейн, 1973):

$$q = \frac{KS \left(H - \frac{S}{2} \right) + q_{\text{меж}} V a T \operatorname{ierfc} \left(\frac{d_0}{2 \sqrt{aT}} \right)}{V a T \operatorname{ierfc} \left(\frac{d_0}{2 \sqrt{aT}} \right) + d + \frac{\sigma}{\pi} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0}}, \quad (\text{V.2})$$

где K и H — соответственно коэффициент фильтрации и мощность водоносного горизонта; S — допустимое понижение уровня в скважинах водозабора; $q_{\text{меж}}$ — среднeminимальный единичный межениный расход реки, определяется делением среднeminимального межениного расхода ($Q_{\text{меж}}$) на длину линейного водозабора ($2l$); a — коэффициент урoвнепрoвoднoсти; T — продолжительность периода отсутствия стока в реке; d_0 — расстояние линейного водозабора от береговой линии; $d = d_0 + \Delta L$ — приведенное расстояние водозабора от береговой линии, учитывающее сопротивление русловых отложений; ΔL — отрезок, на который смещается урез реки, чтобы фильтрационное сопротивление на нем было эквивалентно сопротивлению русловых отложений (Шестаков, 1964, Минкин, Зильберштейн, 1973); σ — половина расстояния между скважинами водозабора; r_0 — радиус этих скважин.

Из условия (V.1) с учетом выражения (V.2) может быть получен критерий для суждения о режиме фильтрации.

Режим фильтрации будет подпертым, если выполняется соотношение

$$A_0 < \frac{(H_0 - m) 2b \left[V a T \operatorname{ierfc} \left(\frac{d_0}{2 \sqrt{aT}} \right) + d + \frac{\sigma}{\pi} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0} \right]}{KS \left(H - \frac{S}{2} \right) + q_{\text{меж}} V a T \operatorname{ierfc} \left(\frac{d_0}{2 \sqrt{aT}} \right)}. \quad (\text{V.3})$$

Для условий круглогодичного стока в реке критерий (V.3) существенно упрощается:

$$A_0 < \frac{(H_0 - m) 2b \left(d + \frac{\sigma}{\pi} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0} \right)}{KS \left(H - \frac{S}{2} \right)}, \quad (\text{V.4})$$

а выражение (V.2) для расчета производительности линейного водозабора в условиях подпертой фильтрации обращается в известную формулу Маскета-Лейбензона

$$q = \frac{KS \left(H - \frac{S}{2} \right)}{d + \frac{\sigma}{\pi} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0}}. \quad (\text{V.5})$$

Если критерии (V.3) или (V.4) не выполняются, можно достаточно обоснованно считать, что при работе водозабора и при нали-

чи стока в реке произойдет отрыв уровня эксплуатируемого горизонта от подошвы слабопроницаемого слоя под руслом реки на всей ее ширине. В этом случае река становится границей постоянного расхода, равного расходу «дождевания». Для таких условий производительность линейного водозабора на единицу его длины может быть определена из выражения (Минкин, Зильберштейн, 1973)

$$q = \frac{KS(2H - S) + \left(\frac{H_0 - m}{A_0}\right) 2b(lR - d_0) -}{lR + \frac{2\sigma}{\pi} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0}} \times \\ \times \frac{- \left[\left(\frac{H_0 - m}{A_0}\right) 2b - q_{\text{мек}}\right] 2 \sqrt{aT} \operatorname{ierfc} \left(\frac{d_0}{2 \sqrt{aT}}\right)}{lR + \frac{2\sigma}{\pi} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0}}, \quad (\text{V.6})$$

в котором R — фильтрационное сопротивление, связанное с работой самого водозабора в условиях пласта-полосы шириной $2L$ и непроницаемыми границами.

Если в периоды паводков не происходит затопления поймы или заметного расширения русла, что наблюдается на участках, где русло ограничено крутыми берегами, а также если река вообще не имеет выраженных паводков, сопротивление R определяется по приведенным в названной работе (Минкин, Зильберштейн, 1973) графикам $R = f\left(\frac{at}{l^2}; \frac{2L}{l}\right)$. Графики построены с учетом решения Ф. М. Бочевера (1968), причем время, на которое оно рассчитывается, принимается равным проектному времени работы водозабора. В этом случае принимается, что восполнение сработываемых естественных (емкостных) запасов подземных вод пренебрежимо мало.

Если же в периоды паводков (ежегодно, раз в несколько лет или несколько раз в году) происходит затопление поймы или заметное увеличение ширины русла (что, как уже отмечалось, приводит к существенному улучшению условий фильтрации поверхностных вод в подземные), т. е. если в паводок происходит определенное восполнение сработанных в межпаводковый период емкостных запасов подземных вод, то в зависимости от величины этого восполнения сопротивление R определяется по-разному.

При полном восполнении сработанных запасов сопротивление также определяется по уже упомянутым графикам $R = f\left(\frac{at}{l^2}; \frac{2L}{l}\right)$, но время, на которое оно рассчитывается, принимается равным времени между началами двух последовательных паводков. Проверочный расчет на возможность полного восполнения сработанных на межпаводковый период емкостных запасов выполняется в следующей последовательности. Сначала определяется обеспеченный восполнением единичный расход ($q_{\text{восп}}$), т. е. отнесенное ко времени

между началами последовательных паводков количество речных вод, могущее поступить к подземным водам во время паводка. Величина $q_{\text{восп}}$ находится по формуле

$$q_{\text{восп}} \approx \frac{\mu S_0 B}{2t_1} \left(1 + \frac{\sqrt{aT_1}}{B} \right). \quad (\text{V.7})$$

Эта формула получена с учетом известных решений о подпоре подземных вод вблизи рек и водохранилищ без учета фильтрационного сопротивления русловых отложений, где μ — коэффициент водоотдачи; S_0 — превышение паводкового уровня воды в реке над расчетным уровнем подземных вод; B — ширина полосы затопления; T_1 — время, в течение которого сохраняется затопление полосы шириной B ; t_1 — время между началами двух последовательных паводков.

Затем полученное значение $q_{\text{восп}}$ сравнивается с тем максимальным единичным расходом (q_0), который может быть получен равноприточной галереей, работающей в условиях пласта-полосы шириной $2L$, и непроницаемыми границами за счет сработки емкостных запасов в течение времени, равного периоду между началами последовательных паводков (t_1).

Расход q_0 определяется по формуле

$$q_0 = \frac{KS_1(2H - S_1)}{lR}, \quad (\text{V.8})$$

в которой сопротивление R рассчитывается на время t_1 , а понижение S_1 определяется как разность между расчетным допустимым понижением S и дополнительным понижением ΔS , создаваемым непосредственной работой скважины проектируемого водозабора (производительность скважины $Q_{\text{скв}}$). Величина ΔS находится по известной формуле (Борисов, 1951)

$$\Delta S = \frac{Q_{\text{скв}}}{2\pi KH} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0}. \quad (\text{V.9})$$

Если $q_{\text{восп}} \geq q_0$, принимается, что восполнение сработанных емкостных запасов будет полным.

Если же $q_{\text{восп}} < q_0$, т. е. когда полного восполнения сработаемых запасов происходить не будет, сопротивление определяется по формуле

$$R = \frac{KS_1(2H - S_1)}{lq_{\text{восп}}}. \quad (\text{V.10})$$

Для условий, когда сток сохраняется в реке в течение всего года, т. е. когда время $T = 0$, выражение (V.6) существенно упрощается:

$$q = \frac{KS(2H - S) + \left(\frac{H_0 - m}{A_0} \right) 2b(lR - d_0)}{lR + \frac{2\sigma}{\pi} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0}}. \quad (\text{V.11})$$

Анализ предлагаемых приближенных расчетных зависимостей показывает, что принятая в практике оценка максимально возможной производительности береговых водозаборов величиной минимального меженного речного стока 95%-ной обеспеченности или чрезмерно осторожная, если отложения под руслом характеризуются малым фильтрационным сопротивлением, или чрезмерно оптимистическая, когда слабопроницаемые русловые отложения не могут пропустить этот меженный расход вследствие больших фильтрационных сопротивлений.

Оценка производительности водозаборов в долинах группы «Б»

Необходимость в создании таких водозаборов чаще всего возникает в тех случаях, когда вышележащий аллювиальный водоносный горизонт, непосредственно связанный с поверхностными водами, характеризуется низкими фильтрационными свойствами или небольшой мощностью.

Геологическое строение и гидрогеологические условия речных долин в таких случаях, как правило, достаточно сложные. Обоснованная оценка производительности водозаборов в этих условиях может быть выполнена только с помощью моделирования.

Лишь в некоторых сравнительно простых случаях такая оценка может быть сделана аналитическим путем. Чаще всего при этом бывает известно, что восполнение эксплуатируемого горизонта происходит ежегодно в период паводка или раз в несколько лет во время больших половодий, когда полностью обводняется осушенная в межпаводковые периоды толща аллювиальных отложений верхнего горизонта, из которой подземные воды перетекают в эксплуатируемый водоносный горизонт.

Как было показано Ф. М. Бочевеком (1968), расчет водозабора в условиях, когда между горизонтами нет слабопроницаемых разделяющих толщ, может быть выполнен по формулам для напорных водоносных горизонтов, но с учетом емкостных свойств верхнего горизонта. Для этого в расчет следует заложить коэффициент пьезопроводности, определяемый по формуле

$$a^* = \frac{Km}{\mu_1 + \mu_2}, \quad (V.12)$$

где μ_1 — коэффициент водоотдачи верхнего горизонта; μ_2 — коэффициент водоотдачи эксплуатируемого горизонта; Km — коэффициент водопроводности эксплуатируемого горизонта, определяемый опытным путем.

Расчет при этом выполняется по формуле (V.8) на срок, равный длительности межпаводкового периода.

В расчетах, выполненных таким образом, заложен некоторый «запас надежности», связанный с тем, что не учитывается поступ-

ление поверхностных вод в верхний водоносный горизонт в межпаводковый период. В ряде случаев, когда взаимосвязь реки с подземными водами аллювия достаточно тесная, указанное допущение может привести к значительному занижению дебита водозабора. Для учета питания за счет фильтрации речных вод можно рекомендовать два приближенных приема расчета.

По первому из них принимается допущение, что через некоторое время после начала эксплуатации в результате усиливающегося поступления в верхний горизонт речных вод уровни в нем стабилизируются, т. е. наступает равновесие между перетеканием в нижний эксплуатируемый горизонт и притоком речных вод, что приводит к стабилизации уровней и в нижнем горизонте.

Расчетная формула в этом случае для линейного водозабора, состоящего из равнодебитных и равноудаленных одна от другой скважин, при условии неограниченного пласта известна (Бочев, Веригин, 1961) и после некоторых преобразований может быть записана в виде

$$q = \frac{KmS}{lD + \frac{\sigma}{\pi} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0}}, \quad (V.13)$$

где

$$D = \frac{1}{\pi N} \left[\ln \frac{3,5NB}{l} + 2 \sum_{n=1}^{N-1} K_0 \left(\frac{n-2l}{NB} \right) \right]. \quad (V.14)$$

Значение сопротивления D удобно определять по графику $D = f(l/B)$, приведенному в работе Е. Л. Минкина (1973). Величина сопротивления D не зависит от числа скважин, а определяется только длиной ряда и значением комплексного параметра B . Параметр B зависит от коэффициентов водопроводности эксплуатируемого горизонта фильтрации (K_0^1) и мощности (m_0^1) слабопроницаемой толщи, отделяющей этот горизонт от верхнего, связанного с рекой.

Понижение S в формуле (V.13) должно отсчитываться от установившегося уровня в верхнем горизонте. Положение этого уровня в свою очередь будет определяться характером связи подземных вод верхнего горизонта с рекой. Конечно, наиболее высоким оно будет под руслом реки. Поэтому независимо от тесноты этой связи, если только такая связь есть, наиболее целесообразна схема водозабора такая, как и в речных долинах группы «А», т. е. линейный ряд скважин, вытянутый вдоль русла на возможно близком расстоянии от него.

Чтобы определить величину понижения S в формуле (V.13), требуется выполнить несложный графический подбор. Для этого следует задать два-три значения для положения установившегося уровня в верхнем горизонте (h_B) и по соотношениям (V.3) или (V.4) определить, какой режим фильтрации из реки будет при этом.

Затем по соответствующим формулам (V.2) и (V.5) или (V.6) и (V.11) определяется производительность $q_{в}$, которая сравнивается с производительностью q , рассчитанной по формуле (V.13) на понижение, отсчитываемое от уровня, соответствующего заданному значению $h_{в}$. Для различных полученных значений $q_{в}$ и q строятся совмещенные графики $q_{в} = f(h_{в})$ и $q = f_1(h_{в})$, в точке пересечения которых и находится искомое оптимальное значение $h_{в}$.

Описанный прием расчета, конечно, сугубо приближенный, но, на наш взгляд, он может дать достаточно надежные результаты, так как основан на очевидных балансовых соотношениях.

Второй рекомендуемый приближенный прием расчета — гидравлический.

Если при разведке будет показано, что во время откачек с дебитами, примерно равными проектным, происходит стабилизация уровня в верхнем и нижнем горизонтах, оценка производительности водозабора может быть выполнена наложением течений по срезам уровня, наблюдавшимся в соседних разведочных или наблюдательных скважинах.

Оценка потенциальных и перспективных эксплуатационных ресурсов подземных вод в речных долинах

Оценке потенциальных эксплуатационных ресурсов подземных вод должно предшествовать районирование речной долины по условиям взаимосвязи подземных и поверхностных вод и особенностям режима речного стока (постоянный или периодичный сток). Каждый выделенный по совокупности упомянутых выше признаков участок должен рассматриваться как самостоятельный балансовый район, характеризуемый едиными (усредненными для этого района) гидрогеологическими и гидрологическими условиями.

Потенциальные эксплуатационные ресурсы подземных вод в речных долинах группы «А» лимитируются величиной меженного стока реки ($Q_{\text{меж}}$) или пропускной способностью русловых отложений ($Q_{\text{р}}$), если она меньше меженного стока. К потенциальным эксплуатационным ресурсам подземных вод следует относить и величину восполнения эксплуатируемого водоносного горизонта ($Q_{\text{восп}}$), т. е. отнесенное ко времени между двумя последовательными паводками количество речных вод, которые могут поступать во время паводка в осушаемую при эксплуатации толщу эксплуатируемого горизонта.

Пропускная способность русловых отложений рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{р}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{H_{0i} - m_i}{A_{0i}} \right) 2b_i l_i, \quad (\text{V.15})$$

где l_i — длина отрезка русла, в пределах которого осреднены параметры H_0 , m , b и A_0 ; n — число отрезков, на которое разбито русло в пределах балансового района.

Величина восполнения эксплуатируемого водоносного горизонта рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{восп}} = \sum_{j=1}^{n_1} q_{\text{восп}j} l_j, \quad (\text{V.16})$$

где l_j — длина отрезка русла, в пределах которого условия восполнения подземных вод примерно одинаковы, т. е. примерно одинакова величина $q_{\text{восп}}$, определяемая по формуле (V.7); n_1 — число отрезков русла с разными условиями восполнения подземных вод эксплуатируемого горизонта в пределах балансового района.

Следует отметить, что в подавляющем большинстве случаев отрезки русла с осредненными параметрами и примерно одинаковыми условиями восполнения совпадают, т. е. $l_i = l_j$ и $n = n_1$. С учетом формул (V.15) и (V.16) можно записать, что величина потенциальных эксплуатационных ресурсов подземных вод в речных долинах группы «А» должна определяться по двум формулам:

а) когда она лимитируется меженным расходом реки,

$$Q_n = Q_{\text{меж}} + \sum_{j=1}^{n_1} q_{\text{восп}j} l_j; \quad (\text{V.17})$$

б) когда она лимитируется только пропускной способностью русловых отложений в пределах балансового района (меженный расход реки значительно больше),

$$Q_n = \sum_{i=1}^n \left(\frac{H_{0i} - m_i}{A_{0i}} \right) 2b_i l_i + \sum_{j=1}^{n_1} q_{\text{восп}j} l_j. \quad (\text{V.18})$$

Потенциальные эксплуатационные ресурсы подземных вод речных долин группы «Б» часто лимитируются не перечисленными для долин группы «А» факторами, а возможной величиной перетекания сверху из горизонта, гидравлически связанного с рекой. Если при этом гидравлическая связь верхнего горизонта с рекой осуществляется только в периоды паводков, а в межень перетекание в эксплуатируемый горизонт сопровождается соответствующим осушением вышележащего горизонта, то потенциальные эксплуатационные ресурсы подземных вод эксплуатируемого горизонта определяются только объемом осушаемой толщи, которая в паводки вновь обводняется, а также временем, в течение которого происходит осушение, т. е. длительностью межпаводкового периода.

В этом случае потенциальные эксплуатационные ресурсы равны второму члену в правой части выражений (V.17) и (V.18). Если потенциальные эксплуатационные ресурсы речных долин группы

«Б» лимитируются факторами, свойственными долинам группы «А», то они определяются по формулам (V.17) и (V.18).

Под общими прогнозными эксплуатационными ресурсами подземных вод в речных долинах условимся понимать суммарную производительность линейных водозаборов, расположенных вдоль русла и состоящих каждый из равнодебитных и равноотстоящих одна от другой скважин.

При оценке перспективных эксплуатационных ресурсов речных долин, т. е. при оценке производительности береговых водозаборов, необходимо предварительно установить, в условиях какого режима фильтрации водозаборы будут работать. В зависимости от величины меженного расхода реки или пропускной способности русловых отложений будет наблюдаться режим подпертой фильтрации в речных долинах группы «А» при выполнении соотношений

$$\frac{KS(2m-S)}{2d} < q_{\text{меж}}, \quad (\text{V.19})$$

$$\frac{KS(2m-S)}{2d} < \left(\frac{H_0 - m}{A_0} \right) 2b. \quad (\text{V.20})$$

При этом $q_{\text{меж}}$ определяется как частное от деления меженного расхода реки заданной обеспеченности на протяженность русла в пределах балансового района.

Если соотношения (V.19) или (V.20) выполняются, общие перспективные эксплуатационные ресурсы ($Q_{\text{пр}}$) определяются по формуле Маскета-Лейбензона (когда сток в реке сохраняется круглогодично)

$$Q_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n q_i l_i = \sum_{i=1}^n \frac{K_i S_i \left(H_i - \frac{S_i}{2} \right) l_i}{d + \frac{\sigma}{\pi} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0}} \quad (\text{V.21})$$

или с учетом зависимости (V.2) (когда часть года стока в реке нет) по формуле

$$Q_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n q_i l_i = \sum_{i=1}^n \frac{\left[K_i S_i \left(H_i - \frac{S_i}{2} \right) + q_{\text{меж}} V_{a_i T} \operatorname{ierfc} \left(\frac{d_0}{2 \sqrt{a_i T}} \right) \right] l_i}{d + \sqrt{a_i T} \operatorname{ierfc} \left(\frac{d_0}{2 \sqrt{a_i T}} \right) + \frac{\sigma}{\pi} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0}}, \quad (\text{V.22})$$

где ierfc — знак функции (табулирована, см. Бочеве, 1968).

Оценка перспективных эксплуатационных ресурсов подземных вод должна производиться отдельно для каждого участка, выделенного при районировании долины, для которого оценивались потенциальные ресурсы подземных вод. При этом необходимо

обратить внимание на следующее важное обстоятельство. Если эксплуатация подземных вод на выше расположенных по реке участках связана с привлечением речного стока, то при оценке прогнозных ресурсов на данном (оцениваемом) участке величина речного стока должна приниматься с учетом его уменьшения эксплуатацией на выше расположенных по реке участках. Разумеется, это замечание относится только к рекам с небольшим расходом стока, где его величина может лимитировать производительность водозаборов.

В условиях подпертого режима фильтрации коэффициент перспективного использования потенциальных ресурсов η , равный отношению $Q_{\text{пр}}/Q_n$ и разный для каждого из выделенных отрезков долины, в зависимости от того, чем лимитируются потенциальные ресурсы (меженным стоком или пропускной способностью русловых отложений), будет определяться по зависимостям:

а) при круглогодичном стоке в реке

$$\eta_i = \frac{K_i S_i \left(H_i - \frac{S_i}{2} \right)}{\left(d + \frac{\sigma}{\pi} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0} \right) (q_{\text{меж}} + q_{\text{восп } i})} \quad (\text{V.23})$$

или

$$\eta_i = \frac{K_i S_i \left(H_i - \frac{S_i}{2} \right)}{\left(d + \frac{\sigma}{\pi} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0} \right) \left[\left(\frac{H_{0i} - m_i}{A_{0i}} \right) 2b_i + q_{\text{восп } i} \right]}; \quad (\text{V.24})$$

б) при прерывистом стоке в реке

$$\eta_i = \frac{K_i S_i \left(H_i - \frac{S_i}{2} \right) + q_{\text{меж}} \sqrt{a_i T} \operatorname{ierfc} \left(\frac{d_0}{2 \sqrt{a_i T}} \right)}{\left[d + \sqrt{a_i T} \operatorname{ierfc} \left(\frac{d_i}{2 \sqrt{a_i T}} \right) + \frac{\sigma}{\pi} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0} \right] (q_{\text{меж}} + q_{\text{восп } i})} \quad (\text{V.25})$$

или

$$\eta_i = \frac{K_i S_i \left(H_i - \frac{S_i}{2} \right) + q_{\text{меж}} \sqrt{a_i T} \operatorname{ierfc} \left(\frac{d_0}{2 \sqrt{a_i T}} \right)}{\left[d + \sqrt{a_i T} \operatorname{ierfc} \left(\frac{d_0}{2 \sqrt{a_i T}} \right) + \frac{\sigma}{\pi} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0} \right] \times \left[\left(H_0 - \frac{h_i}{A_{0i}} \right) \cdot 2b_i + q_{\text{восп } i} \right]} \quad (\text{V.26})$$

Если соотношения (V.19) или (V.20) не выполняются, т. е. происходит дождевание, общие прогнозные ресурсы равны потенциальным эксплуатационным ресурсам и коэффициент использования последних может быть принят равным единице.

Для речных долин, относящихся к группе «Б», коэффициент перспективного использования ресурсов подземных вод независимо от факторов определения потенциальных ресурсов = единице.

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ ПРОЛЮВИАЛЬНЫХ ШЛЕЙФОВ
И КОНУСОВ ВЫНОСА

*

В горных и предгорных районах наибольшие ресурсы пресных подземных вод приурочены к пролювиальным шлейфам и конусам выноса. Водоносные горизонты, заключенные в пролювиальных отложениях, весьма водообильны; на базе этих горизонтов можно организовать водоснабжение крупных объектов, а также орошение больших сельскохозяйственных массивов.

В целом территория пролювиального шлейфа представляет собой единый балансовый район первого порядка, в пределах которого происходит формирование и расходование подземных вод.

Как известно, в пролювиальных шлейфах, представляющих собой слившиеся конусы выноса, разделенные маловодными межконусными пространствами, в направлении от гор к равнине можно выделить балансовые районы (зоны) второго порядка. Условимся называть их: предгорная — верхняя зона, примыкающая к горному обрамлению, сложенному коренными породами, средняя — зона переслаивания галечников и суглинков и нижняя — равнинная.

Предгорная зона — основная область питания подземных вод. Пролувиальные отложения, представленные здесь галечниками, отличаются хорошей водопроницаемостью. Уровень подземных вод залегает на значительной глубине (порядка 100 и более метров) и имеет свободную поверхность. В этой области происходит основное питание подземных вод за счет поглощения постоянных и временных водотоков, стекающих с гор, притока воды из коренных пород и инфильтрации атмосферных осадков.

Средняя зона характеризуется меньшими глубинами залегания подземных вод. Здесь водоносный горизонт представлен чередованием галечников и суглинков. Если в области основного питания водоносный горизонт единый, то в средней зоне он расчленяется на несколько этажно расположенных водоносных слоев, разделенных слоями суглинков. По мере удаления от гор к периферии число и мощность суглинистых слоев увеличиваются. На контакте между средней и нижней зонами вследствие выклинивания водоносных слоев происходит частичная разгрузка подземных вод восходящими источниками.

Нижняя зона характеризуется резким ухудшением фильтрационных свойств водовмещающих пород в результате изменения их литологического состава. Галечники замещаются песками,

а суглинки — глинами. Мощность водоносных слоев уменьшается. Нижняя зона конуса выноса постепенно переходит в степную, где происходит разгрузка подземных вод, главным образом путем испарения.

Гидрогеологические условия конусов выноса изменяются не только по мере удаления от гор к равнине, но и вдоль склона. Наибольшая проницаемость пород и лучшие условия питания характерны для осевой зоны конуса выноса, к периферии литологические условия и питание подземных вод ухудшаются, резкое же ухудшение водопроницаемости наблюдается на участках между конусами выноса.

Подземные воды пролювиальных отложений наиболее целесообразно использовать в средней зоне, т. е. в пределах зоны переслаивания галечников и суглинков, примерно по линии выхода родников, если они имеются. В предгорном районе, несмотря на то что подземные воды приурочены к галечникам, эксплуатация их из-за большой глубины залегания или отсутствия потребителя в данном районе оказывается в настоящее время экономически нецелесообразной, а иногда и технически невозможной. Устройство же водозабора в нижней зоне конуса выноса также экономически не выгодно, так как из-за смены литологического состава пород ухудшаются их фильтрационные свойства и скважины оказываются малодобитными. Ухудшается и качество подземных вод.

При региональной оценке эксплуатационных ресурсов подземных вод пролювиальных шлейфов и конусов выноса ресурсы, формирующиеся в предгорной зоне, следует учитывать только как источник питания подземных вод при оценке их эксплуатационных ресурсов в средней зоне, где предпочтительно располагать водозаборы. Ресурсы подземных вод в нижней (равнинной) зоне целесообразно оценивать только в орошаемых районах в связи с решением задач, связанных с заложением вертикального дренажа.

Учитывая особенности гидрогеологических условий пролювиальных шлейфов, ресурсы их вод лучше оценивать применительно к эксплуатации водозаборными скважинами, расположенными по линии выхода родников, с характеристикой величин ресурсов и линейным модулем эксплуатационных ресурсов подземных вод, т. е. расходом водозабора, отнесенным к единице его длины.

При региональной оценке эксплуатационных ресурсов подземных вод пролювиальных шлейфов и конусов выноса проводится следующая схематизация гидрогеологического разреза. В предгорной зоне подземные воды безнапорные. В средней напорной зоне принимается, что эксплуатируется только наиболее мощный водоносный слой, а не все прослой слоистой толщи, при этом принимается, как и в других случаях, что понижение уровня не должно превышать допустимого по техническим условиям с одновременным учетом осушения пласта не более половины его мощности. Возможное перетекание воды из других прослоев слоистой толщи не учитывается, что идет в некоторый «запас» расчетов.

Водоотдача галечников в зоне выхода их на поверхность гравитационная (μ), а в зоне транзита, где галечники перекрыты водоупорными породами, — упругая (μ^*). При расчете эксплуатационных ресурсов подземных вод принимается, что эксплуатация водозабора (Q_0) происходит с постоянным во времени расходом.

При расположении водозаборных скважин в основании пролювиальных шлейфов и конусов выноса в зоне выхода родников последние иссякнут через короткое время после начала эксплуатации водозабора.

Потенциальные эксплуатационные ресурсы подземных вод слагаются из сработки в процессе эксплуатации естественных запасов подземных вод [в единицу времени (Q_0)], содержащихся в водоносном пласте, и питания подземных вод поглощением поверхностного стока и их фильтрацией атмосферных осадков в основном в зоне выхода галечников на поверхность (Q_e). Таким образом,

$$Q_0 = Q_0 + Q_e. \quad (\text{VI.1})$$

Процессы сработки запасов и питания подземных вод взаимосвязаны, так как понижение уровня в области питания одновременно усиливает последнее. Величина сработки запасов зависит не только от объема воды, содержащейся в пролювиальных отложениях, но и от возможности транспортировки этой воды по пласту к водозабору в течение периода, на который рассчитывается эксплуатация; это зависит от водопроводящей способности пласта, которая лимитирует, таким образом, условия сработки естественных запасов.

При заложении водозабора у подножия пролювиального шлейфа по линии выхода источников движение подземных вод можно приближенно рассматривать как плоскопараллельное в плане, т. е. определять эксплуатационные ресурсы подземных вод (Q_0), относя их к единице длины (L) водозабора:

$$q_0 = Q_0/L \text{ или } q_0 = q_0 + q_e. \quad (\text{VI.2})$$

Таким образом, q_0 представляет собой линейный модуль эксплуатационных ресурсов подземных вод, который целесообразно выражать в литрах в секунду на километр.

Ф. М. Бочеворм (1968) дано решение, выражающее расход подземных вод, формирующийся при их эксплуатации в полужакрытых структурах за счет осушения водоносного пласта в области выхода его на поверхность. В этом решении питание подземных вод, происходящее в процессе эксплуатации, не учитывается. В гидрогеологических условиях конусов выноса и пролювиальных шлейфов эксплуатационные ресурсы подземных вод могут приближенно определяться как сумма величин их питания и сработки естественных запасов; можно также считать, что при длительной эксплуатации источники, выходящие по линии заложения водозабора, иссякнут.

По приведенным соображениям суммирование расходов в формулах (VI.1) и (VI.2) можно считать допустимым. Точнее эта задача с учетом влияния инверсии источников в процессе эксплуатации может решаться методом моделирования. При этой предпосылке формула Ф. М. Бочевера при одностороннем притоке к водозабору на единицу его длины будет иметь следующий вид:

$$q_a = q_0 + q_e = \frac{KmS_g}{lR_{\perp}} + q_e, \quad (\text{VI.3})$$

где Km — водопроводимость пласта; S_g — допустимое понижение; l — расстояние водозабора до половины ширины области питания; поскольку в решении Ф. М. Бочевера ширина области питания принята равной мощности водоносного горизонта, то $l = l_1 + \frac{m}{2}$.

Здесь l_1 — расстояние водозабора до границы основной области питания; R_{\perp} — безразмерное гидравлическое сопротивление.

$$R_{\perp} = \frac{\beta l}{1 + \beta l} \left[F_0 + 0,5 + \frac{1}{\beta l} - \frac{1}{6} \left(1 + \frac{2}{1 + \beta l} \right) \right], \quad (\text{VI.4})$$

$$\beta = \frac{\mu^*}{\mu m}, \quad (\text{VI.5})$$

где

$$F_0 = \frac{Kmt}{\mu^* l^2}, \quad (\text{VI.6})$$

t — расчетный срок эксплуатации водозабора.

При выводе формулы (VI.4) Ф. М. Бочевером принято, что ширина области осушения в зоне выхода галечников на поверхность (b) равна мощности водоносного пласта (m), что в одних случаях при $b < m$ приводит к преуменьшению, в противоположном — к преувеличению эксплуатационных ресурсов.

Как известно, в пролювиальных шлейфах и конусах выноса ширина области питания обычно существенно превосходит мощность водоносного пласта, а поэтому расчеты по формуле (VI.3) дают преуменьшенное значение эксплуатационных ресурсов.

Безразмерное сопротивление R_{\perp} в формуле (VI.3) может изменяться в широких пределах.

При возрастании мощности водоносного пласта и его водоотдачи, а также при уменьшении расстояния от области питания до водозабора и малой упругой водоотдачи пласта, фильтрационное сопротивление убывает и расход соответственно возрастает.

В противоположном случае, при неограниченном возрастании β , безразмерное сопротивление по формуле (VI.4) стремится к величине

$$F_0 + \frac{1}{3}.$$

Значение параметра Фурье (F_0) в реальных гидрогеологических условиях при длительной эксплуатации водозабора измеряется величиной порядка сотен и тысяч. Поэтому допустимо пренебречь вторым слагаемым в приведенном выражении, в этом случае $R_{\max} \approx Kmt/\mu^*l^2$, т. е. сработка запасов во времени происходит равномерно, а величина q_0 получает значение

$$q_0 \approx \frac{\mu^*Sl}{t},$$

т. е. величина сработки учитывается в зоне транзита, где воды напорные, и водоотдача только упругая, что преуменьшает запасы воды.

Модуль эксплуатационных ресурсов можно определить непосредственно из балансового уравнения (VI.2), выразив в нем величину сработки запасов через параметры водоносного пласта, допустимое понижение и считая при этом сработку запасов равномерной по времени. Тогда

$$q_0 = \frac{S(\mu^*l_1 + \mu b)}{t} + q_e, \quad (\text{VI.7})$$

где q_e — естественные ресурсы подземных вод на единицу ширины фронта потока.

Первое слагаемое в скобке формулы (VI.7) выражает величину сработки упругих запасов в транзитной зоне, а второе — гравитационных в зоне осушения галечников.

S — допустимое понижение по линии водозабора. Таким же будет понижение при осушении пласта, так как в процессе длительной эксплуатации движение приближается к установившемуся и депрессионная кривая перемещается параллельно этой кривой в естественных условиях.

В балансовом уравнении (VI.7) не учитывается усиление питания подземных вод поверхностным стоком, вызываемое эксплуатацией, что идет в запас надежности расчета. Учитывая, что в водохозяйственных схемах использования водных ресурсов эксплуатации рассчитывается на длительный срок (порядка 25—50 лет), основным источником формирования эксплуатационных ресурсов при такой длительной эксплуатации будет питание подземных вод (q_e) за счет инфильтрации атмосферных вод и поглощения поверхностного стока.

По мере эксплуатации водозабора значение сработки запасов (первый член) уменьшается, а относительная роль питания подземных вод поглощением с поверхностного стока и инфильтрацией (q_e) не только сохраняется, но и увеличивается вследствие усиления этих процессов при снижении депрессионной кривой.

Отдельные (изолированные) конусы выноса, т. е. не слившиеся в единый пролювиальный шлейф, в плане обычно имеют форму сектора. Поэтому в отличие от пролювиальных шлейфов, где движение подземных вод приближается к плоскопараллельному, при

оценке эксплуатационных ресурсов подземных вод отдельных конусов выноса более применима схема радиального потока.

Исходя из тех же балансовых соображений и при тех же обозначениях величин, как для плоского потока, выражая расход радиального потока (Q_e) по соответствующей формуле Дююи, получим следующее выражение потенциальных эксплуатационных ресурсов конуса выноса:

$$Q_o \approx Q_0 + Q_e = \alpha \pi \left\{ \frac{S}{t} [\mu b^2 + \mu^* l_1 (2b + l_1)] + \frac{2Kml_i e}{\ln \left(\frac{l}{b} + 1 \right)} \right\}, \quad (\text{VI.8})$$

где $\alpha = n/360$, причем n — угол (в град.) между линиями, ограничивающими (образующими) сектор; i_e — уклон подземного потока в естественных условиях.

Учитывая, что при длительной эксплуатации устанавливается квазистационарный режим фильтрации, допустимо принять, что к концу срока эксплуатации понижения напоров в пределах всего конуса выноса будут примерно равными.

Линейный модуль эксплуатационных ресурсов подземных вод конуса выноса (q_o) при расположении водозабора по дуге, огибающей конус выноса радиусом $b + l_1 = l$ по линии разгрузки подземных вод выражается:

$$q_o \approx \frac{Q_o}{2\pi l (b + l_1)} = \frac{1}{(b + l_1)} \left\{ \frac{S}{2t} [\mu b^2 + \mu^* l (2b + l_1)] + \frac{2Kml_i e}{\ln \left(\frac{l}{b} + 1 \right)} \right\}. \quad (\text{VI.9})$$

При определении прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод на первой стадии при условном расположении скважин в виде линейного ряда вдоль подножия пролювиального шлейфа коэффициент перспективного использования потенциальных ресурсов имеет вид

$$\eta \approx \frac{2\pi l_1}{B \ln \frac{B}{2\pi r_0} + 2\pi l_1}, \quad (\text{VI.10})$$

где B — расстояние между скважинами.

Это выражение относится, строго говоря, к случаю расположения ряда скважин по прямой линии в условиях плоского потока. Однако, учитывая удаленность области питания от водозабора, оно может применяться и для радиального потока.

Аналитическими формулами затруднительно учесть все многообразие и сложность гидрогеологических условий пролювиальных отложений (неоднородность литологического состава, локализация питания на отдельных участках, уменьшение дебита источников в процессе эксплуатации и т. п.). В связи с этим при оценке перспективных эксплуатационных ресурсов

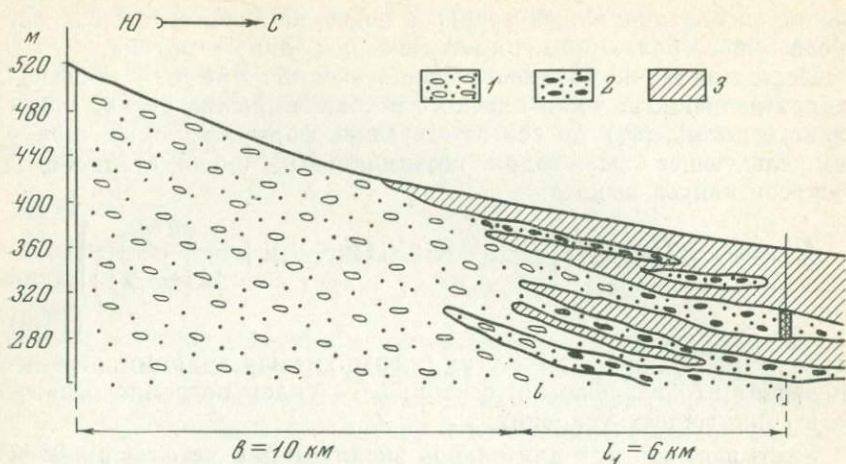


Рис. 3

Схематический гидрогеологический разрез конуса выноса

1 — галечники; 2 — пески с гравием и галькой; 3 — суглинки, глины и супеси с линзами и галечники

подземных вод на второй стадии, т. е. применительно к намечаемому конкретному размещению водозаборов, рекомендуется применять метод моделирования.

Приведем пример оценки перспективных эксплуатационных ресурсов подземных вод Сохского конуса выноса, одного из крупнейших в Ферганской долине, используя данные В. А. Гейнца, приведенные в работе «Поиски и разведка подземных вод для крупного водоснабжения» (1969).

На продольном гидрогеологическом разрезе (рис. 3), секущем конус выноса от его вершины до равнины, область основного питания подземных вод (зона выхода галечников) имеет ширину около 10 км, а зона транзита и частично дополнительного питания 5—6 км. Глубина залегания грунтовых вод в головной части конуса превосходит 100 м. В области транзита, где галечники переслаиваются с пролювиальными суглинками, единый водоносный горизонт расчленяется на несколько водоносных слоев, воды становятся напорными. Основная разгрузка подземных вод происходит по периферии конуса выноса в полосе шириной 2—4 км, здесь наблюдаются выходы многочисленных, в основном мелких, источников. В этой зоне грунтовые воды залегают обычно на глубине 1—2 м, вследствие чего происходит их интенсивное испарение, особенно в условиях жаркого климата Ферганской долины, поэтому дебит родников характеризует лишь небольшую часть разгружающегося потока.

В табл. 5 приведены значения линейного модуля потенциальных эксплуатационных ресурсов водозабора по различным фор-

мулам. При расчете приняты в соответствии с геологическим разрезом и вероятными (характерными) значениями гидрогеологических параметров водоносного пласта следующие значения величин: коэффициент фильтрации — 25 м/сут, мощность — 100 м, упругая водоотдача — 0,001, гравитационная — 0,2.

Ширина полосы области осушения галечников в вершине конуса (b), где происходит в основном питание, $b = 10$ км, а расстояние линии водозабора от области питания $l_1 = 6$ км. Уклон потока

Таблица 5

Модули ресурсов подземных вод Сохского конуса выноса

Тип потока	№ формулы	Линейные модули, л/сек·км			$\frac{q_e}{q_0} \cdot 100 \%$
		сработки естественных запасов	естественных ресурсов	эксплуата- ционных ресурсов	
Плоский	(VI.3)	1,5	144,5	146,0	99
	(VI.7)	115,6	144,5	260,1	56
Радикаль- ный	(VI.9)	36,4	118,0	154,4	76

в естественных условиях (по данным работы «Поиски и разведка...», 1969) равен 0,005.

При расчетах задаемся допустимым понижением 100 м (напор над кровлей водоносного пласта по линии водозабора). Время эксплуатации — 50 лет.

Расчеты по формуле (VI.3) дают значение модуля потенциальных эксплуатационных ресурсов с преуменьшением, так как ширина области осушения в галечниках принята равной мощности водоносного слоя (100 м), в действительности же ширина этой зоны равна 10 км, т. е. превосходит мощность водоносного слоя в 10 раз. Преуменьшение ширины зоны осушения приводит к занижению модуля эксплуатационных ресурсов.

Расчет по формуле (VI.7), где не учитывается сопротивление в водоносном пласте при сработке естественных запасов, дает завышенное значение модуля эксплуатационных запасов (260,1 л/сек·км).

Гидрогеологическим условиям Сохского конуса выноса соответствует схема радиального потока. Угол между линиями, ограничивающими этот конус выноса от соседних слабоводообильных межконусных участков, близок к 45°.

Линейный модуль потенциальных ресурсов по балансовому уравнению при схеме радиального потока (154,4 л/сек·км) несколько меньше, нежели соответствующий модуль при плоском потоке (260,1 л/сек·км). Это объясняется тем, что в условиях радиального потока предполагается, что водозабор расположен по дуге сектора, а не по прямой.

Как показывают произведенные расчеты, эксплуатационные ресурсы подземных вод здесь формируются в основном за счет использования их естественных ресурсов. Как отмечается в литературе, расходы родников, которые выклиниваются вдоль полукружности конуса выноса, на наиболее крупных конусах в Средней Азии, каким и является Сохский конус выноса, нередко достигают величины $2,5 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Сопоставляя величину естественных ресурсов подземных вод в пределах выделенного сектора ($1,2 \text{ м}^3/\text{сек}$) с величиной площади выхода галечников на поверхность, т. е. с основной областью питания (около 40 км^2), находим, что расходу потока в естественных условиях соответствует поглощение слоя воды в области питания около $900 \text{ мм}/\text{год}$. Это значение весьма вероятно, учитывая, что питание происходит не только в результате инфильтрации атмосферных осадков, но и в основном за счет поглощения поверхностного стока, формирующегося в горах.

Эксплуатационные ресурсы подземных вод Сохского конуса выноса по формуле (VI.8) достигают значительной величины (около $2 \text{ м}^3/\text{сек}$), на базе чего может быть организовано не только крупное водоснабжение, но и орошение земель.

СОЛОНОВАТЫЕ И СОЛЕННЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

*

Один из способов восполнения дефицита пресных вод, пригодных для водоснабжения, обводнения и орошения, — это использование ресурсов подземных вод повышенной минерализации (более 1 г/л). К такому относятся солончатые (1—10 г/л) и соленые (10—35 г/л) воды, которые в ряде случаев непосредственно (т. е. без опреснения) могут использоваться в промышленности и в сельском хозяйстве, а с применением искусственного опреснения — и для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Эти воды иногда могут применяться как лечебные или промышленные, однако вопросы, связанные с их использованием в этих целях, здесь не рассматриваются.

Водное законодательство СССР запрещает использование пресных подземных вод для нужд, не связанных с хозяйственно-питьевым водоснабжением населения (за исключением особых случаев, когда такое использование специально обосновано). Применение же соленых подземных вод взамен пресных для промышленного водоснабжения вполне допустимо и может существенно отдалить угрозу «водяного голода» для многих районов.

Современные наиболее разработанные и эффективные методы опреснения (Апельцин, Клячко, 1968; Слесаренко, 1973; Санин, Никитин, 1973) — дистилляция (испарение с последующей конденсацией) различными способами, и в том числе гелиодистилляция, вымораживание, электродиализ (электролиз в сосудах с ионоселективными мембранами), гиперфльтрация или обратный осмос (фльтрация под давлением через полупроницаемые мембраны). Эти методы позволяют осуществлять опреснение солончатых и соленых вод в любых масштабах. Однако стоимость получения пресной воды еще довольно высока, и широкое внедрение искусственного опреснения воды — проблема не столько техническая, сколько экономическая. Стоимость опресненной воды складывается из капитальных затрат и эксплуатационных расходов на целый ряд операций: получение исходной для опреснения воды, ее специальная подготовка (умягчение, обезжелезивание и т. п.), собственно опреснение, удаление «остаточного рассола», доставка опресненной воды потребителю.

Себестоимость извлеченной из скважины подземной воды, как пресной, так и солончатой или соленой, обычно составляет доли копейки (редко 1—2 коп) за 1 м³, что не превышает 5—10% стои-

мости собственно опреснения, которое в основном зависит от общей минерализации воды и производительности опреснительной установки.

Дистилляция и вымораживание в общем применимы при любой величине общей минерализации (солености) исходной воды, но экономически выгодны лишь при больших масштабах опреснения (десятки и сотни тысяч метров кубических в сутки). Так, стоимость дистилляции сейчас составляет на малых установках (до $1000 \text{ м}^3/\text{сут}$) 50—60 коп за 1 м^3 , а при производительности установок более $10\,000 \text{ м}^3/\text{сут}$ снижается до 25—30 коп/ м^3 .

Предполагается (Клячко, 1972), что в дальнейшем стоимость дистилляции составит около 40 коп/ м^3 при производительности установки 1 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ и 6—8 коп/ м^3 при производительности 1 млн. $\text{м}^3/\text{сут}$ и более (атомные водоэлектростанции). Стоимость дистилляции можно дополнительно снизить извлечением ценных веществ из остаточных рассолов, но лишь при очень больших масштабах опреснения.

Гелиодистилляционные установки перспективны в южных районах для получения сравнительно небольших количеств пресной воды при солености исходной воды более 15 г/л. На широте 40° такие установки могут давать 6 л/сут воды с 1 м^2 площади испарителя при очень малых эксплуатационных расходах, но требуют значительных капитальных затрат на сооружение.

Опреснение воды вымораживанием с использованием естественного холода выгодно в районах с соответствующими климатическими условиями.

При малых расходах воды и ее исходной солености до 10—15 г/л наиболее целесообразно опреснение мембранными методами (электродиализ и гиперфльтрация), так как при этом оно обходится дешевле дистилляции. Так, например, при общей минерализации воды 5 г/л и производительности установки 10—20 $\text{м}^3/\text{сут}$ стоимость воды, опресненной этими методами, составляет сейчас 35—40 коп за 1 м^3 , а в будущем ожидается, что за счет удешевления мембран и электроэнергии она должна снизиться при той же производительности до 20—25 коп/ м^3 , при производительности 100 $\text{м}^3/\text{сут}$ до 17—20 коп за 1 м^3 , а при производительности 1000 $\text{м}^3/\text{сут}$ до 12—15 коп за 1 м^3 .

В общем случае экономическая целесообразность опреснения солоноватых или соленых вод определяется сравнением его стоимости со стоимостью подвода воды от ближайшего пресноводного источника (табл. 6).

Предельное расстояние, при котором подача пресной воды выгоднее дистилляции местных соленых вод, составляет 90—100 км при расходе воды 10 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ и 30—40 км при расходе 1 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$. При меньших расходах воды и применении для опреснения электродиализных или гиперфльтрационных установок эти расстояния будут меньше (вероятно, не более 10 км при расходе воды до $1000 \text{ м}^3/\text{сут}$).

На выбор метода опреснения, его технологию и в конечном итоге на стоимость получаемой воды существенно влияет не только степень общей солености исходной воды, но и ее химический состав. Так, повышенное содержание в воде сульфатов и щелочно-земельных металлов существенно затрудняет работу мембран при электродиализе и гиперфильтрации и вызывает накипеобразование в дистилляционных установках. Другие особенности состава исходной воды — повышенное содержание железа, органических

Таблица 6

Прогноз стоимости подачи воды (и ее очистки) в сравнении со стоимостью опреснения дистилляцией (Клячко, 1972)

Показатель	Водоподача, тыс. м ³ /сут.			
	1	10	100	1000
Стоимость подачи воды, коп/м ³ на 1 км	0,8	0,25	0,08	0,03
Стоимость очистки воды, коп/м ³	12	6	3,5	1,5
Стоимость опреснения дистилляцией, коп/м ³	40	28	16	8

веществ и т. п. — обуславливают необходимость специальной подготовки воды перед ее опреснением, такой же, как и при использовании пресной воды.

Температура подземных вод также должна учитываться при выборе метода опреснения и определении его стоимости. В случае переработки дистилляцией термальных подземных вод существенно снижаются энергетические затраты на опреснение. По Б. Н. Голубкову и др. (1964), 1 м³ дистиллята, полученный переработкой термальной воды, обходится в 2—3 раза дешевле, чем при опреснении морской воды той же солености.

Определенные трудности при организации водоснабжения с применением искусственного опреснения солоноватых и соленых подземных вод могут возникнуть в связи с образованием так называемых остаточных рассолов, которые являются в сущности сточными водами в процессе искусственного опреснения. Однако эти «промстоки», как правило, не токсичны и бактериологически не загрязнены.

В зависимости от общей солености исходной воды и примененного метода опреснения концентрация остаточного рассола может колебаться от 5—10 до 150—200 г/л и более, а его количество может достигать 30—50 и даже более 100% объема вырабатываемой пресной воды. Затраты на удаление «остаточного рассола» (закачка в поглощающие скважины, концентрирование в испарительных бассейнах и др.) могут достигать 20—40% стоимости опреснения (Минкин и др., 1974).

Применение искусственного опреснения для водоснабжения подземными водами повышенной минерализации перспективно в районах, где нет пресных вод. В тех случаях, когда по гидрогеологическим условиям возможны большие дебиты водозаборов, достаточные для удовлетворения потребностей крупных водопотребителей, опреснение солоноватых или соленых подземных вод может быть экономически целесообразным для организации централизованного водоснабжения. Однако в ближайшей перспективе наибольший практический интерес представляет использование с опреснением солоноватых, реже — соленых подземных вод для рассредоточенного мелкого сельскохозяйственного водоснабжения и обводнения в засушливых районах СССР.

В связи с этим наряду с увеличением производительности мощных опреснительных установок разного типа серьезное внимание уделяется и созданию «малых» опреснительных аппаратов. В СССР промышленностью выпускаются электродиализные передвижные опреснители с автономным электропитанием производительностью 20 м³/сут пресной воды (при исходной солености воды до 5 г/л) и стационарные установки производительностью от 12 до 350 м³/сут. В настоящее время в народном хозяйстве нашей страны работает около 100 таких электродиализных опреснительных установок. Однако можно ожидать, что гиперфильтрационный способ, допускающий полную автоматизацию процесса опреснения, в будущем вытеснит электродиализ (Клячко, 1972).

Солоноватые и соленые подземные воды широко распространены на территории СССР. Они практически повсеместно имеются на тех или иных глубинах в артезианских бассейнах, а в горноскладчатых районах встречаются обычно локально.

Распространение и условия залегания подземных вод повышенной минерализации обуславливают потенциальную возможность их использования на значительной части территории СССР. Однако практически использование этих вод для водоснабжения, обводнения и орошения целесообразно в настоящее время и в ближайшей перспективе на значительно меньшей площади, именно в пределах районов, где пресные воды отсутствуют или их ресурсы недостаточны для удовлетворения потребностей народного хозяйства. Такие районы преобладают на юге Европейской части СССР, в южной части Западной Сибири, на равнинах Казахстана и Средней Азии. Здесь солоноватые и соленые подземные воды распространены практически повсеместно и залегают на доступных для эксплуатации глубинах (Никитин, 1972б; Никитин, Цыганова, 1972).

Для планирования водохозяйственных мероприятий в районах, где использование солоноватых и соленых подземных вод представляется целесообразным, необходима региональная оценка эксплуатационных ресурсов этих вод. Принципы и методы такой оценки в общем те же, что для пресных подземных вод платформенных областей.

Как указывалось, в водохозяйственных целях (водоснабжение и др.) могут быть использованы подземные воды повышенной минерализации, если последняя не превосходит 30—35 г/л. Такие воды мало отличаются по плотности и вязкости от пресных вод, поэтому при оценке эксплуатационных ресурсов вод повышенной минерализации допустимо пользоваться теми же значениями гидрогеологических параметров (напорами без приведения их по удельному весу, коэффициентами фильтрации пород, а не их проницаемостью), что и для пресных вод.

Вместе с тем оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод повышенной минерализации имеет некоторые особенности (Никитин, Цыганова, 1973), на которых мы и остановимся.

Прежде всего оценка эксплуатационных ресурсов соленоватых и соленых подземных вод должна производиться с учетом степени их общей минерализации (солёности), а в некоторых случаях — типа минерализации и температуры.

В соответствии с этим в пределах балансовых районов, принятых для расчета эксплуатационных ресурсов подземных вод повышенной минерализации, следует выделять площади, различные по степени солёности воды, и оценивать эксплуатационные ресурсы отдельно для каждой из этих площадей. При этом рекомендуется пользоваться следующей классификацией подземных вод по степени их солёности (г/л):

До 1 — пресные воды, непосредственно пригодные для хозяйственно-питьевого водоснабжения;

1—3 — слабосоленоватые воды, пригодные без опреснения для водопоя овец и верблюдов, частично — крупного рогатого скота, ограниченно — для орошения; при использовании для хозяйственно-питьевого водоснабжения требуют опреснения, преимущественные методы которого — мембранные (электродиализ и гиперфильтрация);

3—5 — среднесоленоватые воды, ограниченно пригодные для водопоя овец, допустимые для орошения при хороших условиях дренажа; при использовании для водоснабжения опреснение целесообразно производить мембранными методами;

5—10 — сильносоленоватые воды, ограниченно пригодные для водопоя овец в осенне-зимний период, предельно допустимые для орошения в особо благоприятных условиях; опреснение целесообразно мембранными методами, а при больших расходах воды — дистилляцией, в соответствующих климатических условиях — вымораживанием;

10—15 — слабосоленые воды, частично допустимые для водопоя овец в осенне-зимний период; преимущественные методы опреснения — вымораживание, дистилляция (при больших расходах воды), ограниченно применимы мембранные методы;

15—25 — среднесоленые и 25—35 — сильносоленые воды, пригодные для использования только с опреснением, целесообразные методы которого — дистилляция (при больших расходах воды) и вымораживание.

Более 35 — рассолы (здесь не рассматриваются).

Поскольку в большинстве районов возможного использования подземных вод повышенной минерализации в ближайшее время, как уже указывалось, представляется целесообразной их эксплуатация одиночными, рассредоточенными по площади и практически

не взаимодействующими скважинами, то дебиты последних служат наиболее важной характеристикой, позволяющей оценить возможные масштабы («крупность») водоснабжения и с учетом общей минерализации воды обосновать выбор метода опреснения. Наиболее надежные данные о дебитах водозаборов дает опыт эксплуатации. Однако для вод повышенной минерализации такого опыта еще нет, и возможные дебиты водозаборов определяются расчетами по известным формулам гидродинамики. Однако исходные данные для этого не всегда имеются в достаточном объеме, и при выборе расчетных гидрогеологических параметров приходится основываться на общей литологической характеристике водоносных пластов, прибегая к аналогии с изученными участками.

Во многих случаях карты основных горизонтов подземных вод повышенной минерализации, дополненные прогнозом возможной производительности отдельных (не взаимодействующих) водозаборов, могут явиться достаточным гидрогеологическим обоснованием планов хозяйственного использования соленых и соленых подземных вод (Никитин, 1967).

Для районов, где планируется достаточно широкое использование в народном хозяйстве подземных вод повышенной минерализации, региональную оценку их эксплуатационных ресурсов следует производить в полном объеме и в той последовательности, как это было рекомендовано (глава I).

При оценке потенциальных эксплуатационных ресурсов подземных вод повышенной минерализации (как и пресных вод) применяется балансовый метод с использованием уравнений, приведенных в главе IV. При этом должны учитываться в общем те же источники формирования эксплуатационных ресурсов, но с учетом некоторых их особенностей.

Формирование соленых и соленых подземных вод обычно связывают с зоной затрудненного водообмена, однако на обширных равнинных пространствах юга нашей страны они распространены и в зоне интенсивного водообмена, залегая часто первыми от поверхности земли. Преимущественно это грунтовые воды континентального засоления. Их естественные запасы пополняются за счет инфильтрации атмосферной влаги, поверхностных и часто оросительных вод, но расходуются почти исключительно на испарение (включая транспирацию), что обуславливает накопление в грунтовых водах растворенных солей. На предгорных равнинах Средней Азии, Северного Кавказа и других территориях, для которых характерна обращенная гидрогеохимическая зональность, существенным источником питания грунтовых вод и формирования их солености служит также восходящая разгрузка (перетекание) глубоких напорных вод. Водообмен во всех таких случаях происходит достаточно интенсивно. По расчетам время однократного водообмена, например, для грунтовых вод хвалыньских отложений Прикаспийской низменности в среднем не превышает

200—300 лет, а модуль естественных ресурсов оценивается в 0,2—0,3 л/сек·км² (Никитин, 1972а).

Таким образом, потенциальные эксплуатационные ресурсы соленоватых и соленых грунтовых вод, как и пресных, складываются из некоторой части не только их естественных запасов, но и естественных ресурсов, оценка которых имеет, однако, свои особенности и трудности.

Грунтовые воды повышенной минерализации распространены преимущественно в пределах слабодренированных или недренированных бессточных областей, где обычно не представляется возможным оценить естественные ресурсы подземных вод по величине их стока в реки. В рассматриваемых условиях грунтовые воды часто не образуют и ясно выраженного регионального потока, расход которого можно бы было определить гидродинамическим методом.

Режим и баланс грунтовых вод континентального засоления весьма неоднородны и существенно изменяются на небольших расстояниях в зависимости от строения и состава пород зоны аэрации и водоносного горизонта и от характера микро- и мезорельефа поверхности земли. Так, для бессточной равнины на северо-западе Прикаспийской низменности можно в схеме выделить три типа участков, отличных по режиму и балансу грунтовых вод, «питающие» и «дренирующие» (по Г. Н. Каменскому, 1958) понижения (лиманы и пдины) и разделяющую их плоскую равнину. Исходя из этого, естественные ресурсы грунтовых вод могут быть оценены здесь по величине местного подземного стока, если принять, что он направлен от «питающих» к «дренирующим» лиманам (Никитин, 1972а).

В аридных районах с преобладанием эоловых форм рельефа баланс и режим грунтовых вод различны под барханами и дефляционными котловинами, особыми чертами они обладают на участках такыров и т. п. С учетом этих особенностей можно существенно уточнить (часто в сторону увеличения) и дифференцировать осредненную оценку естественных ресурсов грунтовых вод повышенной минерализации, но, конечно, в тех случаях, когда это соответствует задачам, масштабу и требуемой точности расчетов.

При длительной повсеместной эксплуатации грунтовых вод с частичной сработкой их естественных запасов (условие, положенное в основу региональной оценки потенциальных эксплуатационных ресурсов) должно произойти общее снижение уровня грунтовых вод, при этом испарение с их поверхности существенно уменьшится или вовсе прекратится.

Учитывая это при оценке потенциальных эксплуатационных ресурсов грунтовых вод повышенной минерализации на отдаленную перспективу, за величину питания грунтовых вод можно принимать инфильтрацию в естественных условиях без вычета испарения, полагая, что оно прекратится при понижении зеркала грунтовых вод в условиях эксплуатации. Это следует рассматри-

вать, таким образом, как сумму естественных и привлекаемых ресурсов.

Подобным же образом следует подходить к оценке естественных ресурсов солоноватых и соленых грунтовых вод, формирующихся за счет питания из нижележащих напорных вод, фильтрующихся в грунтовые воды, где происходит их испарение. Если это питание усилится под влиянием эксплуатации грунтовых вод, то естественные и привлекаемые ресурсы будут суммироваться. Надо заметить, что во многих случаях этот процесс не благоприятный, так как нижележащие напорные горизонты могут содержать воды более минерализованные, чем грунтовые.

Водозаборы грунтовых вод повышенной минерализации целесообразно располагать лишь на значительном расстоянии от рек и озер. В противном случае переброска поверхностных вод, как уже указывалось, окажется выгоднее экономически, чем опреснение местных грунтовых вод. В связи с этим привлекаемые ресурсы за счет фильтрации из рек и озер не будут участвовать в формировании эксплуатационных ресурсов солоноватых и соленых грунтовых вод.

Использование с опреснением солоноватых или соленых артезианских вод в отдельных случаях может быть целесообразным. При этом такие воды будут эксплуатироваться преимущественно отдельными, достаточно удаленными один от другого водозаборами. Основной составляющей эксплуатационных ресурсов артезианских вод повышенной минерализации будут их упругие запасы, а в некоторых случаях, при относительно неглубоком залегании водоносных горизонтов, и часть гравитационных запасов.

Поскольку солоноватые и соленые артезианские воды развиты преимущественно в зоне затрудненного водообмена, их естественные ресурсы незначительны и обычно могут не учитываться при оценке эксплуатационных ресурсов.

Оценивать потенциальные эксплуатационные ресурсы подземных вод повышенной минерализации в районах, хорошо обеспеченных ресурсами пресных вод, заведомо удовлетворяющими потребность, пока нецелесообразно.

При оценке прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод на первой стадии учитывается, как указывалось ранее (главы I, IV), планируемая на данной территории система водопользования, в соответствии с чем принимаются та или иная условная схема расположения водозаборов и их тип (одиночные или групповые). Далее должен быть установлен наиболее целесообразный в данных условиях метод опреснения воды и из оценки прогнозных эксплуатационных ресурсов исключены площади, на которых развиты подземные воды с общей минерализацией, превышающей предельно допустимую (по экономическим соображениям) для данного метода опреснения. Понятно, что из оценки следует исключить площади, где имеются достаточные для данного вида использования ресурсы пресных вод, а также площади,

отстоящие от источников пресных вод на расстояниях, при которых транспортировка пресной воды заведомо экономически выгоднее опреснения (избранным методом и при данных единичных потребностях в воде) местных солоноватых или соленых вод. Для всей остальной площади вычисляются прогнозные коэффициенты использования подземных вод по расчетным участкам с различными средними значениями гидрогеологических параметров.

Здесь следует подчеркнуть, что перечисленные условия (предельная величина общей минерализации, наличие источников пресных вод) должны учитываться именно на этапе оценки прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод повышенной минерализации, поскольку, оценивая их потенциальные ресурсы, мы не задаемся какой-либо определенной системой водопользования, не знаем еще требований к количеству и качеству воды и, следовательно, не можем выбрать наиболее целесообразный метод опреснения.

При оценке прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод повышенной минерализации какого-либо района следует их разделить по группам минерализации, исходя из конкретных условий использования воды, что позволит судить, какая часть ресурсов может быть, например, использована без опреснения для водопоя скота или для орошения, опреснение какого количества воды будет наиболее экономично, сколько воды потребует лишь частичного опреснения и т. п.

В тех случаях, когда прогнозный коэффициент использования подземных вод имеет очень малые значения (сотые и первые десятые доли единицы), что обычно свидетельствует о практическом отсутствии в течение расчетного периода взаимодействия между скважинами, оценку прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод повышенной минерализации следует дополнять приближенным расчетом возможных дебитов водозаборов гидродинамическим методом без учета их взаимодействия.

Приведем пример региональной оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод повышенной минерализации западной части Прикаспийской низменности в пределах Калмыцкой АССР (Никитин, Цыганова, 1973).

На территории Калмыцкой АССР, испытывающей острый недостаток пресных вод, подземные воды повышенной минерализации развиты практически повсеместно. Их использование с искусственным опреснением открывает большие возможности для водоснабжения и особенно для обводнения пастбищ отгонного животноводства (основная отрасль сельского хозяйства республики), применительно к нуждам которого и дается следующая оценка.

Основными на рассматриваемой территории являются водонесные горизонты, содержащие преимущественно солоноватые и соленые воды: горизонт грунтовых вод средне-верхнечетвертичных (хазарско-хвалынских) отложений, горизонты напорных вод нижнечетвертичных (бакинских) и верхнеплиоценовых (акча-

гыльских и ашшеронских) отложений. Все водоносные горизонты сложены песками, чередующимися с суглинками и глинами. Коэффициенты фильтрации песков меняются от 0,1—0,2 до 10—17 м/сут, а мощность водоносных горизонтов — от нескольких до 20—50 м. Водоотдача песков принята 0,10, суглинков — 0,02, упругая водоотдача — 10^{-4} — 10^{-3} . Минерализация подземных вод хазарско-хвалыньских отложений преимущественно, а бакинских и верхнеплиоценовых — в значительной части превышает 15 г/л.

При оценке эксплуатационных ресурсов солоноватых и соленых вод этих горизонтов площадь распространения каждого из них принимается за самостоятельный балансовый район, который далее делится на балансовые (расчетные) участки, характеризующиеся различными значениями гидрогеологических параметров водоносного горизонта и величиной общей минерализации воды.

Максимальное эксплуатационное понижение уровня воды в каждом конкретном случае определено в зависимости от глубины залегания водоносного горизонта, его мощности и высоты напора. Оценка модулей потенциальных эксплуатационных ресурсов грунтовых и артезианских вод производилась отдельно по формулам, приведенным в главе IV для грунтовых вод (IV.22) и для напорных вод (IV.7), при этом перетекание воды, выраженное в этой формуле вторым членом в скобках, не учитывалось.

При оценке соблюдались следующие условия: 1) водоносный горизонт осушается не более чем на половину своей мощности; 2) глубина залегания динамического уровня не превышает 100 м.

Расчетное время эксплуатации принято за 25 лет, что соответствует амортизационному сроку работы опреснительных установок.

Модули потенциальных эксплуатационных ресурсов грунтовых вод хазарско-хвалыньских отложений рассчитаны из условия частичной сработки их естественных запасов и полного использования естественных ресурсов, обеспеченных питанием (последнее ввиду отсутствия специально поставленных для этого наблюдений оценивалось весьма приближенно). Поскольку снижение уровня грунтовых вод во время их эксплуатации, приводящее к уменьшению испарения, не учитывалось, надо полагать, что величина питания в условиях эксплуатации несколько занижена.

Модули потенциальных эксплуатационных ресурсов напорных вод бакинских, ашшеронских и актагыльских отложений рассчитаны без учета естественных ресурсов, так как возможный приток из области питания, находящейся далеко за пределами рассматриваемой территории, заведомо незначителен вследствие малости градиентов напора в горизонтальном направлении.

Модуль потенциальных эксплуатационных ресурсов грунтовых вод хазарско-хвалыньского горизонта изменяется в пределах 0,3—1,0 л/сек·км², причем за счет сработки естественных (гравитационных) запасов формируется 60—100%, а за счет исполь-

зования естественных ресурсов — 0—40% эксплуатационных ресурсов грунтовых вод.

Формирование эксплуатационных ресурсов артезианских вод при глубоком залегании водоносного горизонта происходит за счет использования в основном упругих запасов, поэтому величина $\mu_{\text{пр}}$ в формуле (IV.7) принимается равной упругой водоотдаче μ^* . При неглубоком залегании (до 50—100 м) приобретает значение эффект осушения пласта и $\mu_{\text{пр}}$ рассчитывается по формуле (IV.4). В этом случае эксплуатационные ресурсы подземных вод более чем на 90% обеспечиваются их гравитационными запасами.

В целом потенциальные эксплуатационные ресурсы подземных вод повышенной минерализации четвертичных и верхнеплиоценовых отложений на площади около 70 тыс. км² оценены в 95—100 м³/сек (суммарный модуль 1,4 л/сек·км²), однако большую их часть составляют воды с минерализацией более 15 г/л. Наибольшими потенциальными ресурсами обладает хазарско-хвалынский водоносный горизонт — 40—42 м³/сек (средний модуль около 0,7 л/сек·км²), наименьшими — верхнеплиоценовый — 21 м³/сек (модуль 0,3 л/сек·км²), хотя площади распространения этих горизонтов примерно равны (около 50 тыс. км²), а по средним мощностям первый несколько уступает второму (соответственно 5—15 и 15—25 м).

При расчете прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод, исходя из условий использования воды для водопоя скота на пастбищах, принята схема размещения водозаборов — одиночных скважин по квадратной сетке с расстояниями между скважинами 6 км, что примерно соответствует требованиям животноводства. Считалось, что дебит отдельной скважины должен быть не менее 0,8—1,0 л/сек (потребность в воде 3000 голов скота). Оценка ресурсов производилась с выделением следующих градаций общей минерализации воды: 1—10 г/л — возможно использование для водопоя овец без опреснения, а для питья — с опреснением электродиализным или гиперфильтрационным методом; 10—15 г/л — для питья и водопоя скота использование возможно с опреснением гиперфильтрацией или электродиализом; из оценки исключены воды с минерализацией свыше 15 г/л, так как использование их, как правило, нецелесообразно (опреснение мембранными методами дорого из-за высокой минерализации воды, а дистилляцией — из-за малых ее расходов). Из оценки исключены также площади, расположенные на расстоянии менее 10 км от существующих источников пресных вод.

Прогнозный коэффициент использования грунтовых вод вычисляется по формуле (IV.26), для напорных — по формуле (IV.9), причем в случае частичной сработки их гравитационных запасов с подстановкой в эту формулу значения гравитационной водоотдачи взамен упругой, поскольку доля участия упругих запасов, как показали расчеты, оказалась несоизмеримо малой.

Наибольший коэффициент использования подземных вод (близкий к единице) возможен в случае, когда их эксплуатационные ресурсы формируются только за счет упругих запасов. При сработке гравитационных запасов подземных вод коэффициент их возможного использования существенно уменьшается и непосредственно зависит от водопроницаемости водоносного горизонта. Наименьший средний прогнозный коэффициент использования (менее 0,01) получен для грунтовых вод хазарско-хвалыньских отложений, что объясняется также их преимущественно высокой минерализацией, лимитирующей целесообразность эксплуатации. Средний коэффициент использования подземных вод бакинских отложений составляет 0,06, верхнеплиоценовых — 0,10. Значения коэффициента использования отражают не только влияние гидрогеологических параметров и расстояний между водозаборами, но и специфические условия использования соленых и соленых подземных вод — рациональные методы их опреснения для намечаемого вида использования. Кроме того, как отмечено, учитывалось расстояние до источника пресной воды.

Прогнозные эксплуатационные ресурсы подземных вод повышенной минерализации Калмыцкой республики с учетом отмеченных ограничений их использования составляют несколько более 4 м³/сек, т. е. около 4% потенциальных эксплуатационных ресурсов этих вод. Однако и такое количество воды может обеспечить обводнение значительных дополнительных пастбищных площадей и соответствующий рост поголовья скота.

Дебиты отдельных скважин, расположенных на расстоянии 6 км одна от другой, рассчитанные из условия полного их взаимодействия, составляют для грунтовых вод хазарско-хвалыньских отложений 1—2 л/сек, а для напорных вод бакинских и верхнеплиоценовых отложений — 1,5—3,5 л/сек, что вполне отвечает указанным потребностям водопойных пунктов. Однако, учитывая очень малые значения полученных прогнозных коэффициентов использования подземных вод, дебиты отдельных, не взаимодействующих с другими скважин могут быть значительно больше. Так, в хазарско-хвалыньских отложениях при водопроницаемости пласта около 50 м²/сут, коэффициенте уводнепроводности 500—600 м²/сут и понижении уровня воды в скважинах на 10—15 м дебит скважины будет выражаться 15—20 л/сек.

В заключение отметим, что региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод повышенной минерализации — важная задача гидрогеологических исследований для обоснования схем хозяйственного использования этих вод, особенно в аридной зоне нашей страны. Одновременно с оценкой ресурсов должны характеризоваться гидрогеологические условия удаления или утилизации остаточных рассолов (Минкин и др., 1973).

**ФОРМИРОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ РЕСУРСОВ
И ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Формирование искусственных ресурсов и запасов подземных вод может быть целенаправленным для увеличения эксплуатационных ресурсов подземных вод путем подпитывания их поверхностным стоком (искусственное восполнение запасов подземных вод) или только сопутствующим водохозяйственному строительству, не ставящему этой задачи (гидротехническое строительство, ирригация). В последнем случае ущерб, причиняемый изменением гидрогеологических условий под влиянием водохозяйственного строительства (фильтрационные потери из водохранилищ, подтопление населенных пунктов и сельскохозяйственных угодий в прибрежной зоне водохранилища, ухудшение условий разработки полезных ископаемых, вторичное засоление земель в районах ирригации под влиянием повышения уровня грунтовых вод), обычно существенно превосходит пользу, получаемую от увеличения эксплуатационных ресурсов подземных вод для водоснабжения и т. п. При разработке схем использования подземных вод на перспективу должны учитываться как эффект работы инженерных мероприятий, специально направленных на увеличение эксплуатационных ресурсов подземных вод, так и положительное влияние водохозяйственного строительства на их формирование.

**ВЛИЯНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ,
НАПРАВЛЕННЫХ НА УСИЛЕНИЕ ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД
И ВОСПОЛНЕНИЕ ИХ ЗАПАСОВ¹**

Для увеличения эксплуатационных ресурсов подземных вод и обеспеченности возможности их использования в течение более длительного (в некоторых случаях практически неограниченного) времени в некоторых благоприятных для этого гидрогеологических условиях целесообразно искусственно восполнять запасы подземных вод. В большинстве случаев это восполнение осуществляется без специальных инженерных мероприятий, благодаря работе самого водозабора, создающего депрессию подземных вод, в которую происходит фильтрация из реки. При этом следует различать два

¹ В этом разделе использованы некоторые данные статьи М. А. Хордицайнена (1974), в которой содержится обширная библиография по данному вопросу.

типа привлечения речного стока: а) «прямотоком» фильтрацией вдой непосредственно к водозабору; б) с регулированием запасов подземных вод при затоплении поймы в паводки с заполнением емкости водоносного пласта, осушенной предшествующей эксплуатацией водозабора подземных вод.

В этом случае периодически создаются как бы подземные водохранилища, заполняемые в паводки и срабатываемые в межпаводковые периоды. Хорошо известный пример в этом отношении — подземные воды долины Северского Донца, служащие одним из основных источников водоснабжения Донбасса. В межженный период происходит сработка запасов подземных вод в аллювиальных песках, которые ежегодно возобновляются при затоплении поймы весенними паводками.

Формирование эксплуатационных ресурсов подземных вод в речных долинах рассмотрено в главе V.

Сравнительно несложными инженерными мероприятиями формирование эксплуатационных ресурсов подземных вод в речных долинах может быть существенно увеличено. Эти мероприятия направлены как на уменьшение фильтрационных сопротивлений для увеличения производительности водозабора, так и на ускорение заполнения емкостей, создаваемых эксплуатацией.

Инженерные мероприятия, направленные на увеличение эксплуатационных ресурсов подземных вод, заключаются в строительстве каналов и бассейнов на поймах, в расчистках русел рек и стариц от заиления и т. д. Осуществление этих мероприятий возможно как на участках вновь проектируемых, так и вблизи действующих водозаборов подземных вод. Во всех случаях привлечения поверхностных вод должна производиться их очистка, соответствующая кондиционным требованиям их использования; должны также предусматриваться периодические чистки каналов и бассейнов (снятие заиленного слоя грунта). При значительной мутности речной воды она должна предварительно отстаиваться в специально для этого сооружаемых вспомогательных бассейнах.

Как известно, заиление каналов и бассейнов может быть двух типов: в результате образования кольматирующей пленки или глубокого проникновения кольматирующей взвеси в грунты. В зависимости от параметров водоносного горизонта, мутности подаваемой воды скорость инфильтрации изменяется в значительных пределах — от десятых долей метров в сутки до 30—40 м/сут. Например, на одном из водозаборов в г. Новокузнецке мощность закольматированного слоя достигла 2 м, а на некоторых реках Башкирии и Татарии значительная мутность речной воды привела к быстрой кольматации и резкому снижению производительности водозаборов.

Для предотвращения глубокой кольматации водоносного горизонта не рекомендуется использовать речную воду с мутностью более 20 мг/л. При благоприятных гидрогеологических и гидрологических условиях и относительно небольшой потребности

в воде того или иного объекта искусственное восполнение запасов подземных вод может оказаться целесообразнее, чем устройство водохранилища, всегда связанное с затоплением земель, если их устройством, разумеется, не преследуются другие цели (энергетические, транспортные, рыбоводческие и др.)

Магазинирование подземных вод вне речных долин, т. е. выше базиса дренирования, возможно сравнительно редко при совместном соблюдении следующих условий: 1) наличие естественной емкости (хранилища), способной принять, а при эксплуатации отдать подаваемую в нее воду (значительная пористость, трещиноватость и водопроницаемость пород); 2) наличие водоупорных пород в основании и в бортах этой емкости, препятствующих растеканию воды за ее пределы; 3) возможность подачи воды самотеком, тем или иным каналом или водоводом, поскольку емкость располагается выше базиса дренирования и на перекачку в нее воды из реки затрачивать энергетические ресурсы явно нецелесообразно; 4) качество воды, отвечающее кондициям.

Примером благоприятных гидрогеологических условий служит Жанайская структура (Центральный Казахстан), сложенная сильно трещиноватыми, закарстованными породами. В Жанайской структуре в результате 18-летней эксплуатации образовалась емкость около 60—70 млн. м³. Эта емкость может быть использована как хранилище воды, подаваемой водообводнительным каналом из Иртыша.

На Керченском полуострове около 1 км³/год воды, подаваемой из Днепра в Крым по Северо-Крымскому каналу, сбрасывается в Сиваш; эту воду целесообразно использовать для искусственно-го восполнения запасов подземных вод.

Наличие водоупорного обрамления, препятствующего растеканию подземных вод, создает возможность использования магазинируемых вод в любом пункте в пределах структуры. При отсутствии водоупорного обрамления (незамкнутой структуры) мероприятия по восполнению запасов эффективны только в том случае, если эксплуатационные скважины водозабора находятся в непосредственной близости от участка, где происходит восполнение запасов, так как по мере удаления от него доля откачиваемой воды по сравнению с подаваемой на восполнение резко уменьшается. Это связано со значительными фильтрационными сопротивлениями при движении подземных вод в породах в отличие от поверхностных вод, когда расстояние между пунктом поступления и изъятия воды практически не имеет значения. Так, например, использовать подземные воды на Тарханкутском полуострове (Крым) в структуре, сложенной трещиноватыми известняками сармата, при восполнении запасов подземных вод остаточным стоком Северо-Крымского канала целесообразно водозаборами, заложенными в пределах этой структуры, так как в противном случае вода, фильтрующаяся из канала, будет расходоваться подземным стоком в Черное море.

Искусственное питание подземных вод иногда производится в приморских районах для создания гидробарьера, защищающего пресные подземные воды от проникновения морской воды (например, в Калифорнии). Инженерные мероприятия, направленные на увеличение питания подземных вод поверхностным стоком, широко распространены за рубежом: в США, Швеции, ФРГ и др. (Григорьев, 1964; Хордикайнен, 1974). Отмечается, что в США широко применяется восполнение запасов подземных вод через скважины, в которые поступают промстоки после их очистки.

Подобного рода мероприятия возможны только в исключительных, благоприятных для этого случаях. Если промстоки уже очищены до такой степени, что не угрожают загрязнением подземных вод, то их, по-видимому, целесообразно использовать непосредственно, так как коэффициент полезного действия такой системы (нагнетательная и эксплуатационная скважины) очень мал даже при относительно небольших расстояниях между скважинами вследствие растекания жидкости по пласту. По соображениям охраны подземных вод устройство поглощающих скважин допустимо при нагнетании воды, не вызывающей никаких опасений загрязнения подземных вод, и в каждом конкретном случае требует санкции органов Государственной санитарной инспекции. По-видимому, перспективно повторное использование подземной воды, применяемой для охлаждения воздуха, а также конденсационных вод с эксплуатацией их в непосредственной близости от поглощающих скважин.

В СССР искусственное усиление питания подземных вод производится на водозаборах для водоснабжения городов Асбест, Новокузнецк, Ивано-Франковск, Черновцы, Рига, Магаданской области и др.

Искусственное восполнение запасов подземных вод должно в соответствующих гидрогеологических условиях широко применяться, особенно с учетом значительного увеличения отбора подземных вод в перспективе.

В целях более широкого внедрения этих мероприятий в практику проектирования водоснабжения целесообразно, чтобы в решениях ГКЗ при утверждении запасов подземных вод отмечалась в благоприятных для этого гидрогеологических условиях перспективность мероприятий по искусственному восполнению запасов подземных вод.

Вопросы искусственного восполнения запасов подземных вод должны разрабатываться в схемах комплексного использования водных ресурсов уже на стадии оценки потенциальных эксплуатационных ресурсов подземных вод. На этой стадии должны быть выявлены участки, где возможно и целесообразно применение инженерных мероприятий для усиления питания подземных вод поверхностным стоком, для создания регулирующих емкостей как в долинах рек, так и за их пределами, в благоприятных для этого гидрогеологических условиях.

Поскольку эффективность восполнения запасов подземных вод зависит в значительной мере от расположения участка восполнения по отношению к участку их эксплуатации, то окончательно вопрос о целесообразности искусственного восполнения запасов на том или ином участке должен решаться на стадии проектирования конкретных водозаборов.

ВЛИЯНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩ И ОРОШЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЗАПАСОВ И РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Водохранилища. В водохозяйственном балансе водохранилища следует различать понятия «расход на фильтрацию из водохранилища» и «фильтрационные потери из водохранилища» (Биндеман, 1951). Под последними следует понимать уменьшение расхода реки после устройства водохранилища в замыкающем створе (плотина) вследствие совокупного влияния — возникновения или усиления фильтрации из реки в глубь берега и уменьшения питания реки подземными водами вследствие их подпора водохранилищем.

Важно заметить, что фильтрации из водохранилища может и не происходить, а фильтрационные потери будут наблюдаться и их следует учитывать в водохозяйственном балансе водохранилища.

Величина фильтрационных потерь не зависит от направления потока подземных вод в естественных условиях (если река получала питание подземными водами, то оно уменьшается, если теряла воду на фильтрацию, то последняя увеличивается).

В случае, когда подземные воды в береговых слоях отсутствуют или их поверхность в естественных условиях горизонтальна, фильтрационные потери численно равны фильтрационному расходу.

В зоне распространения подпора подземных вод, вызываемого созданием водохранилища, увеличиваются напоры подземных вод, а в безнапорных водоносных горизонтах — и их мощность, что дает возможность эксплуатировать подземные воды с большим дебитом. Приведем несколько примеров.

Подпор подземных вод в закарстованных известняках неогена по левобережью Каховского водохранилища позволяет использовать для орошения до 20—25 м³/сек подземных вод и тем самым соответственно уменьшить подачу воды по Северо-Крымскому каналу.

В засушливых районах, где многие реки не имеют постоянных водотоков, использование подземных вод, получающих питание из водохранилищ, особенно эффективно. Так, водозабор подземных вод в зоне фильтрации из Самаркандского водохранилища на р. Нуре (Центральный Казахстан) служит хорошим источником хозяйственно-питьевого водоснабжения в районе, где подземные

воды в естественных условиях характеризуются высокой минерализацией.

Вблизи Братской плотины фильтрацией из водохранилища в кембрийских песчаниках создан водоносный горизонт, используемый для водоснабжения.

Искусственные запасы и ресурсы подземных вод, как составные части их потенциальных эксплуатационных ресурсов, учитываются в зависимости от того, предшествует ли период намечаемых водохозяйственных мероприятий периоду, на который рассчитываются эксплуатационные ресурсы подземных вод, или эти периоды совпадают.

В первом случае оцениваются только искусственные запасы, во втором — только искусственные ресурсы подземных вод. В самом деле, искусственные запасы подземных вод в зоне водохранилищ формируются не только вследствие фильтрации из водохранилища, аккумуляции при подпоре потока подземных вод, но и обеспечиваются инфильтрацией атмосферных осадков, т. е. естественных ресурсов; поскольку последние уже учтены в балансовом уравнении эксплуатационных ресурсов, то в этом уравнении должна быть учтена только фильтрация из водохранилища (искусственные ресурсы).

То же относится и к случаю, когда искусственные запасы формируются в районах ирригации: они должны учитываться, если создаются раньше периода, на который рассчитывается эксплуатация подземных вод. Если эти периоды совпадают, то должны учитываться только искусственные ресурсы, т. е. питание подземных вод из каналов, на площадях орошения и пр., так как это питание служит источником формирования искусственных запасов.

На участках нижнего бьефа, удаленных от плотины, где влияние обходной фильтрации из водохранилища в створе плотины уже не сказывается, регулирование стока водохранилищем может вызвать ухудшение условий водоснабжения. Регулирование стока влечет уменьшение высоты паводков и скоростей течения в нижнем бьефе, уменьшение, а иногда и прекращение затопления поймы. Между тем в ряде случаев восполнение запасов подземных вод, используемых для водоснабжения, в основном происходит в паводки.

Показательны в этом отношении водозаборы подземных вод, расположенные в долине р. Северский Донец, используемые для водоснабжения Донбасса. Водоносный горизонт приурочен здесь к мергельно-меловой толще и покрывающим ее песчаным аллювиальным отложениям. При эксплуатации водозаборов ежегодно происходит сработка уровня воды на 10 и более метров, а затем в паводок при затоплении поймы уровни воды восстанавливаются. Построенные на притоках Северского Донца водохранилища регулировали сток, пойма стала затапливаться не ежегодно и на меньших площадях, что отрицательно сказалось на

питании водоносного горизонта, в связи с чем эксплуатационные ресурсы подземных вод уменьшились.

Другим примером возможного неблагоприятного влияния строительства водохранилища на использование подземных вод в нижнем бьефе может служить вероятное уменьшение производительности водозаборов подземных вод в долине Арагви после строительства на ней плотины. Питание водозаборов, заложенных в аллювиальных галечниках, происходит в результате фильтрации из р. Арагви, при этом после паводков дебит их существенно возрастает, а затем постепенно уменьшается. Учитывая небольшую высоту паводков (горная река) и малую емкость слоя галечников (его мощность около 5 м), увеличение дебита после паводков можно приписать только декольматирующему воздействию реки при больших скоростях в паводки. В связи с тем, что после строительства плотины паводков не будет, в проекте ее строительства для сохранения производительности существующих водозаборов предусматриваются специальные выпуски воды из водохранилища для промывки русла.

Влияние крупных магистральных каналов на формирование запасов подземных вод в общем аналогично влиянию водохранилищ. В аридной зоне вблизи каналов формируются линзы пресных вод, как бы «плавающие» на грунтовых водах высокой минерализации. Эти «приканальные» линзы могут быть использованы для мелкого сельскохозяйственного водоснабжения. Однако это и в малой степени не окупает того ущерба, который наносит фильтрация из каналов (уменьшение коэффициента полезного действия оросительных систем, подтопление и засоление земель). Так, фильтрационные потери из Большого Каракумского канала выражались несколькими десятками кубометров в секунду, фильтрация на начальном участке Северо-Крымского и на Краснознаменском канале (Украина) составляет около 6 м³/сек.

Каналы, заглубляемые ниже уровня грунтовых вод, становятся их дренами. Учитывая, что величина заглубления обычно небольшая, а верхние водоносные горизонты, как правило, не используются для водоснабжения, фильтрация грунтовых вод в канал практически не отражается на запасах грунтовых вод.

Примером значительных фильтрационных потерь может служить водохранилище Храмгас (Грузия). Это водохранилище создано в котловине, сложенной сильно трещиноватыми андезитобазальтами, которые прикрыты, но не повсеместно, плащом слабопроницаемых озерных отложений. Глубина залегания подземных вод в чаше водохранилища была до наполнения 60—80 м. Поток подземных вод в андезитобазальтах разгружался в нескольких километрах от плотины на контакте с водоупорным гранитным массивом, суммарный дебит родников составлял около 3 м³/сек. При создании водохранилища по его южному борту, где нет защитного слоя озерных отложений, возникла значительная фильтрация (около 6 м³/сек). Дебит родников вследствие фильтрации

из водохранилища сильно возрос, и они могут служить источником крупного водоснабжения.

Другим примером водохранилища с большими фильтрационными потерями может служить Апаранское водохранилище на р. Касак (Армения), дно которого также сложено андезито-базальтами. До строительства водохранилища уровень подземных вод в андезито-базальтах в правом берегу несколько понижался в глубь массива. Возможно, что фильтрация происходит в глубоко лежащие трещиноватые эффузивы и вода отводится в глубоко врезанную долину пра-Касаха, находящуюся в 2 км от водохранилища. Потери на фильтрацию, по данным гидрометрических наблюдений, составляют около 50% поступающей в водохранилище воды. Для борьбы с фильтрацией сооружается цементационная завеса.

Большие фильтрационные потери возможны из водохранилища, проектируемого на р. Кроноцкой (Камчатка). Здесь участок сложен рыхлыми вулканогенными породами мощностью несколько сотен метров с коэффициентом фильтрации порядка 10 м/сут. По ориентировочным расчетам, фильтрационные потери могут составить до 20% стока реки, в связи с чем вопрос о создании водохранилища не решен до окончания более детальных изысканий.

При глубоком залегании уровня подземных вод фильтрационные потери увеличиваются за счет того, что значительный объем воды затрачивается на насыщение пород, залегающих под дном водохранилища; это особенно «чувствительно» для наливных водохранилищ, наполняемых иногда из удаленных источников.

Так, существенные для водного баланса фильтрационные потери возможны в первые годы эксплуатации из проектируемого крупного наливного Талиманджарского водохранилища (Узбекистан), которое будет располагаться в пологой котловине, выход из которой перегораживается плотиной с подпором до 20 м. Котловина несколько возвышается над окружающей местностью. Она заложена в слоистой толще песчаников и алевролитов. Общая мощность этого комплекса более 500 м. К толще приурочены подземные воды, глубина залегания которых в чаше водохранилища около 100 м.

Значительные фильтрационные потери, ожидавшиеся из крупного наливного водохранилища (Киргизия), обусловленные выходом на отдельных участках галечников при глубоком залегании уровня подземных вод, заставили предусмотреть в проекте покрытие опасных участков полиэтиленовой пленкой.

Величина формирующихся искусственных запасов подземных вод связана с величиной фильтрационных потерь из водохранилища балансовым уравнением

$$V_{\text{зап}} = V_{\text{пот}} - V_{\text{ст}} - V_0, \quad (\text{VIII.1})$$

где $V_{\text{зап}}$ — искусственные запасы подземных вод; $V_{\text{пот}}$ —

фильтрационные потери из водохранилища; $V_{ст}$ и V_0 — соответственно объемы воды, поступившей стоком в естественные дрены и испарившейся в зоне развития подпора за это время. Следовательно, в общем случае

$$V_{зап} \leq V_{пот}$$

Равенство этих величин соблюдается, если депрессионная поверхность грунтовых вод в зоне развития подпора не пересекает речек, оврагов и других дрен или грунтовые воды на отдельных участках не испаряются.

Условие $V_{зап} = V_{пот}$ соблюдается при значительной (теоретически неограниченной) протяженности зоны развития подпора в глубь берега либо при ограничении этой зоны слабопроницаемыми породами, например при контакте аллювиальных отложений террасы со слабопроницаемыми коренными породами. В этом случае расход воды из водохранилища (искусственные ресурсы) и искусственные запасы на единицу длины одного берега водохранилища можно соответственно определять по формулам, предложенным Н. Н. Веригиным (Абрамов и др., 1960):

$$q_t = 0,56H_0 \sqrt{\frac{\mu K h_{ср}}{t}} - q_e, \quad (\text{VIII.2})$$

$$V_{зап} = 1,12H_0 \sqrt{\mu K h_{ср} t}, \quad (\text{VIII.3})$$

где q_t — фильтрационный расход из водохранилища через время t от момента его наполнения; $V_{зап}$ — искусственные запасы (в объеме выражении), образовавшиеся за время t ; q_e — расход потока подземных вод в естественных условиях (в данной транскрипции формулы принят положительным, если до подпора он был направлен к реке); μ — недостаток насыщения пород в зоне аэрации, если воды напорные, то $\mu = \mu^*$ (упругая водоотдача); K — коэффициент фильтрации; $h_{ср}$ — средняя мощность водоносного пласта; H_0 — подпор реки водохранилищем.

Величина q_t уменьшается во времени, и когда величина под радикалом в уравнении (VIII.2) становится равной q_e , фильтрация из водохранилища прекращается. Если поток подземных вод в естественных условиях был направлен от реки, то фильтрация теоретически может продолжаться неограниченно долго, но также убывая во времени.

Если в зоне развития подпора будет происходить дренирование подземных вод или их испарение, то расчет искусственных ресурсов подземных вод по формуле (VIII.2) даст их преуменьшенное значение, а искусственных запасов по формуле (VIII.3) — завышенное, что следует иметь в виду при оценке потенциальных эксплуатационных ресурсов подземных вод. Определять эти величины целесообразно лишь на стадии оценки перспективных

эксплуатационных ресурсов подземных вод применительно к намечаемому размещению водозаборов методом моделирования.

Если подземные воды на некотором расстоянии (Z) от берега реки, на которой проектируется водохранилище, выклиниваются на поверхность, дренируются или получают питание фильтрацией из другой реки, то фильтрационные потери ($V_{\text{пот}}$) и фильтрационный расход (q_1) из водохранилища могут быть определены по следующим формулам, предложенным Н. Н. Веригиным:

$$V_{\text{пот}} = \frac{Kh_{\text{cp}}H_0t}{L} \left[1 + 0,213 \frac{\mu Z^2}{Kh_{\text{cp}}t} f_1(\tau) \right], \quad (\text{VIII.4})$$

$$q_1 = \frac{Kh_{\text{cp}}H_0}{L} [1 + f_2(\tau)] - q_e,$$

где

$$\tau = \frac{Kh_{\text{cp}}t}{\mu L^2}. \quad (\text{VIII.5})$$

Значение величины расхода подземного потока в естественных условиях (q_e) считается положительным, если он был до подпора направлен к реке, на которой строится водохранилище,

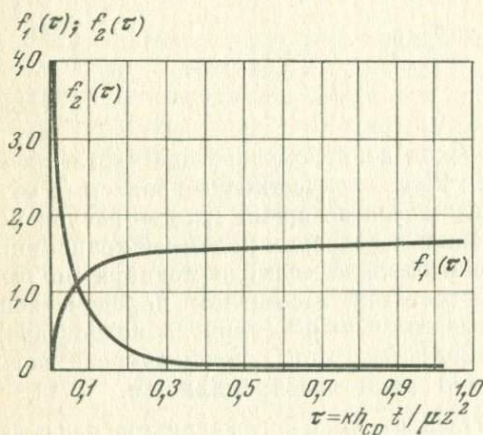


Рис. 4
Значение функций $f_1(\tau)$
и $f_2(\tau)$

а в противоположном случае — отрицательным. Значения функций $f_1(\tau)$ и $f_2(\tau)$ могут быть определены по графику (рис. 4). При $\tau > 1$ функции $f_1(\tau) \approx 1,64$ и $f_2(\tau) \approx 0$.

Фильтрация из водохранилища в обход примыкания плотины в нижний бьеф обычно происходит на небольшом участке, ограниченном выходами слабопроницаемых пород в берегах водохранилища на некотором удалении от плотины. Если такого ограничения нет, то протяженность берега водохранилища, в пределах которого возможна фильтрация в нижний бьеф, зависит от направления потока подземных вод в естественных условиях. Если река имела подземное питание, то протяженность берега водохра-

вилища (l) от плотины, где возможна фильтрация в обход плотины, по Н. Н. Веригину (1947), выражается

$$l = H_0 / \pi i_e, \quad (\text{VIII.6})$$

где H_0 — подпор в реке; i_e — уклон потока подземных вод, направленного в естественных условиях к реке.

В тех случаях, когда поток подземных вод в естественных условиях направлен от реки в глубь берега или если зеркало подземных вод было горизонтально, участок берега, где может происходить фильтрация из водохранилища, может распространяться на значительное расстояние (теоретически до хвоста водохранилища). Так, например, в левобережном примыкании Каховской плотины, имеющей подпор всего 15—16 м, фронт фильтрации в обход плотины по берегу водохранилища имеет протяженность около 15 км, так как до подпора пьезометрическая поверхность подземных вод в известняках неогена между Днестром и Черным морем была практически горизонтальной и участок обходной фильтрации распространился до выходов в склоне долины Днестра слабопроницаемых пород среднего и нижнего сармата на отметках, превышающих НПУ водохранилища.

При оценке потенциальных эксплуатационных ресурсов подземных вод оценивать их искусственные запасы в зоне фильтрации в обход плотины нет необходимости, так как объем этих запасов незначителен вследствие расходования запасов одновременно с формированием оттока воды в нижний бьеф.

Фильтрационный расход из водохранилища, т. е. искусственные ресурсы подземных вод в зоне обходной фильтрации, уменьшается во времени. Анализ этого явления выполнен Ф. М. Боcheвром (Абрамов и др., 1960).

При практической стабилизации потока, которая, как правило, наступает значительно раньше, чем срок, на который разрабатывается схема, фильтрационный расход в одном берегу долины (Q_{II}) выражается формулой

$$Q_{II} = Kh_{cp} \left[\frac{H_0}{\pi} \ln \frac{l}{r_0} - (l - r_0) i_e \right], \quad (\text{VIII.7})$$

где r_0 — радиус врезки тела плотины в берег (при противофильтрационной завесе по оси плотины $r_0 \approx 2/\pi b$, где b — длина завесы от плотины; i_e — уклон потока подземных вод в естественных условиях (при движении подземных вод в сторону реки величина i_e положительная).

Орошение. Инфильтрация на площадях орошения и фильтрация из каналов — основные источники формирования подземных вод в районах орошаемого земледелия. Так, например, Красная речка в Чуйской долине, имеющая расход свыше 20 м³/сек, практически целиком питается за счет инфильтрации воды на орошаемых землях и фильтрации из магистрального канала. Учет ре-

сурсов подземных вод, формирующихся при ирригации, имеет важное значение для повторного использования воды вертикальным дренажем.

Ресурсы подземных вод, формирующиеся на площадях орошения, выражаются формулой

$$Q_{\text{п}} = WF = \alpha ZF, \quad (\text{VIII.8})$$

где W — инфильтрация оросительной воды, выражаемая слоем воды в единицу времени; α — коэффициент инфильтрации, т. е. доля воды, просочившейся и достигающей поверхности грунтовых вод, от подаваемой на орошение воды Z (в той же размерности, что и W); F — площадь орошаемого участка.

Коэффициент α изменяется во времени; он зависит от транспирации и испарения воды на орошаемых площадях, расходования воды на формирование связанной воды в зоне аэрации, а после ввода в действие дренажных систем — также от величины оттока воды в дрены.

Значение коэффициента α в гидрогеологических расчетах принимается по данным наблюдений за режимом грунтовых вод на опытных балансовых гидрогеолого-мелиоративных участках. Если вблизи орошаемого участка отсутствуют дрены или понижения, где может происходить испарение грунтовых вод, то пласт, в который происходит инфильтрация, может рассматриваться как практически неограниченный и создаваемые за время t искусственные запасы подземных вод составляют

$$V_{\text{и}} = WtF. \quad (\text{VIII.9})$$

В формировании запасов следует различать два этапа: 1) до начала работы дренажной системы и 2) после ввода в действие дренажей.

На первом этапе запасы создаются как непосредственно под участком орошения, так и за его пределами вследствие растекания воды по пласту.

На втором этапе дальнейшее повышение уровня воды на орошаемом участке прекращается, и горизонт грунтовых вод поддерживается дренами на глубине, не меньшей критической, при которой возможно заболачивание и вторичное засоление почв.

В этих условиях запасы формируются лишь за пределами участка орошения, что зависит от положения уровня воды, поддерживаемого на участке орошения дренами.

Повышение уровня грунтовых вод, угрожающее ухудшением мелиоративной обстановки, увеличивается при прочих равных условиях по мере удаления от границ орошаемого участка, где происходит отток воды за пределы участка. В центре участка или по его оси, если он имеет полосообразную форму, скорость повышения уровня грунтовых вод наибольшая. Здесь, пренебрегая оттоком воды по пласту, т. е. рассматривая движение как одно-

размерное, приближенно

$$t_{кр} = \frac{\mu \Delta H}{W}, \quad (\text{VIII.10})$$

где $t_{кр}$ — время (критическое), за которое уровень грунтовых вод повысится на ΔH — предельно допустимое по мелиоративным условиям повышение; μ — недостаток насыщения пород до орошения.

Применительно к условиям орошения участка полосообразной формы, т. е. если его длина значительно превосходит ширину,

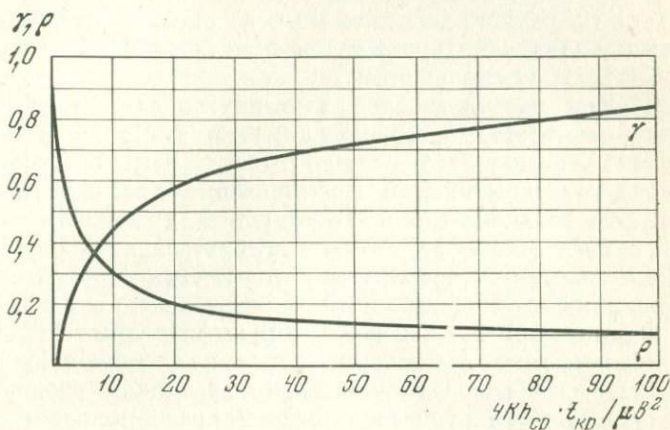


Рис. 5
Функции
 ρ и γ

С. Ф. Аверьяновым (Костяков и др., 1956) предложено гидродинамическое решение, позволяющее определять время повышения уровня грунтовых вод (ΔH) до достижения критической для мелиорации глубины залегания грунтовых вод.

По оси полосы, где повышение наибольшее,

$$t_{кр} = \frac{\mu \Delta H}{\rho W}, \quad (\text{VIII.11})$$

где

$$\rho = f \left(\frac{4Kh_{cp} t_{кр}}{\mu b^2} \right). \quad (\text{VIII.12})$$

Здесь b — ширина полосы орошения.

Время ($t_{кр}$) определяется по формуле (VIII.11) несложным подбором. Величина ρ определяется по графику (рис. 5).

Значение ρ убывает с уменьшением водопродимости пласта и с увеличением ширины полосы орошения. При большой ширине полосы орошения коэффициент ρ стремится к единице, и формула (VIII.11) обращается в приближенную формулу (VIII.10).

Доля оттока воды, просочившейся на участке орошения, израсходованная на насыщение пород за пределами орошаемого

участка, тем больше, чем больше водопроницаемость пласта (Kh_{cp}) и время эксплуатации (t), и тем меньше, чем шире полоса орошения. Эта доля, по С. Ф. Аверьянову, характеризуется коэффициентом γ (см. рис. 5).

В супесчано-суглинистых породах, характеризующихся коэффициентами фильтрации порядка десятых долей метра в сутки, даже при относительно узкой полосе массива орошения (порядка нескольких километров) отток воды в стороны от него выражается за 10 лет долями процента от профильтровавшейся воды. Только в хорошо проницаемых песках с коэффициентами фильтрации порядка 10 м/сут при значительной мощности водоносного пласта (несколько десятков метров) отток в стороны за это же время значителен (он составляет до 30—40% от профильтровавшейся воды при орошении).

Потоки грунтовых вод, формирующиеся на отдельных участках орошения, постепенно смыкаются с такими же потоками других участков, что вызывает общее региональное повышение уровня грунтовых вод и формирование их искусственных запасов. Так, Н. П. Фаворин (Костяков и др., 1956) отмечает, что при коэффициенте земельного использования 40—45% и неглубоким залеганием уровня грунтовых вод критический подъем уровня происходит уже за 3—5 лет.

Формирование запасов во вторую фазу лимитируется работой дренажной сети. Для этой стадии в «неограниченном» пласте запасы могут рассчитываться суммированием расходов воды из поглощающей галереи или поглощающего колодца, работающих при постоянном напоре.

Если в зоне влияния орошения происходит отток грунтовых вод в естественные дрены (реки, саи и т. п.) или понижения, в которых может происходить их интенсивное испарение, то расчеты искусственных ресурсов по формуле (VIII.8) и искусственных запасов по формуле (VIII.9) дадут в первом случае заниженное, а во втором — завышенное значение этой величины.

Учитывая разнообразие расположения и отметок естественных дрен и участков возможного испарения, изменение граничных условий на участках орошения во времени и пр., рекомендуется величины искусственно создаваемых ресурсов и запасов подземных вод под влиянием орошения определять методом моделирования.

Расчеты формирования ресурсов и запасов подземных вод при фильтрации из магистральных каналов целесообразно производить также методом моделирования (Филимонов, Шестаков, 1964).

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД
НА РЕЧНОЙ СТОК

*

Величина возможного сокращения речного стока при эксплуатации подземных вод — основной критерий для суждения об учете подземных вод в водохозяйственных балансах.

В результате отсутствия методики оценки этого сокращения до настоящего времени нет единого мнения о ставшем уже «традиционным» вопросе о допустимости суммирования ресурсов подземных и поверхностных вод в водохозяйственных расчетах.

Остановимся кратко на основных соображениях, которыми руководствовались ведущие специалисты при разработке методики составления водохозяйственных балансов.

По мнению С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля (1964), при составлении водохозяйственных балансов в качестве приходной их статьи следует учитывать лишь те подземные воды, которые разгружаются в моря и океаны. Что касается подземных вод, дренируемых речными долинами, то при оценке общих водных ресурсов их учитывать, как правило, не следует, так как их отбор вызывает такое же сокращение речного стока.

Несколько позднее в работе В. Т. Турчиновича (1967) вопросам учета подземных вод в водохозяйственных балансах уделено большее внимание. Оставляя в стороне некоторые спорные в гидрогеологическом отношении определения В. Т. Турчиновича в области естественных и эксплуатационных ресурсов и запасов подземных вод, отметим, что он рекомендует учитывать в приходной части водохозяйственных балансов эксплуатационные ресурсы артезианских вод, независимо от участия последних в поверхностном стоке.

Относительно грунтовых вод В. Т. Турчинович, подобно С. Н. Крицкому и М. Ф. Менкелю, считал, что, несмотря на их инерционность, вследствие которой отбор скажется на поверхностном стоке только через несколько лет, они не подлежат учету в приходной части водохозяйственного баланса. Предпочтение, которое В. Т. Турчинович отдает артезианским водам, мотивируется тем, что они характеризуются весьма малыми скоростями движения, существенно меньшими, чем скорости движения грунтовых вод, и поэтому их эксплуатация на определенном удалении из районов дренирования в обозримом будущем заметно не скажется на речном стоке.

С рекомендациями С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля можно было бы согласиться в тех случаях, когда перспективный водохозяйственный баланс составляется на весьма далекий срок, измеряемый многими десятилетиями (теоретически — на неограниченно долгий срок). В этом случае действительно ущерб речному стоку приближается к величине водоотбора подземных вод, но только в том случае, если в естественных условиях подземные воды не расходовались на испарение. Если же это условие не выполняется, то даже при долгосрочном прогнозе ущерб речному стоку может оставаться существенно меньшим водоотбора.

Рекомендации В. Т. Турчиновича об учете ресурсов только артезианских подземных вод, как самостоятельного элемента водного баланса, справедливы лишь в тех случаях, когда они разгружаются в речные долины, находящиеся вне района, для которого составляется данный водохозяйственный баланс. В противном случае эти рекомендации так же неприемлемы, как неприемлемы и рекомендации в отношении учета ресурсов грунтовых вод. Учет или неучет ресурсов подземных вод как элемента водохозяйственного баланса, конечно, не может определяться скоростями их движения. Основным естественным показателем водоносного пласта, характеризующим степень возможного влияния водоотбора на речной сток, являются коэффициенты уровняпроводности (для грунтовых вод) или пьезопроводности (для артезианских вод), характеризующие не скорости движения, а скорость передачи возмущения в водоносном пласте.

Отсутствие достаточно обоснованных рекомендаций по учету подземных вод в водохозяйственных балансах привело к тому, что до настоящего времени в практике составления таких балансов все ресурсы подземных вод рассматриваются как ресурсы, использование которых обязательно вызовет такое же сокращение речного стока. В связи с этим ресурсы подземных вод, как правило, учитываются при составлении водохозяйственных балансов с таким же сокращением величины ресурсов поверхностных вод.

Современные гидрогеологические представления требуют пересмотреть эту неверную практику. Разработаны методические рекомендации (Хантуш, 1968; Минкин, 1972б, 1973), которые позволяют оценивать величину сокращения поверхностного стока при эксплуатации подземных вод и определять, как и в каком количестве должны учитываться подземные воды в приходной части водохозяйственных балансов. Основные положения методики этого учета описаны в данном разделе.

При оценке общих водных ресурсов рассматриваться должны только те подземные воды, которые целесообразно отбирать с учетом технико-экономических соображений, т. е. прогнозные эксплуатационные ресурсы подземных вод.

Нельзя, конечно, просто суммировать поверхностные и эксплуатационные ресурсы подземных вод. Эксплуатация подзем-

ных вод, почти всегда в той или иной мере гидравлически связанных с поверхностными, приводит к определенному сокращению речного стока, которое принято считать ущербом речному стоку. Поэтому при составлении водохозяйственных балансов какого-либо района общие водные ресурсы должны слагаться из поверхностных и эксплуатационных ресурсов подземных вод за вычетом сокращения речного стока, вызванного эксплуатацией подземных вод.

Следует отметить, что этот ущерб при прочих равных условиях будет одинаковым независимо от того, питается ли река за счет подземных вод или, наоборот, подземные воды получают питание из рек, так как в первом случае расход рек сокращается как непосредственно из-за фильтрации речных вод к водозаборам подземных вод, так и в результате сокращения расхода выклинивающихся в реку подземных вод. Вследствие инерционности последних влияние начавшейся эксплуатации в подавляющем большинстве случаев не сразу сказывается в полной мере на речном стоке. Ущерб речному стоку возрастает с увеличением продолжительности эксплуатации, приближаясь к некоторому предельному значению, которое, как правило, меньше величины водоотбора.

Рассмотрим методику оценки ущерба речному стоку для самого простого случая, когда эксплуатируемый водоносный горизонт непосредственно гидравлически связан с рекой. Аналитические решения, используемые для этого, исходят из допущения, что параметры эксплуатируемого водоносного горизонта могут быть достаточно обоснованно осреднены по площади, а эксплуатируемый водоносный горизонт может рассматриваться как полуограниченный пласт с границей постоянного напора, за которую принимается река.

При непрерывной работе водозаборов с постоянным дебитом для условий, когда связь подземных вод с рекой совершенна, величина ущерба речному стоку ($Q_{ущ}$) от работы водозабора с дебитом Q определяется по формуле (Хантуш, 1968)

$$Q_{ущ} = Q \operatorname{erfc} \left(\frac{d_0}{\sqrt{2} \sqrt{at}} \right), \quad (\text{IX.1})$$

где d_0 — расстояние водозабора от береговой линии; a — коэффициент уравнепроводности (для безнапорного горизонта) или пьезопроводности (для напорного горизонта); t — время с начала работы водозабора.

Функция $\operatorname{erfc}(z)$ табулирована и приводится в справочниках и методических руководствах (Бочевер, 1968).

С помощью выражения (IX.1) методом сложения фильтрационных течений можно определить суммарный ущерб речному стоку при работе любого числа (N) разнодебитных, произвольно распо-

ложенных и в разное время начавших работать водозаборов:

$$Q_{\text{ущ. сум}} = \sum_{i=1}^N Q_i \operatorname{erfc} \left(\frac{d_i}{2\sqrt{at_i}} \right). \quad (\text{IX.2})$$

Анализ выражений (IX.1) и (IX.2) показывает, что основными факторами, определяющими величину ущерба речному стоку при эксплуатации водозабора, помимо его дебита являются: время эксплуатации, коэффициент урвнеспроводности (или пьезопроводности), обобщенно характеризующий водопроницающие и емкостные свойства водоносного пласта, и расстояние водозабора от реки. В результате того что характер взаимосвязи подземных вод с поверхностными определяется фильтрационным сопротивлением русловых отложений, принято учитывать его соответствующим виртуальным смещением береговой линии (см. главу V). Так, если гидравлическая связь совершенна, то принимается, что расстояние водозабора до реки равно истинному. Если же русловые отложения имеют худшие по сравнению с эксплуатируемым горизонтом фильтрационные свойства, то береговая линия условно смещается на длину отрезка, общее фильтрационное сопротивление которого равно фильтрационному сопротивлению русловых отложений. В этом случае в выражение (IX.1) должно входить не истинное расстояние водозабора до береговой линии, а виртуальное, т. е. сумма истинного расстояния и дополнительного отрезка, эквивалентного сопротивлению русловых отложений (см. главу V). Поэтому к трем названным факторам, определяющим величину ущерба речному стоку, следует добавить четвертый — степень взаимосвязи поверхностных вод с эксплуатируемым водоносным горизонтом.

Функция $\operatorname{erfc}(Z)$ увеличивается с уменьшением аргумента, изменяясь от 0 до 1. Поэтому чем больше время эксплуатации или коэффициент урвнеспроводности (пьезопроводности) эксплуатируемого горизонта, тем большим будет при прочих равных условиях ущерб поверхностному стоку, вызванный эксплуатацией. И наоборот, чем больше расстояние водозабора от реки, истинное или приведенное, тем меньше при прочих равных условиях ущерб поверхностному стоку.

Если эксплуатация подземных вод намечается береговыми водозаборами, располагающимися в речных долинах, т. е. в непосредственной близости от рек, то при составлении водохозяйственных балансов эксплуатационные ресурсы подземных вод нельзя рассматривать как дополнительные к ресурсам поверхностных вод, так как близость водозабора к реке определяет быстрое и примерно равное эксплуатационному водоотбору сокращение поверхностного стока. Лишь в том случае, когда при оценке общих водных ресурсов ресурсы поверхностных вод принимаются равными средней величине меженного стока заданной обеспеченности, часть ресурсов подземных вод речных долин,

равная величине питания подземных вод в паводок, когда обводняется осушенная при эксплуатации толща, т. е. второй член в правой части выражений (V.17) и (V.18), может рассматриваться как приходная статья в общем водном балансе.

Что касается общих перспективных эксплуатационных ресурсов подземных вод на остальных территориях (вне речных долин), то, как отмечалось выше, они всегда должны рассматриваться как приходная часть общих водных ресурсов за вычетом ущерба речному стоку, вызванного их отбором. При этом должно учитываться, что при использовании водных ресурсов балансового района возможно как увеличение общих прогнозных ресурсов подземных вод, так и их уменьшение.

Так как общие перспективные эксплуатационные ресурсы подземных вод ($Q_{пр}$) рассчитываются при условии, что водозаборы размещаются равномерно на площади по сетке с заданным шагом, прогнозный ущерб речному стоку при отборе этих ресурсов может быть определен из выражения

$$Q_{ущ. сум} = Q_{пр} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2\sqrt{at}} \right) + \frac{2\sqrt{at}}{Z\sqrt{\pi}} \left(1 - e^{-\frac{Z^2}{4at}} \right) \right]. \quad (IX.3)$$

Зависимость (IX.3) получена интегрированием выражения (IX.1) по ширине полосы (Z) между рекой и верхней границей балансового района (чаще всего это водораздельная линия) при условии постоянства водоотбора в любой точке этой полосы.

Конечно, ширина полос на правобережье и левобережье может быть различной, как могут быть различными и перспективные эксплуатационные ресурсы подземных вод в пределах этих полос. Поэтому ущерб речному стоку рассчитывается отдельно по левобережью и правобережью. На рис. 6 приведен график зависимости $Q_{ущ. сум}/Q_{пр} = f(Z/2\sqrt{at})$ по выражению (IX.3) и для сравнения приведен также график зависимости $Q_{ущ}/Q = f(d/2\sqrt{at})$ для одиночного водозабора по выражению (IX.1).

Можно видеть, что основными факторами, определяющими величину ущерба речному стоку при равномерной площадной эксплуатации подземных вод, как и в случае одиночного водозабора, помимо величины самого водоотбора являются время эксплуатации и коэффициент уравнипроводности (или пьезопроводности). В отличие от одиночного водозабора, в случае которого основным фактором было расстояние его от реки, при региональной эксплуатации подземных вод основным фактором оказывается ширина полос между рекой и границами балансового района на левобережье и правобережье (Z).

В ряде случаев определенный интерес представляет определение суммарных потерь речного стока ($V_{ущ}$) за какой-то определенный период эксплуатации подземных вод. При работе одиночного водозабора определение этих суммарных потерь может быть

$Q_{\text{уш.}}/Q; Q_{\text{уш.}}/Q_{\text{пр}}$

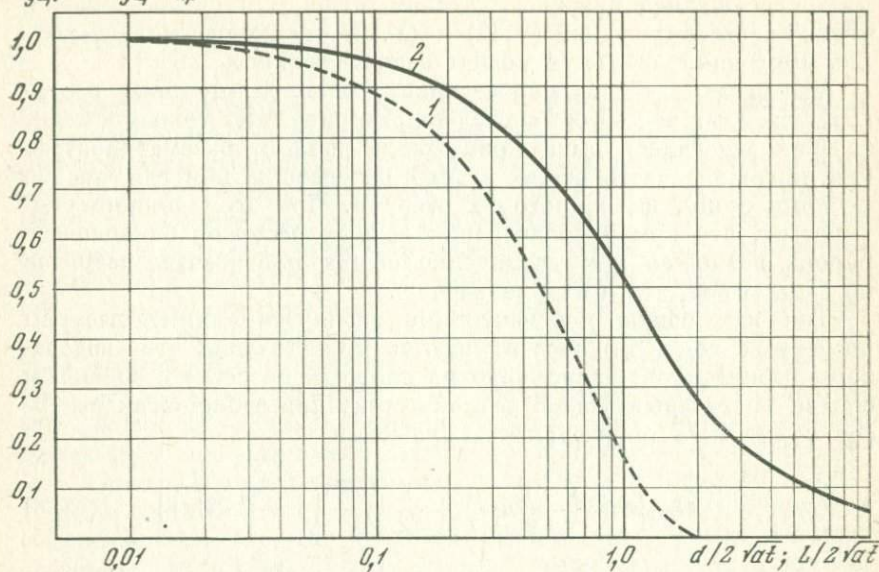


Рис. 6. График $\frac{Q_{\text{уш.}}}{Q} = f\left(\frac{d}{2\sqrt{at}}\right)$ (1) и $\frac{Q_{\text{уш.}}}{Q_{\text{пр}}} = f\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right)$ (2)

$v_{\text{уш.}}/Q\bar{t}; v_{\text{уш.}}/Q_{\text{пр}}\bar{t}$

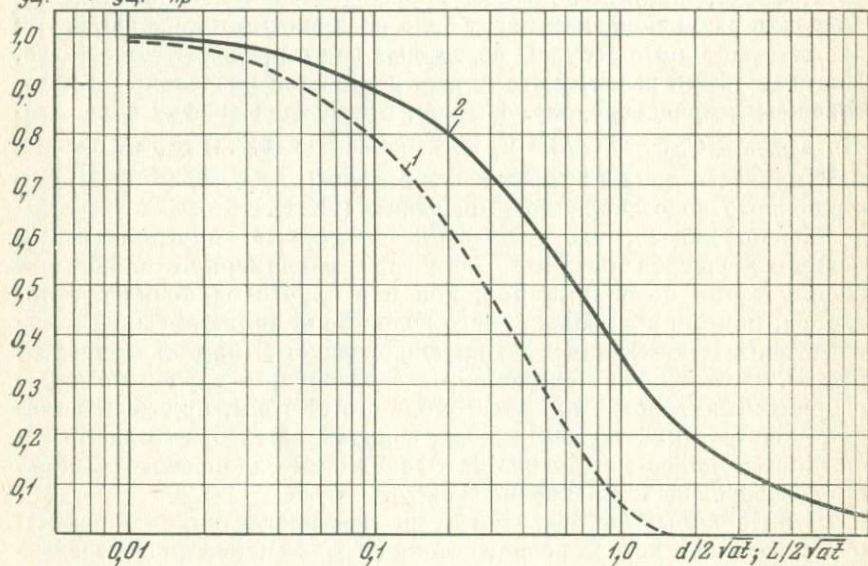


Рис. 7. График $\frac{v_{\text{уш.}}}{Q\bar{t}} = f\left(\frac{d}{2\sqrt{at}}\right)$ (1) и $\frac{v_{\text{уш.}}}{Q_{\text{пр}}\bar{t}} = f\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right)$ (2)

$$V_{\text{ум}} = 4Qti^2 \operatorname{erfc} \left(\frac{d}{2\sqrt{at}} \right), \quad (\text{IX.4})$$

полученной М. С. Хантушем (1968) путем интегрирования выражения (IX.1) по времени.

При равномерной площадной эксплуатации подземных вод (по сетке), т. е. когда отбираются общие перспективные эксплуатационные ресурсы, расчетная зависимость для определения суммарных потерь речного стока имеет вид

$$V_{\text{ум}} = 4Q_{\text{пр}}t \left[i^2 \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2\sqrt{at}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{Z}{2\sqrt{at}} \right) i \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2\sqrt{at}} \right) + \frac{1}{6\sqrt{\pi}} \left(\frac{2\sqrt{at}}{Z} \right) \left(1 - e^{-\frac{Z^2}{4at}} \right) \right]. \quad (\text{IX.5})$$

Зависимость (IX.5) получена интегрированием выражения (IX.3) по времени.

На рис. 7 приведены графики зависимостей

$\frac{V_{\text{ум}}}{Qt} = f \left(\frac{d}{2\sqrt{at}} \right)$ и $\frac{V_{\text{ум}}}{Q_{\text{пр}}t} = f \left(\frac{Z}{2\sqrt{at}} \right)$, построенные по выражениям (IX.4) и (IX.5).

Функции $i \operatorname{erfc} (Z)$ и $i^2 \operatorname{erfc} (Z)$ табулированы и приводятся в ряде работ (Боचेвер, 1968 и др.).

Если дебит водозаборов в течение года меняется и ежегодно эти изменения повторяются, ущерб речному стоку и его суммарные потери при эксплуатации подземных вод без большой погрешности могут определяться по всем приведенным зависимостям, в которые подставляется средневзвешенный (по времени) дебит $Q_{\text{ср}}$ соответствующего водозабора.

Уже отмечалось, что если в естественных условиях подземные воды расходуются на испарение и это испарение в процессе эксплуатации уменьшится или вообще прекратится, то ущерб речному стоку и его суммарные потери соответственно уменьшатся.

Если расход подземных вод на испарение сокращается (ΔE) в течение времени, несопоставимо малого по сравнению со временем, на которое ведется расчет ущерба речному стоку или его суммарных потерь, величина их приближенно может быть определена по соответствующим приведенным зависимостям, в кото-

рых вместо величины водоотбора Q подставляется разность $Q - \Delta E$.

Следует отметить, что, строго говоря, все приведенные зависимости получены для условий совершенной связи поверхностных и подземных вод. Если эта связь затруднена вследствие фильтрационной неоднородности и закольматированности русловых отложений, задача оценки ущерба речному стоку и определения его суммарных потерь при эксплуатации подземных вод оказывается более сложной и здесь подробно не рассматривается. Отметим лишь, что расчеты по приведенным зависимостям, не учитывающим несовершенство связи подземных и поверхностных вод, как правило, несколько преувеличивают величину ущерба и суммарных потерь речного стока.

Для суждения о масштабах влияния эксплуатации подземных вод, дренируемых речной сетью в пределах балансового района, на речной сток представляется целесообразным выполнить ориентировочные расчеты по приведенным зависимостям для одиночного водозабора и для условий равномерной площадной эксплуатации подземных вод.

Допустим, что водозабор располагается в междуречье и эксплуатирует безнапорный водоносный горизонт, характеризующийся весьма широким распространением и высокими фильтрационными свойствами, которые не претерпевают существенных изменений при переходе к речной долине, где аллювиальные отложения обладают такой же водопроницаемостью и водоотдачей, и содержащиеся в них воды гидравлически тесно связаны с рекой. В этих условиях ущерб речному стоку от работы рассматриваемого водозабора, который вследствие удаленности от реки допустимо рассматривать как одиночный, можно приближенно определить по зависимости (IX.1) или по кривой I на рис. 6.

Принимая, например, расстояние до реки равным 10 км, а коэффициент урвнепроводности эксплуатируемого горизонта $10\ 000\ м^2/сут$, можно видеть, что ущерб речному стоку в этом случае составит около 25% расхода водозабора только по истечении 10 лет с начала его эксплуатации; только через 30 лет величина ущерба возрастет до 50% расхода водозабора.

Если связь эксплуатируемого горизонта с аллювиальными отложениями затруднена или последние обладают сравнительно худшими фильтрационными свойствами, ущерб речному стоку под влиянием работы водозабора будет еще меньшим.

Этот приведенный пример показывает, что эксплуатация безнапорных подземных вод водозабором, находящимся на расстоянии 20—25 км от реки, практически не вызовет уменьшения ее расхода за все расчетное время работы. Суммарные потери речного стока для этих условий составят через 10 лет лишь 12% суммарного водоотбора в течение этого времени, а 50% они достигнут только через 85 лет.

Если эксплуатируемый водоносный горизонт — артезианский, то влияние эксплуатации на речной сток может сказаться скорее, так как коэффициент пьезопроводности может быть значительно выше, чем коэффициент внедренности грунтовых вод.

В большинстве случаев артезианские горизонты дренируются реками путем фильтрации через весьма слабо проницаемую кровлю артезианского горизонта, поэтому влияние эксплуатации артезианских вод на речной сток может оказаться меньше влияния эксплуатации грунтовых вод, если водоупорная кровля не прорезана древними переуглубленными долинами, выполненными хорошо фильтрующими рыхлыми отложениями.

Для тех же природных условий, где ширина полосы между рекой и водораздельной линией, по которой может проходить граница балансового района, равна 25 км, ущерб речному стоку при равномерной площадной эксплуатации подземных вод, подсчитанный по зависимости (IX.3), составит через 10 лет эксплуатации лишь 26—27% перспективных эксплуатационных ресурсов и лишь через 40 лет ущерб возрастет до 50%.

Отношение суммарных потерь речного стока к суммарному водоотбору за все время эксплуатации будет еще меньшим. Так, в первые 10 лет эксплуатации величина суммарных потерь не превысит 20% суммарного водоотбора, а 50% она достигнет лишь после 100 лет эксплуатации.

Все изложенное относилось к вопросам методики учета подземных вод в водохозяйственных балансах. Приведенные зависимости (IX.1) и (IX.3) и соответствующие им графики (см. рис. 6) позволяют определять величину ущерба речному стоку, которую следует вычесть из суммы ресурсов поверхностных и подземных вод, чтобы оценить общие водные ресурсы при составлении водохозяйственных балансов.

Однако весьма часто ставятся задачи оценки возможного сокращения речного стока при эксплуатации подземных вод с учетом безвозвратных потерь и обратного сброса после очистки воды в реку (например, для решения вопроса о сохранении стока, необходимого по санитарным соображениям, и т. д.). В этих случаях должно учитываться, что часть отобранных в процессе эксплуатации подземных вод после использования и соответствующей очистки сбрасывается в реки. Если принять отношение безвозвратных потерь при использовании подземных вод к суммарному их отбору равным β , то сокращение речного стока при эксплуатации подземных вод может быть определено в соответствии с зависимостями (IX.1) и (IX.3) и с учетом возможного сокращения испарения подземных вод из выражений

$$Q'_{\text{ущ}} = (Q - \Delta E) \operatorname{erfc} \left(\frac{d}{2 \sqrt{at}} \right) - Q(1 - \beta), \quad (\text{IX.6})$$

$$Q'_{\text{ущ. сум}} = (Q_{\text{пр}} - \Delta E) \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2 \sqrt{at}} \right) + \frac{2 \sqrt{at}}{Z \sqrt{\pi}} \left(1 - l^{\frac{-Z^2}{4at}} \right) \right] - Q(1 - \beta). \quad (\text{IX.7})$$

Можно видеть, что в значительном числе случаев обратный сброс использованных подземных вод не только компенсирует сокращение речного стока, но может привести к его увеличению в первые годы эксплуатации подземных вод. В каждом конкретном случае это будет определяться величиной отношения β и местоположением пунктов обратного сброса использованных вод.

Для решения перечисленных задач как в части учета подземных вод в водохозяйственных балансах, так и в случаях, когда требуется вообще оценить, какой расход сохранится в реке при эксплуатации подземных вод, в каждом конкретном районе требуется провести соответствующие гидрогеологические исследования. Для определения расчетных параметров нужно собрать материалы о действующих в районе водозаборах, режиме их работы, времени ввода в эксплуатацию. При этом особое внимание обращается на оценку связи подземных вод с реками, на размещение водозаборов по отношению к речным долинам. Необходимо располагать сведениями о гидрологическом режиме рек и режиме уровня подземных вод в районе, о расходе подземных вод на испарение. Важно учесть принимаемые в схеме размеры безвозвратных потерь и объем сброса очищенных сточных вод. Все это позволит выделить и оценить приходные и расходные статьи баланса поверхностного стока.

Следует отметить, что приведенные аналитические зависимости получены для весьма схематизированных и простых условий. Реальные природные условия значительно сложнее. Поэтому расчеты по этим зависимостям, как правило, лишь ориентировочные. В ряде случаев, когда требуется (и имеются для этого достаточные данные) более точная оценка ущерба речному стоку при эксплуатации подземных вод, учитывая сложные гидрологические условия, этот прогноз целесообразно выполнять моделированием.

ЛИТЕРАТУРА

- Абрамов С. К., Биндеман Н. Н., Бочеввер Ф. М., Веригин Н. Н. Влияние водохранилищ на гидрогеологические условия прилегающих территорий. М., Госстройиздат, 1960.
- Апельцин И. Э., Клячко В. А. Опреснение воды. М., Стройиздат, 1968.
- Аравин В. И., Нумеров С. Н. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений. М., Госстройиздат, 1955.
- Бабушкин В. Д., Плотников В. С., Лосев Ф. И. Прогноз режима подземных вод на территории КМА при разработке месторождений и эксплуатации водозаборов. Серия 86. М., Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1967.
- Биндеман Н. Н. Гидрогеологические расчеты подпора грунтовых вод и фильтрации из водохранилищ. М., Углетехиздат, 1951.
- Биндеман Н. Н. К определению расхода грунтовых вод в аллювиальных отложениях.— Советская геология, 1960, № 6.
- Биндеман Н. Н. Об эксплуатационных ресурсах пресных подземных вод СССР и перспективах их использования.— Водные ресурсы, 1972, № 3.
- Биндеман Н. Н., Бочеввер Ф. М. Региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод.— Советская геология, 1964, № 1.
- Биндеман Н. Н., Никитин М. Р., Фаренгольц З. Д. Об учете прогнозного коэффициента использования подземных вод при региональной оценке их эксплуатационных ресурсов.— Водные ресурсы, 1973, № 1.
- Биндеман Н. Н., Язвин Л. С. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М., «Недра», 1970.
- Боревский В. В., Язвин Л. С. Методические рекомендации по перспективной оценке эксплуатационных запасов подземных вод в слабоизученных районах (в основном по категории С₂). М., ВСЕГИНГЕО, 1971.
- Борисов Ю. П. Определение дебита скважин при совместной работе нескольких рядов скважин.— Труды ВНИИ им. Губкина, 1951, вып. 11.
- Бочеввер Ф. М. О классификации запасов подземных вод.— Советская геология, 1957, № 62.
- Бочеввер Ф. М. Расчеты эксплуатационных запасов подземных вод. М., «Недра», 1968.
- Бочеввер Ф. М., Веригин Н. Н. Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. М., Госстройиздат, 1961.
- Бочеввер Ф. М., Орадовская А. Е. Гидрогеологическое обоснование защиты подземных вод и водозаборов от загрязнения. М., «Недра», 1973.
- Брукс К., Карузерс Н. Применение статистических методов в метеорологии. Л., Гидрометеозиздат, 1963.
- Венцель Е. С. Теория вероятностей. М., «Наука», 1969.
- Веригин Н. Н. Фильтрация в обход плотины и эффективность завес.— Гидротехническое строительство, 1947, № 5.
- Всеволожский В. А. Ресурсы подземных вод южной части Западно-Сибирской низменности. М., «Наука», 1973.
- Гавич И. К. Принципы и методы моделирования при оценке эксплуатационных запасов подземных вод. Серия гидрогеол. и инж. геол., № 14,6. М., Изд-во ОНТИ ВИЭМС, 1970.
- Гидрогеология СССР. Т. 1. М., «Недра», 1966.

- Голубков Б. Н., Федоров К. В., Фролов П. М. Получение пресной воды с использованием термальных вод.— В сб.: Методы изучения воды и использование водных ресурсов. М., «Недра», 1964.
- Григорьев В. М. Теоретические основы расчета инфильтрационных водозаборов с учетом заиления речных русел.— Водоснабжение и сантехника, 1960, № 6.
- Григорьев В. М. Зарубежный опыт искусственного пополнения запасов подземных вод.— Труды ВОДГЕО, 1964, вып. 9.
- Джамалов Р. Г. Подземный сток Терско-Кумского артезианского бассейна. М., «Наука», 1973.
- Дугинов В. И., Коробейников В. А. Многолетние колебания уровня грунтовых вод Каменной степи и их связь с метеорологическими элементами.— Разведка и охрана недр, 1957, № 8.
- Дунин-Барковский Л. В., Смирнов Н. В. Теория вероятностей и математическая статистика в технике. М., Техиздат, 1955.
- Жернов И. Е., Шестаков В. М. Моделирование фильтрации подземных вод. М., «Недра», 1971.
- Зекцер И. С. Естественные ресурсы пресных подземных вод Прибалтики. М., «Недра», 1968.
- Зекцер И. С., Куделин Б. И., Попов О. В. Изучение ресурсов подземных вод СССР.— Водные ресурсы, 1972, № 1.
- Зеленин И. В. Естественные ресурсы подземных вод Молдавии. Кишинев, Изд-во ШТИИИИЦА, 1972.
- Инструкция по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод. М., Госгеолтехиздат, 1962.
- Кайса Ч. Анализ временных рядов гидрологических данных. Л., Гидрометеоздат, 1972.
- Каменский Г. П. Лиманы северной части Прикаспийской низменности как аккумуляторы пресных вод.— Изв. вузов, серия Геология и разведка, 1958, № 10.
- Карта модулей эксплуатационных ресурсов пресных и солоноватых вод СССР. М-6 1 : 5 000 000. М., ГУГК, 1965.
- Карта подземного стока СССР в процентах от общего речного стока и коэффициентов подземного стока в процентах от осадков. М-6 1 : 5 000 000. М., ГУГК, 1965а.
- Карта подземного стока СССР (зона интенсивного водообмена). М-6 1 : 5 000 000. М., ГУГК, 1965б.
- Кац Д. М. Контроль режима грунтовых вод на орошаемых землях. М., «Колос», 1967.
- Кийко Е. П., Просенкова Н. И., Старовойт Р. Д. Методические указания по оценке естественных ресурсов подземных вод зоны интенсивного водообмена при гидрогеологических съемках масштаба 1 : 200 000 и 1 : 500 000. М., ГУГК, 1969.
- Клячко В. А. Перспективы увеличения ресурсов пресных вод за счет опреснения соленых вод.— Водные ресурсы, 1972, № 1.
- Ковалевский В. С. Методы оценки размеров питания подземных вод по одиночным скважинам.— В сб.: Вопросы изучения и анализа режима подземных вод, вып. 2. М., Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1967.
- Ковалевский В. С. Долгосрочные прогнозы естественного режима грунтовых вод. М., Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1972.
- Ковалевский В. С. Закономерности многолетних естественных колебаний уровней подземных вод.— Водные ресурсы, 1973а, № 1.
- Ковалевский В. С. Условия формирования и прогнозы естественного режима подземных вод. М., «Недра», 1973б.
- Ковалевский В. С. Основы прогнозов естественного режима подземных вод. М., Стройиздат, 1973в.
- Коляда М. Н. Влияние граничных условий на значение обобщенного коэффициента пьезопроводности для различных расчетных схем.— В сб.: Вопросы оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод. Труды ВСЕГИНГЕО, 1970, вып. 32.

- Коноплянцев А. А.* Применение методов математической статистики для анализа и прогноза режима уровня подземных вод. Серия № 79. М., Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1967. (Ротапринт).
- Коноплянцев А. А.* Вековые и многолетние колебания уровня грунтовых вод на территории СССР.— В сб.: Вопросы изучения и прогноза режима подземных вод, серия № 127. М., Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1970. (Ротапринт).
- Коноплянцев А. А., Ковалевский В. С., Семенов С. М.* Естественный режим подземных вод и его закономерности. М., Госгеолтехиздат, 1963.
- Коробейников В. А.* Циклические многолетние изменения уровня грунтовых вод и природных процессов.— Разведка и охрана недр, 1965, № 1.
- Костяков А. Н., Фаворин Н. Н., Аверьянов С. Ф.* Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод. М., Изд-во АН СССР, 1956.
- Крашин И. И., Пересунько Д. И., Плотников В. С.* Моделирование для целей прогнозной оценки эксплуатационных запасов подземных вод и оптимальной схемы расположения водозаборов в пределах центральной части Московского артезианского бассейна.— Материалы 3-го семинара по применению моделирования и математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., ВСЕГИНГЕО, 1970.
- Крицкий С. Н., Менкель М. Ф.* Гидрологические основы речной гидротехники. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1950.
- Крицкий С. Н., Менкель М. Ф.* Методические основы построения водохозяйственных балансов.— Труды Гидропроекта. М.—Л., «Энергия», 1964.
- Куделин Б. И.* Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. Изд-во МГУ, 1960.
- Куделин Б. И., Всеволожский В. А., Богданова Л. П., Долгопалов В. В., Кернова В. П., Фиделли И. Ф.* Оценка естественных ресурсов подземных вод при среднемасштабном гидрогеологическом картировании в складчатых областях.— Тезисы докл. IV научн. отчетной конф. геол. ф-та МГУ. Изд-во МГУ, 1969.
- Лебедева Н. А.* Естественные ресурсы подземных вод Московского артезианского бассейна. М., «Наука», 1972.
- Лялюк В. И., Шнейдерман Г. А.* Формирование и прогноз ресурсов подземных вод засушливых районов. Киев, «Наукова думка», 1965.
- Методическое руководство по изучению режима подземных вод. М., Госгеолтехиздат, 1954.
- Минкин Е. Л.* Исследования и прогнозные расчеты для охраны подземных вод. М., «Недра», 1972а.
- Минкин Е. Л.* К методике учета подземных вод в водохозяйственных балансах.— Гидротехническое строительство, 1972б, № 8.
- Минкин Е. Л.* Взаимосвязь подземных и поверхностных вод и ее значение при решении некоторых гидрогеологических и водохозяйственных задач. М., Стройиздат, 1973.
- Минкин Е. Л., Зильберштейн Б. М.* Учет характера связи подземных вод с поверхностными и режима речного стока при расчетах инфильтрационных водозаборов.— Водные ресурсы, 1973, № 1.
- Минкин Е. Л., Никитин М. Р., Санин М. В., Цыганова К. Н.* Об остаточных рассолах при опреснении соленых подземных вод.— Водные ресурсы, 1974, № 2.
- Мягков А. Н.* Напорный комплекс подземных вод и колодцы.— Изв. АН СССР, 1947, № 9.
- Никитин М. Р.* Методическое указание по составлению карт основных горизонтов подземных вод повышенной минерализации. М., Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1967.
- Никитин М. Р.* О роли временного поверхностного стока в возобновлении запасов соленых грунтовых вод Прикаспийской низменности.— В сб.: Вопросы оценки взаимосвязи поверхностных и подземных вод и качества воды. Изд-во МГУ, 1972а.

- Никитин М. Р.* Солоноватые и соленые подземные воды как составляющая общих водных ресурсов Советского Союза и задачи их изучения.— В сб.: Подземный сток и методы его исследования. М., «Наука», 1972б.
- Никитин М. Р.* Некоторые вопросы формирования ресурсов подземных вод повышенной минерализации в связи с оценкой перспектив их практического использования.— В сб.: Вопросы гидрогеохимии, вып. 63. М., Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1973а.
- Никитин М. Р.* О количественном гидрогеологическом картировании в связи с повышением информативности гидрогеологических карт.— Разведка и охрана недр, 1973б, № 7.
- Никитин М. Р., Цыганова К. Н.* Перспективы использования соленых подземных вод для водоснабжения южных районов СССР и методы их картирования.— Разведка и охрана недр, 1972, № 8.
- Никитин М. Р., Цыганова К. Н.* Региональная оценка эксплуатационных ресурсов соленоватых и соленых подземных вод.— Водные ресурсы, 1973, № 2.
- Паповский Г. А., Брайер Г. В.* Статистические методы в метеорологии. Л., Гидрометеониздат, 1972.
- Пашковский И. С.* Оценка эксплуатационных запасов с применением моделирования на примере Тахта-Купырского артезианского бассейна.— В сб.: Применение вычислительной техники при гидрогеологических исследованиях. М., «Недра», 1969.
- Подземный сток на территории СССР. Изд-во МГУ, 1966.
- Поиски и разведка подземных вод для крупного водоснабжения, М., «Недра», 1969.
- Руководство по изучению режима и баланса подземных вод в речных бассейнах Международного гидрологического десятилетия, серия № 91. М., Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1968. (Ротапринт).
- Санин М. В., Никитин М. Р.* Некоторые аспекты проблемы опреснения подземных вод.— Водные ресурсы, 1973, № 4.
- Сборкина С. М.* О долгосрочном прогнозе гидрогеологических процессов методами теории стационарных случайных функций.— В сб.: Применение математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. Серия № 153. М., Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1970. (Ротапринт).
- Слесаренко В. Н.* Современные методы опреснения морских и соленых вод. М., «Энергия», 1973.
- Турчинович В. Т.* Методика составления водохозяйственного баланса.— В кн.: Исследование поверхностного и подземного стока. М., «Наука», 1967.
- Филимонов В. Д., Шестаков В. М.* Учет гидродинамического несовершенства каналов и дрен при моделировании.— Труды координационного совещания по фильтрации. М., Госэнергоиздат, 1964.
- Хантуш М. С.* Скважины вблизи рек со слабопроницаемым ложем.— В сб.: Переводы статей по гидрогеологии и инженерной геологии, вып. 8. М., Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1968. (Ротапринт).
- Хордикайнен М. А.* Об искусственном восполнении запасов подземных вод и районировании территории СССР по условиям его применения.— Водные ресурсы, 1974, № 1.
- Шестаков В. М.* Основы гидрогеологических расчетов при фильтрации из хранилищ промышленных стоков.— Труды ВОДГЕО, 1961.
- Шестаков В. М.* Оценка сопротивления ложа водоемов при гидрогеологических расчетах.— Разведка и охрана недр, 1964, № 5.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава первая	
Основные вопросы региональной оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод	5
Понятие о видах запасов и ресурсов подземных вод	5
Основные положения методики региональной оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод. <i>Н. Н. Виндеман, Л. С. Язвин</i>	8
Глава вторая	
Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. <i>И. С. Зекцер</i>	20
Глава третья	
Учет естественного режима подземных вод при перспективном планировании их использования	29
Составление временных прогнозов	33
Составление вероятностных невременных прогнозов. <i>В. С. Ковалевский</i>	41
Глава четвертая	
Подземные воды платформенных областей	49
Артезианские воды	49
Грунтовые воды	63
Особенности оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод небольших ограниченных структур. <i>Н. Н. Виндеман, Л. С. Язвин, В. В. Бореский</i>	66
Глава пятая	
Подземные воды речных долин	71
Особенности гидрогеологических условий речных долин	71
Оценка производительности водозаборов в долинах группы «А»	76
Оценка производительности водозаборов в долинах группы «Б»	80
Оценка потенциальных и перспективных эксплуатационных ресурсов подземных вод в речных долинах. <i>Е. Л. Минкин</i>	82
Глава шестая	
Подземные воды пролювиальных шлейфов и конусов выноса. <i>Н. Н. Виндеман, З. Д. Фаренгольц</i>	86

Глава седьмая	
Солоноватые и соленые подземные воды, <i>М. Р. Никитин</i>	95
Глава восьмая	
Формирование искусственных ресурсов и запасов подземных вод . . .	107
Влияние инженерных мероприятий, направленных на усиление питания подземных вод и восполнение их запасов	107
Влияние водохранилищ и орошения на формирование запасов и ресурсов подземных вод, <i>Н. Н. Виндеман</i>	111
Глава девятая	
Влияние эксплуатации подземных вод на речной сток, <i>Е. Л. Минкин</i>	121
Литература	131

Региональная оценка ресурсов подземных вод

Утверждено к печати Институтом водных проблем АН СССР

Редактор издательства Э. Б. Травицкая
 Художник Н. Н. Власик
 Художественный редактор С. А. Литвак
 Технический редактор Т. Д. Панасюк
 Корректоры Т. В. Гурьева, Л. Ю. Розенберг

Сдано в набор 26/VI-1975 г. Подписано к печати 22/X-1975 г.
 Формат 60×90^{1/16} Бумага № 2. Усл. печ. л. 8,5. Уч.-изд. л. 9,2
 Тираж 1400. Тип. зак. 2522. Цена 62 коп. Т-16365

Издательство «Наука». 103717 ГСП, Москва К-62, Подсосенский пер., 21
 2-я типография издательства «Наука». 121099, Москва Г-99, Шубинский пер., 10

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
37	15 сл.	$n = \tau$	$n - \tau$
93	Табл. 5, гр. 1 слева	радикальный	радиальный
116	3 сл.	(Z)	(L)
116	Формула (VIII 4)	Z^2	L^2

Региональная оценка ресурсов подземных вод

62 КОП.

6825-15

1562

8