Библиотека СОК

**А.Е.Орадовская**
**Н.Н.Лапшин**

# САНИТАРНАЯ ОХРАНА ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

**УДК 614.777**

**Орадовская А. Е., Лапшин Н. Н.** Санитарная охрана водозаборов подземных вод. — М.: Недра, 1987. — 167 с., с ил.

Обобщены результаты исследований, проведенных в СССР и за рубежом за последние десять лет для гидрогеологического и санитарно-гигиенического обоснования и проектирования зон санитарной охраны подземных вод и водозаборов. Описаны водоносные горизонты и их связь с поверхностными водами. Объяснены причины ухудшения качества подземных вод при их эксплуатации. Дана оценка защищенности подземных вод от загрязнения. Освещены мероприятия по санитарной охране. Рассмотрены методы расчета зон санитарной охраны для водозаборов в различных гидрогеологических условиях.

Для, гидрогеологов и работников санитарно-эпидемиологической службы.

Табл. 15, ил. 44, список лит. — 45 назв.

Рецензент: *В. М. Гольдберг,* д-р геол.-минер. наук (Всесоюзный научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии)

*Издательство «Недра», 1987*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Охрана источников питьевого водоснабжения от загрязнения и истощения всегда являлась актуальной проблемой. Однако в последнее время, характеризующееся бурным развитием всех отраслей промышленности и сельского хозяйства, она становится еще более актуальной и вместе с тем гораздо более сложной. Это объясняется как увеличением числа потенциальных источников загрязнения, так и появлением новых видов загрязнителей.

Как известно, для хозяйственно-питьевого водоснабжения используются поверхностные и подземные воды, причем приоритетным источником являются подземные воды, обладающие, по сравнению с поверхностными, более высоким качеством и стабильностью. Вместе с тем, по сравнению с поверхностными, охрана подземных вод от загрязнения представляет собой гораздо более сложную задачу, что связано с необходимостью не столько заранее обнаружить, сколько своевременно предупредить возможность поступления загрязнителя в водоносный пласт. В противном случае загрязнение подземных вод обнаруживается с запозданием и ликвидация его становится делом сложным, дорогостоящим, а порой и просто невозможным. Поэтому охрана водозаборов подземных вод должна предусматривать разнообразные профилактические и другие защитные мероприятия, в числе которых организация зон санитарной охраны водозаборов — важный, хотя и не единственный элемент.

Авторы сделали попытку комплексно рассмотреть вопросы, связанные с охраной подземных вод от загрязнения, и дать гидрогеологическое обоснование выделения зон санитарной охраны водозаборов подземных вод. При этом учтены большой опыт советских исследователей и зарубежные публикации по данному вопросу, использованы новые теоретические разработки и натурные исследования авторов.

Авторы выражают благодарность А. В. Ефремовой, Т. М. Куликовой и В. Н. Львовой за помощь, оказанную при подготовке рукописи к печати.

Главы 1 — 8, 9 и 11 написаны А. Е. Орадовской, глава 10 — Н. Н. Лапшиным и Э. М. Хохлатовым.

# ГЛАВА 1. ОХРАНА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СССР

В нашей стране после Великой Октябрьской социалистической революции все природные богатства, в том числе и воды, были национализированы. Принципы социалистического отношения к природе наиболее полно отражены в Конституции СССР, провозгласившей необходимость принятия мер для охраны и научно обоснованного рационального использования земли, ее недр, водных ресурсов, растительного и животного мира, а также для сохранения в чистоте атмосферного воздуха. Возможность осуществления в СССР крупномасштабных мероприятий, направленных на охрану окружающей среды, основана на успехах нашей страны в области экономики. Научная система рационального природопользования постоянно совершенствуется и внедряется во все отрасли народного хозяйства в соответствии с государственными планами экономического и социального развития.

Эффективное научно обоснованное использование природных вод в СССР для нужд населения и народного

хозяйства, их охрана от загрязнения, засорения и истощения определены советским водным законодательством. В «Основах водного законодательства Союза ССР и союзных республик», утвержденных Верховным Советом СССР 10 декабря 1970 г., даны основные положения по регулированию водных отношений, государственному управлению в области использования и охраны вод, контролю за их использованием, а также рассмотрены вопросы охраны вод от загрязнения, засорения и истощения, государственного учета и планирования использования вод. Использование любых водных объектов предусматривается в первую очередь для удовлетворения питьевых и бытовых нужд населения и лишь затем для других целей — лечебных, курортных, оздоровительных, сельскохозяйственных, промышленных, энергетических, транспортных, рыбохозяйственных и других государственных и общественных потребностей. Что касается подземных вод питьевого качества, то их использование для нужд, не связанных с питьевым и бытовым водоснабжением, как правило, не допускается.

В каждой союзной республике действуют водные кодексы, в которых изложены юридические нормы, направленные на рациональное использование и охрану водных ресурсов.

В соответствии с Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР «Об усилении охраны природы и улучшении использования природных ресурсов» (декабрь 1972 г.) определен порядок осуществления охраны подземных вод от загрязнения и истощения и контроля за их охраной на территории СССР.

Охраной подземных вод занимаются предприятия, организации и учреждения, деятельность которых влияет на состояние этих вод. Государственный контроль за использованием и охраной подземных вод осуществляется исполнительными и распорядительными органами Советов народных депутатов, а также специально уполномоченными на это государственными органами в порядке, устанавливаемом законодательством СССР. Контроль за охраной подземных вод от истощения и загрязнения осуществляется Министерством геологии СССР.

Охрана подземных вод — это система мер, направленных на предотвращение и устранение последствий загрязнения и истощения вод; при этом ставится цель сохранить такое качество и количество вод, которое позволяет использовать их в народном хозяйстве. Основными объектами охраны являются эксплуатируемые водоносные горизонты и водозаборы хозяйственно-питьевого назначения.

При решении сложных комплексных проблем охраны природы возникает необходимость в оценке состояния природной среды и источников наиболее опасного воздействия на нее. Для оценки состояния среды используются нормы (стандарты) ее качества и допустимых воздействий на нее.

Качество водных ресурсов, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения, определяется показателями химического и бактериального состава, а также органолептических свойств. Норма допустимых воздействий оценивается предельно допустимыми концентрациями (ПДК) вредных веществ, значения которых устанавливаются санитарными органами. За ПДК принимаются максимальные не действующие на здоровье человека концентрации вещества в воде, выявленные при экспериментальных исследованиях с учетом возможных отдаленных последствий длительного влияния нормируемых веществ. Список ПДК уже включает около 1000 различных веществ — возможных загрязнителей воды, входящих в состав промышленных и коммунальных стоков, сельскохозяйственных ядохимикатов и удобрений, нефтепродуктов и т. п. Значения ПДК в настоящее время являются основным критерием, определяющим допустимость сбросов того или иного количества сточных вод в водоемы и в водоносные горизонты, необходимость устройства очистных сооружений, проведения защитных мероприятий и т. д.

Большое значение для охраны подземных вод имеет охрана поверхностных вод, которые являются одним из основных источников питания водоносных горизонтов. «Правила охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами» утверждены в 1974 г. министерствами здравоохранения, мелиорации и водного хозяйства, рыбного хозяйства СССР. В 1982 г. Главным государственным санитарным врачом СССР было утверждено «Положение о порядке проектирования и эксплуатации зон санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно-питьевого назначения» [24], в котором даны основные принципы выделения зон санитарной охраны водозаборов подземных вод и определены санитарно-защитные мероприятия в их пределах. ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР разработаны рекомендации по гидрогеологическим расчетам для обоснования размеров зон санитарной охраны водозаборов подземных вод [13]. Организация зон санитарной охраны (ЗСО) водозаборов подземных вод регламентирована также в СНиП 2.04.02 — 84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения».

Следует отметить, что законы об организации зон санитарной охраны подземных источников водоснабжения были приняты в разных странах лишь в 1930 — 40-е гг. текущего столетия. В СССР первое положение об обязательном проектировании ЗСО было утверждено Всесоюзной Государственной санитарной инспекцией в 1938 г., а инструкция по установлению ЗСО — в 1956 г. В этих документах в составе ЗСО предусматривались два пояса: первый — пояс строгого режима, второй — пояс ограничений. Размеры второго пояса не были регламентированы.

В 1950 — 60-е гг. вопросы методики обоснования размеров поясов ЗСО подземных источников водоснабжения рассматривались в работах Н. Ф. Гуляева, А. С. Белицкого, Е. В. Салтыкова, В. И. Владимирского, а за рубежом — в работах Д. Чока, Р. Трофина и др. Среди современных зарубежных исследователей, занимающихся проблемами гидрогеологического обоснования границ ЗСО, следует назвать Дж. Браунса, Х. Вейгениша, Х. Экслера, В. Левиса, С. Фостера, Г. Рида и др. Судя по публикациям этих авторов, в различных странах еще не выработан общий подход как к числу выделяемых в составе ЗСО поясов

(два или три), так и к их назначению, принципам выделения и методам определения размеров.

В СССР вопросы использования теории фильтрации для разработки аналитических методов расчета второго пояса ЗСО впервые наиболее полно рассмотрены Е. Л. Минкиным в работе «Гидрогеологические расчеты для выделения зон санитарной охраны водозаборов подземных вод». При этом были предложены методы расчета ЗСО для случаев фильтрации к одиночному водозабору, двум равнодебитным взаимодействующим, линейному водозабору в неограниченном водоносном горизонте или вблизи реки при направлении естественного потока подземных вод к реке или от нее.

Применяющиеся для расчета границ поясов ЗСО аналитические зависимости, связывающие время движения к водозабору частиц воды от точек с заданными координатами, используются и для решения других проблем, связанных с изучением движения подземных вод, например для прогноза качества воды в водозаборах, обоснования защиты водозаборов от загрязнения и т. п. Поэтому на развитие методики аналитических расчетов ЗСО применительно к разнообразным гидрогеологическим условиям большое влияние оказали работы [1, 3, 5, 11, 12] и др. Используя результаты указанных выше исследований, а также собственные новые проработки, в рекомендациях [13] ив главах 9 и 10 настоящей книги авторы представили аналитические и другие методы расчета границ второго и третьего поясов ЗСО для наиболее распространенных расчетных схем фильтрации применительно к обобщенной (прямоугольной) форме площади ЗСО и составляющих ее поясов.

# Г Л А В А 2.
# ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Многочисленными наблюдениями и исследованиями давно установлена роль питьевой воды в распространении инфекционных кишечных (холера, брюшной тиф, дизентерия), кишечных вирусных (инфекционный гепатит, аденовирусные заболевания, полиомиелит) и других заболеваний. Большое влияние на организм человека оказывает также химический состав воды — солевой и микроэлементный. Некоторые компоненты даже в малых количествах ухудшают вкус и запах воды, а в больших — могут оказывать вредное действие на здоровье. В связи с этим разработаны гигиенические нормативы качества воды, используемой для хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Для определения норм безвредности воды по ее химическому составу проводятся специальные исследования, заключающиеся в санитарно-токсикологических экспериментах на лабораторных животных. Выявленная при этом опасная доза того или иного вещества, выраженная в миллиграммах на 1 кг массы животного, затем пересчитывается на предельно допустимую концентрацию (ПДК), выраженную в миллиграммах вещества в 1 $дм^3$ воды. При этом условно исходят из средних показателей массы человека (60 кг) и суточного потребления воды (3 л).

Первый в Европе стандарт качества питьевой воды был разработан в СССР в 1937 г. Стандартизация качества питьевой воды — одно из важнейших профилактических мероприятий советского здравоохранения, которое нашло отражение в «Основах законодательства Союза ССР и Союзных республик о здравоохранении» (1969г.).

В хозяйственно-питьевом и промышленном водоснабжении используются пресные (сухой остаток до 1 $г/дм^3$) и солоноватые (1 — 5 $г/дм^3$) подземные воды.

Для производственного водоснабжения применение пресных подземных вод допускается с разрешения органов по регулированию использования и охране вод только в районах, где отсутствуют необходимые поверхностные водные источники и имеются достаточные запасы подземных вод питьевого качества. Требования к качеству подземных вод для производственного водоснабжения устанавливаются водопотребляющими или проектными организациями для каждого конкретного случая с учетом специфических особенностей применения вод по данному назначению.

В хозяйственно-питьевом водоснабжении используются только пресные подземные воды, но в отдельных случаях по согласованию с органами санитарно-эпидемиологической службы допускается использование подземных вод с минерализацией до 1,5 $г/дм^3$. Требования к качеству питьевой подземной воды, подаваемой централизованными хозяйственно-питьевыми системами водоснабжения, а также используемой одновременно для питьевых, хозяйственных, технических и коммунально-бытовых целей, регламентируются государственным стандартом ГОСТ 2874 — 82 «Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством».

В случае несоответствия качества подземной воды требованиям этого ГОСТа должны быть проведены мероприятия по улучшению ее качества (умягчение, обезжелезивание, обеззараживание, обесфторивание и др.) согласно СНиП 2.04.02 — 84.

Качество воды хозяйственно-питьевого назначения должно удовлетворять гигиеническим нормам, предусматривающим безопасность воды в эпидемическом отношении, безвредность химического состава и благоприятные органолептические свойства. Соответственно этому государственным стандартом установлены

показатели качества воды: 1) микробиологические; 2) содержания токсических химических веществ; 3) органолептические.

Безопасная в эпидемическом отношении вода не должна содержать болезнетворных бактерий и вирусов. Обычно используются косвенные микробиологические показатели безвредности воды, характеризующие степень общего загрязнения воды микроорганизмами и содержание микроорганизмов группы кишечной палочки. Общее число микроорганизмов в 1 $дм^3$ неразбавленной воды не должно превышать 100, а число санитарно-по-казательных микроорганизмов группы кишечной палочки не должно превышать трех в 1 $дм^3$ воды (коли-индекс <3). Соответственно этому объем воды, в котором обнаружен один микроорганизм группы кишечной палочки, должен быть не менее 300 $см^3$ (коли-титр не менее 300). В отдельных случаях, когда имеются опасения в отношении бактериального загрязнения подземных вод, кроме указанных косвенных микробиологических показателей, дополнительно определяют содержание болезнетворных бактерий, кишечных вирусов, яиц гельминтов. Токсические химические вещества и вещества, ухудшающие органолептические свойства (запах, привкус, цветность), встречаются в природных подземных водах, но, кроме того, могут появиться в воде при обработке ее реагентами или поступить в водоносный горизонт в результате загрязнения сточными водами и отходами.

Допустимые концентрации (в мг/$дм^3$) токсических химических веществ, преимущественно встречающихся в природных водах или добавляемых к воде в процессе ее обработки, не должны превышать нормативов, содержащихся в ГОСТ 2874 — 82 и приведенных ниже:

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Алюминий остаточный ($A1^3+$)** | **0,5** | **Свинец ($РЬ^2+$)** | **0,03** |
| **Бериллий ($Be^{2+}$)** | **0,0002** | **Селен ($Se^6+$)** | **0,001** |
| **Молибден ($Mo^{2+}$)** | **0,25** | **Стронций ($Sr^2+$)** | **7,0** |
| **Мышьяк ($As^{3+}$; $As^{5+}$)** | **0,05** | **Фтор (F-) I и II*** | **1,5** |
| **Нитраты (по $No_3$~)** | **45,0** | **III** | **1,2** |
| **Полиакриламид остаточный** | **2,0** | **IV** | **0.7** |

*** I — IV — климатические районы.**

Указанный диапазон содержания фтора в воде принят в связи с тем, что избыточное содержание этого элемента в воде вызывает заболевание флюорозом, а недостаточное — кариесом зубов. В зависимости от климатических условий, определяющих количество потребляемой воды, оптимальная для здоровья концентрация фтора составляет от 0,7 до 1,5 мг/$дм^3$.

Радиоактивные вещества в питьевой воде нормируются в соответствии с нормами радиационной безопасности (НРБ — 76). Допустимые концентрации (в мг/$дм^3$) химических веществ, влияющих на органолептические свойства воды, также не должны превышать нормативов ГОСТ 2874 — 82, приведенных ниже:

| | |
|---|---|
| **Сухой остаток*** | **1,0** |
| **Хлориды (С1~)** | **350** |
| **Сульфаты ($SO_4^2$~)** | **500** |
| **Железо ($Fe^2+$, $Fe^3+$)** | **0.3** |
| **Марганец ($Мп^{2+}$)** | **0,1** |
| **Медь ($Си^2+$)** | **1** |
| **Цинк ($Zn^2+$)** | **5** |
| **Полифосфаты остаточные ($P0_4^3$-)** | **3,5** |
| **Общая жесткость** | **7** |
| **Водородный показатель pH** | **6 — 9** |

Примечания. Величина сухого остатка приведена в граммах на кубический де-циметр, общая жесткость — в миллиграммах-эквивалентах на кубический дециметр.

В отдельных случаях для водопроводов, подающих воду без специальной обработки, по согласованию с органами санитарно-эпидемиологической службы допускается увеличение содержания сухого остатка до 1,5 г/$дм^3$, общей жесткости до 10 мг-экв/$дм^3$, железа — до 1 мг/$дм^3$ и марганца — до 0,5 мг/$дм^3$.

Кроме содержания указанных выше химических веществ обязательному определению при оценке качества подземных вод подлежат показатели органолептических свойств. Требования к этим показателям следующие: запах при 20 °С и при подогревании воды до 60 °С не более чем 2 балла; привкус при 20 °С не более чем 2 балла; цветность не более чем 20 градусов; мутность не более чем 1,5 мг/$дм^3$.

В отдельных случаях по согласованию с органами санитарно-эпидемиологической службы допускается

увеличение цветности воды до 35° и мутности (в паводковый период) до 2 мг/дм$^3$.

В районах, где имеется опасность загрязнения подземных вод, дополнительно определяют содержание специфических химических веществ, характерных для технологических и сточных вод

промышленных предприятий, а также веществ, входящих в состав загрязненных поверхностных и хозяйственно-бытовых сточных вод (сельскохозяйственные удобрения, ядохимикаты и т. п.). Концентрации в воде химических веществ, не указанных выше, не должны превышать ПДК, утвержденных Министерством здравоохранения СССР для воды водоемов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования по органолептическим и санитарно-токсикологическим признакам, а также норм радиационной безопасности НРБ — 76.

При определении значений ПДК различные признаки вредного действия химических веществ (токсичность, влияние на ор-ганолептические свойства воды, изменение санитарного режима водных объектов) учитываются в комплексе, при этом нормирование ведется по лимитирующему признаку вредности.

В зависимости от токсичности, кумулятивности, способности вызывать отдаленные эффекты и лимитирующего показателя вредности выделены классы опасности вещества для человека: 1) чрезвычайно опасные, 2) высокоопасные; 3) опасные; 4) умеренно опасные. Классы опасности веществ учитываются при гидрохимических исследованиях для выбора соединений-индикаторов загрязнения воды; классы опасности определяют также очередность изучения содержания тех или иных веществ при анализах, проводимых для изучения степени загрязненности воды. Перечень ПДК утверждается Главным государственным санитарным врачом СССР.

Показатель ОБУВ (ориентировочный безопасный уровень воздействия веществ в воде) представляет собой временный гигиенический норматив, ограничивающий содержание вредных веществ в воде с целью обеспечения безопасных условий водопользования. ОБУВ применяется на стадиях испытаний малоизученных (в гигиеническом отношении) новых веществ и технологических процессов. Он утверждается на срок не более трех лет. При внедрении нового вещества в технологические процессы после соответствующего гигиенического обоснования ОБУВ должен быть заменен на ПДК. Среди 34 значений ОБУВ можно указать показатели для трихлорэтилена (0,06 мг/дм$^3$, 2-й класс), хлороформа (0,06 мг/дм$^3$, 2-й класс), четыреххло-ристого углерода (0,006 мг/дм$^3$, 1-й класс) и 1,1-дихлорэтилена (0,0006 мг/дм$^3$, 1-й класс).

При обнаружении в воде нескольких химических веществ первого-второго классов с одинаковым лимитирующим признаком вредности (санитарно-токсикологический, органолептический) сумма отношений обнаруженных концентраций в воде к их ПДК не должна быть более 1.

Как было отмечено выше, ГОСТ 2874 — 82 распространяется на питьевую воду, подаваемую централизованными хозяйственно-питьевыми системами водоснабжения и водозаборами. При де-централизованном водоснабжении за счет подземных вод, согласно Санитарным правилам по устройству и содержанию колодцев и каптажей родников, используемых для децентрализованного хозяйственно-питьевого водоснабжения, утвержденным Министерством здравоохранения СССР, вода в колодцах и каптажах должна быть прозрачной (не менее 30 см по шрифту), бесцветной (не более 30°), без привкуса и запаха (при 20 °С не более трех баллов), содержание нитратов не должно превышать 45 мг/дм$^3$, а содержание кишечных палочек в 1 дм$^3$ не должно быть более чем 10 (коли-титр не менее 100). Показателем поступления в воду загрязнений может служить также увеличение содержания в воде хлоридов, аммиака, нитритов и повышение окисляемости.

В водозаборах систем искусственного пополнения запасов подземных вод качество воды зависит от состава и свойств «сырой» воды источника пополнения и «естественной» подземной воды эксплуатируемого водоносного горизонта. Предложения по нормированию качества воды источника пополнения даны в работе [26].

В отдельности «сырая» вода и «естественная» подземная вода по составу и свойствам могут отличаться от требований ГОСТ 2874 — 82, но при обязательном условии, что после их полного или частичного смешения в водоносном пласте и водозаборном сооружении, а также в результате процессов физико-химического взаимодействия «сырой» воды с подземными водами и породами эксплуатируемого водоносного горизонта отбираемая для подачи потребителю вода приобретает качества, отвечающие этим требованиям. Если этого не происходит, то необходимо провести соответствующую очистку «сырой» воды до подачи ее на инфильтрацию или последующую очистку смешанной воды после откачки ее из водозабора перед подачей потребителю.

На стадиях поисков, предварительной и детальной разведок пробы подземных вод для изучения их качества отбирают из разведочных и эксплуатационных скважин при проведении откачек, наблюдениях за режимом подземных вод намеченного к использованию и смежных с ним водоносных горизонтов. Пробы отбираются также из всех водных объектов, находящихся в зоне влияния водозабора, — источников, поверхностных водотоков и водоемов, дренажных сооружений, горных выработок, шахтного водоотлива и т. п. Интервалы и методы отбора проб воды, их число, а также количество и виды анализов устанавливаются в зависимости от гидрогеологических, гидрохимических и санитарных условий участка с учетом назначения подземных вод в соответствии с ГОСТ 24481 — 80 и 2874 — 82.

Следует также руководствоваться утвержденными Министерством геологии СССР Временными методическими указаниями по проведению химико-аналитических исследований при поисках и разведке подземных вод хозяйственно-питьевого назначения [6].

Если в подземных водах отмечена повышенная концентрация железа, то при выборе метода обезжелезивания воды при анализах следует обратить внимание на следующие показатели: содержание железа

(общего, и в том числе двухвалентного), сероводорода и свободной углекислоты, значения pH, щелочности и перманганатной окисляемости. Для обоснования выбора метода удаления из воды марганца существенное значение имеют содержание марганца, сульфатов, бикарбонатов и pH.

При проектировании водозаборов подземных вод необходимо не только ориентироваться на показатели качества воды, определенные на участке водозабора в период изысканий, но и иметь прогноз возможного изменения качества воды во времени, так как в условиях эксплуатации водозабора нередко наблюдается ухудшение состава отбираемой воды. Это необходимо для райо-нов с неоднородным химическим составом подземных вод и для районов, где их загрязнение наиболее вероятно (интенсивно используемые густозаселенные промышленные и сельскохозяйственные территории). Прогноз изменения качества воды во времени необходим для определения рационального режима эксплуатации и срока действия водозабора, а также размеров зон санитарной охраны.

Наиболее значительная по масштабам инфильтрация загрязненных вод может происходить на промышленных площадках, из шламо- и хвостохранилищ, накопителей и испарителей сточных вод, на полях орошения и фильтрации.

Ухудшение качества подземных вод может быть связано с привлечением некондиционных или загрязненных подземных вод из удаленных участков эксплуатируемого пласта, с подтягиванием высокоминерализованных подземных вюд к водозабору из более глубоких частей пласта, с привлечением вод из водотоков и водоемов, загрязненных промышленными, хозяйственно-бытовыми и сельскохозяйственными стоками, или с инфильтрацией загрязненных сточных и атмосферных вод с застроенных промышленных и городских территорий и т. д. В отдельных случаях возможно загрязнение водоносного горизонта через неисправные водозаборные, разведочные, газовые, нефтяные скважины и другие горные выработки.

Контроль за качеством подземных вод на действующих водозаборах осуществляется учреждениями и организациями, в ведении которых находятся централизованные системы хозяйственно-питьевого водоснабжения и водопроводы, используемые одновременно для хозяйственно-питьевых и технических целей.

Пробы воды для анализа отбираются после насосов первого подъема перед поступлением воды в сеть, а также в распределительной сети. Методы отбора проб регламентированы ГОСТ 24481 — 80. Перечень показателей качества воды при ла-бораторно-производственном контроле составляется с учетом местных и санитарных условий и согласовывается с органами санитарно-эпидемиологической службы. Контроль и наблюдения за качеством подземных вод на водозаборах выполняются, кроме того, организациями Министерства геологии и Министерства водного хозяйства и мелиорации.

Качество подземных вод является важным критерием при выборе источника водоснабжения. Требования к подземным водам как к источнику водоснабжения и питьевой воде неодинаковы, так как некоторые показатели состава и качества подземных вод могут быть улучшены с помощью водоочистки. В соответствии с ГОСТ 2761 — 84 «Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические, технические требования и правила выбора» пригодность подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения устанавливается на основе санитарной оценки условий их формирования и залегания, оценки качества и количества подземных вод, санитарной оценки места размещения водозаборных сооружений, прогноза санитарного состояния этих вод. Состав подземных вод, используемых в качестве источника хозяйственно-питьевого водоснабжения, должен соответствовать требованиям, указанным в табл. 1; кроме того, сухой остаток должен быть не более 1 г/дм$^3$ (по согласованию с органами санитарно-эпидемиологической службы допускается 1,5 г/дм$^3$); концентрации хлоридов и сульфатов — не более 350 и 500 Мг/дм$^3$ соответственно, общая жесткость не более 7 мг-экв/дм$^3$ (по согласованию с органами санитарно-эпидемиологической службы допускается 10 мг-экв/дм$^3$); концентрации химических веществ (кроме указанных в табл. 1) не должны превышать ПДК для воды хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, а также норм НРБ.

В зависимости от качества воды и требуемой степени обработки для доведения ее до показателей ГОСТ 2874 — 82 подземные воды, пригодные для использования в качестве источника хозяйственно-питьевого водоснабжения, разделены на три класса. Качество вод первого класса по всем показателям удовлетворяет требованиям ГОСТа. Воды второго класса по отдельным показателям имеют отклонения от требований. Эти отклонения могут быть устранены аэрированием, фильтрованием, обеззараживанием. К этому же классу относятся воды с сезонными колебаниями величины сухого остатка и микробиологических показателей в пределах нормативов ГОСТ 2874 — 82; в последнем случае требуется профилактическое обеззараживание. При использовании вод третьего класса необходимо доведение их качества до требований ГОСТа методами обработки, предусмотренными для вод второго класса с применением ряда дополнительных — фильтрование с предварительным отстаиванием, использование реагентов и др.

Все воды, свойства которых не позволяют отнести их к трем указанным классам (например, солоноватые, соленые воды, воды с высоким содержанием фтора и т. п.), могут быть использованы по согласованию с органами санитарно-эпидемиологической службы при наличии методов обработки, надежность которых подтверждена специальными технологическими и гигиеническими исследованиями. При изучении качества подземных вод для выбора источника централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения пробы воды отбирают из горизонта, намеченного к эксплуатации, а также из водоносных горизонтов и поверхностных вод, имеющих гидравлическую связь с эксплуатируемым горизонтом.

Таблица 1

**Показатели качества подземных вод источника водоснабжения**

| Класс качества ВОДЫ | Мутность, мг/дм$^3$ | Цветность, градус | Содержание химических веществ, мг/дм$^3$ | | | | Окисляемость перманганатная, МгОз/ДМ$^8$ | Число бактерий группы кишечных палочек в 1 дм$^3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Fe | Мп | $H_2S$ | F | | |
| Первый | 1,5 | 20 | 0,3 | 0,1 | — | 0,7 — 1,5 | 2 | 3 |
| Второй | 1,5 | 20 | 10 | 1 | 3 | 0,7 — 1,5 | 5 | 100 |
| Третий | 10 | 50 | 20 | 2 | 10 | 5 | 15 | 1000 |

Примечания Величина водородного показателя pH для всех классов постоянна и составчяет 6 — 9 Содержание фтора для вод первоги и второго классов изменяется от 07 до 15 в зависимости от климатических условий района.

В соответствии с ГОСТ 2761 — 84 для оценки качества воды в месте предполагаемого водозабора должны быть представлены анализы проб, отбираемых ежемесячно не менее чем за последние три года; при этом ставится цель — получить представление о степени устойчивости состава подземных вод как критерии изолированности и защищенности водоносного горизонта от загрязнения. Отбор, хранение, транспортировку проб воды и проведения химических анализов следует осуществлять согласно требованиям соответствующих ГОСТов. Контроль результатов анализов химического состава подземных вод рекомендуется проводить в соответствии с Инструкцией по внутрилабораторному контролю качества химических анализов воды, выполняемых лабораториями системы Министерства геологии СССР.

Выбор водоносного горизонта, участка расположения и проект водозабора для централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения должны быть согласованы с геологическими организациями, органами государственного санитарного надзора, органами по регулированию и охране вод, землепользователями, а также с органами и учреждениями санитарно-эпидемиологической службы Министерства здравоохранения СССР и союзных республик.

Для обеспечения надежности качества питьевой воды, подаваемой водопроводами населению, необходимо не только удовлетворяющее стандарту качество подземных вод, но и надежное санитарно-техническое состояние всей системы водоснабжения. В связи с этим определенные санитарные требования предъявляются к устройству водопровода (см. гл. 6). Для водопроводных сооружений устанавливаются зоны санитарной охраны (см. главы 8 и 9), а для водоводов санитарно-защитные полосы. Состав отбираемых водозабором подземных вод может зависеть от величины водоотбора — с увеличением последнего к водозабору подтягиваются подземные воды из более удаленных участков водоносного горизонта, из выше- и нижележащих водоносных горизонтов и других источников питания. В связи с этим характеристика качества подземных вод должна быть увязана с величиной эксплуатационных запасов подземных вод, принципы подсчета которых установлены в «Классификации эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод», утвержденной постановлением Совета Министров СССР от 25 февраля 1983 г. В ГОСТ 2761 — 84 отмечено, что при выборе источника централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения возможность использования пригодных для питьевого водоснабжения подземных вод рассматривается и при недостаточных их запасах. Эта рекомендация имеет целью полную мобилизацию наиболее надежных в санитарном отношении водных ресурсов. Восполнение дефицита воды осуществляется за счет менее надежных в санитарном отношении водоисточников. По признаку санитарной надежности источники водоснабжения принято располагать в следующем порядке: межпластовые напорные воды, межпластовые безнапорные воды, грунтовые воды, подрусловые подземные воды, грунтовые воды в условиях искусственного пополнения, поверхностные воды.

# Г Л А В А 3.
# СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ В ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЯХ И ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДОЗАБОРОВ

Для водоснабжения используются грунтовые или сравнительно неглубоко залегающие напорные воды, в которых при работе водозабора пьезометрический уровень может быть снижен до глубин 150 — 200 м, что определяется технико-экономическими возможностями водоподъемных насосов.

Пресные подземные воды сконцентрированы главным образом в верхней части земной коры в зоне активного водообмена на глубинах до 600 м, редко глубже; ниже, в зоне замедленного подземного стока, располагаются воды повышенной минерализации.

Месторождения пресных подземных вод, встречающихся в разнообразных типах геологических структур, отличаются источниками формирования их эксплуатационных запасов.

На формирование химического состава пресных подземных вод, имеющих современные, обычно не слишком удаленные области питания, влияют многие природные факторы, основным из которых является физико-химическое взаимодействие воды с вмещающими породами разнообразного состава и структуры при движении воды от областей питания к участкам разгрузки или погружения водоносного горизонта. Большое влияние также оказывает состав воды, поступающей в водоносный горизонт из различных источников питания: за счет просачивания атмосферных осадков, разгрузки глубокозалегающих подземных вод, перетекания из других водоносных горизонтов через слабопроницаемые слои и литологические окна, привлечения речного стока, оросительных вод и др. Например, на участке берегового водозабора с искусственным пополнением запасов качество отбираемой воды формируется под влиянием смешения подземных вод, поступающих со стороны речных террас, из реки и из инфильтрационного бассейна, а также с участием физико-химического и биохимического взаимодействия этих вод с фильтрующей средой — аллювиальными и коренными отложениями, кольматирующей пленкой на дне бассейна. Химический состав и минерализация грунтовых вод, кроме того, зависят от климатических условий, характера почвенного покрова и растительности, рельефа, густоты и врезанности гидрографической сети. Разнообразие гидрогеологических и природных условий определяет широкий диапазон изменения химического состава подземнцх вод по площади и по глубине водоносного горизонта, поэтому при изысканиях и разведке подземных вод для водоснабжения всегда проводится детальное изучение гидрогеохимических условий и состава этих вод.

Даже в слабоминерализованных подземных водах отдельных районов отмечается высокое содержание некоторых нормируемых химических элементов — железа, фтора, бериллия, селена, стронция.

В составе природных пресных подземных вод в зависимости от содержания выделяют макрокомпоненты (концентрация от единиц до сотен миллиграммов на кубический дециметр) и микрокомпоненты (концентрация очень мала и редко составляет 1 — 5 мг/дм$^3$). К макрокомпонентам, относительное содержание которых определяет гидрохимический тип подземных вод, относятся хлориды, сульфаты, бикарбонаты, натрий, магний, кальций, калий, а к микрокомпонентам — бром, йод, фтор, бор, литий, стронций, медь, радий, уран. Кроме того, в заметных количествах могут содержаться в природных подземных водах ионы $H^+$, $NO_3$~, $NO_2$~, $H_3SiO_4$~, $Fe^{24}$-, $Fe^{3+}$, $Mn^2$+, сульфидные соединения, $H_2S$ и HS~, органические вещества, газы, микроорганизмы (бактерии, простейшие, водоросли, грибы, вирусы, актиномицеты). При правильной конструкции и эксплуатации скважин взвешенные вещества, кроме микроорганизмов, в подземных водах обычно отсутствуют. Редкий случай обнаружения в водозаборных скважинах системы городского водоснабжения асбестовых волокон, содержащихся в составе трещиноватых палеозойских и докембрийских водовмещающих пород (шт. Нью-Джерси, США) указывает на необходимость детального изучения вещественного состава подземных вод, иногда даже с помощью электронного микроскопа.

Природные аномалии качества подземных вод отмечаются в районах, где подземные воды залегают в отложениях, обогащенных некоторыми неорганическими (ртуть, медь, железо, свинец, цинк, хлориды калия и натрия) и органическими (уголь, торф) веществами. Ухудшение качества подземных вод наблюдается также на прибрежных участках речных долин, где постоянное или периодическое питание подземных вод обеспечивается речной водой, имеющей повышенные минерализацию и жесткость. Повышенную минерализацию имеют также подземные воды, контактирующие с солеными морскими водами, а также грунтовые воды в аридных и полуаридных областях, где испарение преобладает над осадками, и в других районах.

Полученная при изысканиях по данным опытных откачек характеристика состава подземных вод в последующем при работе водозабора может измениться. В первую очередь это связано с часто наблюдающейся гидрохимической неоднородностью водоносного горизонта и с подтягиванием при длительной эксплуатации подземных вод из более удаленных участков водоносного горизонта, где вода имеет иной состав. Большую роль играют также вовлечение дополнительных источников питания в виде фильтрации из поверхностных водотоков и водоемов, усиление инфильтрации атмосферных осадков и др., при этом могут поступать более минерализованные воды из нижележащих водоносных горизонтов, загрязненные поверхностные воды, соленые морские воды и т. д.

Понижение уровня грунтовых вод на участке водозабора изменяет окислительно-восстановительную обстановку в осушенной части водоносного горизонта; это может привести, в частности, к увеличению в воде концентрации сульфатов железа, кальция и магния вследствие окисления содержащегося в породах тонкодисперсного пирита, как это произошло на водозаборе г. Энсхеде в Нидерландах.

На заторфованных и заболоченных участках вместе с понижением уровня грунтовых вод происходит разложение органического вещества в породах, что способствует увеличению содержания в воде азотсодержащих веществ и железа, выносимого из пород в результате обогащения воды органическими веществами и $CO_2$. Так, на одном из приречных водозаборов в долине р. Северский Донец за время эксплуатации водозабора количество железа увеличилось с 0,2 до 5 — 8 мг/дм$^3$. Здесь используются подземные воды трещиноватых мелов, залегающих под аллювиальной толщей, сложенной (снизу вверх) мелкозернистыми песками, супесями и илистыми суглинками, содержащими до 10%, а на заторфованных участках — до 40% органических веществ.

Повышение минерализации отбираемых водозабором подземных вод в результате понижения уровня

пресных подземных вод и внедрения (интрузии) соленых морских вод в водоносный горизонт неоднократно наблюдалось на островах и морских побережьях многих стран. Скорость продвижения границы между солеными и пресными водами к центру депрессионной воронки по мере снижения напоров или уровней подземных вод увеличивается; по сообщению Д. Ергенсона, в районе г. Хьюстон (шт. Техас, США) она достигает 200 м в год.

Для большинства типов месторождений пресных подземных вод характерна тесная связь с атмосферой, при этом одним из существенных или даже главных источников питания являются атмосферные осадки и поверхностные воды. Эта связь при работе водозабора усиливается, поэтому состав поверхностных вод (ливневых, талых, речных, ирригационных, озерных) оказывает большое влияние на качество подземных вод. При инфильтрации через зону аэрации поверхностные воды могут изменять свой состав, причем во многих случаях он несколько улучшается за счет удаления взвешенных, эмульгированных и некоторых растворенных веществ в результате осаждения, сорбции, химических и биохимических превращений. Однако в других условиях, например если зона аэрации сложена засоленными породами, инфильтрующиеся поверхностные воды обогащаются растворенными веществами и, поступая в водоносный горизонт, ухудшают качество подземных вод. В последние десятилетия основной причиной ухудшения качества подземных вод стало поступление промышленных, сельскохозяйственных или коммунально-бытовых загрязнителей с поверхности земли, в связи $_t$ с чем приобрели актуальность проблемы оценки естественной защищенности подземных вод и их охраны от загрязнения.

## ПРИЧИНА АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Антропогенное влияние на подземные воды стало особенно ощутимым в текущем столетии в связи с развитием и интенсификацией промышленности и сельского хозяйства, ростом крупных городов и расширением урбанизированных территорий. Оно проявляется в истощении запасов подземных вод и ухудшении их качества; при этом в подземных водах может увеличиться содержание компонентов, характерных для природных подземных вод (хлориды, сульфаты, железо и др.), но могут также появиться компоненты и соединения, связанные исключительно с деятельностью человека — поверхностно-активные вещества, ядохимикаты, синтетическая органика и др.

Данные о современном загрязнении подземных вод приведены в работах [3, 7, 16, 22, 23, 33 и др.]. Интенсивность загрязнения подземных вод характеризуется размерами площади, где произошло ухудшение качества воды, и концентрацией загрязняющих веществ в подземных водах. Она зависит от характера и длительности действия источника загрязнения, гидрогеологических условий участка его расположения, а также от вида и срока осуществления защитных мероприятий, направленных на ликвидацию или ограничение развития очага загрязнения в водоносном горизонте.

Вещества антропогенного происхождения попадают в подземные воды из промышленных и коммунально-бытовых стоков и отходов, удобрений и ядохимикатов, стоков и отходов животноводческих ферм и комплексов, птицефабрик и других объектов.

Химическое загрязнение подземных вод связано с поступлением промышленных сточных вод, утечками технологических жидкостей, растворением атмосферными осадками сырья, твердых отходов и продуктов промышленности, загрязнением атмосферного воздуха, неправильным использованием сельскохозяйственных удобрений и ядохимикатов. Для современного промышленного производства характерно разнообразие состава сырья, продуктов, сточных вод, отходов (именно это определяет многочисленность веществ, которые могут поступать в водоносный горизонт). На участках химического загрязнения в подземных водах обнаружены тяжелые металлы, нефтепродукты, синтетические органические соединения, хлориды, сульфаты, фтор, мышьяк, азот и многие другие вещества. Показатели химического состава и химических свойств воды, которые целесообразно определять в районе воздействия сточных вод и отходов, специфичны для различных предприятий. Соответствующие методические указания по этому вопросу приведены в работе **[15].**

Биологическое загрязнение подземных вод вызывается микроорганизмами, поступающими при инфильтрации фекальных и коммунально-бытовых сточных вод из выгребных ям, канализационной сети, скотных дворов, полей фильтрации, а также при использовании береговыми водозаборами загрязненных речных вод. Из мелководных водохранилищ и прудов-охладителей с теплой водой могут проникать сине-зеленые водоросли и другая микрофлора по водоносному горизонту в водозаборные скважины, находящиеся на расстоянии десятков метров и более от берега. Эти микроорганизмы вызывают обрастания трубопроводов, резервуаров и ухудшают качество воды.

Разнообразные органические вещества, поступающие в подземные воды с коммунально-бытовыми сточными водами и отходами, а также из отходов пищевой промышленности, стимулируют интенсивный рост и активность микроорганизмов в водоносном горизонте, что приводит к дополнительному ухудшению качества воды.

Радиоактивное загрязнение подземных вод ураном, радием, стронцием, цезием и другими элементами в основном является следствием ядерных взрывов, поступления сточных вод с предприятий, добывающих или использующих радиоактивные вещества.

Тепловое загрязнение подземных вод возникает на участках прудов-охладителей нагретых промышленных вод, при сбросе в скважины нагретых вод из систем кондиционирования, а также на участках, где береговые

водозаборы используют речные воды с повышенной температурой из-за сброса в реку горячих сточных вод.

При всем многообразии обстоятельств и путей поступления антропогенных загрязнений в водоносный горизонт и к водозаборам можно, в соответствии с предложениями Е. Л. Минкина, выделить несколько типичных случаев:

1) поступление сверху, с поверхности земли, в результате инфильтрации промышленных и коммунально-бытовых сточных вод с территорий предприятий и населенных пунктов, а также проник-

новение дренажных, сточных и атмосферных вод с сельскохозяйственных территорий и т. п.;

2) поступление сбоку при фильтрации загрязненных поверхностных вод через борта, русло и затопленные поймы рек, а также при фильтрации морских вод на участках интенсивного водоот-бора и снижения уровня подземных вод;

3) поступление в виде вертикального перетока загрязненных грунтовых вод в нижележащий эксплуатируемый водоносный горизонт через гидрогеологические окна или через разделяющий слабо-проницаемый слой;

4) поступление загрязненных грунтовых вод в нижележащий эксплуатируемый водоносный горизонт через затрубное пространство водозаборной скважины;

5) поступление через незатампонированные дефектные разведочные и наблюдательные скважины.

Водоносный горизонт загрязняется также при сбросе сточных вод в поглощающие скважины, колодцы, шахты.

По масштабу влияния на водоносные горизонты выделяются локальные и региональные загрязнения подземных вод.

Источниками локального загрязнения являются отдельно действующие объекты: 1) фильтрующие шламо- и хвостохранилища, гидрозолоотвалы, пруды-накопители, отстойники, испарители, поля фильтрации и другие земляные емкости для сбора жидких и твердых отходов производства, минерализованных-шахтных вод и т. п.; 2) свалки коммунально-бытовых и промышленных отходов на поверхности земли, в выработанных карьерах; 3) индивидуальные системы канализации (септики, выгребные ямы) и нарушенные участки трасс централизованной канализации; 4) территории промышленных предприятий, нефтебаз, складов горюче-смазочных материалов, где происходит утечка нефтепродуктов, технологических и сточных вод; 5) животноводческие фермы и комплексы, склады удобрений и ядохимикатов, силосные ямы; 6) участки сброса сточных вод в скважины и горные выработки.

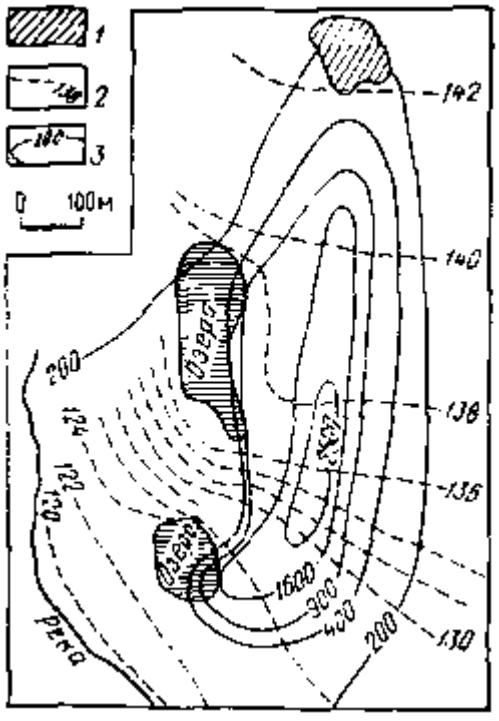



**Рис. 1. Загрязнение подземных вод в районе сброса сточных вод в песчаный карьер (по В. Робертсону, Дж. Баркеру, И. Ле Во, С. Марку, 1984 г.):**

**1 — карьер; *2* — гидроизогипсы; *3* — изолинии содержания натрия, мг/дм$^3$**

Под локальным источником загрязнения в водоносном горизонте формируется ареал загрязнения подземных вод, форма и размеры которого в плане, а также проникновение в глубину водоносного горизонта изменяются в широких пределах и зависят, во-первых, от интенсивности и характера поступления загрязнений (постоянное, периодическое), химического состава, плотности и вязкости инфильтрующихся загрязненных вод, во-вторых, от гидрогеологических условий участка — литологического строения, гидрогеологических параметров зоны аэрации и водоносного горизонта, направления и скорости движения подземных вод; в-третьих, от характера проявления процессов физико-химического взаимодействия между загрязняющими компонентами и подземными водами и породами. На рис. 1 показан в плане ареал загрязнения грунтовых вод песчаного водоносного горизонта отходами производства, сбрасываемыми в карьер. Сточные воды содержат

большое количество органических веществ и сульфатов натрия, имеют высокое значение pH. Загрязнение водоносного горизонта охватило участок длиною 900 м, а шириной 400 м и проникло на глубину более 25 м. В зоне загрязнения содержание натрия достигло 3000 мг/дм$^3$, хлоридов 590 мг/дм$^3$, общего органического углерода 2000 мг/дм$^3$, щелочность повысилась до 2700 мг/дм$^3$, а химическое потребление кислорода — до 10800 мг $O_2$/дм$^3$.

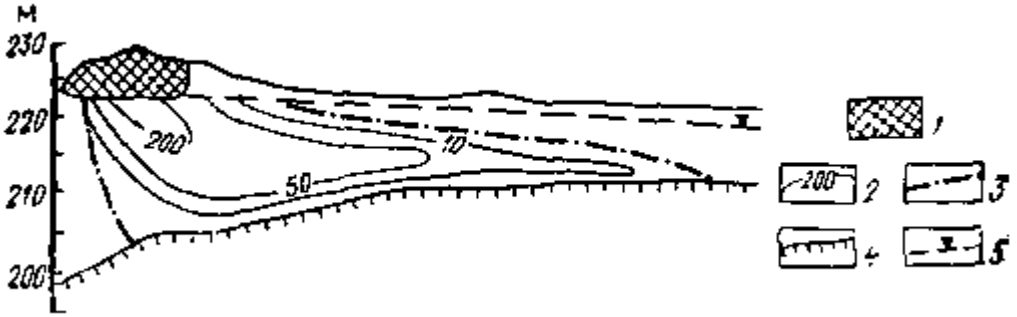



**Рис. 2. Ареал загрязнения подземных вод под свалкой отходов (по Д. Макфарлейну, Дж. Черри, Р. Гилхэму, Е. Садики, 1983 г.):**

***1* — свалка отходов; *2* — изолинии содержания в воде хлоридов, мг/дм$^3$; *3* — контур ареала загрязнения; *4* — водоупор; *5* — уровень подземных вод**

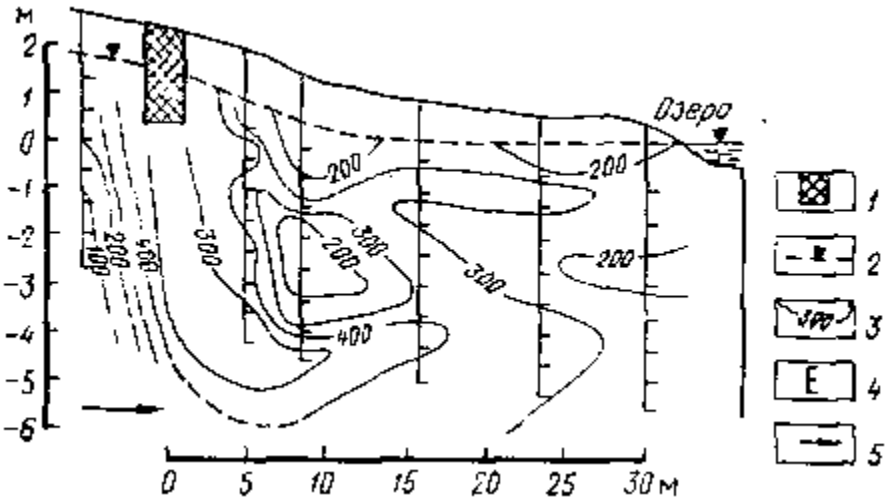



**Рис. 3. Распределение хлоридов в потоке грунтовых вод от септика (по Р. Реа, С. Апчарчу, 1980 г.):**

**1 — септик; 2 — поверхность грунтовых вод; *3* — изолинии содержания хлоридов, мг/дм$^3$; *4* — разведочная скважина с указанием места отбора проб воды по глубине водоносного горизонта; 5 — направление потока грунтовых вод**

Ареал загрязнения подземных вод под свалкой отходов, описанный в работе [40], показан на рис. 2. При многокомпонентном составе фильтрующихся загрязненных поверхностных вод формируется сложный ареал загрязнения, в котором скорости и пути движения отдельных веществ в потоке подземных вод различны даже при внешней однородности состава и фильтрационных свойств пород и «точечном» характере поступления инфильтрующихся вод. Такая картина распределения хлоридов, фосфатов, органических веществ и других компонентов была выявлена Г. Реа и С. Апчарч при изучении участка фильтрации из септика в водоносные мелкозернистые пески. Ареал загрязнения состоит из нескольких «языков» (рис. 3), что, как показали данные изучения состава подземных вод, а также химического и литологического состава, текстуры, адсорбционных, фильтрационных и других свойств песчаных водоносных отложений, объясняется микро- и макронеоднородностью пород по этим показателям. Эти небольшие мелкомасштабные различия оказали большое влияние на динамику распространения загрязнения.

При действии многочисленных локальных источников, совокупность которых обуславливает площадной характер загрязнения, оно становится региональным. Такое загрязнение характерно для урбанизированных территорий, а также для территорий интенсивного сельскохозяйственного производства. В промышленных районах, помимо постоянных утечек и аварийных разливов сточных и технологических вод из цехов, коммуникаций, различных емкостей для хранения жидкого и твердого сырья, продуктов, отходов производства, большую роль в загрязнении подземных вод играют газодымовые выбросы предприятий и теплоэнергетических установок, поступающие на поверхность земли с атмосферными осадками, ливневые стоки, а также сброс в реки неочищенных сточных, шахтных или дренажных вод. К площадному химическому загрязнению подземных вод приводит также широкое применение солей-антиобледенителей на дорогах. В районах размещения

неканализованных населенных пунктов и при дефектах канализационной сети дополнительно к химическому развивается бактериальное загрязнение. На сельскохозяйственных территориях региональное увеличение минерализации подземных вод происходит на орошаемых массивах в результате поступления поливных и дренажных вод, выносящих соли из почв. Большой масштаб приобрело нитратное загрязнение подземных вод как следствие выноса азота из удобрений, навоза, органического вещества обрабатываемых почв; известны случаи загрязнения грунтовых вод ядохимикатами, применяемыми в сельском хозяйстве.

Ниже приведены примеры влияния некоторых источников загрязнения на качество подземных вод.

*Влияние загрязненных речных вод.* На одном из участков долины р. Дуная (Чехословакия), где происходит активная инфильтрация загрязненных речных вод в гравийно-песчаный аллювиальный водоносный горизонт (с интенсивностью 20 — 200 $м^3/с$), снизилось качество подземных вод в прибрежной части долины реки. В 60 м от русла реки в подземных водах содержатся углеводороды в количестве 25,55 $мг/дм^3$ (винилбензол, трихлорэтилен, этилбензол и др.), содержание растворенного кислорода в воде снижено до 1 мг $O_2/дм^3$, концентрация аммония превысила 1,5 $мг/дм^3$, увеличилось содержание железа и марганца, отмечаются плохие орга-нолептические свойства воды.

Береговой водозабор Хардхофе (г. Цюрих, Швейцария) загрязнен органическими веществами, содержащимися в речных водах. При изучении химического состава воды в реках Глатт, Ааре и Лиммат обнаружены органические компоненты (хлороформ, три-хлорэтан, трихлорэтилен, тетрахлорэтилен), которые при фильтрации через подрусловые и прибрежные аллювиальные отложения не подвергаются деградации и поэтому поступают в береговые водозаборы в заметных количествах.

Водозабор, расположенный на берегу притока одной из рек европейской части территории СССР, использует подземные воды, содержащиеся в трещиноватых известняках мелового возраста, перекрытых аллювием. Речная вода содержит фенолы, цианиды и рода-ниды, поступающие с недостаточно очищенными сточными водами металлургического завода. Качество отбираемых водозабором подземных вод длительный период было удовлетворительным, но после того, как в районе водозабора провели расчистку и спрямление русла реки, оно ухудшилось: удаление слоя осадков и уменьшение мощности аллювия в русле затруднили условия естественной очистки речной воды от загрязнений.

*Влияние сточных и атмосферных вод на участках складирования промышленных и коммунально-бытовых отходов.* Горно-обогатительный комплекс и завод удобрений расположены на отработанном карьере, заполненном вскрышными породами и спланированном. В геологическом разрезе снизу вверх залегают нижне-кембрийские глины, толща песчаников, алевролитов и аргиллитов, в верхней части которой находится продуктивный фосфоритонос-ный горизонт, сложенный песками и песчаниками. Толща известняков и доломитов над продуктивным слоем, а также перекрывающие ее четвертичные отложения на участке карьера удалены и замещены высокопроницаемыми насыпными грунтами вкрыши карьера, представленными обломками известняка с суглинистым заполнителем. Образующиеся на горно-обогатительном комбинате и заводе удобрений отходы производства складируются в шламонакопитель, отвалы фосфогипсов, огарко- и хвостохранилище. В основании этих сооружений были созданы противофильтрационн.ые экраны из поли-этиленовой пленки, уложенной на маломощный слой песка, подстилаемого насыпным грунтом — суглинком с большим количеством остроугольных обломков пород, что, по-видимому, и явилось основной причиной разрушения пленочных экранов.

В шламонакопитель сбрасывается шлам от нейтрализации технологических стоков. Состав сточных вод в шламонакопителе характеризуется следующими показателями (в $г/дм^3$): плотный остаток 14 — 16; $NH_4$+ 2,5 — 3,5; $PO_4^{3-}$ 2,0 — 13,6; F- 0,1 — 0,44; $SO_4^2$-4,1 — 5,0; C1- 0,5 — 1,4; ХПК 0,3 — 0,5 $гO_2/дм^3$, pH 5,7 — 5,8. В хранилище сухого фосфогипса поступают отходы, в твердой фазе которых содержатся 0,5% $NH_4^+$; 1,5% $P_2O_{5общ}$ и 0,4% F~. При этом атмосферные осадки вымывают из фосфогипса растворы, обогащенные фтором, фосфором, аммиаком и сульфатами. В хранилище пиритных огарков складируются сухие отходы сернокислотного производства и жидкие отходы — сульфид-бисульфидные щелоки и некондиционная серная кислота. Фильтрация сточных вод и атмосферных осадков из шламонакопителей и хранилищ отходов вызвала загрязнение сформировавшегося в насыпных грунтах водо- » носного горизонта фосфатами, азотными соединениями и сульфатами. В районе шламонакопителя и огаркохранилища в грунтовых водах минерализация достигает 30 $г/дм^3$, повысилось содержание (в $г/дм^3$) ряда элементов: сульфатов — до 17,7; фосфатов — до 2,8, аммония — до 6, фтора — до 0,14.

Инфильтрация сточных вод гальванического производства из земляных отстойников вызвала загрязнение грунтовых вод флювио-гляциального водоносного горизонта шестивалентным хромом и кадмием. На глубине 3 м от поверхности грунтовых вод сформировался ареал загрязнения, мощность которого 21 м, ширина 300 м, длина 1300 м.

Влияние на качество подземных вод фильтрации атмосферных осадков, поступающих на поверхность свалки коммунально-бытовых хозяйственных отходов, прослежено в районе г. Франкфурта. Распределение аммония в подземных водах этого участка показано на рис. 4; концентрации свинца, кадмия, хрома, меди, никеля, ртути и цианидов превышают ПДК.

*Влияние отходов от сжигания топлива на электростанциях.* Из гидрозолоотвалов и участков складирования золы, образующейся при сжигании топлива на электростанциях, атмосферные осадки и сточные воды выщелачивают и выносят в подземные воды хром, медь, никель, свинец, цинк, кадмий, молибден,

мышьяк, ванадий и другие элементы.

Содержание фтора, ванадия, мышьяка в осветленных водах гидрозолоудаления при использовании некоторых видов топлива в СССР приведено в табл. 2.

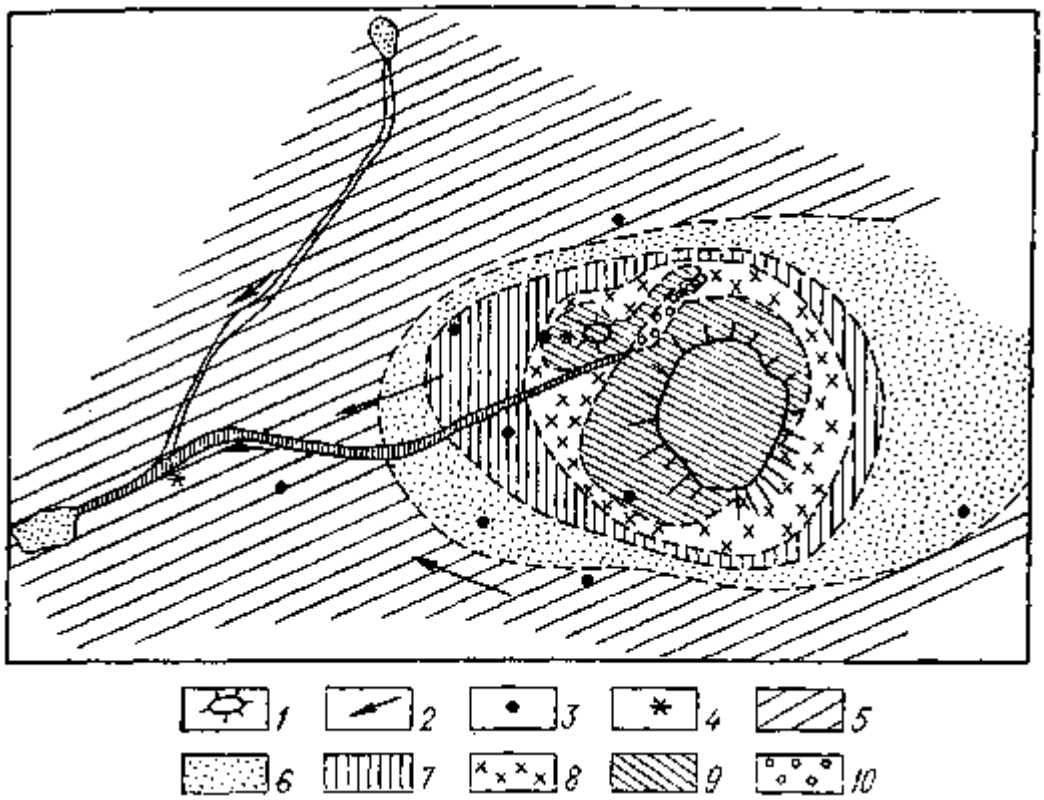



**Рис. 4. Распределение аммония в подземных водах на участке свалки отходов (по А. Гловеру, К. Кнолвю и др., 1976 г.):**

**1 — свалка; *2* — направление потока грунтовых вод; *3* — скважина; *4* — точка отбора пробы; *5* — территория, где содержание NH4+ не определено; *6 — 10* — территория с различным содержанием $NH_4$+ (*6* — до 1, 7 — 1 — 10, *8* — 10 — 100, 9 — 100 — 200, 10 — 200 — 1500 мг/дм$^3$)**

*Влияние перетекания через гидрогеологические окна.* Поступление загрязненных грунтовых вод через гидрогеологическое окно описано А. Адамчиком и С. Хавински. На участке складирования сточных вод целлюлозно-бумажного завода загрязнены грунтовые воды четвертичных отложений (рис. 5); ареал загрязнения распространился на расстояние более 1500 м от накопителя в направлении к р. Бяла Пшема. Вблизи реки в слабопроницаемых породах, перекрывающих триасовый водоносный горизонт, имеется гидрогеологическое окно. В триасовом водоносном горизонте вследствие проведения горных работ уровни подземных вод были снижены и грунтовые воды, содержащие загрязнители лигносульфонаты, проникли в этот водоносный горизонт и достигли горных выработок. Концентрация лигносульфонатов постоянно увеличивается и в настоящее время достигла 26 мг/дм$^3$.

**Таблица 2**

| Вид топлива | Содержание в воде, мг/дм$^8$ | | |
|---|---|---|---|
| | фтора | ванадия | мышьяка |
| | 0,5 — 95,7 | 0,08 — 1,22 | 0,05 — 3 и более |
| Торф | 0,9 — 19,5 | 0,17 — 0,81 | 0,05 — 0,08 |
| Сланец | 8,3 — 31,3 | 0,08 — 0,22 | |

## ЕСТЕСТВЕННАЯ ЗАЩИЩЕННОСТЬ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ ОТ ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Подземные воды, по сравнению с поверхностными, в целом лучше защищены от загрязнения, так как водоносный горизонт перекрыт более или менее мощной толщей почвы и пород. Однако если покрывающая толща водопроницаема и имеет небольшую мощность, то инфильтрующиеся с поверхности загрязненные воды довольно быстро проникают в водоносный горизонт и загрязняют его. Только в том случае, когда над водоносным горизонтом залегают водонепроницаемые породы, они могут предохранить его от загрязнения.

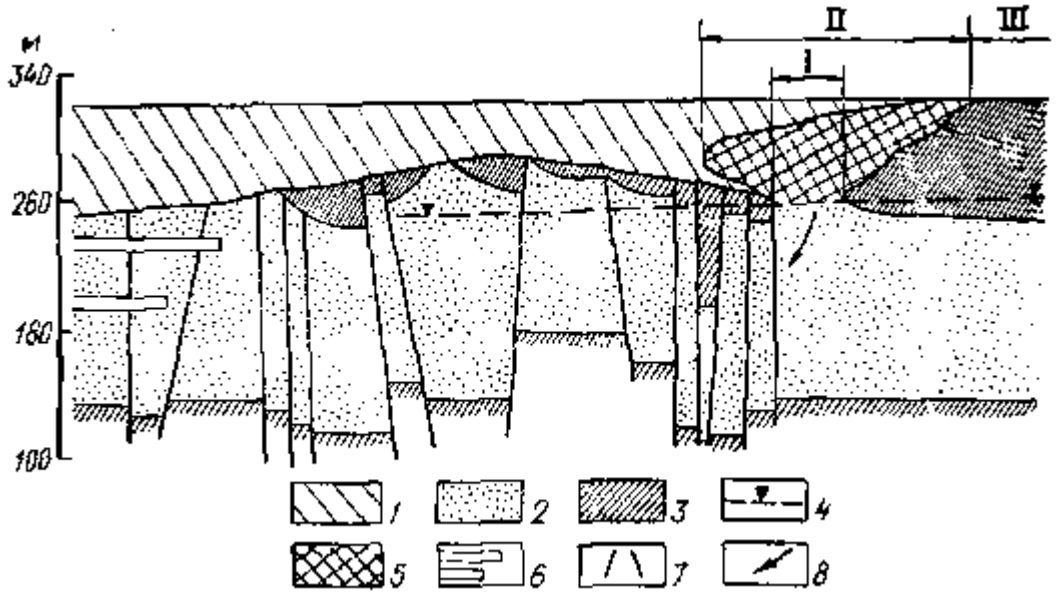



**Рис. 5. Поступление загрязненных грунтовых вод в водоносный горизонт через гидрогеологическое окно (по А. Адамчику, С. Хавински, 1982 г.):**

**1 — четвертичные отложения; 2 — проницаемые слои триасовых отложений; *3* — непроницаемые породы; *4* — уровень подземных вод; Л — загрязненные грунтовые воды; *6* — горные выработки; 7 — тектонические нарушения; *8* — направление движения загрязненных подземных вод. I — гидрогеологическое окно; II — область распространения загрязненных грунтовых вод; III — область размещения отхоцов производства**

Грунтовые воды, не перекрытые водоупорными породами, как правило, защищены значительно меньше, чем нижележащие горизонты напорных подземных вод, и обычно принимают основную часть инфильтрующихся с поверхности загрязнений. Из грунтовых вод загрязнения могут затем проникать в более глубокие напорные и безнапорные горизонты с пониженными (например, вследствие работы водозабора) напорами — через литологические окна в во-доупорах, при перетоке через слабопроницаемые раздельные горизонты, по стволу дефектных скважин и т. д.

Степень естественной защищенности подземных вод от поверхностного загрязнения зависит от факторов, определяющих возможность, скорость и время инфильтрации загрязнений с поверхности в водоносный горизонт. К таким факторам можно отнести: 1) мощность, водопроницаемость и активную пористость перекрывающих пород; 2) величину перепада уровней (напоров) между загрязненными водами и подземными водами рассматриваемого водоносного горизонта с учетом понижения уровня воды при работе водозабора; 3) вид и химический состав загрязнений, интенсивность и характер их поступления в подземные воды; 4) физико-химические, в частности сорбционные, свойства перекрывающих пород и загрязняющих веществ, определяющие возможность полного или частичного поглощения загрязнений данного состава или их трансформацию в безвредное состояние. При оценке защитной способности глин и глинистых пород, залегающих над используемым водоносным горизонтом, следует учитывать, что в зоне аэрации глины часто обладают вертикальной макропористостью и повышенной водопроницаемостью из-за развития корней растений, деятельности землероев, а также наличия трещин и макропор усыхания, вызванных усадкой при переменном увлажнении и осушении. По мере увеличения глубины залегания глинистых пород их пористость и водопроницаемость уменьшаются. На большой глубине в спокойных тектонических условиях и при сохранении способности самозалечивания трещин пластическим материалом глинистые породы часто характеризуются очень малым коэффициентом фильтрации ($k<10^{-8}$ м/сут) и таким образом практически водоупорны. Под влиянием тектонических напряжений, а также в зонах эрозионного вреза в современных и древних долинах рек при фациальных изменениях состава глинистых пород их водопроницаемость может увеличиваться и составлять $10^{-4}$ — $10^{-2}$ м/сут и более. При таких значениях коэффициента фильтрации, как показали изыскания при разведке на воду, через глинистые слои происходит переток подземных вод, что указывает на возможность загрязнения смежных водоносных горизонтов.

Разнообразие геолого-гидрогеологических условий, состава и структуры перекрывающих горных пород, а также специфика отдельных видов загрязнений (микробиологическое, химическое, радиоактивное) определяют большие различия в степени естественной защищенности подземных вод.

Классификация степени защищенности вод, а также методики оценки и составления карт природной защищенности подземных вод от поверхностного загрязнения предложены В. М. Гольдбергом, Н. В. Роговской и другими исследователями. Такие карты могут применяться для предварительной оценки возможности загрязнения подземных вод в связи с задачами охраны природы при планировании использования земель и

водных ресурсов, в частности при выборе места расположения объектов, потенциально опасных в отношении загрязнения вод, — шламохранилищ, обогатительных фабрик черной и цветной металлургии, свалок промышленных и бытовых отходов и т. п.

Применительно к задачам охраны водозаборов подземных вод от загрязнения оценка степени естественной защищенности необходима для получения однозначного ответа на вопрос: могут ли химические и биологические загрязнения проникнуть с поверхности в эксплуатируемый водоносный горизонт за время, соответствующее заданному сроку эксплуатации водозабора?

Эта оценка влияет на выбор эксплуатируемого водоносного горизонта, участка расположения водозабора, размера отдельных поясов зоны санитарной охраны водозабора и санитарного режима в них. Природную защищенность подземных вод можно считать достаточной в тех случаях, когда: 1) водоносный горизонт надежно изолирован от поверхностных вод, так что последние не проникнут в водоносный горизонт, а если и проникнут, то через очень большой период времени, существенно превышающий обычные сроки использования подземных вод водозабором; 2) породы, перекрывающие водоносный горизонт, способны полностью очистить загрязненные поверхностные воды на пути их фильтрации в водоносный горизонт.

Первый случай встречается при залегании в кровле водоносного горизонта практически водоупорных или слабопроницаемых пород большой мощности, имеющих региональное распространение и не нарушенных литологическими окнами, трещиноватостью или тектоническими проявлениями. Загрязнения не достигнут водоносного горизонта, если при работе водозабора в эксплуатируемом водоносном горизонте сохраняются высокие напоры, превышающие отметки земли, уровни в хранилищах сточных вод или уровни загрязненных грунтовых вод. Такие условия характерны главным образом для глубокозалегающих напорных вод.

Второй случай возможен, если достаточная мощность, соответствующий литологический состав и фильтрационные свойства перекрывающих слабопроницаемых мелкозернистых отложений обеспечивают при фильтрации загрязненных вод полное исчезновение болезнетворных микроорганизмов, а также преобразование или исчезновение химических загрязнений за счет сорбции, разложения, окисления, распада и других процессов.

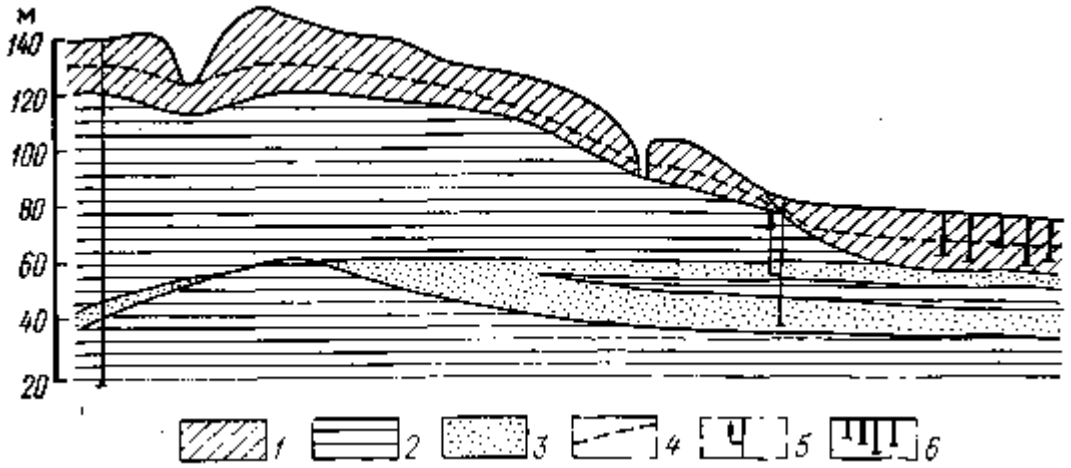



**Рис. 6. Напорный водоносный горизонт в песчаных отложениях, недостаточно защищенный от загрязненных грунтовых вод:**

**1 — суглинисто-супесчаная толща; *2* — глины; *3* — пески; *4* — уровень грунтовых вод; 5 — водозаборная скважина в напорном водоносном горизонте и напорный уровень воды; *6* — скважины в грунтовых водах**

Во всех остальных ситуациях (горизонт грунтовых вод, наличие повышенной проницаемости или литологического «окна» в кровле напорного горизонта, тесной гидравлической связи водоносного горизонта с речными водами; создание водозаборов в системах искусственного пополнения запасов подземных вод и др.) подземные воды оказываются недостаточно или плохо защищенными от химического загрязнения, а иногда и от микробиологического, и поэтому необходимо принять дополнительные меры по санитарной защите в виде регламентации хозяйственной деятельности в районе водозаборов, специальных технических мероприятий и т. д. Поскольку при изысканиях подземных вод и проектировании водозаборов обычно отсутствуют данные, необходимые для оценки барьерной роли физико-химических процессов (возможное количество, состав, свойства и интенсивность поступления загрязнений, физико-химические свойства перекрывающих пород и эксплуатируемого водоносного горизонта), для обоснования зон санитарной охраны водозабора целесообразно выделить по условиям естественной защищенности подземных вод всего две основные группы водоносных горизонтов: защищенные и недостаточно защищенные.

К защищенным относятся напорные и безнапорные межпластовые воды, имеющие в рассматриваемом районе сплошную водоупорную кровлю и не получающие здесь как в естественных, так и в нарушенных условиях (например, при работе водозабора,-дренажа и др.) питания из вышележащих грунтовых вод, рек и водоемов через разделяющие слои или гидрогеологические окна. К недостаточно защищенным подземным водам относятся: а) грунтовые воды, получающие питание на площади распространения; б) напорные и

безнапорные межпластовые воды, которые в природных условиях и при эксплуатации водозабора и других сооружений получают питание на площади ЗСО из вышележащих недостаточно защищенных подземных вод через разделяющие слои или гидрогеологические окна, а также из рек и водоемов при непосредственной гидравлической связи. Пример недостаточно защищенного напорного водоносного горизонта приведен на рис. 6.

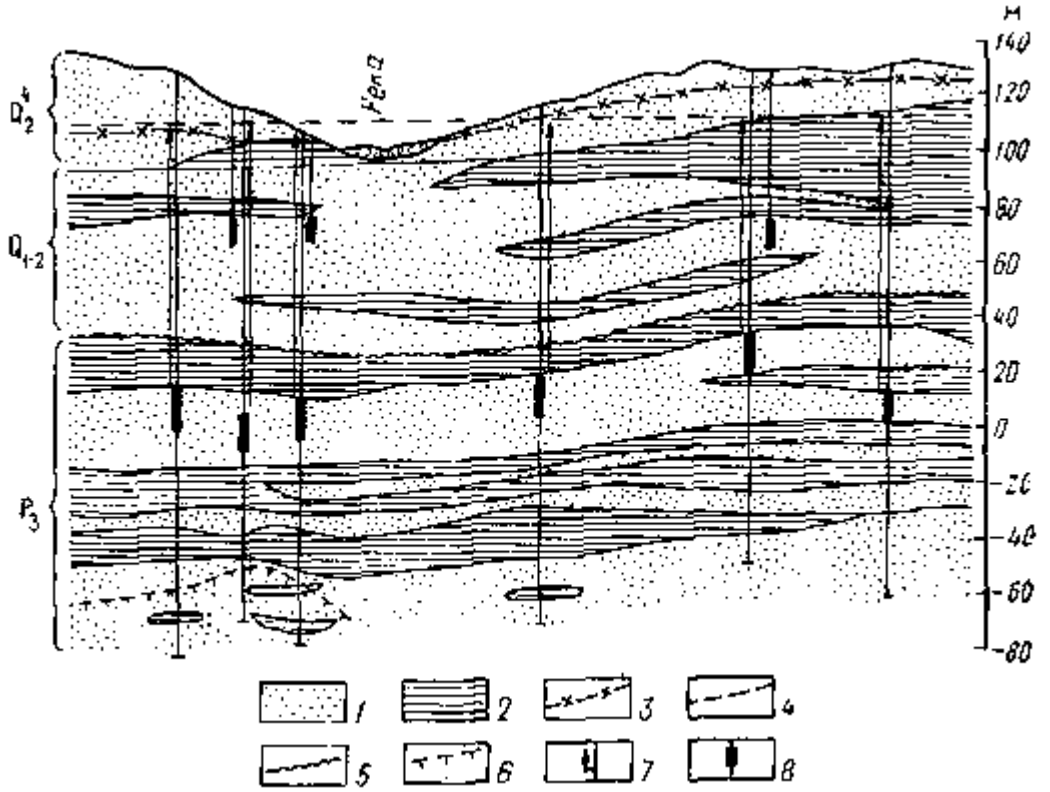



**Рис. 7. Гидрогеологический разрез на участке разведки подземных вод для водоснабжения:**
**$Q_2^4$ — среднечетвертичные флювиогляциальные отложения; $Q_{1—2}$ — нижнечетвертичные озер-но-аллювиальные отложения; *Рз* — верхнепалеогеновые (олигоценовые) отложения; 1 — пески, супеси, алевриты; *2* — глины, суглинки; *3* — - уровень водоносного горизонта в отложениях $Q_{1—2}$; 4 — то же, в отложениях $P_3$; 5 — граница стратиграфического несогласия; 6 — кровля многолетнемерзлых пород; 7 — скважина и напор воды; 8 — водоприемная часть скважины.**

В отдельных случаях, при практической значимости и необходимости уточнения степени естественной защищенности водоносного горизонта, целесообразно проводить дополнительные исследования и изыскания, позволяющие оценить параметры физико-химических процессов для расчета миграции и трансформации загрязнений на пути к водоносному горизонту и водозабору. Без этого оценка защищенности производится в основном по данным о гидрогеологическом строении участка расположения водозабора и фильтрационных свойствах пород водоносного горизонта и вмещающих его пород. Учитывая степень защищенности, при выборе эксплуатируемого водоносного горизонта в гидрогеологических условиях, отраженных на рис. 7, предпочтение было отдано более глубокозалегающим подземным водам в олигоценовых отложениях, перекрытых выдержанным слоем глин и суглинков мощностью не менее 15 м и толщей песчано-глинистых отложений мощностью до 70 м. Связанные с атмосферой вышележащие подземные воды в нижнечетвертичных озерно-аллювиальных отложениях были признаны непригодными в качестве источника централизованного водоснабжения как недостаточно защищенные от химического загрязнения (водозабор проектируется в нефтедобывающем районе).

Неправильная оценка роли зоны аэрации как естественной защиты безнапорного водоносного горизонта, приуроченного к трещиноватым известнякам, может быть иллюстрирована на примере создания группы городских водозаборов, расположенных в долине притока одной из рек европейской части территории СССР. Здесь над поверхностью подземных вод в известняках залегают безводные известняки, а еще выше — песчано-глинистые отложения мощностью до 60 м, в составе которых, как считалось ранее, имеется толща глин. При разведке и проектировании водозаборов, видимо, полагали, что зона аэрации должна явиться барьером для проникновения поверхностных загрязнений в водоносный горизонт. Развитие нитратного загрязнения подземных вод в рассматриваемом районе, сопровождающееся увеличением концентрации азота, входящего в состав $NO_3$ ($N — NO_3$~), в отдельных скважинах городских водозаборов до 15 мг/дм$^3$, а в прилегающей к городу сельской местности до 55 мг/дм$^3$, не подтвердило этих предположений. Гидрогеологические изыскания, проведенные в связи с нитратным загрязнением подземных вод, выявили недостаточность естественной

защищенности эксплуатируемого водоносного горизонта, так как многочисленные овраги, в которых зона аэрации уменьшалась до нескольких метров, служили путями сбора и активной инфильтрации загрязненных сточных и атмосферных вод непосредственно в водоносный горизонт. Интенсивность инфильтрации, по данным численного моделирования, в оврагах достигает 1,8-10~$^3$ м/сут. Кроме того, было установлено, что среди пород, слагающих зону аэрации, глины отсутствуют. По гранулометрическому составу и свойствам глинистые отложения в зоне аэрации идентифицированы как суглинки с коэффициентом фильтрации от 0,1 до 0,6 м/сут, поэтому даже при мощности 50 — 60 м песчано-глинистая толща в целом довольно быстро пропускает поверхностные воды, не задерживая всего количества содержащихся в них загрязнений.

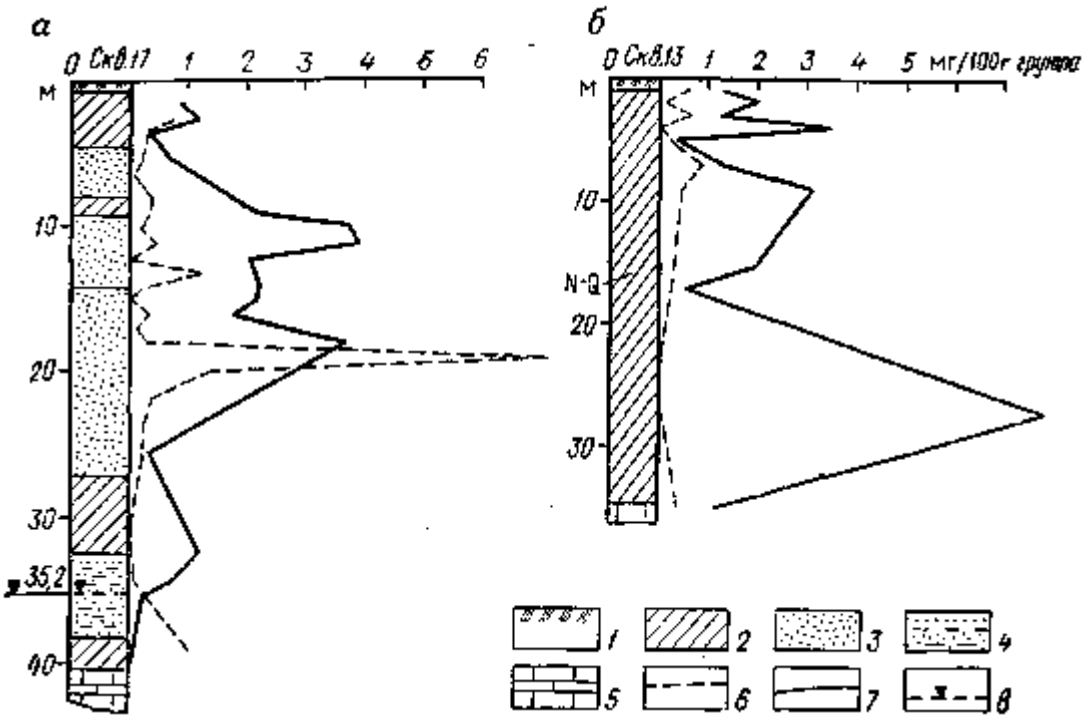



**Рис. 8. Концентрационные профили нитратного загрязнения пород в зоне аэрации по скв. 17 и 13:**
**1 — почвенно-растительный слой; 2 — суглинки; *3* — пески; *4* — супеси; 5 - верхнедевонские известняки; *6,7* — графики изменения содержания $NH_4$+ и $NO_3$- соответственно; *8* — уровень подземных вод**

На это указывают результаты изучения содержания соединений азота в породах зоны аэрации на участках между оврагами, где мощность зоны аэрации максимальна (рис. 8). Содержание $NH_4^+$Н $NO_3$ — в породе здесь достигает 8 мг на 100 г, а в поровой влаге — нескольких сот миллиграмм на кубический дециметр. При этом максимальные концентрации азота встречаются и в самой нижней части зоны аэрации, т. е. непосредственно над известняками как при песчаном (см. рис. 8,а), так и при суглинистом (см. рис. 8,6) составе пород зоны аэрации. Таким образом, в условиях поступления большого количества загрязненных поверхностных вод защитная роль песчано-глинистой зоны аэрации оказывается недостаточной даже при значительной ее мощности.

# Г Л А В А 4.
# РАСПРОСТРАНЕННЫЕ ЗАГРЯЗНИТЕЛИ ВОДЫ В ДЕЙСТВУЮЩИХ ВОДОЗАБОРАХ

Качество воды в действующих водозаборах чаще всего ухудшается вследствие загрязнения бактериями и вирусами, нефтепродуктами, азотсодержащими веществами, сельскохозяйственными ядохимикатами, неорганическими и органическими компонентами промышленных сточных вод, а также неорганическими компонентами, характерными для минерализованных природных вод. Степень ухудшения качества воды зависит от интенсивности источников загрязнения, размещения их относительно водозабора и особенностей процесса миграции тех или иных веществ в водоносном горизонте. Неблагоприятные последствия загрязнения воды в значительной мере определяются величиной превышения концентрации загрязнителя над ПДК и наличием эффективных способов ликвидации загрязнения и очистки подземных вод.

## НЕФТЕПРОДУКТЫ И НЕФТЬ

Загрязнение подземных вод и водозаборов нефтью и нефтепродуктами встречается часто и представляет значительную опасность в связи с большой распространенностью потенциальных источников этого вида загрязнения — территорий предприятий по переработке и хранению нефти, участков нефтедобычи и трасс нефтепроводов, где утечки и разливы нефти и нефтепродуктов наиболее вероятны. Так, в Великобритании из зафиксированных в 1977 — 1978 гг. 989 случаев загрязнения подземных вод на долю нефтепродуктов приходится 381 случай.

В наибольшей степени подвержены загрязнению грунтовые воды; появление нефтепродуктов в заметных концентрациях в водозаборных скважинах, использующих глубокозалегающие напорные воды, встречается реже и обычно является результатом нарушения целостности эксплуатационных, разведочных и наблюдательных скважин на газонефтяных месторождениях. Основную часть нефти (90 — 95%) составляют разнообразные углеводороды, а в состав примесей входят сера, азот и металлы. Плотность нефти и многих нефтепродуктов меньше плотности воды, лишь некоторые сорта мазута и углеводородов имеют более высокую плотность. Вязкость нефти и величина капиллярного натяжения также отличаются от соответствующих показателей воды, что определяет некоторые особенности распространения этих веществ в зоне аэрации и в верхнем водоносном горизонте. Нефть и большинство нефтепродуктов с водой не смешиваются, растворимость их относительно невелика. Например, для жидких парафинов и нафтеновых углеводородов она составляет 40 — 150 мг/дм$^3$, что все же во много раз превышает ПДК. Растворимость ароматических углеводородов еще выше и достигает 500 (толуол) и даже 1800 (бензол) мг/дм$^3$. При малом количестве разлившихся нефтепродуктов они остаются в зоне аэрации, обволакивая поверхность зерен и трещин в породе, а если достигают капиллярной каймы, то распространяются на некоторое расстояние и в горизонтальном направлении. При этом загрязнение грунтовых вод растворимыми углеводородами происходит в результате промывания пород зоны аэрации атмосферными осадками. Сезонные колебания поверхности грунтовых вод несколько изменяют высотное положение нефтепродуктов, сосредоточенных в капиллярной кайме, что увеличивает размеры загрязненной части пород зоны аэрации. Движение нефтепродуктов через зону аэрации сопровождается их частичным расслоением, адсорбцией в породах, биохимическим распадом и испарением. При большом количестве разлившихся нефтепродуктов в процессе вертикальной инфильтрации они заполняют всю зону аэрации, капиллярную кайму и расплываются на поверхности грунтовых вод в виде слоя той или иной толщины. Колебания уровня грунтовых вод приводят к увеличению мощности загрязненных нефтепродуктами пород в водоносном горизонте.

При слоистом строении пород зоны аэрации и водовмещающей толщи форма залегания нефтепродуктов усложняется. На контакте подземных вод с линзой или слоем нефтепродуктов последние могут переходить в подземные воды в эмульгированном виде; на всей поверхности контакта нефтепродуктов с инфильтрующимися и подземными водами происходит вынос из них растворимых углеводородов. Эмульгированные и растворенные углеводороды вместе с потоком подземных вод мигрируют в водоносном горизонте в направлении движения подземных вод и могут загрязнять водозаборы. Линза нефтепродуктов тоже может передвигаться; скорость ее распространения обычно меньше скорости потока подземных вод и зависит от физических свойств нефтепродуктов (вязкость, плотность, поверхностное натяжение) и водовмещающих пород (гранулометрический состав, трещиноватость, проницаемость, содержание воды).

В водоносном горизонте в процессе анаэробных биохимических реакций происходит окисление нефтепродуктов, которое сопровождается развитием резко выраженной восстановительной обстановки. В этих условиях из воды исчезают растворенный кислород и нитраты и уменьшается содержание сульфатов, но появляются аммоний, сероводород, увеличивается содержание железа, марганца и свободной углекислоты, ухудшаются вкус и запах воды и она становится непригодной для питьевого использования. Такое изменение состава воды, кроме того, приводит к кольматации фильтров скважин и зарастанию водоводов и резервуаров, что вызывает необходимость обезжелезивания воды. Ухудшение качества подземных вод вблизи участков разлива нефти, по данным Ф. Бирка и С. Форевера, не исчезнет и через 70 лет.

Изменение органолептических свойств воды происходит уже при очень малых содержаниях нефтепродуктов, что предъявляет повышенные требования к точности анализа воды. Определение малых количеств нефтепродуктов в воде, особенно при наличии других загрязнителей органического происхождения, вызывает затруднения и требует применения разнообразных методов, в том числе спектральных и хроматографических.

Для определения содержания растворенных углеводородов пробы воды иногда приходится отбирать ниже слоя нефтепродуктов,, залегающих на поверхности водоносного горизонта, и это обстоятельство обусловливает необходимость использования специальных пробоотборников, обеспечивающих надежную изоляцию пробы воды от нефтепродуктов при спуске и подъеме пробоотборника.

При разливах нефтепродуктов в районе расположения водозаборных скважин в первую очередь принимают меры по сбору нефтепродуктов с поверхности земли, а иногда и по удалению верхних, наиболее загрязненных пород на достижимую глубину. После этого проводят длительную откачку загрязненных подземных вод для промывки водоносного горизонта. Такие откачки проводились, например, в Швейцарии, где несколько аварийных разливов нефтепродуктов произошли в непосредственной близости от водозаборных скважин. Несмотря на длительную откачку, один из водозаборов в кантоне Базель все же пришлось закрыть. В другом районе Швейцарии в результате катастрофы на дороге на поверхности земли, в 170 м от городского водозабора, были разлиты 10 м$^3$ дизельного топлива; из них 2 м$^3$ удалось собрать на месте, а 8 м$^3$ проникли в водоносный

горизонт. На месте аварии был вырыт котлован, из которого вывезено 9 тыс. $м^3$ загрязненных пород. После этого котлован был заполнен чистым грунтом. Ниже по потоку от места сброса были пройдены скважины и шахта, из которых в течение 15 сут проводилась откачка воды с расходом 30 л/с. Эти мероприятия оказались действенными и защитили городской водозабор от загрязнения.

По сообщению Г. Баттермана (1983 г.), менее успешными были трехлетние откачки загрязненных нефтепродуктами подземных вод в одном из городов ФРГ в долине Верхнего Рейна. Оставшиеся нефтепродукты продолжали быть источниками легко растворимых ароматических углеводородов, для удаления которых из воды пришлось проводить усиленную промывку водоносного горизонта и биодеградацию загрязнений. А. Хантер-Блейр в 1978 г. описал загрязнение подземных вод, которое произошло в Юго-Восточной Англии в результате аварии на нефтехранилище. Хотя площадь разлива составляла всего 500 $м^2$ и большая часть нефтепродуктов (дизельное топливо) была сразу собрана, все же 130 $м^3$ проникли в почву и подстилающую толщу пород, сложенную неоднородными трещиноватыми мелами, в которых на глубине 25 м залегают подземные воды. В 700 м от места аварии находится водозаборная скважина, обеспечивающая водоснабжение части города. Учитывая отсутствие альтернативного источника водоснабжения в случае загрязнения водозабора, изучили распределение нефтепродуктов в породах, после чего через две дренажные скважины провели откачку загрязненных вод. Для очистки откачиваемых вод был разработан метод и сооружена опытная установка. По данным Я. Швома (ЧССР), в одном из водозаборов подземных вод содержание углеводородов в воде увеличивалось до 0,18 мг/$дм^3$ вследствие утечки нефтепродуктов из склада горюче-смазочных материалов, находящегося в 600 м от водозабора. Для разработки мер по устранению последствий загрязнения подземных вод были пробурены 26 разведочных скважин, установлены мощность слоя нефтепродуктов на поверхности грунтовых вод и их концентрация в воде. Затем вблизи места утечки был пробурен перехватывающий ряд из семи скважин глубиной 15 м, оборудованных керамическими фильтрами. В каждой из скважин были установлены два насоса: верхний — для отбора нефтепродуктов и нижний — для отбора подземных вод. Откачиваемую воду очищали от нефтепродуктов. С целью более полного перехвата верхней части загрязненного потока подземных вод, между линией дренажных скважин и водозабором, кроме того, была сооружена защитная траншея длиной 600 м и глубиной 4 м, засыпанная щебенкой. В верхней части траншеи до глубины 1 м была уложена трехслойная обсыпка (суглинок, крупный песок, гравий). В траншее через каждые 100 м размещены дренажные колодцы-скважины глубиной 5 м из перфорированных бетонных труб большого диаметра. При откачке из этих скважин, выполнявшейся с понижением уровня на 2 м, отбиралось 100 — 600 $м^3$/сут воды с содержанием углеводородов вначале 0,11, а через полгода — 0,01 мг/$дм^3$.

Крупномасштабное загрязнение аллювиального водоносного горизонта и водозабора нефтепродуктами произошло на о-ве Житном, на левобережье р. Дуная [43], в результате утечек на территории нефтехимического комбината и сброса в реку недостаточно очищенных сточных вод. По данным контрольного опробования скважин и колодцев в водоносном горизонте загрязнение распространилось на несколько километров, растворенные нефтепродукты содержались по всей мощности пласта, а эмульгированные (масла) собирались в верхней части пласта и над уровнем грунтовых вод. По ориентировочным расчетам на поверхности водоносного горизонта накопилось около 100 тыс. $м^3$ нефтепродуктов. Для ликвидации загрязнения помимо мероприятий общего характера, предотвращающих дальнейшее поступление загрязнений в подземные воды, запроектированы специальные защитные мероприятия.

## НИТРАТЫ

Соответственно стандартам, принятым в СССР и многих других странах, концентрация нитратов в питьевой воде не должна превышать по нитратам NOa~ 45 мг/$дм^3$ или по азоту нитратов N — $NO_3$~ 10 мг/$дм^3$. Если эта концентрация превышена, то вода может оказывать вредное воздействие на здоровье: в организме человека под влиянием кишечной микрофлоры происходит восстановление нитратов в нитриты, при этом нитриты, образуя метгемоглобин, блокируют в крови гемоглобин и этим тормозят перенос кислорода к тканям. Заболевание метгемоглобинемией особенно опасно для грудных детей. Кроме того, образующиеся в организме человека нитриты могут взаимодействовать с некоторыми компонентами пищи или лекарственных препаратов, принимаемых человеком. При этом образуются N-нитрозосоставляющие. Установлено, что для животных они являются потенциально канцерогенными, нельзя исключить эту опасность и для человека.

В незагрязненных подземных водах содержание нитратов обычно незначительно и редко достигает нескольких процентов от об- , щего количества анионов.

В почвах основная часть нитратов находится в органической форме. По мере того как органическое вещество и остатки растений разрушаются почвенными бактериями, небольшая часть органического азота трансформируется в аммонийный азот Э$МН_4^+$-В этой форме азот в почвах долго не сохраняется. В благоприятных условиях (повышенная температура, хорошая аэрация, pH 6,5 — 7,5) он с помощью почвенных бактерий быстро переходит в $NO_3$~. Нитраты хорошо растворимы в воде, мало сорбируются почвенными частицами; часть их усваивается корнями растений, другая часть с помощью бактерий переходит в газообразный азот, а оставшиеся нитраты легко выносятся инфильтрующимися поверхностными водами в подземные воды.

В подземных водах МОз~ обычно стабилен, так как при инфильтрации через почву и зону аэрации из поверхностных вод удаляются бактерии и большая часть органических веществ, которые могли бы способствовать трансформации нитратов в газообразный азот.

Первые случаи нитратного загрязнения подземных вод на сельскохозяйственных территориях, связанные с применением и вымыванием азотных неорганических удобрений из почв, были описаны еще в конце XIX в. — начале XX в. Особенно быстро развивается нитратное загрязнение подземных вод после 40-х гг. текущего столетия, когда во всем мире произошло резкое увеличение использования удобрений: если в 1938 — 1939 гг. в почвы вносилось примерно 2,6 млн. т азота в год, то в 1975 — 1976 гг. — 40,9 млн. т в. год. Соответственно этому увеличился и вынос азота из почв в подземные воды.

Массовое применение удобрений, особенно азотных, привело к нарушению почвенной экологической системы, снизило действие почвы как биологического фильтра и, как следствие, привело к увеличению выноса нитратов в подземные воды. Как показали исследования, проведенные в ряде европейских стран, с применением азотных удобрений содержание нитратов в подземных водах вначале резко возросло с 10 — 12 до 25 мг/дм$^3$, а затем наблюдался ежегодный прирост до 2 мг/дм$^3$ в год. Сообщения о региональном увеличении содержания нитратов в подземных водах в Великобритании, Франции, Нидерландах, Израиле и других странах стали появляться все чаще с конца 60-х гг. Районы площадного нитратного загрязнения подземных вод за рубежом установлены в этих странах, а также в США, ФРГ, ГДР, ПНР, ЧССР, СФРЮ, Индии и др.

В США обследование 14600 водозаборных скважин в основных сельскохозяйственных штатах Среднего Запада (Иллинойс, Миссури, Небраска, Висконсин) показало, что до 27% скважин подают воду с содержанием N — $NO_3$ более 10 мг/дм$^3$.

В последующем выяснилось, что кроме избыточного удобрения почв причинами нитратного загрязнения подземных вод часто являются сточные воды животноводческих объектов и хозяйственно-бытовые. Так, по данным Ж- Бабо, Г. Кребса и К. Биара в верхней части долины р. Рейна (Франция), где в последнее десятилетие содержание нитратов в подземных водах увеличилось почти вдвое, происхождение 60% нитратов, накапливающихся в почвах и подпочвенном слое, связано с сельскохозяйственным производством, а 40% — с бытовыми и промышленными стоками.

В ФРГ, по данным С. Фельдхофа, К. Коса и др., региональное нитратное загрязнение подземных вод, характерное для речных долин и прибрежной части страны, развилось в первую очередь в результате увеличения количества вносимых на 1 га удобрений с 50 до 130 кг/год, а в отдельных районах до 500 кг/год (в пересчете на азот). В этих же районах в подземных водах повысилось содержание фосфора и калия.

В 1978 — 1980 гг. в ФРГ было проведено массовое обследование водозаборных скважин (6 тыс. скважин в групповых водозаборах и 2 млн. индивидуальных водозаборных скважин), используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Нитратное загрязнение было установлено в 5 — 8% скважин, при этом максимальное загрязнение приурочено к районам интенсивного животноводства, где навоз и сточные воды ферм используются как удобрение. Вблизи ферм концентрация $N0_3$~ в водозаборных скважинах достигала 400 мг/дм$^3$. По данным Д. Поха, на 1971г. в ГДР в 15% групповых водозаборов содержание нитратов составляло более 50 мг/дм$^3$, а в сельской местности в 50% водозаборных скважин — более 60 мг/дм$^3$.

Имеются многочисленные данные об увеличении количества нитратов в грунтовых водах на территориях городов и населенных пунктов, произошедшем в результате инфильтрации хозяйственно-бытовых и сточных вод при утечках из канализационной сети и, особенно, на неканализованных территориях.

Проведенное в ВНР широкое изучение качества подземных вод с обследованием более тысячи водозаборных скважин и более 10 тыс. колодцев и родников показало, что во многих колодцах содержание нитратов превышает 100 мг/дм$^3$. Определяющими причинами нитратного загрязнения грунтовых вод признаны интенсивное использование азотных удобрений (до 300 кг/год на 1 га при выращивании кукурузы), инфильтрация сточных вод на животноводческих фермах и на неканализованных территориях. Приток загрязненных нитратами подземных вод со стороны населенных территорий приводил к загрязнению даже инфильтрационных водозаборов, использовавших в основном речные воды, содержащие мало нитратов; обнаружены также случаи нитратного загрязнения водоносного горизонта на глубине до 150 м, что явилось следствием вовлечения загрязненных грунтовых и поверхностных вод в депрес-сионные воронки действующих водозаборов.

В СССР повышенное содержание нитратов в подземных водах обнаружено в ряде сельскохозяйственных районов. Интенсивное строительство животноводческих комплексов, сопровождающееся концентрацией больших количеств навоза и использованием его для удобрения, выдвигает задачу защиты от загрязнения водозаборов, эксплуатирующих неглубокозалегающие подземные воды. Актуальность этой задачи определяется отсутствием эффективных методов очистки питьевых вод от нитратов.

Представляют интерес результаты выполненного авторами в 1981 — 1983 гг. изучения причин и развития нитратного загрязнения в районе одного из городов, где интенсивно развивающееся хозяйственно-питьевое водоснабжение целиком основано на использовании подземных вод. Город, пересеченный глубокими оврагами, расположен на правом берегу реки. Большинство рассматриваемых водозаборов находятся в черте города (рис. 9). Средний годовой отбор воды семью городскими водозаборами составляет примерно 200 тыс. м$^3$/сут и 38 ведомственными водозаборами — 30 тыс. м$^3$/сут. Территория города канализована не полностью. Эксплуатируемый водозаборами безнапорный верхнедевонский водоносный горизонт сложен трещиноватыми и кавернозными известняками, коэффициент фильтрации которых на отдельных участках достигает 160 м/сут. Над поверхностью подземных вод залегают необводненные трещиноватые известняки, а еще выше — неоген-четвертичные песчано-суглинистые отложения, которые обладают значительной водопроницаемостью, что обеспечивает питание основного водоносного горизонта атмосферными осадками. Максимальную мощность

(до 60 м) песчано-суглинистая толща имеет на межовражных пространствах, в оврагах она уменьшается до 10 м и менее. Недостаточная естественная защищенность водоносного горизонта способствует ухудшению качества подземных вод под влиянием инфильтрации загрязненных поверхностных вод. В 1969 г. в городских водозаборах содержание $N\text{-}NO_3$~ составляло 2 — 5 мг/дм$^3$. Увеличение количества нитратов было впервые обнаружено в 1977 г. на водозаборе I; в последующий период в отдельных скважинах этого водозабора концентрация $N\text{-}NO_3$~ периодически достигала 17 мг/дм$^3$, т. е. была выше ПДК. Состав воды на водозаборе I ухудшился и по другим показателям: увеличилось до 100 мг/дм$^3$ содержание хлоридов (было 10 — 20 мг/дм$^3$), сульфатов — до 100 мг/дм$^3$ (было 15 — 30 мг/дм$^3$), возросла до 8,7 мг-экв/дм$^3$ общая жесткость воды. Количество азота нитратов в воде во времени не стабильно, в период паводков и многоводных лет наблюдается увеличение их содержания.

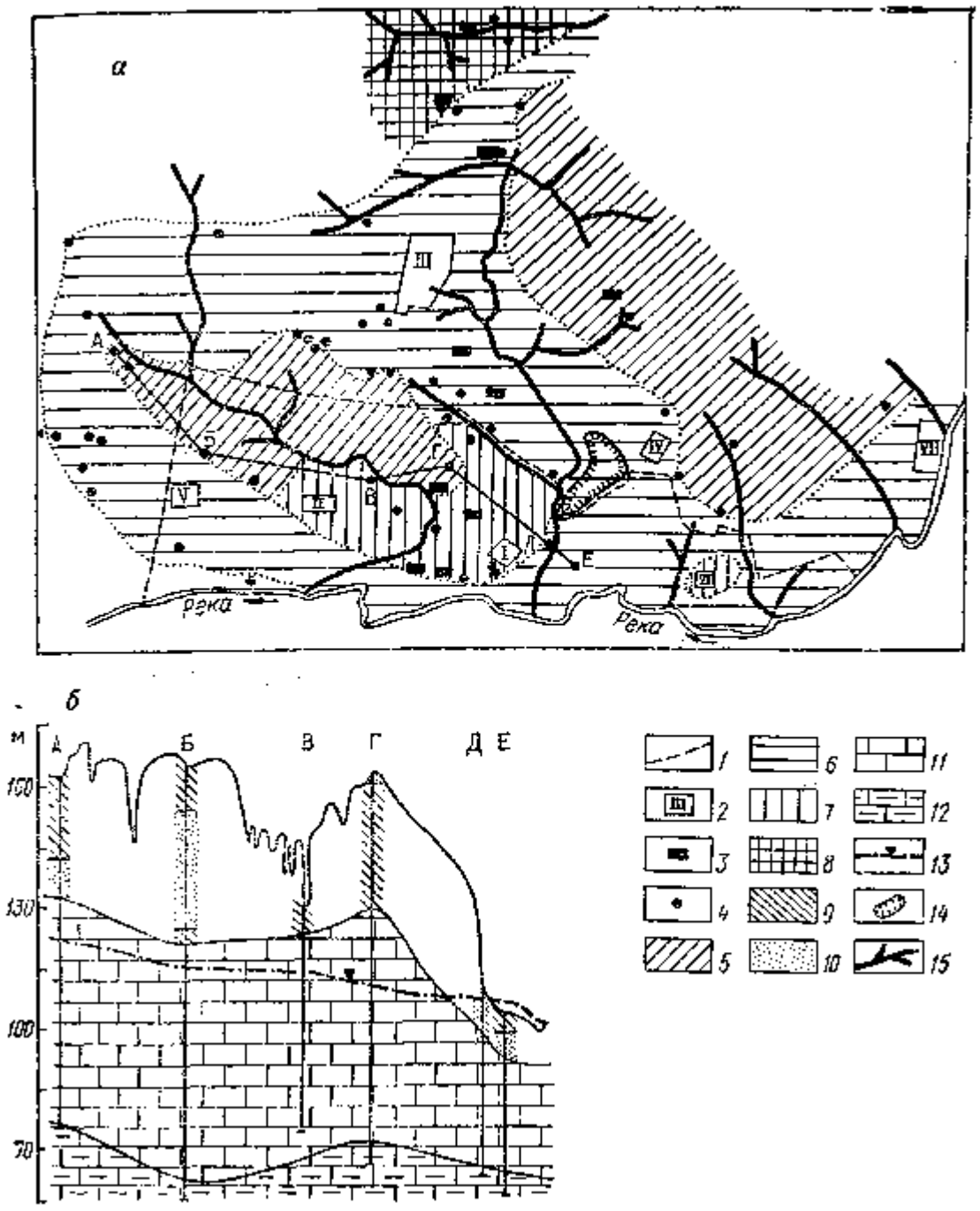



**Рис. 9. Нитратное загрязнение подземных вод в районе действующих водозаборов:**

**а — карта; б — гидрогеологический разрез по линии А — Е. *1* — граница городской территории; *2* — водозаборы подземных вод I — VII; 3 — локальные источники нитратного загрязнения (свиноводческий комплекс, птицефабрика, молочно-товарные фермы, канализационные насосные станции); *4* — скважины водозаборные, разведочные, наблюдательные; 5 — 8 — зоны развития подземных вод с различным содержанием $N\text{-}NO_3$ (5 — 1 — 5, 6 — 5 — 10, 7 — 10 — 20, *8* — более 20 мг/л); *9, 10* — неоген-четвертичные отложения (*9* — суглинки, *10* — пески); 11 — *12* — верхнедевонские породы (11 — известняки, *12* — мергели); *13* — уровень подземных вод; *14* — карьеры; *15* — овраги**

При обследовании территории города были выявлены источники бактериального и нитратного загрязнения подземных вод: 1) аварийные выпуски хозяйственно-фекальных сточных вод из канализационных станций, размещенных в оврагах; 2) сброс в овраги неочищенных хозяйственно-бытовых, сточных и ливневых вод с территорий промышленных предприятий и жилой застройки, расположенных в зоне оврагов; 3) утечки сточных вод из канализационных сетей, а на участках, где таких сетей нет, — из выгребных ям. На площади, примыкающей к городу и также входящей в область питания водоносного горизонта, причинами загрязнения были нарушения норм очистки сточных вод, складирования и использования навоза и помета для удобрения почв сточными водами с птицефабрик, свинокомплексов, ферм крупного рогатого скота, а также неконтролируемое применение минеральных и органических удобрений.

После обследования здесь были проведены гидрогеологические изыскания, в результате которых изучено развитие нитратного загрязнения на площади водоносного горизонта, оценена защитная роль зоны аэрации, определена интенсивность инфильтрации загрязненных поверхностных вод на отдельных участках водоносного горизонта, уточнены размеры областей захвата водозаборов. В состав гидрогеологических изысканий вошли бурение разведочных скважин, химические анализы подземных и поверхностных вод, изучение водопроницаемости пород зоны аэрации и определение в них содержания и форм азота, моделирование фильтрации подземных вод. Увеличение концентрации азота во времени было прослежено не только на водозаборе I, но и на других городских водозаборах. Максимальные концентрации в отдельных скважинах за 1969 — 1982 гг. составляли (в мг/дм$^3$): на водозаборе II — 11,5; на водозаборе III — 12; на водозаборе IV — 8; на водозаборе V — 6,4 и на водозаборе VI — 15. Во многих ведомственных водозаборных скважинах содержание азота в воде также повышено. Наибольшая загрязненность подземных вод соединениями азота обнаружена при опробовании разведочных скважин, пробуренных вблизи свиноводческого комплекса и птицефабрики; здесь кроме $NO_3$~ обнаружены также $NH_4$+ (до 1,6 мг/дм$^3$) и $NO_2$~ (до 1,84 мг/дм$^3$). В подземных водах неоднократно наблюдалась бактериальная загрязненность, в связи с чем на водозаборах воду обеззараживают.

Изучение состава песчано-глинистой толщи, залегающей выше водоносного горизонта, показало, что в ней аккумулировано значительное количество азотсодержащих веществ в виде $NH_3$~,

NH4+ и NO2~, что является следствием фильтрации через эту толщу загрязненных поверхностных и сточных вод. На карте (см. рис. 9) по интенсивности нитратного загрязнения выделены четыре зоны. Зона чистых подземных вод, где N-$NO_3$<5 мг/дм$^3$, располагается в основном к северо-востоку от городской территории. Зона с содержанием N-$NO_3$~ от 5 до 10 мг/дм$^3$ характерна для той части водоносного горизонта, где нитратные загрязнения поступают в относительно небольших количествах, так что после их смешения с подземными водами концентрация N-$NO_3$~ не достигает ПДК. Однако, поскольку здесь концентрации превышают фоновые значения, эту зону тоже можно считать затронутой загрязнением» Она охватывает овраги и прилежащие к ним территории, прирез ную часть выше города. В зоне с концентрацией N-$NO_3$~ от 10 до 20 мг/дм$^3$ в водоносный горизонт, по-видимому, поступает настолько значительное количество нитратсодержащих поверхностных вод, что эффективность разбавления при смешении с подземными водами недостаточна и подземные воды становятся практически непригодными для питьевых целей. Эта зона приурочена к территории города, оврагам и примыкающим к ним площадям. Наиболее загрязненные подземные воды (N-$NO_3$->20 мг/дм$^3$) выявлены на севере в верховьях одного из логов, где расположены свиноводческий комплекс и птицефабрика. Концентрация N-$NO_3$~>20 мг/дм$^3$ свидетельствует о большой интенсивности источников загрязнения как по количеству инфильтрующихся загрязненных вод, так и по концентрации загрязнений в поверхностных стоках и водах. Появление этого очага загрязнения подземных вод, видимо, стало причиной ухудшения качества воды в наиболее крупном городском водозаборе III, отбирающем 60 тыс. м$^3$/сут.

Из анализа карты гидроизогипс, построенной по натурным наблюдениям и уточненной на фильтрационной модели, следует, что городская территория, овраги и вся площадь выше города до водораздела находятся в области захвата городских водозаборов I — VII и многих ведомственных водозаборов; определенная при моделировании максимальная интенсивность инфильтрационного питания подземных вод (0,0018 м/сут) приурочена к области развития оврагов, где защищенность водоносного горизонта минимальна, поэтому поступающие в него талые, ливневые и сточные воды оказывают такое большое влияние на качество подземных вод.

Нитратное загрязнение подземных вод происходит и на водораздельных участках, если интенсивность поступления и загрязненность сточных вод особенно велики, как, например, на участке расположения птицефабрики.

Для улучшения качества отбираемых водозаборами подземных вод намечены мероприятия по ликвидации источников микробиологического и нитратного загрязнений в зонах санитарной охраны водозаборов. Предполагается также строительство резервуаров и дополнительных водоводов для смешения перед подачей потребителям воды, получаемой из загрязненных и чистых водозаборов, что позволит снизить содержание нитратов в воде до ПДК.

## ОРГАНИЧЕСКИЕ СИНТЕТИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

Одним из распространенных, но еще недостаточно изученных видов ухудшения качества подземных вод является загрязнение органическими синтетическими веществами, входящими в состав многочисленных

химических веществ, широко применяемых в промышленности, сельском хозяйстве и быту. Присутствие этих веществ уже в очень малых количествах делает воду непригодной для питья. Трудность быстрого выявления и идентификации органических загрязнителей обусловлена необходимостью применения специальных очень чувствительных методов исследований, которые при выборе источника водоснабжения и оценке качества питьевых вод ранее обычно не применялись.

Предварительные представления о масштабе загрязненности подземных вод органическими компонентами можно получить на основании определения содержания в воде летучей и нелетучей фракций общего органического углерода и общего количества хлор-органических соединений. Более точные данные об индивидуальных органических веществах дают методы газовой хроматографии,, масс-спектрометрии, адсорбции на активированном угле с последующим использованием микроколориметрического детектора.

Хлорорганические соединения, входящие в состав дефолиантов, инсектицидов и других сельскохозяйственных ядохимикатов, а также широко используемые в промышленности (в том числе при обработке металлов), в качестве растворителей при чистке одежды и для других целей обнаружены в подземных водах многих стран. Хлорированные углеводороды имеют повышенную плотность, заметно растворимы в воде (от 50 мг/дм$^3$ до 40 г/дм$^3$) и отличаются малыми значениями ПДК. В питьевой подземной воде хлорорганические соединения впервые были обнаружены в 1973 г. в ФРГ, а затем после широкого привлечения для анализа воды методов хроматографии и масс-спектрометрии — ив США. Согласно данным Агентства по охране окружающей среды США, приведенным Г. Вестерхоффом и В. Юлом, этими соединениями загрязнены 45% крупных и 12% мелких систем централизованного водоснабжения США, использующих подземные воды.

Дж. Даксен и А. Гесс приводят сведения о том, что при обследовании органические загрязнения подземных вод были обнаружены в 44 системах водоснабжения шт. Массачусетс, В 25 — шт. Коннектикут, в 25 — шт. Пенсильвания, в 24 — шт. Нью-Йорк. В г. Джексон по этой причине была прекращена подача воды из 100 питьевых скважин, размещенных в районе городской свалки. В г. Ведфорд (шт. Массачусетс) около 85% скважин в городских водозаборах вышли из строя из-за высокого содержания органики. Большое число водозаборных скважин, воды которых содержали трихлорэтилен, было ликвидировано в долине р. Сан-Габриэль (шт. Калифорния) и в других районах США.

В США в воде питьевых водозаборов установлено уже более 700 специфических органических компонентов, среди которых наиболее часто встречаются тригалометаны и хлорированные углеводородные соединения трихлорэтилен и тетрахлорэтилен. Содержание последних в подземных водах на отдельных участках оказалось более высоким, чем в неочищенных и очищенных водах наиболее загрязненных рек, и достигло 3,5 мг/дм$^3$.

В г. Тусон (шт. Аризона), хозяйственно-питьевое водоснабжение которого целиком основано на использовании аллювиального водоносного горизонта, загрязнение подземных вод трихлорэтиле-ном и тяжелыми металлами связано с поступлением в воду с территории промышленной зоны, где размещены аэропорт, военные заводы, предприятия электронной промышленности и др.

В г. Гровленд (шт. Массачусетс) в 1979 г. в двух основных городских водозаборах в подземных водах было обнаружено значительное количество трихлорэтилена. В город в аварийном порядке пришлось подать воду из соседних городов. Одним из рассмотренных вариантов восстановления качества воды была откачка подземных вод из перехватывающих скважин и очистка воды на фильтрах с активированным углем. В 25 городах шт. Массачусетс после 1978 г. исключена из эксплуатации часть водозаборных скважин из-за загрязнения воды органическими веществами.

В Великобритании, по данным П. Бардена, также обнаружено органическое загрязнение подземных вод, используемых в системе общественного водоснабжения, причем концентрация трихлорэтилена и трихлорэтана в подземных водах намного превысила ПДК. До 30% потенциальных запасов подземных вод были выведены из использования вследствие их опасного загрязнения.

При обследовании водозаборов подземных вод, снабжающих водой южную часть г. Вены (Австрия), в воде были обнаружены хлорированные углеводороды (трихлорэтилен, тетрахлорэтилен, трихлорэтан, дихлорметан), потребление которых в стране велико и составляет в общем примерно 14 тыс. т. Загрязнение подземных вод вызвано потерями этих веществ при транспортировке, складировании и использовании предприятиями бытового обслуживания. Оценка степени загрязненности подземных вод хлорорганическими веществами была выполнена по общему содержанию в воде этих веществ: при концентрации менее 0,001 мг/дм$^3$ считалось, что загрязнение отсутствует; при концентрации 0,001 — 0,01 мг/дм$^3$ — оно незначительно; при концентрации более 0,01 мг/дм$^3$ — загрязнение сильное (данные В. Кашпера, Ф. Зайдельбергера).

В ФРГ на территориях городов земли Баден-Вюртемберг отмечено до 60 случаев загрязнения подземных вод тетрахлорэтиле-ном, хлороформом и трихлорэтиленом.

В г. Милане (Италия) в 1975 г. ликвидированы водозаборные скважины, в которых были обнаружены хлорированные углеводороды в количестве более 0,25 мг/дм$^3$. Длительная откачка из этих скважин не улучшила состава подземных вод из-за большой площади загрязнения.

В Японии в префектуре Тояма в подземных водах были обнаружены такие органические вещества-загрязнители, как метилхлориды, дихлорметан, хлороформ, четыреххлористый углерод, Дихлорэтан, трихлорэтан, дихлорэтилен, тетрахлорэтилен, толуол, ксилол, дибутилфталат и этилметилфталат.

На сельскохозяйственных территориях, особенно при ирригации, определенную роль в загрязнении подземных вод органическими синтетическими веществами играют химические средства защиты растений —

пестициды. Вместе с оросительными водами они могут быть вынесены за пределы корнеобитаемого слоя. Хотя в зоне аэрации основная часть ядохимикатов подвергается распаду, однако при большом периоде детоксикации и значительной норме орошения ядохимикаты могут быть вынесены в водоносный горизонт. Большинство пестицидов относятся к высокотоксичным веществам, ПДК многих из них в питьевой воде измеряются сотыми и тысячными долями миллиграмма на кубический дециметр.

Загрязнение подземных вод ядохимикатами особенно опасно в связи с тем, что применение последних имеет площадной характер и, кроме того, для сельскохозяйственных районов характерно децентрализованное водоснабжение населенных пунктов, при котором водозаборные скважины находятся внутри или вблизи массивов, где применяются ядохимикаты. В таких районах пестициды могут содержаться и в водах рек и каналов, поступая в них вместе с загрязненным дренажным и ливневым стоком, а также при обработке полей ядохимикатами с использованием авиации. Возможны и аварийные поступления ядохимикатов в водоносный горизонт на участках их складирования, при транспортировке и т. п.

Загрязнение подземных вод и водозаборов сельскохозяйственными ядохимикатами обнаружено во многих странах.

В сельскохозяйственных районах США входящие в состав пестицидов трихлорэтилен и 1,2-дибромо-3-хлорпропан были обнаружены в водозаборных скважинах в штатах Пенсильвания, Нью-Джерси, Нью-Йорк, Калифорния и др. По данным Р. Ваймара, М. Дугласа, Р. Карселя, С. Коэна, Д. Уолтерса и др., наличие пестицида алдикарба установлено в водозаборах на Лонг-Айленде (шт. Нью-Йорк), ландана и алдрина — в шт. Южная Каролина, паратиона — в шт. Флорида, ДДТ — в районе г. Мэдисон (шт. Висконсин), а также в Южной Каролине, в шт. Вашингтон.

В округе Клейтон (шт. Айова) подземные воды закарстован-ных карбонатных пород содержат гербициды при повышенной концентрации нитратов. В шт. Небраска в грунтовых водах, залегающих под песчано-суглинистыми почвами на глубине 5 — 7 м от поверхности, был обнаружен гербицид атразин. По-видимому, этот препарат был применен в большом количестве, так как специальные полевые опыты показали, что в гидрогеологических условиях данного района безопасная доза внесения атразина на поверхность составляет всего 2,2 — 4,4 кг на 1 га.

В шт. Аризона пестициды в подземных водах были обнаружены после того, как сельскохозяйственные земли, на которых выращивали цитрусовые культуры, были заняты жилой застройкой, а из скважин, которые раньше использовались для орошения, стали отбирать воду для сельскохозяйственных нужд. В 50 водозаборных скважинах установлено заметное содержание канцерогенного пестицида 1,2-дибромо-3-хлорпропана (ДВСР).

По данным А. Хорвата, в ВНР, в одном из сельскохозяйственных районов, где водоснабжение населения осуществляется из неглубоких колодцев, в 1974 г. было установлено загрязнение грунтовых вод мышьяком в концентрации до 0,6 мг/дм$^3$. Мышьяк также был обнаружен в грунтах в количестве до 100 мкг/кг. Загрязнение подземных вод в данном случае было связано с мышь-якосодержащим пестицидом дарсином, использование которого в Венгрии было запрещено еще в 1968 г. К 1975 г. зона загрязнения подземных вод все еще занимала площадь 2,1 км$^2$.

Х. Босеа в 1980 г. описал случай загрязнения подземных вод инсектицидом дибутоксом вблизи г. Аджуд (СРР), которое произошло из-за сброса в фильтрующую канаву сточных вод, образующихся на территории областного центра защиты растений при промывке емкостей и приспособлений для приготовления и распыления раствора. Вынос ядохимикатов из залегающих под канавой песчано-гравийных аллювиальных отложений происходил при подъеме уровйя грунтовых вод в периоды паводков и часто выпадающих осадков. Содержание дибутокса в водозаборных скважинах в момент его обнаружения в воде составляло 0,5 — 3,0 мг/дм$^3$; через 9 мес. загрязнение все еще было на уровне 0,1 — 0,3 мг/дм$^3$, а желтая окраска подземных вод в ареале загрязнения исчезла только через 2 года.

Загрязнение 28 водозаборных скважин при аварийной утечке пестицидов в ЧССР в пос. Храсте в 1978 г. описано Р. Хонсом и О. Марковой. В связи с длительным временем (по расчету 150 — 200 сут) деградации этих веществ в грунтах, для локализации загрязнения и восстановления качества воды запроектирован дренаж.

## МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ

Микробиологическое загрязнение подземных вод вызывают микроорганизмы, наиболее широко представленные в самых верхних водоносных горизонтах, связанных с почвами и атмосферой. К этим микроорганизмам относятся бактерии, простейшие, водоросли, грибы, вирусы и актиномицеты. В связи с оценкой роли и условий развития микроорганизмов в подземных водах выделяют: 1) микроорганизмы аутохтонные, обитающие в природных незагрязненных подземных водах; 2) аллохтонные патогенные (болезнетворные), появляющиеся в подземных водах в результате инфильтрации и сброса загрязненных поверхностных и сточных вод.

Значение аутохтонных микроорганизмов в формировании качества подземных вод различно и зависит от вида микроорганизмов, их количества и условий существования. Положительная деятельность аутохтонных микроорганизмов проявляется в том, что они способствуют биохимической деградации и обезвреживанию пропикающих в водоносные горизонты разнообразных органических и бактериальных загрязнений. Однако при большом поступлении органических веществ биологическая активность микроорганизмов настолько

интенсифицируется, что приводит к изменению окислительно-восстановительных условий, состава и качества подземных вод.

Главным агентом аэробной биохимической деградации органических загрязнений является кислород, находящийся в подземных водах в растворенном виде, а в зоне аэрации — в газообразном состоянии. Роль катализаторов биохимических реакций выполняют ферменты, выделяемые микроорганизмами. В ходе биохимической деградации сложные органические вещества последовательно трансформируются в более простые соединения — жирные кислоты, спирты, альдегиды, аммоний и др. На конечной стадии этот процесс может завершиться полной минерализацией с образованием нетоксичных веществ — воды, двуокиси углерода, нитратов, фосфатов, сульфатов.

К аэробным бактериям относятся, в частности, серобактерии и тионовые бактерии (окисляют сероводород, сульфиды и серу до серной кислоты), железобактерии (извлекают из воды железо и отлагают его в виде гидрогеля), нитрифицирующие бактерии (окисляют аммиак до нитритов и нитратов), бактерии-аммонификаторы (способствуют выделению аммиака из органических веществ при их разложении).

Масштабы и глубина естественной биохимической очистки подземных вод зависят от состава и количества поступивших загрязнений, а также от состава пород и подземных вод, водопроницаемости пород, скорости фильтрации и других элементов гидрогеологической обстановки. В определенных условиях, например при массовом поступлении органических веществ и аллохтонных микроорганизмов, при большой скорости фильтрации в трещиноватых и валунно-галечниковых породах и т. д. биохимическая очищающая деятельность автохтонных микроорганизмов имеет ограниченное значение и не может воспрепятствовать распространению микробиологических и органических загрязнений в водоносном горизонте.

При большом количестве поступивших в водоносный горизонт органических загрязнений дефицит кислорода, затраченного на аэробные превращения незначительной части органических веществ, приводит к возникновению анаэробных условий и росту анаэробных бактерий (жизнедеятельность последних сопровождается использованием не только растворенного кислорода, но и кислорода сульфатов и нитратов с появлением вследствие этого сульфидов, сероводорода, газообразного азота, аммония и метана, которые являются загрязнителями подземных вод). Избыточная активность автохтонных микроорганизмов в водоносном горизонте наблюдалась на участках сброса или складирования отходов пищевой промышленности, силоса, навоза, хозяйственно-бытовых сточных вод. В воде отмечены исчезновение растворенного кислорода, обогащение аммонием, сероводородом, сульфидами, железом и ухудшение в целом качества подземных вод.

Автохтонные микроорганизмы иногда могут поступить в водоносный горизонт непосредственно из поверхностных вод. Так, в скважины группы водозаборов, расположенных на берегу притока р. Дона и оказавшихся после создания на реке неглубокого водохранилища вблизи уреза воды, проникли споры хлороглеи — переходной формы от бактерий к водорослям, которые не задерживались песчаной толщей даже на столь значительных путях фильтрации. Здесь же наблюдалось интенсивное развитие железобактерий, связанное с повышением температуры подземных вод.

Размножение и отмирание хлороглеи и железобактерий в скважинах, водосборных емкостях и водоводах ухудшало качество воды и вызывало необходимость его очистки для хозяйственно-питьевого использования.

Интенсивное развитие микроорганизмов в подземных водах наблюдалось авторами в районе водозаборов одного из развивающихся городов, хозяйственно-питьевое и техническое водоснабжение которого основано на использовании подземных вод аллювиального водоносного горизонта, сложенного гравийно-галечно-валунными отложениями с песчаным и супесчано-суглинистым заполнителем. Город расположен на коренном склоне долины и частично на той же высокой пойменной террасе, что и водозаборы подземных вод. С 1960-х по 1980-е гг. производительность групповых водозаборов возросла от 24 до 180 тыс. $м^3$/сут, что связано с увеличением городского населения, интенсивным промышленным и городским строительством. Вместе с тем значительная часть территории города еще занята жилой застройкой, где отсутствует канализационная сеть, поэтому увеличение водопо-требления привело к росту объема неочищенных хозяйственно-бытовых сточных вод, инфильтрующихся в аллювий и поступающих в многочисленные мелкие притоки горной реки, проходящие по городу. В некоторых районах города отмечены утечки и переливы сточных вод из неисправных канализационных сетей. Утечки сточных вод на промышленных площадках, в соответствии с характером промышленного развития города (кожевенное производство, шерстомойная и камвольно-суконная фабрики, мыловаренный завод, мясоконсервный комбинат и т. д.), также приводят преимущественно к органическому загрязнению подземных вод.

На загрязненных участках водоносного горизонта в грунтах зоны аэрации, по данным исследования состава водных вытяжек, значения химического потребления кислорода (ХПК) достигают 68 мг$O_2$/$дм^3$, аммоний-иона 1,6; железа 2,79 и фосфатов 3,2 мг/$дм^3$, что указывает на сорбцию некоторой части загрязнений. Однако вследствие небольшой мощности зоны аэрации и малого содержания в породах сорбирующей глинистой фракции барьерная роль зоны аэрации оказалась незначительной, так что загрязнения достигают поверхности грунтовых вод. Данные, приведенные в табл. 3, отражают значительные изменения химического состава первоначально чистых ультрапресных природных (подземных и поверхностных) вод, причем в нарушенных условиях величина некоторых компонентов и показателей превышает ПДК. Обогащение подземных вод органическим материалом, азотом, фосфором, железом, нефтепродуктами, фенолами способствовало настолько интенсивному развитию микроорганизмов (табл. 4), что по составу и количеству последних на отдельных участках подземные воды в районе водозаборов оказались близки к загрязненным поверхностным водам.

Таблица 3

**Химический состав подземных и поверхностных вод в естественных и нарушенных (в скобках) условиях**

| Компоненты и показатели состава воды | Содержание компонентов, мг/дм$^3$ | |
|---|---|---|
| | Подземные воды | Поверхностные воды |
| Окисляемость* | 1 — 1,8 (114) | 2,72 (38,2) |
| хпк* | 5-6 (146) | 6 (242,4) |
| Сухой остаток | 59-68 (1106) | 50 (942) |
| Аммоний (по N) | 0 — 0,02 (32,5) | 0,05 (4,75) |
| Нитриты (по $NO_2$) | 0 — 0,004 (1,5) | 0,007 (1,44) |
| Нитраты (по $NO_3$) | 0 — 0,13 (13) | 0,05 (5,4) |
| Фтор | 0 — 0,05 (12,6) | 0 (2,28) |
| Фенолы | 0 — 0,005 (0,18) | 0,012 (0,54) |
| СПАВ | 0 (3,6) | 0 (0,285) |
| Нефтепродукты | 0,0025 (10,1) | 0,44 (3,75) |
| Медь | 0 (0,72) | 0 (0,075) |
| Цинк | 0,006 (4,5) | 0,03 (0,15) |
| Марганец | 0,02 (9,6) | 0 (0,25) |
| Фосфаты | 0,01 — 0,07 (1,27) | 0,04 (15,4) |

* В миллиграммах $O_2$ на кубический дециметр.

Наиболее опасные последствия вызывает биологическое загрязнение подземных вод аллохтонными микроорганизмами, вызываемое болезнетворными бактериями, кишечными вирусами, яйцами гельминтов, появление которых связано с жизнедеятельностью человека и животных. Патогенные микроорганизмы поступают в подземные воды при фильтрации фекальных и хозяйственно-бытовых сточных вод из индивидуальных систем канализации (выгребные ямы, септики), из дефектных колодцев и сетей централизованной канализации, с участков размещения животноводческих ферм и комплексов, складирования навоза, орошения неочищенными хозяйственно-бытовыми сточными водами, с ливневыми стоками с урбанизированных и сельскохозяйственных территорий.

Водным путем распространяются бактерии и вирусы Salmonella sp., Shigella sp., Vibrio cholera, Versinia enterocolitica, Lep-tospira sp., v. Pseudotuberculosis, Dyspepsia Coli, Francisella tu-larensis, enterotoxigenic. E. Coli, Pseudomonades, вирусы инфекционного гепатита, полиовирусы, аденовирусы и др. По данным К. Герба, К. Уоллиса и других исследователей, почти все случаи водных инфекций в США были вызваны загрязнением подземных вод сточными водами. Кишечные палочки Escherichia Coli, являющиеся представителями нормальной микрофлоры кишечника человека используются как санитарно-показательные микроорганизмы, характеризующие интенсивность фекального загрязнения воды. В ряде стран в качестве такого организма, кроме кишечных палочек, служат и энтерококки, которые отличаются наибольшей устойчивостью и выживаемостью во внешней среде. Энтерококки, наряду с кишечными палочками, обитают в кишечнике человека и теплокровных животных и могут быть причиной поражений кишечника. Большая концентрация санитарно-показа-тельных микроорганизмов свидетельствует о загрязненности воды и возможности содержания в ней патогенных микробов и вирусов.

При санитарно-бактериологическом исследовании воды обязательному учету подлежат Escherichia paracoli, имеющие большое эпидемиологическое значение.

При санитарной оценке качества подземных вод отсутствие в составе воды колиформных бактерий обычно считалось признаком отсутствия и патогенных. Однако в литературе описаны случаи нахождения в подземных водах энтеровирусов при отсутствии или количестве коли-форм менее двух в 100 мм (данные С. Герба). Согласно данным Г. Битона и др. [33], выживаемость энтеровиру-сов в подземных водах может характеризоваться большими сроками, чем выживаемость санитарно-показательных микроорганизмов. Это указывает на недостаточность распространенных стандартных методов определения бактериологической безопасности воды только по количеству кишечных палочек. Случаи бактериального загрязнения используемых в водоснабжении подземных вод многократно описаны в литературе.

При поступлении загрязненных бактериями и вирусами сточных и поверхностных вод в почвы, породы зоны аэрации и водоносный горизонт количество бактерий и вирусов, как правило, уменьшается — происходит «почвенная очистка воды». Интенсивность и механизм удаления микроорганизмов контролируются двумя главными факторами: 1) выживаемостью бактерий и вирусов в данных биологических, химических и термодинамических условиях зоны аэрации и водоносного горизонта; 2) физическими и физико-химическими процессами, определяющими перенос микроорганизмов в подземных водах.

Таблица 4

**Микроорганизмы в подземных водах в районе городских водозаборов (данные Э. В. Соколовой)**

| Гидробиологические характеристики воды | Содержание (число) в 1 см$^8$ | | |
|---|---|---|---|
| | Подземные воды | | Поверхностные воды на участках сброса неочищенных сточных вод |
| | вдали от города (незагрязненное) | в районе города | |
| Сестон* | Нет | 0,04 — 410 | 0,5 — 62 |
| Зоопланктон** | " | n*10 | n*10 |
| Простейшие** | " | n*10 | до n*10$^5$ |
| Бактерии:*** | 120 | n *(10$^2$ — 10$^5$) | до *n* * 10$^4$ |
| палочки | Есть | Нет | Есть |
| дрожжевые клетки | " | Есть | " |
| кокки | Единичные | Нет | " |
| нитчатые бактерии | Нет | Есть | " |
| железобактерии | " | " | " |
| серобактерии | " | Нет | " |
| актиномицеты | V | Есть | Нет |
| споры грибков | Есть | " | " |
| споры растительных организмов | Нет | " | „ |
| зооглейные бактерии | " | " | Есть |
| Обрывки и остатки высшей водной растительности, водных мхов, грибов | " | До 120 | До *n*- 10* |
| Железистые соединения | „ | Есть | Есть |

* Общая величина загрязняющих примесей в воде дана в граммах на кубический метр (сухая масса остатка на фильтре, высушенного при t=60 °С).

** В единицах на кубический дециметр. *** В единицах на кубический сантиметр.

При инфильтрации загрязненных вод через зону аэрации количество патогенных микроорганизмов и интенсивность их поступления в подземные воды регулируются аэробными процессами, а также воздействием разнообразных аутохтонных микроорганизмов, являющихся естественными антагонистами бактерий и вирусов. При соответствующих химическом составе, строении и мощности пород зоны аэрации степень очистки вод от бактериального загрязнения при инфильтрации может быть значительной. На последующей фазе горизонтального перемещения биологических загрязнений по водоносному горизонту вместе с потоком подземных вод возможностей для естественной очистки меньше, тем не менее патогенные микроорганизмы в подземных водах не могут существовать очень долгое время. В благоприятных условиях в первые 1 — 7 сут они могут выжить без заметного снижения их количества или даже слабо размножаются, но затем количество патогенных бактерий и вирусов убывает. Биологическая деградация патогенных микроорганизмов связана с тем, что в присутствии растворенных и адсорбированных органических веществ, а также нитратов и фосфора, вызывающих интенсивное развитие сапрофитных бактерий, на частицах пород формируется биологическая пленка, которая превращает породы в более эффективный фильтр для задержания разнообразных микроорганизмов. Дальнейшее снижение количества патогенных микроорганизмов по пути фильтрации происходит вследствие общего уменьшения содержания в воде биологических форм из-за неблагоприятных для их существования условий: низких температур, ограниченных возможностей питания, присутствия антагонистических организмов и веществ — бактериальных вирусов, антибиотиков, вырабатываемых другими микроорганизмами, и т. д. Как показал Б. Меркли, уменьшение во времени количества аллохтонных микроорганизмов подчиняется экспоненциальной зависимости. При этом коэффициент биологической деградации различен для разных микроорганизмов и сильно зависит от химического состава и температуры воды, от концентрации автохтонных бактерий и бактериофагов и других факторов, поэтому определения этого коэффициента необходимо проводить экспериментально. Время «полураспада» для бактерий и вирусов, в течение которого их начальная концентрация в подземных водах снижается в два раза, составляет от 1 до 20 сут. Затем уменьшение их концентрации замедляется и некоторое количество бактерий и вирусов может сохраниться еще на значительное время.

В благоприятных условиях при температуре 15°С выживаемость патогенных бактерий и вирусов, по данным Г. Мэтчеса и А. Пекдегера, составляет для Escherichia Coli и Salmonella ty-phi более 100 сут, для Salmonella typhimurium — менее 230 сут, для Versinis sp. — менее 200 сут, а для Poliovirus — более 250 сут. По данным советских исследователей (Е. И. Моложавая и др.), выживаемость некоторых микроорганизмов в подземных водах достигает 400 сут (энтерококк, сальмонеллы паратифа В, фаг Escherichia Coli).

При определении размеров зон санитарной охраны водозаборов в СССР в соответствии с рекомендациями [24] расчетное время выживаемости болезнетворных микроорганизмов принимается равным 100 — 400 сут в зависимости от климатических условий и степени связи подземных вод с источниками загрязнения.

Перенос микроорганизмов в подземных водах, кроме выживаемости, контролируется еще и такими физическими и физико-химическими факторами, как фильтрация, адсорбция и дисперсия.

При фильтрации перенос микроорганизмов может быть ограничен малым, по сравнению с размером микроорганизмов, размером пор породы. Но поскольку диаметр бактерий (0,2 — 5 мкм) и вирусов (0,25 — 0,03 мкм) очень мал, то уже в крупнозернистых песках и тем более в гравии микроорганизмы могут свободно проходить через поры между частицами этих отложений и переноситься на значительные расстояния в соответствии со скоростью движения подземных вод, которая изменяется от долей до десятков и сотен метров в сутки.

По данным М. Хатчисона, в натурных условиях продвижение аллохтонных микроорганизмов наблюдалось в почвенном слое на 100 м, в песках и гравии на 75 м, а в трещиноватых мелах на расстояние более 1 км. Возможность дальнего переноса микроорганизмов увеличивается в трещиноватых и закарстованных породах не только из-за большой скорости движения воды, но и из-за значительного размера трещин.

Большое влияние на задержку движения микроорганизмов при фильтрации в пористой и трещиноватой средах может оказывать их адсорбция, приближенно описываемая изотермами сорбции Фрейндлиха или Лэнгмюра. Параметры, характеризующие соотношение между количеством микроорганизмов, адсорбированных и находящихся во взвешенном состоянии, зависят от состава пород и подземных вод и вида микроорганизмов. Однако, по данным полевых опытов Г. Мэтчеса и А. Пекдегера, скорость продвижения бактерий Escherichia Coli u Serratia marcescens в подземных водах была близка средней скорости движения воды, т. е. адсорбция происходила в очень малой степени.

Снижение скорости движения вирусов в грунтах значительно больше (для полиовирусов — до 500 раз) и также зависит от свойств воды, грунтов и вирусов. Однако вирусы могут десорби-роваться и вновь перемещаться с потоком, С. Дюбуа, Б. Мур и Б. Сейджик отмечали, что это происходит, например, после интенсивных дождей. Бактерии десорбируются в меньшей степени; они могут необратимо прикрепляться к поверхности частиц грунта и некоторое время жить в адсорбированном состоянии.

Хотя адсорбция вирусов происходит более интенсивно, чем адсорбция бактерий, имеются данные о том, что вирусы в песчаном водоносном горизонте распространялись на расстояние около 60 м от источника загрязнения (септика). Кроме этого, перенос вирусов сильно зависит от минерализации воды и при опреснении подземных вод, например после выпадения дождей, вирусы могут десорбироваться и вновь попадать в воду.

Некоторые экспериментальные данные по кинетике адсорбции микроорганизмов [21] позволяют охарактеризовать эти процессы математически в виде уравнения нелинейной кинетики, в котором учитываются число сорбированных организмов, их текущее содержание в воде, полная сорбционная емкость породы, в которой происходит фильтрация содержащей микроорганизмы воды, а также кинетический коэффициент. Это дает возможность использовать для прогноза миграции биологических загрязнений в потоке подземных вод дифференциальное уравнение переноса и его решение, действительное для условий постоянной скорости фильтрации и входной концентрации микроорганизмов $C_{вх}$ [3].

Параметры массопереноса микроорганизмов в подземных водах отличаются большой изменчивостью, так как зависят от вида и начального содержания микроорганизмов, литологического состава и структуры пород водоносного горизонта, химического состава подземных вод и др. В трещиноватых и закарстованных породах роль адсорбции относительно невелика и «очистка» подземных вод происходит главным образом путем их разбавления и снижения концентрации микроорганизмов.

Гидродинамическая дисперсия микроорганизмов в породах определяется не только коэффициентом диффузии и дисперсии, но и коэффициентом собственной активной мобильности бактерий *M,* причем со снижением температуры воды *M* уменьшается: по лабораторным данным для Escherichia Coli при t=20 °С *M*= =0,1 м/сут [44].

Существуют большие расхождения в данных о параметрах процессов дисперсии, адсорбции и отмирания микроорганизмов, что связано, в частности, с различной методикой экспериментов и их условиями, поэтому параметры модели переноса и выживаемости микроорганизмов необходимо определять всякий раз для конкретных условий.

Оценка опасности биологического загрязнения подземных вод и водозаборов имеет большое значение не только для обоснования размеров зон санитарной охраны, но и для выбора метода складирования отходов и участков размещения животноводческих ферм, свалок, полей фильтрации, полей орошения сточными водами, при выяснении безопасных расстояний от источников бактериального загрязнения до водозаборов, при искусственном пополнении запасов подземных вод поверхностными и сточными водами.

## ПОВЫШЕННЫЕ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ И ОБЩАЯ ЖЕСТКОСТЬ

Увеличение минерализации и общей жесткости подземных вод, проявляющееся обычно в возрастании концентрации хлоридов и сульфатов кальция, натрия и магния, часто происходит в результате привлечения к водозабору некондиционных солоноватых и соленых природных вод из смежных по разрезу водоносных горизонтов, удаленных частей эксплуатируемого водоносного горизонта и поверхностных вод. Предусмотреть и исключить эти нежелательные явления можно путем детального изучения гидрогеологических и гидрохимических условий района расположения водозабора с соответствующим обоснованием выбора участка расположения, схемы и производительности водозабора.

Наблюдающиеся тем не менее случаи увеличения минерализации и жесткости воды в водозаборах связаны с недостаточным учетом деталей природной гидрохимической обстановки или с нарушением заданного режима водоотбора.

Нередки также техногенные влияния, например утечки и фильтрация минерализованных промышленных и сточных вод с поступлением их в эксплуатируемый водоносный горизонт. Часто повышение минерализации подземных вод происходит вследствие выноса солей из почв оросительными водами. В таких районах высокую минерализацию имеет и вода в дренажных каналах, перехватывающих подземные воды, что, в свою очередь, приводит к росту минерализации воды в реках, принимающих дренажные воды. Таким образом, непригодные для питьевых целей минерализованные воды отбирают не только водозаборные скважины, расположенные на орошаемых массивах или ниже по потоку, но и скважины, использующие приречные и приканальные линзы подземных вод.

Широко известны также случаи внедрения (интрузии) соленых морских вод на побережьях в водоносный горизонт после снижения в нем уровней вследствие интенсивного водоотбора.

Интрузия океанических вод в водоносный горизонт в районе г. Санта-Барбара (шт. Калифорния, США) описана П. Мартином в 1984 г. За период с июля 1978 г. по январь 1980 г. уровни подземных вод понизились здесь более чем на 30 м вследствие увеличения отбора подземных вод городскими водозаборами. (Это увеличение отбора было частью исследований для определения эксплуатационных запасов подземных вод.) Водоотбор, сконцентрированный в городе на расстоянии до 1,6 км от побережья, вызвал понижение уровня подземных вод ниже уровня океана, в связи с чем увеличились размеры интрузии соленых океанических вод и ухудшилось качество воды в прибрежных водозаборных скважинах: в четырех скважинах концентрация хлоридов превысила 1 г/дм$^3$, а в остальных стала более 0,25 г/дм$^3$. Ранее предполагалось, что интрузия соленых вод может происходить только в неглубокой прилегающей к берегу части водоносного горизонта, так как вследствие тектонических нарушений далее залегают слабопроницаемые породы. Гидрогеологические исследования, однако, показали, что океаническая вода внедрилась на большую глубину и за пределы прибрежного тектонического сброса, который, таким образом, не стал барьером для интрузии. Поэтому при дальнейшем намеченном программой увеличении водоотбора контур деградации состава воды будет еще больше удаляться от берега и по расчетам через 20 лет достигнет городских скважин. С целью управления и контроля за интрузией предусмотрены снижение производительности городских водозаборов, развитие водоснабжения за счет использования поверхностных вод, искусственное пополнение подземных вод через нагнетательные скважины, передислокация водозаборных скважин в удаленные от берега участки.

# Г Л А В А 5.
# МЕТОДЫ ПРОГНОЗА КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ВОДОЗАБОРАХ

Как отмечалось выше, в условиях длительной эксплуатации водозабора состав отбираемой воды иногда изменяется по сравнению с составом, характерным непосредственно для участка расположения водозабора и изученным при разведке подземных вод. Причиной изменений может быть привлечение к водозабору воды другого состава из удаленных участков эксплуатируемого водоносного горизонта, переток из выше- и нижележащих водоносных горизонтов, привлечение поверхностных вод (речных, морских, из промышленных бассейнов — накопителей сточных вод) и т. д. В результате в отбираемой водозабором воде могут появиться различные загрязняющие вещества.

Эти изменения следует учитывать при оценке эксплуатационных запасов подземных вод, определяемых с учетом требования о сохранении качества отбираемых подземных вод в течение всего расчетного срока работы водозабора, а также при обосновании зон санитарной охраны водозабора. Надежность прогноза качества подземных вод для условий эксплуатации водозабора, зависящая от сложности гидрохимических условий района его расположения, правильности их систематизации при проведении прогнозных расчетов, полноты исходных параметров, является одним из критериев отнесения эксплуатационных запасов подземных вод по степени изученности к категориям А, В, С.

Прогноз качества подземных вод выполняется при оценке влияния на подземные воды объектов — потенциальных источников за- -грязнения, а также при обосновании и разработке проектов профилактических, локализационных и восстановительных мероприятий, имеющих целью защиту подземных вод от загрязнения.

Прогноз качества подземных вод на водозаборах складывается из оценки возможности подтягивания к водозабору некондиционных по качеству вод, определения сроков их появления в водозаборе и прогноза изменения во времени состава и качества отбираемой воды.

Движение растворенных, взвешенных или эмульгированных веществ в водоносных горизонтах в области активного водообмена контролируется в первую очередь теми же гидрогеологическими факторами, которые определяют фильтрацию подземных вод, — геологическим строением, структурой и свойствами водоносных горизонтов, условиями пополнения запасов подземных вод (инфильтрация атмосферных осадков, питание из

водотоков и водоемов, переток их соседних водоносных горизонтов), интенсивностью отбора воды из водоносного горизонта водозаборами, дренажами и т. д. Все это в целом определяет направления и скорости движения подземных вод вместе с содержащимися в них веществами к естественным дренам и к водозабору.

Кроме фильтрационных факторов большое влияние оказывают физико-химические процессы трансформации веществ в подземных водах и их взаимодействие с вмещающими породами — ионный обмен, физическая и химическая сорбция, разложение, выпадение в осадок и растворение, радиоактивный распад, дисперсия и другие процессы, приводящие к изменению скорости движения и концентрации мигрирующих в водоносном горизонте веществ.

При прогнозировании изменения качества воды в водозаборе должны быть учтены гидрогеологическая обстановка и гидрохимические условия района размещения водозабора, выявлены источники питания подземных вод, установлены существующие и возможные источники загрязнения и их гидродинамическая активность, т. е. влияние на уровни, скорости и расходы естественного потока подземных вод.

Теоретической основой прогноза качества подземных вод является теория массопереноса в фильтрующей среде, а применительно к гидрогеологическим задачам — теория миграции веществ в горных породах и в подземных водах, в которой в схематизированном виде учитываются некоторые гидрогеологические и физико-химические факторы.

Таблица 5

**Параметры сорбции некоторых загрязняющих веществ**

| Мигрирующее вещестзо-загрязнитель | Порода | Характеристика сорбционного процесса | Автор |
|---|---|---|---|
| **Стронций** | **Кварцевый песок,** | **$e=10^{-3}$ — $10^{-2}$** | **Н. В. Берсеньева, 1984 г.** |
| | **Суглинки** | **e = 0,3** | **Р. Джексон. 1980 г.** |
| | **Пески** | **v=33; \|З=10** | |
| **Цезий** | **— « —** | **v=330; \|З=100** | |
| **Талловые мыла** | **Ленточные глины** | **\|З=0,1 — 0,5** | |
| | **Суглинки** | **\|З=0, 3 — 0,7** | **Н. С. Петров, 1982 г.** |
| | **Пески** | **\|З=0,8 — 1,4** | |
| **Фосфаты** | **Ленточные глины** | **\|З=0,2 — 0,3** | |
| | **Суглинки** | **\|З = 0, 1 — 0,7** | |
| | **Пески** | **\|З=1,2** | |
| **Фториды** | **— « —** | **\|З=2, 1 — 9,5** | |
| **Хлороформ, бромоформ, трихлорэтан, хлорбензол** | **Пески** | **v=3 — 35** | **П. Роберте, А. Валокки, 1981 г.** |
| **Масляная кислота, фенолы, хлорфенол, диметилфталат** | **—** | **v= 1** | **П. Сеттон, Дж. Баркер, 1985 г.** |

Примечания. Для стронция и цезия приведены данные, полученные при проведении полевых и лабораторных опытов, для талловых мыл, фосфатов, фторидов, хлороформа, трихлорэтана и хлорбензола — только лабораторных опытов и для масляной кислоты, фенолов, хлорфенола и диметилфтолата — только полевых опытов.

*e* — емкость поглощения, мг-экв/г; *C* — концентрация растворенных веществ, мг/дм$^3$; $v=v_д/v_м$ (где $v_Д$ — скорость движения воды, $v_м$ — скорость движения вещества); |З — параметр распределения $(N_C/C)$, мл/г; |З — коэффициент распределения $(CJN_c)$ (где $N_C$ — концентрация сорбированных веществ).

Массообмен и миграция химических веществ в подземной сфере в связи с качеством подземных вод рассматривались многими исследователями [1, 3 — 5, 8, 14, 19, 28, 30, 34 и др.] Сводка данных о параметрах сорбции загрязняющих веществ в горных породах при фильтрации имеется в работах [1, 3]. В табл. 5 по литературным данным приведены некоторые дополнительные сведения.

В теории миграции процессы массопереноса в подземных водах описываются физико-математическими моделями, разработанными применительно к нескольким типам фильтрационного строения горных пород. Для фильтрационно-однородных пористых и трещиноватых пород применяется модель конвективно-дисперсионного переноса, который развивается как движение веществ вместе с потоком подземных вод (конвекция) с сопутствующим рассеянием этих веществ (дисперсия) на границе зон распространения воды различного состава. В этой модели, кроме того, возможен учет влияния проточных и застойных зон, сорбционных и других физико-химических процессов. Для фильтрационно-неоднородных толщ пород рассмотрены следующие модели: 1) слоистой толщи с конвективно-дисперсионным массопереносом вдоль отдельных слоев и с молекулярной диффузией между слоями; 2) квазиоднородной трещиновато-пористой

породы с конвективно-дисперсионным переносом в трещинах и молекулярно-диффузионным в блоках; 3) неоднородной породы неупорядоченного строения, содержащей случайным образом распределенные линзы, пропластки и включения пород различной формы и проницаемости. В моделях неоднородных толщ также можно учитывать некоторые виды физико-химического взаимодействия.

На формирование качества подземных вод, отбираемых длительно работающим водозабором, влияют значительные площади водоносного горизонта, поэтому для решения поставленной задачи при рассмотрении неоднородности целесообразно выделять достаточно заметные по мощности и выдержанные по простиранию высокопроницаемые, непроницаемые и слабопроницаемые слои, пласты или зоны.

Применение различных моделей массопереноса к задачам прогноза качества воды в водозаборах подземных вод в настоящее время ограничено недостаточной изученностью соответствия тех или иных моделей реальным условиям распространения веществ в подземной сфере и недостатком сведений о параметрах массопереноса, которые специфичны для различных веществ и пород и условий их взаимодействия. Для определения параметров мас-сообмена необходимы специальные полевые эксперименты, методика проведения которых и интерпретация результатов разработаны также еще недостаточно. Обычно при прогнозах качества воды в водозаборах используется наиболее простая модель конвективного переноса, в которой учитывается только основной фактор миграции — перенос веществ с частицами воды при их одинаковой усредненной скорости движения. В этой схеме несложно учесть дисперсию и частный случай сорбции — равновесную сорбцию.

Прогноз составляется в два этапа. Вначале тем или иным методом проводят расчет плановой фильтрации (как правило, можно ограничиться рассмотрением стационарного режима) с построением гидродинамичной сетки движения подземных вод. При этом выделяют область питания водозабора (см. гл. 9) и представляющие интерес отдельные линии и полосы тока, например связывающие водозабор с контурами распространения некондиционных подземных вод, с участками расположения источников загрязнения и т. п.

Затем применительно к выделенным полосам тока проводят расчеты миграции вещества в одномерном потоке с учетом только горизонтальной скорости фильтрации. В некоторых случаях (значительная роль инфильтрации загрязненных вод в водоносный горизонт с поверхности, вертикальная фильтрационная неоднородность, повышенная плотность инфильтрующихся вод и др.) для выделенных полос тока целесообразно изучать миграцию в профильно-двухмерном потоке с учетом различия горизонтальных и вертикальных составляющих скорости фильтрации; методика этих расчетов рассмотрена в работах О. Стрэка, В. М. Шестакова и Л. С. Рыбниковой.

Модель конвективного переноса веществ, или «поршневого» вытеснения воды одного состава водой другого состава, широко используется в СССР и за рубежом не только при прогнозе качества воды в связи с оценкой эксплуатационных запасов подземных вод, но и при разработке проектов технических мероприятий по защите подземных вод от загрязнения, а также для расчетов границ зон санитарной охраны водозаборов подземных вод (см. главы 9 и 10).

Для прогноза массопереноса в подземных водах применяют различные методы расчета — аналитические (для простых схем фильтрации и миграции), графоаналитические, а также аналоговое и численное моделирование. Методика аналитических расчетов, позволяющих для некоторых схематизированных условий и расчетных схем определить на основе модели конвективного переноса время и дальность продвижения границы раздела чистых и загрязненных вод при работе водозабора, изложена в работах [1, 3 — 5,8, 9, 11, 12, 17,25,34 и др.]

При моделировании фильтрации и массопереноса на ЭЦВМ используются конечно- и вариационно-разностные численные методы, причем последние реализуются обычно в виде различных модификаций метода конечных элементов. На ЭЦВМ также обычно вначале моделируют фильтрационный поток, а затем по отдельным направлениям рассчитывают миграцию. Известны моделирующие системы, в которых модели фильтрационного течения и массопереноса объединены [34, 36]. Примером успешного использования модели конвективного переноса веществ с целью прогноза качества воды в проектируемом водозаборе является исследование, выполненное для Шадринского водозабора в долине р. Исети [27]. Прогноз качества подземных вод оказался необходимым в связи с ожидаемым перетоком из выше- и нижележащих водоносных горизонтов. Здесь из трех этажно расположенных и взаимосвязанных водоносных горизонтов (сверху вниз, четвертичный аллювиальный в песках, нижнеэоценовый в опоках, верхнемеловой в песках и песчаниках) для централизованного водоснабжения выбран средний, залегающий на глубине 30 — 40 м. Водоносные горизонты разделены слабопроницаемыми толщами — диатомитовой и аргиллитово-мергельной. Гидрохимические условия района характеризуются плановой и вертикальной неоднородностью водоносных горизонтов, связанной с разгрузкой подземных вод в пойменной части долины и влиянием региональных глубинных тектонических нарушений. Минерализация (в г/дм$^3$) подземных вод с глубиной увеличивается: в четвертичном горизонте она составляет в среднем 0,6 (местами более 1), в нижнеэоценовом опоковом 1,9 (в плане минерализация изменяется от 0,8 до 3,5, а в разрезе от кровли к подошве увеличивается в 1,5 — 3 раза), в верхнемеловом 6 — 8. В условиях работы проектируемого водозабора, имеющего большую производительность, в опоковый горизонт будут привлечены подземные воды из аллювиального и верхнемелового водоносных горизонтов. Прогноз фильтрации в многослойной толще и изменений химического состава подземных вод опокового горизонта при водоотборе выполнен на численной нестационарной математической модели. По результатам моделирования установлено, что через 25 лет основная часть (75%) водо-отбора будет формироваться за счет перетока из четвертичного аллювиального горизонта, а остальная

часть (25%) — за счет привлечения воды из удаленных участков опокового. Расчеты концентрации солей в отбираемой воде, проведенные по схеме смешения вод различной минерализации, подходящих к водозабору по отдельным полосам тока, показали, что в начальный период минерализация составит 1,61 г/дм$^3$, через три года эксплуатации она увеличится до 1,68 г/дм$^3$ (из-за привлечения более минерализованных вод опокового горизонта с участков, приуроченных к дну долины), а затем, вследствие поступления пресных вод аллювиального горизонта, начнет снижаться и через 13 лет составит 1,5 г/дм$^3$, а через 25 лет — 1,43 г/дм$^3$.

Более сложная численная модель миграции, учитывающая физико-химические процессы, применена Дж. Робертсоном при изучении распространения радиоактивных и химических отходов от ядерных реакторов в подземных водах. Фильтрационный поток был отражен на конечно-разностной модели; в модель массопереноса включены конвективный перенос, двухмерная дисперсия, радиоактивный распад и обратимая равновесная сорбция по линейной изотерме.

Для изучения миграции стронция в численной модели, разработанной К. Миллером и Л. Бенсоном [42], кроме конвективно-дисперсионного переноса отражены сорбция ионов и комплексов на твердой фазе, формирование комплексов в водной фазе, диссоциация. Уравнения, характеризующие взаимодействие веществ, их перенос и ионный обмен, выражены в дифференциальной и алгебраической формах и решаются совместно. Методика численного моделирования для изучения миграции в системе пресные воды — соленые воды при эксплуатации водозабором линз пресных вод, залегающих над минерализованными водами, предложена Я. и Х. Рабинами [45].

# Г Л А В А 6.
# САНИТАРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К УСТРОЙСТВУ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В состав водозаборных сооружений входят: 1) водозахватные устройства, т. е. сооружения для отбора воды из водоносного горизонта — вертикальные скважины, шахтные колодцы, горизонтальные линейные открытые или закрытые дрены, трубчатые дрены, горизонтальные скважины-лучи (лучевые водозаборы), каптажи источников. В комбинированных водозаборах горизонтальные дрены, галереи, штольни и шахтные колодцы сочетаются с вертикальными скважинами, вскрывающими напорный водоносный горизонт; 2) насосные станции первого подъема воды из водоприемных устройств; 3) водоводы для сбора воды из водоприемных устройств и последующей подачи ее, если это необходимо, на сооружения по подготовке и улучшению качества воды или сразу в резервуары для дальнейшей транспортировки к потребителям; 4) сооружения по подготовке и улучшению качества воды; 5) насосные станции второго и при необходимости третьего-четвертого подъемов (при сифонном способе отбора воды скважинами и шахтными колодцами насосные станции первого и второго подъемов совмещаются в одном здании); 6) магистральные водоводы для транспортировки воды потребителям; 7) сооружения, регулирующие напор и расход воды, подаваемой в водопроводную сеть потребителя.

В состав сооружений горизонтального водозабора входят: а) одна или несколько линейных дрен, проложенных под уклоном к водосборному колодцу; б) смотровые колодцы над дренами; в) водосборный колодец и обычно совмещенная с ним насосная станция.

Лучевой водозабор состоит из водонепроницаемого шахтного колодца; горизонтальных скважин-лучей, выведенных из колодцев в водоносный горизонт веерообразно в одной или двух горизонтальных плоскостях; насосной станции, монтируемой в шахтном колодце.

Для перехвата естественных выходов подземных вод сооружаются каптажи — камеры или колодцы, работающие дном или стенками. Каптажи отдельных источников соединяются трубами, по которым вода самотеком поступает в сборный колодец (камеру), а из него также самотеком или с помощью насосов подается потребителям. При пластовом выходе подземных вод их сбор осуществляется с помощью горизонтальной дрены.

При необходимости в состав сооружений горизонтальных и лучевых водозаборов, а также каптажей родников вводятся устройства для обработки воды.

При искусственном пополнении запасов подземных вод в состав водозабора входят: 1) сооружения для забора воды из источника пополнения, в качестве которого используются поверхностные, шахтные, дренажные воды, очищенные сточные воды или подземные воды другого водоносного горизонта; 2) насосная станция первого подъема для подачи воды из источника пополнения; 3) сооружения предварительной подготовки «сырой» воды, используемой для пополнения; 4) инфильтрационные сооружения, через которые подготовленная вода подается (инфильтруется) в водоносный горизонт, — открытые (бассейны, каналы, площадки, канавы, борозды, русла водотоков, естественные и искусственные понижения рельефа) или закрытые (поглощающие буровые скважины, шурфы, колодцы, галереи, штольни); 5) водозахватные устройства (скважины, шахтные колодцы, лучевые или горизонтальные водозаборы); 6) сборные водоводы; 7) резервуары; 8) сооружения для обработки подземных вод (при необходимости); 9) резервуары чистой воды; 10) насосная станция второго подъема; 11) магистральные водоводы.

Выбор типа водозахватного сооружения определяется геологическими и гидрогеологическими условиями, заданной производительностью водозабора, а также величиной затрат на строительство и эксплуатацию сооружений.

Наиболее распространенным типом водозахватных устройств являются водозаборные скважины, применяемые для отбора подземных вод в различных гидрогеологических условиях с глубин от 10 до 1000 м, а также при залегании водоносного горизонта на глубине менее 10 м, если мощность горизонта не менее 5 м. Шахтные колодцы используются для отбора воды из напорных и безнапорных водоносных горизонтов, залегающих на глубинах до 50 м. Горизонтальные водозаборы с укладкой в открытой траншее трубчатой дрены или каменно-щебеночной призмы применяются в тех случаях,- когда подошва безнапорного водоносного горизонта залегает на небольшой (до 8 м) глубине; для получения подземных вод с больших глубин используются водосборные галереи и штольни.

Лучевые водозаборы применяются для .получения воды из водоносных горизонтов, сложенных песчано-галечниковыми безвалунными отложениями мощностью 3 — 20 м и залегающих на глубине до 20 м от поверхности земли.

В санитарном отношении наиболее уязвимы водозаборные сооружения, обычно отбирающие неглубокозалегающие подземные воды: шахтные колодцы, горизонтальные и лучевые водозаборы, каптажи родников, водозаборы в системе искусственного пополнения подземных вод.

При выборе типа водозахватного сооружения (скважины, лучевой или горизонтальный водозабор) и схемы расположения скважин (одиночные, группы скважин, линейный ряд, кольцевая или площадная система) учитываются гидрогеологическая эффективность водозабора, оцениваемая оптимальными значениями понижений уровня подземных вод и расхода водозабора, технико-экономические показатели (протяженность и стоимость коммуникаций, стоимость строительства водозабора, площадь и народнохозяйственное использование отводимых под водозабор земель), а также экологическое влияние отбора подземных вод на окружающую среду, например на лесные массивы, пастбища и т. д.

В зависимости от того, какую роль в питании эксплуатируемого водоносного горизонта играют поверхностные воды (река, озеро, водохранилище, море), выделяют водозаборы водораздельные, удаленные от поверхностного источника питания, и береговые (или инфильтрационные), размещаемые вблизи уреза реки или водоема и получающие из них постоянное или периодическое питание. Это разделение имеет и санитарное значение. Так, подземные воды, отбираемые береговыми водозаборами, часто испытывают неблагоприятное влияние загрязненных поверхностных вод. Характер и степень изменения качества определяются составом речных вод, производительностью и размерами водозабора, расстоянием его от реки, а также гидрогеологическими факторами — фильтрационной однородностью и водопроводимостью водоносного горизонта, уклонами естественного (т. е. не нарушенного работой водозабора) потока подземных вод и др.

Ухудшение качества подземных вод, как отмечено выше, нередко происходит вследствие случайного проникновения загрязненных атмосферных осадков, поверхностных или некондиционных вод неэксплуатируемого горизонта непосредственно в водозаборное сооружение — скважину, дрену. Для предупреждения этих явлений место расположения сооружения и конструкция водоза-хватных и других сооружений, входящих в состав водозабора, должны удовлетворять определенным санитарно-техническим требованиям. Прежде всего, участок расположения скважин, дрен или других водозахватных сооружений должен находиться в благоприятных санитарных условиях. Кроме того, необходимо выполнение специальных мероприятий по оборудованию скважин. Для предупреждения затопления устья скважины (шахты) грунтовыми или паводковыми водами устраиваются асфальтированные откосы от стен сооружений и водоотводные каналы. Конструкция оголовка скважины должна быть герметична, чтобы не допустить проникновения в межтрубное и затрубное пространство поверхностной воды и загрязнений. Верхняя часть выведенных на поверхность земли колонн должна возвышаться не менее чем на 0,5 м. При выводе устья скважины в шахту на дне последней устраивается приямок с уклоном к нему пола для откачки просочившейся воды. Металлическая крышка должна защищать шахту от атмосферных осадков; вокруг устья скважины и на дне шахты устраивается глиняный «замок».

Изоляция эксплуатируемого водоносного горизонта от выше- и нижележащих горизонтов осуществляется с помощью цементации межтрубного и затрубного пространства, а также тампонажа стыков обсадных труб. Первый от поверхности неиспользуемый водоносный горизонт перекрывается двумя колоннами обсадных труб или одной колонной с затрубной цементацией. Скважины для питьевого водоснабжения, как правило, оборудуются металлическими трубами; использование труб из полимерных материалов или специальных покрытый для металлических труб возможно только с разрешения Министерства здравоохранения СССР. Обсадная труба в верхней части скважины, находящаяся под воздействием грунтовых вод, должна быть коррозионно-устойчивой, что, в частности, может быть достигнуто цементацией затрубного пространства под давлением с выдавливанием цемента от башмака до устья скважины.

Извлечение из скважины промежуточных колонн обсадных труб допускается только в случае, если это не вызовет соединения эксплуатационного и смежных водоносных горизонтов. При вырезке колонны труб срез колонны должен не менее чем на 5 м превышать башмак предыдущей колонны, а кольцевой зазор следует заделывать цементным раствором или сальником. Фильтр скважины должен быть устойчив к химической коррозии и эрозионному воздействию воды. Материал для обсыпки фильтров необходимо отбирать из незагрязненного карьера и затем следить, чтобы его состав не ухудшился при транспортировке и хранении; в

некоторых случаях целесообразно промыть материал обсыпки на поверхности земли. Перед засыпкой материал дезинфицируют. При бурении скважин с промывкой забоя водой и применении глинистого раствора вода и глина также должны быть чистыми. После окончания бурения скважины, установки фильтра и строительной откачки, выполняющейся до полного осветления воды в скважине, отбирают пробы воды для химических и бактериологических анализов. Повторная откачка воды из скважины на сброс выполняется после монтажа насоса. В случае интенсивного бактериального загрязнения откачиваемой воды проводят дезинфекцию скважины и насоса раствором активного хлора 50 — 100 мг/дм$^3$. В случаях, когда для подъема воды используется зр-лифт, подаваемый в скважину воздух следует очистить от примесей смазочных материалов; он не должен быть загрязнен дымом, газами, пылью. При ремонте скважины опускаемое в скважину водоподъемное оборудование должно быть очищено от грязи и смазочного масла, а затем промыто раствором хлорной извести. После каждого ремонта проводится откачка воды на сброс, а при плохих бактериологических анализах — хлорирование скважины.

На горизонтальных водозаборах вокруг смотровых и водосборных колодцев устраивают глиняный замок, чтобы исключить проникновение загрязненных поверхностных вод. Колодцы оборудуются крышками и вентиляцией.

Разведочные и неиспользуемые наблюдательные скважины должны быть затампонированы, чтобы предотвратить поступление загрязненных подземных вод из других горизонтов по стволу скважины, по межтрубному или затрубному пространствам. При тампонаже скважин выполняются следующие операции: очистка скважины от заиления и обрастаний стенок; промывка скважины и отбор пробы воды на химический и бактериологический анализы; дезинфекция скважины раствором хлорной извести; засыпка рабочей части скважины фильтрующим материалом (песок, гравий, щебень), предварительно промытым и продезинфицированным; заливка цементным раствором через заливочную трубу; перфорация скважины на участке залегания грунтовых вод; заливка ствола скважины цементным раствором под избыточным давлением для заполнения раствором затрубного и межтрубного пространства через перфорированную часть скважины; устройство шурфа вокруг скважины на глубину 1,5 — 2 м; срез обсадных труб на 0,5 м ниже поверхности земли, заливка шурфа раствором цемента.

При использовании шахтных колодцев к основным санитарно-техническим мероприятиям относятся предохранение прилегающей территории от загрязнения, отвод от колодца ливневых вод, надежное крепление шахты колодца, устройство глиняного «замка» вокруг устья колодца и применение, механического способа водоподъема. По отношению к существующим и возможным источникам загрязнения колодец необходимо располагать выше по течению грунтового потока и выше по рельефу. Нельзя размещать шахтные колодцы на участках, заливаемых ливневыми и талыми водами или заболоченных. При бактериальном загрязнении колодца можно применить хлорирование воды с помощью дозирующего патрона.

Санитарно-технические требования предъявляются и к другим сооружениям водозабора. Так, резервуары для хранения запаса воды должны иметь непроницаемые стенки и дно, для чего применяются глиняные «замки», торкретирование, изоляция асфальтом и др.; поверхностные воды отводятся от резервуаров с помощью нагорных канав. Люки резервуаров и шахт герметически закрывают плотными металлическими крышками; на краях люков делают отливы из цементного раствора. Во избежание вторичного загрязнения воды в системе водоразводящих сетей должна быть обеспечена герметичность соединений труб. Водопроводные линии с водой питьевого качества укладывают, как правило, выше линий бытовой и производственной канализации. Проектирование и укладку водопроводных линий проводят после санитарной оценки трассы; водопроводные линии испытывают под давлением воды на герметичность и прочность, промывают, дезинфицируют раствором хлорной извести или газообразного хлора. При подготовке, транспортировке и хранении воды, используемой для хозяйственно-питьевых нужд, следует применять реагенты, внутренние антикоррозионные покрытия, а также фильтрующие материалы, соответствующие требованиям Министерства здравоохранения СССР.

# Г Л А В А 7.
# УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОБРАБОТКОЙ ИХ В ВОДОНОСНОМ ГОРИЗОНТЕ

Мероприятия по улучшению качества подземных вод проводятся в случаях, когда оно по некоторым показателям не удовлетворяет требованиям потребителя. Наиболее простым способом улучшения качества является смешение воды из различных водозаборов или отдельных скважин на водозаборе, среди которых имеются водозаборы или скважины с более или менее чистой водой. Вода смешивается в резервуарах, находящихся непосредственно на водозаборе или на водопроводной станции.

При этом учитываются расходы воды из отдельных скважин и водозаборов, показатели состава и качества воды и по формуле смешения определяется ожидаемый состав смешанных вод. В некоторых случаях для доказательства эффективности смешения может потребоваться проведение предварительных лабораторных опытов.

При отсутствии источников водоснабжения с чистыми водами или малой их производительности смешение становится невозможным и тогда необходимо проводить специальную обработку воды.

Наиболее часто применяемыми видами улучшения качества подземных вод являются обеззараживание и обезжелезивание; в отдельных случаях может также потребоваться снижение содержания марганца, кремниевой кислоты и растворенных газов, снижение концентрации или, наоборот, добавление фтора; умягчение; уменьшение солесодержания; удаление привкусов и запахов и др. Традиционные методы улучшения качества подземных и поверхностных вод связана с обработкой воды на очистных сооружениях. В последнее время развиваются новые методы очистки, при которых обработка воды и улучшение ее качества осуществляются непосредственно в водоносном горизонте. Это сулит значительные экономические выгоды, так как отпадает необходимость в строительстве и эксплуатации дорогостоящих очистных сооружений.

Способ очистки подземных вод от железа и марганца непосредственно в водоносном горизонте был разработан в 1969 г. в Финляндии. По этому способу, получившему широкое развитие в Швеции, а затем и в других странах под названием метода Вире-доке, удаление железа и марганца из подземных вод производится на пути фильтрации к водозаборной скважине. Для этого вокруг эксплуатационной водозаборной скважины на расстоянии от 5 до 100 м от нее по окружности устраиваются пять — восемь аэрацион-ных скважин. Часть воды (10 — 40%), отбираемой из эксплуатационной скважины, дегазируется для освобождения от метана и сероводорода, обогащается кислородом и затем с помощью воздушно-водяных эжекторов периодически подается в аэрационные скважины. Таким образом, в водоносном пласте вокруг эксплуатационной скважины создается обогащенная кислородом зона, условия в которой благоприятны для интенсификации жизнедеятельности железобактерий и марганцевых бактерий, осаждения труднорастворимых соединений железа и марганца и их адсорбции на зернах грунта. В результате в водозаборную скважину некоторое время поступает вода с пониженным содержанием железа и марганца. При последующем увеличении содержания этих веществ в откачиваемой воде обработку аэрационных скважин повторяют.

Для повышения степени подземной очистки воды от железа и разработаны новые способы, находящиеся в стадии экспериментального опробования и внедрения на отдельных водозаборах.

Математическая модель процесса обезжелезивания в водоносном горизонте и технологический регламент на проектирование установок обезжелезивания (при содержании в воде железа до 3 мг/дм$^3$) с попутным удалением марганца и сероводорода разработаны во ВНИИ ВОДГЕО (Г. М. Коммунар). При этом предусмотрена возможность использования установок трех типов: циклических, циркуляционных и многоскважинных.

В установке циклического типа в одной и той же скважине периодически производятся зарядка и откачка. При зарядке в при-скважиныую зону подается кислород путем закачки аэрированной воды; на этой стадии процесса содержащееся в воде железо окисляется адсорбированным кислородом и осаждается в породе. На стадии откачки из скважины отбирается обезжелезенная вода.

В установках циркуляционного типа фильтр водозаборной скважины с помощью герметических перегородок (пакеров) разделяется на отдельные секции, что обеспечивает возможность одновременной закачки аэрированной воды, например через верхнюю секцию фильтра, и откачки очищенной воды через нижнюю секцию.

Многоскважинная установка в принципе аналогична системе «Виредокс» и может включать от одной до нескольких аэрацион-ных скважин. При необходимости дополнительной обработки воды реагентами к описанным установкам на стадии зарядки можно подключить дозаторы реагентов.

Опыт эксплуатации установок обезжелезивания воды в водоносном горизонте на водозаборах ряда городов (Рига, Брест и др.) свидетельствует об их высокой эффективности.

По мнению ряда исследователей (В. Бреник, И. Радченко,, И. Хаускрехта), можно использовать метод подземной очистки с подачей в водоносный горизонт кислорода или кислородсодержащих веществ для удаления из воды (кроме железа и марганца) тяжелых металлов и аммония, а также для снижения углекислотной агрессивности воды. При этом из воды могут быть удалены растворенные углеводороды и другие органические вещества, появившиеся в водоносном горизонте в результате загрязнения воды. Для улучшения качества подземных вод, загрязненных растворенными нефтепродуктами, Г. Нагель и В. Кюн в 1982 г. предложили способ подземной очистки с использованием озонирования. Восстановление качества подземных вод, загрязненных нефтепродуктами, осуществляется с помощью этого метода с 1980 г. на водозаборе в г. Карлсруэ (ФРГ). Нефтепродукты появились здесь, в четырех скважинах, дающих в сумме 17 тыс. м$^3$/сут воды и расположенных в 400 м от железнодорожных путей, на которых происходили утечки нефти при заполнении цистерн. Поскольку очистка воды в поверхностных очистных сооружениях, например на активированном угле, экономически невыгодна, было принято решение о создании подземной водяной завесы, отделяющей водоза-борные скважины от зоны загрязнения. Для этого между очагом загрязнения и водозаборными скважинами на расстоянии 45 — 75м пробурили пять нагнетательных инфильтрационных скважин, в каждую из которых подается 2 — 3 тыс. м$^3$/сут воды, предварительно обработанной озоном в больших реакторах-бассейнах. Воду для обработки отбирают из защищаемой скважины и добавляют в нее озон в количестве 1 г на 1 г органических примесей в воде (в пересчете на углерод). Обработанная в реакторе вода содержит 0,1 — 0,2 мг/дм$^3$ озона. В результате нагнетания, озонированной воды в водозаборные скважины концентрация нефтепродуктов в воде снизилась с 3 — 5 до 1 — 1,5 мг/дм$^3$, увеличилось содержание кислорода с 1 — 3 до 7 — 8 мг/дм$^3$, наблюдалось также снижение концентрации тяжелых металлов и улучшение бактериологических показателей качества воды.

При водоподготовке на специальных поверхностных очистных сооружениях для улучшения состава и

качества питьевых вод применяются химические (реагентные, ионного обмена, адсорбционные), физические (дегазация, вымораживание, дистилляция, термическая обработка), электрохимические и комбинированные методы.

# ГЛАВА 8.
# МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОХРАНЕ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Для регулирования и контроля антропогенного загрязнения используемых для водоснабжения подземных вод применяются управляющие воздействия (выбор нового источника водоснабжения, устранение источника загрязнения, мероприятия по защите подземных вод от загрязнения) или очистка и обработка отбираемой загрязненной воды.

Мероприятия по защите подземных вод от загрязнения подразделяются на профилактические, направленные на сохранение естественного качества подземных вод; локализационные, препятствующие увеличению и продвижению создавшегося в водоносном горизонте очага загрязнения; восстановительные, проводимые для удаления загрязнений из водоносного горизонта и восстановления природного качества подземных вод [1, 3].

Опыт показывает, что для осуществления мероприятий по ликвидации загрязнения подземных вод требуются большие средства; кроме того, возникают технические трудности, связанные с необходимостью очистки откачиваемых загрязненных подземных вод .из-за невозможности их использования или сброса в водоем. Между тем методы очистки подземных вод от химических загрязнений разработаны недостаточно и также требуют больших эксплуатационных затрат вследствие большого объема подлежащих очистке подземных вод. Если очаг загрязнения в водоносном горизонте имеет большой объем, ликвидация загрязнения становится практически неосуществимой. Поэтому основным направлением в борьбе с загрязнением подземных вод должно быть осуществление системы профилактических мер, учитывающих тесную связь подземных вод с поверхностными.

Главную роль в предупреждении загрязнения подземных вод играют мероприятия общего характера. К их числу в первую очередь следует отнести все меры по предотвращению загрязнения рек и водоемов; совершенствование методов очистки промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод; создание производств с бессточной технологией и замкнутых систем промышленного водоснабжения и канализации; изоляцию коммуникации, несущих сточные воды; ликвидацию или очистку газодымовых выбросов на предприятиях; ограничение использования ядохимикатов и удобрений на сельскохозяйственных территориях; глубокое подземное захоронение особо вредных стоков, очистка которых экономически не оправдана.

Многие мероприятия профилактического характера должны осуществляться при активном участии специалистов-гидрогеологов. К таким мероприятиям относятся:

— целенаправленный выбор водоносного горизонта, места расположения водозабора и режима его эксплуатации, т. е. определение производительности, числа и расположения водозаборных сооружений, а также допустимого понижения уровня подземных вод с целью сохранения должного качества подземных вод на весь период эксплуатации водозабора;

— оценка естественного и прогнозного качества подземных вод с позиций удовлетворения требованиям государственных стандартов на качество воды и при учете возможности и технико-экономической эффективности искусственного улучшения качества воды;

— выполнение гидрогеологических расчетов для обоснования размеров зоны санитарной охраны для каждого водозабора хозяйственно-питьевого нааначения;

— назначение в пределах зоны санитарной охраны санитарно-технического режима, соответствующего гидрогеологическим условиям и специфике хозяйственного освоения территории в районе водозабора.

При обязательном участии гидрогеологических организаций по данным специальных изысканий должно также проводиться обоснование выбора безопасного в отношении загрязнения подземных вод места расположения новых промышленных предприятий, населенных пунктов и сельскохозяйственных объектов. Геологический контроль особенно важен при выборе участка размещения новых предприятий с большим количеством сточных вод и отходов, животноводческих комплексов и ферм. При этом необходимо учитывать естественную защищенность пригодных для водоснабжения подземных вод и связь отдельных водоносных горизонтов между собой и с поверхностными водами. Как правило, следует избегать строительства водоемких промышленных предприятий в долинах рек, на поймах и аллювиальных террасах, а также в других районах, где грунтовые или плохо защищенные подземные воды используются или могут быть использованы для водоснабжения.

Если по технико-экономическим или другим причинам нельзя отказаться от размещения нового предприятия в районе незащищенного водоносного горизонта, то гидрогеологические данные должны быть достаточными для разработки рекомендаций по защитным мероприятиям и созданию наблюдательной сети скважин, с помощью которых контролируется эффективность этих мероприятий.

Значительный успех в деле охраны качества подземных вод обеспечивает создание региональных водоохранных зон, охватывающих всю область питания и распространения водоносного горизонта, используемого для водоснабжения, или ее значительную часть. Здесь вводятся определенный режим использования территории, регламент эксплуатации существующих предприятий, строгий контроль за очисткой и сбросом сточных вод, санитарным состоянием почв, воздуха, природных вод и т. п.

Профилактике загрязнения подземных вод способствует мониторинг качества подземных вод, т. е. научно обоснованная система длительных натурных наблюдений за основными динамическими характеристиками водоносного горизонта: уровнями, напорами, химическим и бактериологическим составом, температурой воды и т. п. Анализ этих данных позволяет получить пространственно-временную картину загрязнения, объяснить произошедшие изменения и дать прогноз ожидаемых изменений качества подземных вод.

Специальные профилактические мероприятия технического характера применяются для изоляции подземных вод от промышленных, сельскохозяйственных и коммунальных отходов, водорастворимого сырья, продуктов производства. Выбор схемы, типа, конструкции и проектирование профилактических технических мероприятий проводятся по данным инженерно-геологических изысканий и наблюдений. Профилактика загрязнения подземных и поверхностных вод при сельскохозяйственном производстве имеет большое значение в связи с развитием современного животноводства, поставленного на промышленную основу и дающего большое количество навоза и навозных стоков с высокой концентрацией органических веществ в них и бактериальной загрязненностью: биологическое потребление кислорода БПКб более 6 — 8 г$O_2$/дм$^3$; коли-титр $10^{\sim 10}$ — 1СН$^2$; титр энтерококков $10^{\sim 7}$; патогенные серо-типы кишечной палочки и сальмонеллы до 10000 ед/дм$^3$; загрязненность яйцами гельминтов 160 — 420 на 1 л. Навоз и навозные стоки могут быть причиной более 100 инфекционных и паразитарных заболеваний. Для предупреждения загрязнения природных вод необходимы следующие мероприятия:

— сбор и хранение навоза на специальных гидроизолированных площадках с выдержкой на них навоза не менее 6 мес для освобождения от патогенных микроорганизмов и яиц гельминтов;

— сбор навозных стоков из помещений ферм и с площадки навозохранилища в гидроизолированные жижесборники;

— отвод ливневых стоков с выгульных площадок и других территорий, на которых находятся животные и птицы, со сбросом их в гидроизолированные накопители ливневых вод. Использование навоза и животноводческих стоков на полях для удобрения и орошения должно проводиться согласно существующим нормам.

Для предотвращения выноса удобрений и ядохимикатов в водотоки необходимо соблюдение правил транспортировки, хранения и внесения удобрений и пестицидов, применение оптимальных доз удобрений, внесение фосфорных и калийных удобрений под зяблевую вспашку, дробное внесение азотных удобрений с заделкой на глубину вспашки, использование гранулированных пестицидов и пестицидов кратковременного действия, чередование различных групп пестицидов в севооборотах, применение хлорорганических пестицидов не чаще одного раза в год, расположение пахотных угодий при малых уклонах поверхности (менее 0,0005) не ближе 50 м от уреза воды в водотоке, а при больших уклонах (более 0,002) — не ближе 100 м.

Основными элементами инженерной защиты от утечки сточных вод и технологических растворов из зданий промышленных предприятий являются надежная, гидроизоляция фундаментов и полов или создание пластовых и линейных дренажей, собирающих профильтровавшиеся воды и растворы для перекачки с последующей утилизацией или очисткой. Вдоль трасс трубопроводов, несущих сточные воды, загрязненную пульпу или токсичные растворы, устраиваются сопутствующие дренажи. Пластовые и линейные дренажи должны иметь в основании водонепроницаемый экран из глинобетона, асфальта, пленки или других нефильтрующих материалов. Промышленная площадка в целом или отдельные группы зданий могут быть изолированы от чистых подземных вод с помощью кольцевой противофильтрационной завесы или стенки, доведенной до водоупора, в сочетании с дренажом, отбирающим инфильтрую-щиеся атмосферные осадки и сточные воды.

В районах, где под влиянием промышленных предприятий произошло загрязнение воздуха и почв, необходимо собирать и очищать ливневые воды. Наибольшее внимание при проектировании защиты от загрязнения подземных вод должно быть обращено на участки складирования сточных вод и отходов — шламо- и хвостохранилища, накопители, испарители, гидрозолоотвалы, поля фильтрации, солеотвалы и другие сооружения, которые должны быть нефильтрующими.

В целях предотвращения или резкого сокращения фильтрации загрязненных вод из шламо- и хвостохранилищ, накопителей, отстойников, солеотвалов и других объектов применяются разнообразные противофильтрационные устройства, выполненные из слабофильтрующих материалов — уплотненной глины, грунтово-по-. лимерной смеси, асфальтополимербетона, глинобетона, полиэтиленовой пленки, битумных покрытий и т. д. Конструктивно они оформляются в виде экранов, устраиваемых под сооружениями или на дне хранилищ и накопителей, в ядре и на откосах ограждающих их дамб, в виде вертикальных или наклонных противо-фильтрационных завес, прорезающих всю толщу водопроницаемых пород до водоупора и создаваемых путем инъекции цемента, растворов твердеющих органических и неорганических соединений, а также в виде стенок-барражей, возводимых путем выемки водопроницаемых пород и замены их водонепроницаемым материалом — цементно-глинистым раствором, смолами, рулонными синтетическими пленками и т. д.

Применяются двухслойные экраны, например из синтетического материала, при этом между экранирующими слоями помещают фильтрующий гравийный слой с системой дренажных труб, отводящих

загрязненные воды.

Широко применяются экраны из уплотненных глинистых грунтов, хотя опытным путем доказано, что они не дают полной изоляции. Так, проведенные в Нидерландах лизиметрические испытания грунтового экрана показали, что, несмотря на низкий коэффициент фильтрации (2-10$^{-6}$ см/с) слоя уплотненных суглинков толщиной 50 — 75 см, уложенных на песчаную подушку и под песчаным прикрытием, за зимний период величина инфильтрации через экран превысила 300 см.

Рекомендуется [35] при складировании вредных отходов укладывать в основание глинистый экран толщиной не менее 3 м и водопроницаемостью (1 — 5)-10$^{-8}$ см/с в зависимости от токсичности отходов. Кроме того, рекомендуется предварительная обработка отходов с целью изменения подвижности вредных компонентов за счет изменения pH среды или комплексообразования, разложения отходов на простые нетоксичные компоненты или разбавления.

Материалы противофильтрационных устройств должны быть устойчивы к агрессивному воздействию сточных вод и отходов. Следует учитывать, что полиэтиленовая пленка не стойка к действию сильных окислителей и разрушается в органических растворителях; асфальтобетон при температуре более 40 °С не стоек к действию концентрированных кислот, щелочей, органических растворителей и отходов переработки нефти. На глинистые грунты агрессивное воздействие оказывают кислые сточные воды, при этом, по данным В. М. Гольдберга, Н. П. Скворцова и В. М. Павилон-ского, водопроницаемость глин может увеличиваться в несколько сот раз. Е. Лаппал установил, что водопроницаемость противофильтрационных устройств из глинистых грунтов может возрасти на три порядка при инфильтрации растворов некоторых органических веществ (анилин, этиленгликоль, ацетон).

Следует признать, что большинство конструкций экранов и завес полностью фильтрацию не прекращают, поэтому для выбора типа экрана, помимо его стоимости, следует руководствоваться расчетными размерами ограниченной фильтрации, допустимой в конкретных гидрогеологических условиях с учетом степени токсичности, концентрации и разбавления сточных вод в подземном потоке. Для указанных расчетов необходимы фильтрационные и миграционные характеристики материала экрана, пород зоны аэрации и водоносного горизонта.

Противофильтрационные экраны иногда покрывают слоем гравия или другого проницаемого материала для сбора и отвода проникших загрязненных сточных вод и атмосферных осадков.

Примером защитных противофильтрационных сооружений может служить вертикальная заполненная бентонитовой глиной стенка глубиной от 15 до 30 м, созданная в штате Нью-Гэмпшире (США) для защиты подземных вод от загрязнения синтетическими органическими веществами, поступающими из накопителя промышленных сточных вод, в основании которого залегают песчаные грунты. Водопроницаемость завесы составила 10$^{-5}$ см/с.

В районе нефтеперерабатывающего завода в провинции Онтарио (Канада), где отходы из отработанных накопителей попадали в реку вблизи водозаборных скважин, в русле реки был уложен металлический экран для изоляции загрязненных поверхностных вод от эксплуатируемого водоносного горизонта на участках «окон», где перекрывающий слабопроницаемый слой был размыт.

В дополнение к экранам и завесам для перехвата фильтрующихся из хранилищ и накопителей сточных вод устраиваются дренажи различного типа: горизонтальные, вертикальные и комбинированные. Все собранные дренажами сточные воды должны аккумулироваться и перекачиваться в шламохранилище или в систему оборотного промышленного водоснабжения. Для предотвращения загрязнения подземных вод часто применяются комбинированные способы защиты, в которых противофильтрационные завесы и экраны сочетаются с дренажными устройствами.

На участках, где в результате кратковременной аварийной ситуации или под влиянием длительно действовавших источников произошло загрязнение подземных вод, в первую очередь необходимо устранить источник загрязнения (прекратить использование полей фильтрации, свалок, накопителей сточных вод и отходов; изменить технологический процесс на предприятии и, если возможно, удалить загрязненные породы с поверхности земли). Ликвидация источника загрязнения, однако, не устраняет угрозы дальнейшего распространения загрязнений, уже попавших в водоносный горизонт, и поэтому требуется локализация очага загрязнения, препятствующая продвижению некондиционных вод к водозаборам.

При локализации загрязнений в водоносном горизонте используются два основных принципа: 1) создание подземной преграды на пути потока загрязненных вод к водозабору; 2) стягивание контура загрязненных подземных вод путем вовлечения их в де-прессионную воронку, создаваемую откачкой подземных вод через специальные дренажные (перехватывающие) скважины или траншеи. В зависимости от места сосредоточения загрязняющих веществ по глубине водоносного горизонта, фильтры в дренажных скважинах устраивают в верхней, средней или нижней части водоносного горизонта или на всю его мощность. Возможны также одновременные откачки воды с разных глубин.

Для управления скоростью и направлением движения потока загрязненных вод можно также сочетать откачивающие и нагнетательные скважины, размещенные выше и ниже (по потоку) очага загрязнения, что приводит к уменьшению скорости движения подземных вод вплоть до создания застойной зоны. Подземные преграды создаются (как и в профилактических целях) в виде кольцевых или линейно ориентированных противофильтрационных завес и стенок из слабофильтрующих материалов; в некоторых случаях возможно создание противофильтрационной гидравлической завесы, устраиваемой путем подачи в водоносный горизонт

под напором чистой воды через скважины или траншеи. Недостатками использования гидравлических завес являются затраты чистой воды для непрерывной закачки, а в отдельных случаях — необходимость в одновременной откачке загрязненных и чистых подземных вод.

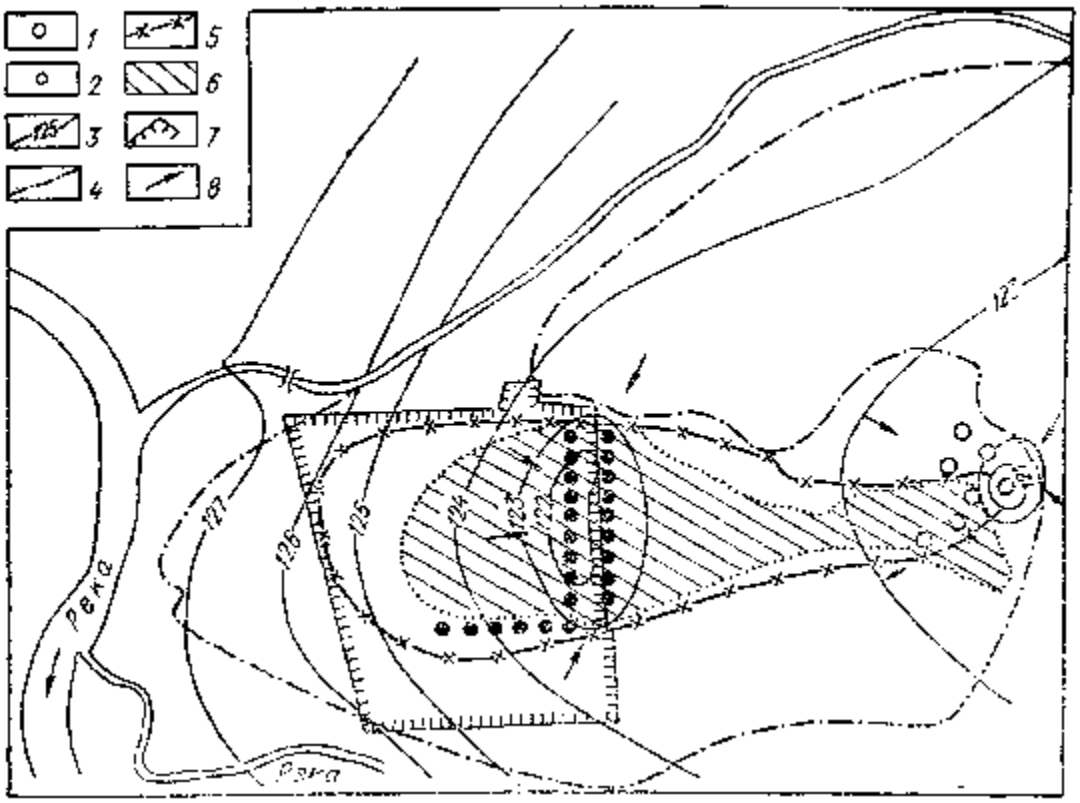



**Рис. 10. Гидравлическая завеса для защиты водозабора от загрязнения нефтепродуктами [43]:**

**1 — водозаборная скважина; 2 — скважина гидравлической завесы; *3* — гидроизогипсы при работе гидравлической завесы и их отметки; 4, 5 — границы зоны распространения подземных вод, содержащих растворенные нефтепродукты, на период до начала откачки *(4)* из скважин гидравлической завесы и после двухлетней откачки (5); 6 — зона распространения слоя нефтепродуктов на поверхности подземных вод до начала откачки; 7 — территория нефтехимического комбината; *8* — направление движения подземных вод**

С помощью подземных противофильтрационных стенок можно также изменить скорость и направление движения подземных вод, «отклонив» их от водозабора.

При стягивании контура загрязнений откачиваемые подземные воды непосредственно используются на технологические нужды и сбрасываются в реки или предварительно подвергаются очистке до необходимых пределов.

Выбор защитных мероприятий основывается на анализе природных условий рассматриваемой территории, учете характера и влияния источника загрязнения и на технико-экономических расчетах. Примером успешно осуществленного мероприятия по локализации загрязнения является действующая в ЧССР дренажная завеса на участке очага загрязнения подземных вод нефтепродуктами (рис. 10) [43]. Завеса состоит из двух рядов скважин, раздельно отбирающих нефтепродукты и подземные воды. За два года площадь участка, где на подземных водах находился слой нефтепродуктов, уменьшилась с 3,5 до 2,8 км$^2$, при этом было собрано примерно 30 тыс. м$^3$ нефтепродуктов. Площадь загрязнения подземных вод растворимыми и эмульгированными нефтепродуктами уменьшилась с 26 до 12 км$^2$. Концентрация нефтепродуктов в откачиваемых водах составляла 0,1 — 23 мг/дм$^3$.

Основные элементы проекта защиты городского берегового водозабора от загрязнения показаны на рис. 11. Береговой водозабор использует подземные воды аллювиального водоносного горизонта, получающего питание из реки. В долине реки, в 40 км выше города, расположен завод, сбрасывавший сточные воды в не-зкранированный шламонакопитель на речной террасе. В результате сброса сформировался ареал загрязнения подземных и речных вод фтором, а в городском водозаборе периодически отмечалось повышение концентрации фтора. Для локализации загрязнения было прекращено пользование шламонакопителем и запроектированы следующие мероприятия: 1) перехват и откачка наиболее загрязненных подземных вод с помощью дренажной комбинированной завесы (галерея и разгрузочные скважины); 2) устройство кольцевой противофильтрационной стенки из глинистого материала вокруг шламонакопителя; 3) перехват загрязненных подземных вод на контуре ареала с помощью ряда дренажных скважин.

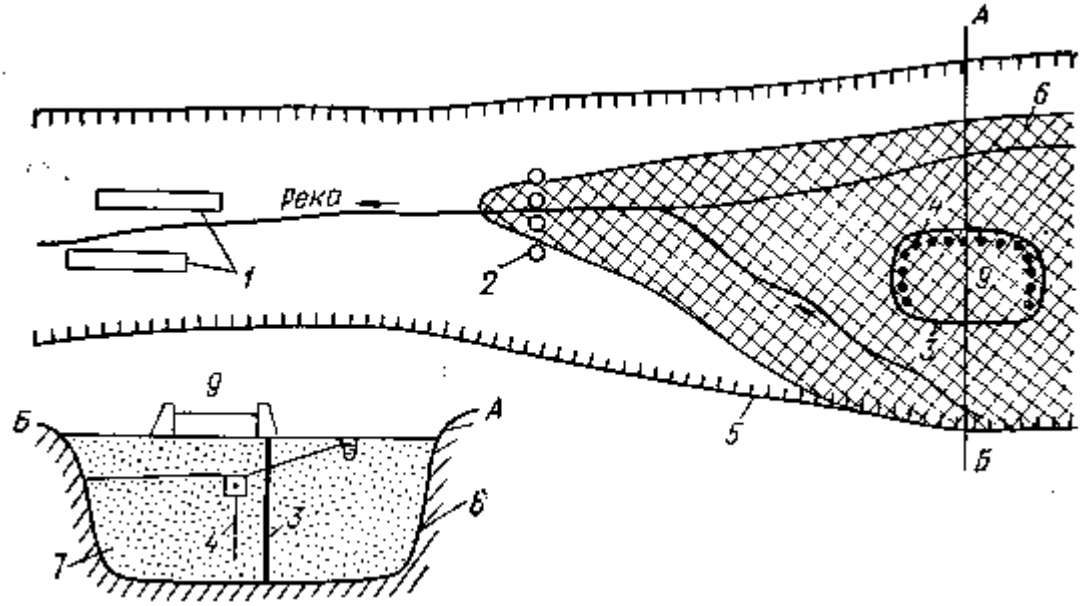



**Рис. 11. Схема защиты берегового водозабора от загрязнения:**

**1 — береговой водозабор; *2* — перехватывающий ряд скважин; *3* — противофильтрационная стенка-барраж; *4* — дренажная комбинированная завеса; 5 — коренной борт речной долины; *6* — ареал загрязнения в аллювиальном водоносном горизонте; 7 — аллювиальные пески; *8* — глины триасового возраста; *9* — старый шламонакопитель**

Восстановление качества подземных вод реально лишь при малых размерах загрязненного участка; в этих целях рекомендуется промывка водовмещающих пород чистой водой, подаваемой через скважины или траншеи. При этом воду можно очищать кислородом или веществами, способствующими деградации загрязнений, их нейтрализации. Этот метод используется как завершающий этап комплекса мероприятий по ликвидации загрязнения подземных вод. Так, в США на одном из участков разлива и утечек углеводородов, этиленгликоля и других органических веществ проведены удаление наиболее загрязненного грунта на участке аварийного разлива органических веществ; бурение разведочных и наблюдательных скважин для оконтуривания очага загрязнения в водоносном горизонте; проходка дренажных скважин и откачка загрязненных подземных вод с созданием депрессионной воронки, ограничивающей дальнейшее распространение загрязнений в водоносном горизонте; очистка извлеченных подземных вод на поверхности с применением аэрации, методов биологической очистки, фильтрации через активированный уголь. Возвращение очищенной воды в водоносный горизонт проводилось через нагнетательные скважины для промывки загрязненных пород водоносного горизонта, причем эти скважины размещались так, чтобы подаваемая вода привлекалась к дренажным скважинам. После того как концентрация загрязняющих веществ в откачиваемой воде значительно снизилась, в закачиваемую воду добавляли культуру определенного вида бактерий, для которых загрязняющее органическое вещество является питательным субстратом. Под действием таких бактерий в водоносном горизонте происходила направленная биодеградация остатков органических загрязнений. При полной очистке воды и пород от органики вода освобождалась и от бактерий, которые в условиях отсутствия питания погибали.

Система, предназначенная для перехвата загрязненных подземных вод (в воде содержатся диизометилфосфонат, дибромди-хлорпропан, дипихлопентадиен), удаления их из водоносного горизонта, очистки на поверхности и возвращения в водоносный горизонт, создана в одном из районов в Скалистых горах (США). Основные компоненты системы включают: 1) 54 дренажные скважины, соединенные трубопроводами и оборудованные для выборочного включения отдельных скважин, что позволяет осуществлять раздельный отбор из трех выявленных зон загрязнения подземных вод; 2) противофильтрационную завесу, созданную нагнетанием бентонитового раствора в скважины и заглубленную до водоупора; 3) 38 скважин, в которые подавали откачанные подземные воды после очистки; 4) наблюдательные скважины, размещенные в пределах всей системы. Получаемая с помощью наблюдательных скважин информация об уровнях и качестве подземных вод позволяет регулировать работу системы в целях достижения максимальной производительности. Локализация очага загрязнения путем откачки сильно загрязненных подземных вод, содержащих до 200 мг/дм$^3$ органических веществ, их очистка на поверхности с помощью фильтрации через гранулированный активированный уголь и последующая подача части очищенной воды в водоносный горизонт через скважины описаны Р. О' Брайеном и Дж. Фишером в 1985 г. При этом степень очистки подземных вод задавалась в зависимости от дальнейшего использования воды для питьевых, технических нужд или для возврата в водоносный горизонт.

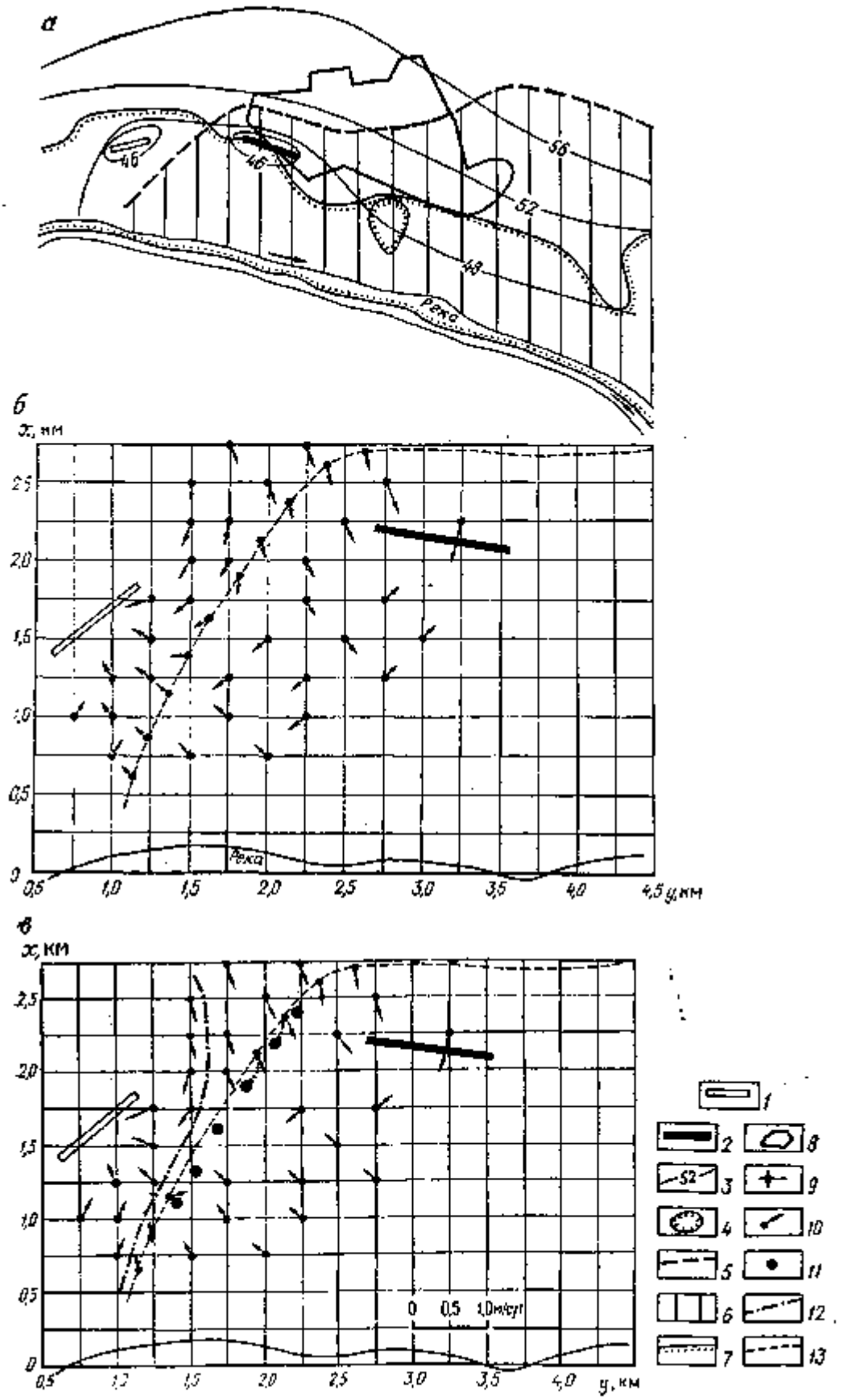



**Рис. 12. Гидрогеологическое обоснование параметров защитной гидравлической завесы между загрязненным и чистым водозаборами:**

**а — план; *б,* в — расчетная схема направлений скорости фильтрации подземных вод между водозаборами до создания гидравлической завесы (б) и при ее работе (0). 1 — чистый «одозабор; *2* — загрязненный водозабор; *3* — гидроизогипсы и их отметки; *4* — накопитель сточных вод; 5 — граница распространения загрязненных подземных вод; *6* — зона распространения загрязненных подземных вод;**

**7 — граница поймы; *8* — промышленная зона и городская застройка; *9* — расчетная точка сетки в координатах *x, y* для определения скорости фильтрации подземных вод; *10* — направления $v_x$ и $o_y$; 11 — дренажные скважины гидравлической завесы; *12* — раздельная линия тока; *13* — траектория движения подземных вод. Направление и величина о:** $v = \sqrt{v_y^2 + v_x^2}$; ← $v_y > 0$; → $v_y < 0$; ↓ $v_x > 0$; ↑ $v_x < 0$

Место расположения защитных противофильтрационных и перехватывающих дренажных сооружений и режим их работы должны быть определены с помощью гидродинамических расчетов, в которых учитывается также воздействие на подземные воды существующих и проектируемых водозаборов или водопонизитель-ных установок, участков усиленной фильтрации, рек, накопителей сточных вод и т. д. В сложных гидрогеологических условиях расчеты перехватывающих и противофильтрационных устройств рекомендуется выполнять методами аналогового или численного моделирования. В более простых условиях и на ранних стадиях проектирования возможно использование аналитических методов расчета, как это было сделано, например, авторами для обоснования защитного дренажа на участке между чистым и загрязненным водозаборами (рис. 12а) в бассейне р. Дона.

Расположенные в долине реки водозаборы эксплуатируют верх-яемеловой водоносный горизонт, сложенный трещиноватыми ме-.лами и перекрытый песчаным аллювиальным водоносным горизонтом. Аллювий и мел разделены слоем разрушенного мела, обладающего слабой проницаемостью. Мощности аллювиального и мелового водоносных горизонтов соответственно равны 15 — 20 и 20 — 25 м, мощность элювиированного раздельного слоя 2 — 8 м. Поток подземных вод в естественных условиях направлен к реке и дренируется ею. Водозаборы работают в стационарном режиме, эксплуатационные запасы подземных вод обеспечиваются в основном за счет перетока из аллювия и в значительно меньшей мере — за счет притока из мелового водоносного горизонта и из реки.

Один водозабор, имеющий производительность 30 тыс. $м^3$/сут, расположен вблизи химического комбината и накопителя промышленных сточных вод; в этой же промышленной зоне (см. рис. 12,а) находятся другие давно действующие предприятия химической промышленности. Утечки технологических и сточных вод из коммуникаций и цехов на промышленных площадках и из накопителя сточных вод привели к загрязнению подземных вод органическими и неорганическими компонентами, поэтому загрязненный водозабор, построенный для питьевых целей, используется только для технического водоснабжения. Водозабор отбирает воду, в которой отмечается повышенное содержание (в мг/$дм^3$) ряда компонентов: аминосоединений 0,11 — 0,23; нитросоединений 0,33 — 0,34; аммиака 0,5; фенола 0,09 — 0,66, сухой остаток 0,9.

В другом водозаборе сохранилось хорошее качество воды, и он используется для хозяйственно-питьевого водоснабжения при производительности 25 тыс. $м^3$/сут. Граница между чистыми и загрязненными водами по данным изысканий проходит примерно посредине между водозаборами. Соотношение отметок уровня подземных вод на водозаборах и между ними свидетельствует о принципиальной возможности движения загрязненных вод в направлении чистого водозабора, что, однако, зависит от колебаний величины водоотбора на водозаборах, интенсивности инфильтрации атмосферных осадков, а также количества сточных вод, поступающих в водоносный горизонт из ближайших источников загрязнения. Для защиты водозабора намечено устройство перехватывающих дренажных скважин, откачка из которых должна привести к созданию водораздела на поверхности подземных вод, препятствующего продвижению загрязнений. Действие дренажного ряда должно также обеспечить локализацию очага загрязнения на рассматриваемом участке.

При выборе места расположения дренажных скважин и определении режима их работы следовало учитывать количество и состав откачиваемых подземных вод с точки зрения возможности их дальнейшего использования, а также необходимость сохранения производительности действующих водозаборов, недопущение ускорения движения и распространения загрязненных подземных вод.

Гидрогеологическая оценка эффективности и расчет производительности перехватывающего дренажа выполнены аналитическим методом применительно к трехслойному горизонту для условий установившейся фильтрации подземных вод.

При аналитических расчетах установлены понижения уровня воды в водозаборных и дренажных скважинах в современных и проектных условиях, а также скорости и направления движения воды в точках, располагающихся на сформировавшемся фронте загрязненных вод. Для составляющих скоростей фильтрации в верхнем и нижнем горизонтах получены выражения, характеризующие величину скорости фильтрации в каждой точке области фильтрации при откачке из взаимодействующих дренажных и водозаборных скважин в рассматриваемом трехслойном горизонте вблизи реки. На первом этапе по данным натурных наблюдений за уровнями подземных вод и расходами водозаборных скважин с помощью аналитических расчетов было проведено уточнение исходных гидрогеологических параметров водоносных горизонтов, а также сделана оценка основных элементов фильтрационного потока в современных условиях, т. е. до создания перехватывающих скважин.

Построение поля скоростей фильтрации для современных условий выполнено с использованием значений уклона естественного потока подземных вод (см. рис. 12,6). Анализ поля показывает, что движение загрязненных подземных вод на участке имеет сложный характер. В удаленной от реки северной части они движутся в направлении к загрязненному водозабору; продвижение к чистому водозабору возможно здесь лишь в отдельные периоды, когда поток подземных вод со стороны водораздела уменьшается или увеличивается

расход чистого водозабора, или уменьшается расход загрязненного. В южной части загрязненные воды могут продвигаться к чистому водозабору.

На втором этапе расчетов по тем же аналитическим зависимостям проведена оценка влияния работы проектируемых дренажных скважин на направления и величину скорости фильтрации подземных вод при различных вариантах расположения и производительности этих скважин. Оптимальная схема размещения дренажа выбиралась с учетом следующих соображений. Дренажная система должна создать водораздельную линию, располагающуюся между водозаборами, причем для полного исключения подтока подземных вод к чистому водозабору скорость фильтрации вдоль нее должна быть равной 0. Расход дренажных скважин должен быть минимальным для снижения количества откачиваемой воды, нуждающейся в очистке, а также для того, чтобы не привлекать загрязненную воду -из центральной части очага загрязнения (т. е. из района промышленной площадки и накопителя) к периферийной, где находятся водозаборы. Степень загрязненности отбираемых дренажных вод также должна быть по возможности меньшей, чтобы улучшить условия очистки или использования этой воды. Варьировались общий расход откачиваемой воды, число дренажных скважин, протяженность дренажного ряда, расстояние от дренажных скважин до фронта загрязнения. В выбранном варианте производительность дренажных скважин 10 тыс. $м^3$/сут, число дренажных скважин, размещаемых примерно в 50м от границы между загрязненными и чистыми водами, равно шести, отбор воды из каждой скважины составит 1670 $м^3$/сут. Как показали расчеты и построение поля скоростей (см. рис. 12,0), при работе проектируемого дренажного ряда движения воды в точках, располагающихся вблизи современного положения фронта загрязнения, в сторону чистого водозабора происходить не будет. В эксплуатационных скважинах водозаборов намечаемый дренаж вызовет небольшие (до 1 м) срезки уровней, при этом производительность водозаборов практически не изменится, так как здесь имеется достаточный напор над кровлей мела. В соответствии с прогнозом качества откачиваемых дренажных вод последние могут быть использованы только для технических и технологических целей. Наблюдательные скважины, устраиваемые до строительства дренажного ряда, предназначаются для уточнения места расположения дренажных скважин и оценки эффективности проектируемого защитного мероприятия.

# ГЛАВА 9.
# ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГРАНИЦ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

## ПРИНЦИПЫ ВЫДЕЛЕНИЯ И СТРУКТУРА ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Для сохранения природного состава и качества подземных вод следует защищать от загрязнения всю область питания и площадь распространения эксплуатируемого водоносного горизонта; на решение именно этой большой задачи направлены законы об охране природных вод. Однако первоочередная и наиболее строгая охрана необходима непосредственно на участках использования подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения, так как загрязнение вблизи водозабора может быстро сказаться на качестве отбираемой воды, нарушить условия водоснабжения и вызвать другие нежелательные последствия. Поэтому вокруг водозабора — источника централизованного хозяйственно-питьевого или объединенного производственно-питьевого водоснабжения — создается зона санитарной охраны (ЗСО), в которой осуществляются специальные мероприятия, исключающие возможность поступления загрязнений в водозабор и водоносный горизонт в районе водозабора. В дополнение к этому предусматривается, что водозаборы подземных вод должны располагаться, как правило, вне территории промышленных предприятий и населенных пунктов.

Защита водозабора в пределах ЗСО реализуется в первую очередь с помощью системы ограничений и запрещений некоторых видов хозяйственной деятельности и использования территорий; при необходимости проводятся технические мероприятия — вынос существующих зданий и коммуникаций, устройство канализации, очистных сооружений, специальных противофильтрационных экранов и т. д. На застроенных территориях создание ЗСО может оказаться дорогостоящим или даже нереальным. Вопрос о возможности организации ЗСО на том или ином участке рассматривается уже при проведении разведки подземных вод. Основным является требование, чтобы на данной территории до строительства водозабора источники загрязнения на поверхности и очаги загрязнения непосредственно в водоносном горизонте отсутствовали. Вместе с тем нередки случаи, когда те или иные небольшие источники и очаги загрязнения на рассматриваемой территории имеются; в этом случае обязательным условием создания ЗСО является возможность полной ликвидации источников загрязнения до введения водозабора в эксплуатацию. Эти меры могут не потребоваться, если объект загрязнения невелик, удален от водозабора, количество и концентрация загрязнителей невелики, а их влияние на качество подземных вод как в современных условиях, так и при эксплуатации водозабора

может быть оценено как незначительное. Для обоснования такого вывода следует определить возможное время *t* прихода загрязнений к водозабору и прогнозную концентрацию $C_в$ загрязняющих веществ в водозаборе в сопоставлении с нормативными концентрациями этих веществ в питьевой воде. Для простых схем фильтрационных потоков приближенные значения *t* и $C_в$ могут быть получены аналитическими расчетами с использованием модели конвективного переноса и учетом смешения воды, поступающей к водозабору из различных участков водоносного горизонта или из разных источников питания. Если известны параметры равновесной сорбции загрязняющего вещества, то можно учесть и эффект торможения, т. е. уменьшение скорости движения веществ в водоносном горизонте вследствие сорбции [1, 5, 8, 30 и др.].

При внутренних источниках загрязнения, находящихся непосредственно в изолированном (приток воды сверху или снизу отсутствует) водоносном горизонте, расчеты могут быть выполнены по приведенным ниже зависимостям [1, 3, И, 12, 25].

1. В: одномерном плоскопараллельном потоке подземных вод время движения загрязнений по полосе тока на участке длиной l определяется по зависимости $t=mnl/g$, где m — мощность водоносного горизонта; n — активная пористость; *g* — удельный расход, потока подземных вод.

Концентрация загрязняющего компонента $C_в$ в конце расчетного участка l равна концентрации в начале участка (предполагается, что в изолированном водоносном горизонте в начале участка загрязнением охвачена вся мощность горизонта и далее на пути фильтрации смещения с водами другого состава не происходит). Если одновременно с фильтрацией происходит равновесная сорбция загрязняющего вещества, то $t=Amnl/g$, где *A* — коэффициент, учитывающий влияние сорбции; A= (l+|З)/|З (здесь {З — коэффициент распределения сорбирующегося вещества между водой и породой). При известных значениях |З аналогичный сомножитель *A* вводится в последующие формулы для расчета *t*.

*2.* При работе линейного берегового (инфильтрационного) водозабора, когда общая минерализация воды или концентрации компонента в речной воде $C_Р$ и в подземных водах на берегу *Сб* отличаются друг от друга, результирующая концентрация на линии водозабора $C_в$ составляет: $C_в= (Q_рC_р+Q_бC_б) / (Q_р+Q_е)$, где $Q_р$ и $Q_б$ — расходы, поступающие в водозабор со стороны реки и берега: $Q_р=Lkm(H_р — H_В)/x_0$; $Q_б=Lkm(H_К — H_В)/(x_К — x_Q)$, где *L* — длина линейного водозабора; *km* — водопроводимость водоносного горизонта; $H_В$ и $H_р$ — уровни воды в водозаборе и в реке; $x_0$ — расстояние от водозабора до реки; $H_к$ — естественный уровень подземных вод на берегу на расстоянии $x_к$ от водозабора.

Если подземные воды на берегу частично загрязнены, то для расчета $C_в$ применяют выражение $C_в= [Q_РC_Р-J-(1 — г))(2_бСбН-+ Qn_бC_З] /(Qр+Q_б)$, где n — доля загрязненных вод в расходе естественного потока, привлекаемого линейным водозабором со стороны берега; $C_З$ — концентрация компонента в подземных водах на загрязненном участке. 6 — 5383 81

3. При работе одиночного или группового водозабора в удале--нии от реки при отсутствии или малом расходе естественного потока (т. е. когда фильтрация подземных вод вызвана преимущественно действием водозабора), время движения загрязнений к водозабору от участка, находящегося на расстоянии Гф, составляет $..t=[nmn(r_ф^2 — r_0^2)]/Q_В$, где $Q_В$ — расход водозабора; $r_0$ — радиус водозабора.

Концентрация загрязняющего компонента в -водозаборе определяется по формуле смешения: $C_в= (C_4Q_4-i-C_3Q_3)/Q_В$; $Q=Q_4-\{-+Q_З$, где $C_ч$ и $C_З$ — концентрации загрязняющего компонента в чистых и загрязненных подземных водах; $Q_4$ и $Q_З$ — расходы воды, .поступающей к водозабору с чистого и загрязненного участков. Значения $Q_4$ и $Q_З$ определяются аналитическим или графоаналитическим методами с учетом размера очага загрязнения и гидрогеологических параметров водоносного горизонта.

При наличии «внешнего» источника загрязнения, находящегося в смежном по разрезу водоносном горизонте, в результате перетока воды из него в эксплуатируемый водоносный горизонт в водозаборе может появиться загрязняющий компонент в концентрации $C_в$. Для определения концентрации загрязнителя используются приведенные ниже зависимости.

1. Если эксплуатируемый напорный водоносный горизонт, содержащий подземные воды хорошего качества, получает питание из вышележащего загрязненного покровного безнапорного горизонта и атмосферных осадков (двуслойный пласт), то в одиночном или групповом водозаборе концентрацию загрязняющего компонента Св можно рассчитать по выражению

$$\ln\frac{C_в — C_п}{C_н — C_п} = \frac{\mu_п}{\mu_п + \mu_н^*}\bar{Q}e^{\bar{Q}}\left[— Ei\,(— z)\right],$$

где $C_п$ и $C_н$ — концентрации загрязняющего компонента в питающем верхнем безнапорном и нижнем напорном эксплуатируемом горизонтах; $м_п$ и $м_н$* — водоотдача верхнего и нижнего слоев; $Q = = Q_В/(4пmпа**)$; *n* — активная пористость нижнего водоносного горизонта; а**=km/*м***; *km* — водопроводимость эксплуатируемого напорного горизонта; $м**=м_п+м_н*$; *Ei(* — z) — интегральная показательная функция; $z=Q+r_0^2/(4a**t)$; $Q_В$ — расход водозабора.

2. При использовании подземных вод слоистой водоносной толщи, в которой напорные водоносные горизонты в хорошо проницаемых отложениях гидравлически связаны друг с другом через слабопроницаемые слои, в результате перетекания воды из загрязненного смежного по разрезу питающего слоя через слабопроницаемый слой в водозаборе при достижении максимального расхода перетока концентрация загрязняющего компонента в водозаборе составит:

$$C_{\text{п}} = C_{\text{п}} (C_{\text{э}} - C_{\text{п}}) \frac{(km)_{\text{э}}}{(km)_{\text{э}} + (km)_{\text{п}}},$$

где $C_э$ — концентрация загрязняющего компонента в эксплуатируемом водоносном горизонте; $(km)_З$ и $(km)_п$ — водопроводимо-сти эксплуатируемого и питающего горизонтов соответственно.

Для сложных фильтрационных потоков в неоднородных и многослойных водоносных толщах при сложных граничных условиях и в других случаях для оценки влияния загрязнений на качества подземных вод используются графоаналитические и численные методы, а также моделирование.

Размеры ЗСО должны быть такими, чтобы источники загрязнения, которые могут появиться в районе водозабора, были удалены за границы ЗСО на расстояния, при которых длительность движения к водозабору поступивших в водоносный горизонт загрязнений будет не менее заданной. Для водозаборов, где запасы подземных вод позволяют неограниченную длительность эксплуатации водозабора, водоносный горизонт должен быть защищен от любого вида загрязнений также на неограниченный срок.

Правильное определение границ ЗСО и назначение санитарно-оздоровительных и защитных мероприятий в их пределах имеют большое народнохозяйственное и социальное значение, поскольку занижение площади ЗСО может вызвать опасность загрязнения водозабора, а завышение — приводит к исключению из хозяйственного использования ценных земель, что может привести к экономическому ущербу.

В состав зоны санитарной охраны входят три пояса: пояс строгого режима, два пояса режима ограничений.

Границы ЗСО и составляющих ее поясов устанавливают применительно к конкретной производительности и схеме водозабора с учетом развития системы водоснабжения на перспективу; кроме того, учитывают гидрогеологические, гидрохимические и местные санитарные условия, а также особенности характера загрязняющих веществ. При изменении производительности, схемы водозабора и других условий его эксплуатации границы ЗСО должны быть пересмотрены.

Первый пояс ЗСО создается для устранения возможности случайного или умышленного загрязнения водозаборного или водопроводного сооружения. В этот пояс входит территория расположения водозабора, площадок всех водопроводных сооружений и, при искусственном пополнении запасов подземных вод, водоподво-дящего канала и инфильтрационных сооружений. Граница пояса устанавливается на расстоянии не менее 30 м от водозабора при использовании защищенных подземных вод и на расстоянии не менее 50 м при использовании недостаточно защищенных подземных вод. Если водозабор состоит из группы близко расположенных скважин, шахтных колодцев или родников, первый пояс ЗСО устраивается общим для них, причем его граница должна находиться на расстоянии не менее 30 или 50 м соответственно от крайних скважин, шахтных колодцев или родников.

Если скважины или колодцы удалены друг от друга или нежелателен отвод большой территории под первый пояс ЗСО, допустимо создание для каждой скважины или шахтного колодца отдельного пояса.

Для водозаборов, расположенных в благоприятных гидрогеологических и санитарно-технических условиях, в том числе для находящихся на территории объекта, исключающего возможность загрязнения почвы и подземных вод, границу этого пояса по согласованию с местными органами санитарно-эпидемиологической службы можно приблизить к водозабору на расстояние до 15 и 25 м соответственно. При искусственном пополнении запасов подземных вод граница первого пояса должна устанавливаться на расстоянии не менее 50 м от инфильтрационных сооружений закрытого типа (скважины, шахтные колодцы) и не менее 100 м от сооружений открытого типа (бассейны, каналы и др.).

Для береговых (инфильтрационных) водозаборов подземных вод в границы рассматриваемого пояса необходимо включить территорию между водозабором и поверхностным водотоком, если расстояние между ними менее 150 м. Для подрусловых водозаборов ЗСО следует предусматривать так же, как для поверхностных источников водоснабжения.

Второй пояс ЗСО предназначен для защиты водоносного горизонта одновременно от микробных и химических загрязнений, поскольку он расположен внутри третьего пояса, назначением которого является защита от химических загрязнений.

Основным параметром, определяющим расстояние от границы второго пояса ЗСО до водозабора, является расчетное время $t_м$ продвижения микробного загрязнения с потоком подземных вод к водозабору. Это время должно быть достаточным для утраты патогенными микроорганизмами жизнеспособности и вирулентности (способности к неблагоприятному воздействию на организм человека), т. е. для эффективного самоочищения загрязненных вод при движении в водоносном пласте. При этом адсорбция микроорганизмов, способствующая самоочищению, как правило, не учитывается (в связи с малой изученностью параметров этого процесса), что приводит к завышению размеров, т. е. запасу при определении границ пояса. Если по соображениям хозяйственного использования земель необходимо уменьшить размеры второго пояса ЗСО, то можно учесть и адсорбцию микроорганизмов, однако для этого параметры адсорбции должны быть определены экспе-риментально на породах и в условиях, соответствующих участку расположения водозабора.

Граница второго пояса ЗСО определяется гидродинамическими расчетами с помощью аналитических, графоаналитических и численных методов расчета, а также моделирования фильтрации. При этом исходят из условий, что если за ее пределами через зону аэрации или непосредственно в водоносный горизонт поступят микробные загрязнители, то они не достигнут водозабора. Рекомендации по выбору расчетного времени $T_м$ приведены в табл. 6 с учетом интенсивности поступления загрязнений в водоносный горизонт из поверхностных вод открытых водоемов и климатического фактора, влияющего на выживаемость

микроорганизмов.

Таблица б

**Расчетное время $T_м$ (сут) для обоснования границ второго пояса ЗСО в пределах различных климатических районов**

| Гидрогеологические условия | I и II районы | III и IV районы |
|---|---|---|
| **Грунтовые воды** | **400/400** | **400/200** |
| **Напорные и безнапорные межпластовые воды** | **200/200** | **200/100** |

Примечание. В числителе приведены данные для условий наличия непосредственной связи с открытым водоемом, а знаменателе — для условий, когда такой связи нет.

Третий пояс ЗСО предназначен для защиты подземных вод от химических загрязнений. Расположение границы этого пояса также определяется с помощью гидродинамических расчетов исходя из условия, что если за пределами пояса в водоносный горизонт поступят химические загрязнения, то они не достигнут водозабора, перемещаясь с подземными водами вне области питания водозабора, или достигнут его, но не ранее расчетного времени $T_x$, принимаемого равным проектному сроку эксплуатации водозабора (25 — 50 лет). Если запасы подземных вод обеспечивают неограниченный срок эксплуатации водозабора, то третий пояс должен обеспечить соответственно длительное сохранение качества подземных вод.

При определении положения границ пояса, как правило, считается, что химические вещества, которые могут поступить в водоносный пласт, стабильны, т. е. не изменяют свой состав и концентрацию в результате физико-химического взаимодействия с подземными водами и породами. Эта условность, дающая запас в расчетах размеров ЗСО, является вынужденной из-за недостаточной изученности названных процессов и соответствующих параметров. При необходимости уменьшения размеров пояса учет трансформации химических веществ в водоносном горизонте допустим только в случае, если эти процессы резко выражены и их закономерности достаточно изучены в экспериментах.

При высокой степени естественной защищенности водоносного горизонта и в некоторых других случаях размеры второго и третьего поясов ЗСО могут быть уменьшены или эти пояса могут быть объединены при условии, что качество подземных вод от этого не ухудшится. Для уменьшения размеров или объединения этих поясов требуется соответствующее гидрогеологическое обоснование и при необходимости проектируются специальные защитные мероприятия.

Если при расчете границ ЗСО берегового (инфильтрационно-го) водозабора, имеющего тесную гидравлическую связь с рекой или водоемом, оказывается, что в пределы первого или второго и третьего поясов ЗСО входит участок реки или водоема, то и для реки (водоема) необходимо устанавливать все три пояса ЗСО, размеры которых определяются как для источника водоснабжения из поверхностных вод. ЗСО по реке или водоему устанавливаются также в случае, если эти поверхностные воды используются для искусственного пополнения запасов подземных вод.

В соответствии с положением о зонах санитарной охраны [24] границы поясов для поверхностных водоисточников устанавливаются в направлениях вверх и вниз по течению, а также в глубь берега (боковые) следующим образом. Граница первого пояса для рек и каналов вверх и вниз по течению, т. е. вдоль водотока (или водоема), устанавливается на расстоянии соответственно не менее 200 м и 100 м от крайних скважин берегового водозабора.

От реки в глубь берега, на котором находится водозабор, граница первого пояса ЗСО проходит на расстоянии не менее 100 м от уреза воды при летне-осенней межени. По противоположному берегу при ширине реки или канала менее 100 м в первый пояс включается вся акватория и полоса суши шириной 50 м от уреза воды при летне-осенней межени, а при ширине реки или канала более 100 м — полоса акватории шириной не менее 100 м. Для водохранилищ и озер граница пояса устанавливается по акватории во всех направлениях шириной не менее 100 м.

Границы второго пояса ЗСО вверх по течению вдоль проточного водотока и его боковых притоков определяются с учетом времени движения воды до водозабора, необходимого для ее микробного самоочищения, что, в свою очередь, зависит от скорости течения и климатических условий. Скорость течения принимается усредненной по ширине и длине водотока. Время продвижения воды от границы второго пояса до водозабора при расходе воды в проточном водотоке, соответствующем 95%-ной обеспеченности, должно быть не менее 5 сут для климатических районов IA, Б, $B_5$ Г и ПА и не менее 3 сут для 1Д, ПБ, В и Г, а также для III и IV. Вниз по течению граница второго пояса должна находиться на расстоянии не менее 250 м от водозабора. При подпоре или влиянии обратных ветровых течений это расстояние должно быть уточнено в зависимости от гидрологических и метеорологических условий. На судоходных реках и каналах в границы пояса входит акватория, прилегающая к водозабору в пределах фарватера.

На непроточных водоемах граница второго пояса ЗСО по акватории должна быть удалена во все стороны от водозабора на 3 км при количестве ветров в сторону водозабора до 10% или на 5 км при количестве ветров в сторону водозабора более 10%.

Боковые границы второго пояса ЗСО водотоков и водоемов, включая притоки, определяются шириной береговой полосы, которая при отсчете от уреза воды в период летне-осенней межени должна составлять не менее 500 м при равнинном рельфе местности и 750 — 1000 м при гористом (для пологого и крутого склонов соответственно). 86

Границы третьего пояса ЗСО вверх и вниз по течению совпадают с границами второго пояса, а боковые границы — с линией водораздела в пределах 3 — 5 км, включая притоки реки.

Если положение границ второго и третьего поясов ЗСО на берегах в районе водозабора подземных вод, установленное по приведенным выше указаниям как для поверхностных источников водоснабжения, не совпадает с положением, определенным по гидродинамическим расчетам (см. гл. 10), то следует выбрать положение, при котором границы удалены от водозабора на большее расстояние.

Рекомендации о размерах ЗСО и мероприятиях в этой зоне водозабора подземных вод даются гидрогеологической организацией по результатам разведки и оценки эксплуатационных запасов подземных вод. Проект ЗСО разрабатывается одновременно с составлением проекта хозяйственно-питьевого водоснабжения и входит в его состав. ЗСО проектируют с использованием материалов гидрогеологических, гидрологических, санитарных изысканий и в соответствии с «Положением о порядке проектирования и эксплуатации зон санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно-питьевого водоснабжения», утвержденным Главным государственным санитарным врачом СССР 18 декабря 1982 г. Для действующих водозаборов, не имеющих установленной ЗСО, проект ЗСО разрабатывается специально.

Проект ЗСО и план санитарных и защитных мероприятий должны быть согласованы с исполкомом местного Совета народных депутатов, с органами санитарно-эпидемиологической службы, по регулированию использования и охраны вод, коммунального хозяйства, системы Министерства геологии, а также с другими заинтересованными министерствами и ведомствами и утверждены в порядке, предусмотренном положением о зонах санитарной охраны [24].

## ВОДООХРАННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ВОДОЗАБОРОВ

Санитарно-оздоровительные и защитные мероприятия, целью которых является устранение и предупреждение возможности загрязнения подземных вод, планируются отдельно для каждого пояса ЗСО При этом следует учитывать назначение каждого из них, *а* также степень естественной защищенности водоносного горизонта от загрязнения с поверхности. Мероприятия по обеспечению установленного режима на территории поясов ЗСО должны проводиться в течение всего периода эксплуатации водозабора, а единовременные меры (например, снос некоторых строений, устройство ограды и др.) осуществляются до строительства водозабора.

Можно выделить следующие водоохранные мероприятия, проводимые в ЗСО: общие подлежащие выполнению во всех трех поясах; дополнительные, только по первому и второму поясам и дополнительные, только по первому поясу.

К общим мероприятиям относятся: 1) выявление и ликвидация (или восстановление) всех бездействующих, старых, дефектных или неправильно эксплуатируемых скважин, представляющих опасность в отношении возможности загрязнения водоносного горизонта; 2) регулирование бурения новых скважин и любого нового строительства при обязательном согласовании с местными органами санитарно-эпидемиологической службы, геологического контроля и по регулированию использования и охране вод; 3) запрещение закачки отработанных вод в подземные горизонты, подземного складирования твердых отходов и разработки недр земли, которая может привести к загрязнению водоносного горизонта; 4) своевременное выполнение необходимых мероприятий по санитарной охране поверхностных водотоков и водоемов, имеющих непосредственную гидравлическую связь с используемым водоносным горизонтом; 5) запрещение размещения накопителей промышленных стоков, шламохранилищ, складов горюче-смазочных материалов, ядохимикатов и минеральных удобрений, а также других объектов, представляющих опасность химического загрязнения подземных вод. К ним следует отнести крупные животноводческие объекты и птицефабрики, являющиеся источниками стойкого нитратного загрязнения. Размещение таких объектов допускается в пределах третьего пояса ЗСО только при использовании защищенных подземных вод, а также при условии проведения специальных мероприятий по защите водоносного горизонта от загрязнения и по согласованию с перечисленными выше организациями санитарного, геологического и водного контроля.

На территории третьего пояса устанавливается строгий санитарный надзор за использованием пестицидов и биологических средств борьбы с вредителями и болезнями растений, не допускается также применение высокотоксичных, стойких в почве и кумулятивных веществ.

Во втором и третьем поясах, кроме мероприятий, общих для всех поясов и перечисленных выше, необходимо проводить следующие дополнительные мероприятия:

1) запрещается размещение кладбищ, скотомогильников, полей ассенизации и фильтрации, земледельческих полей орошения, сооружений подземной фильтрации, навозохранилищ, силосных траншей, животноводческих и птицеводческих предприятий, а также других сельскохозяйственных объектов, обусловливающих опасность микробного загрязнения подземных вод; запрещаются также применение удобрений и ядохимикатов и промышленная рубка леса; 2) санитарное благоустройство территории населенных пунктов и других объектов

(создание канализационной сети, устройство водонепроницаемых выгребов и др.)-

По первому поясу ЗСО дополнительно к перечисленным мероприятиям предусматриваются следующие: 1) территория пояса должна быть спланирована для отвода поверхностного стока за ее пределы, озеленена, огорожена и обеспечена постоянной охранной; 2) запрещаются все виды строительства, не имеющие непосредственного отношения к эксплуатации, реконструкции и расширению водозабора и водопроводных сооружений, в том числе .жилых и хозяйственных зданий, прокладка трубопроводов различного назначения, проживание людей (в том числе работающих на водопроводе), а также применение ядохимикатов и удобрений; 3) здания должны быть канализованы с отведением сточных вод в систему канализации или на местные очистные сооружения, расположенные за пределами первого пояса с учетом санитарного режима на территории второго пояса ЗСО. В исключительных случаях, при отсутствии канализации, устраиваются водонепроницаемые приемники для бытовых отходов и нечистот; 4) предусматривается строгое выполнение санитарно-технических требований к конструкции водозаборных и наблюдательных скважин; .5) водозаборные скважины должны быть оборудованы аппаратурой для систематического контроля соответствия фактического дебита при эксплуатации производительности, предусмотренной при проектировании водозабора и обосновании границ ЗСО.

Состав указанных выже основных и дополнительных санитар-но-оздоровительных и защитных мероприятий на территории ЗСО при соответствующем обосновании может быть уточнен и расширен применительно к конкретным гидрогеологическим условиям с учетом современного и перспективного народнохозяйственного использования территории в районе ЗСО.

На реках и водоемах, входящих в ЗСО водозаборов подземных вод, предусматриваются следующие водоохранные мероприятия. По первому поясу ЗСО:1) акватория должна ограждаться бакенами (буями) и другими предупредительными знаками; 2) запрещается спуск любых сточных вод, а также купание, стирка белья, водопой скота и другие виды водопользования, оказывающие влияние на качество воды. По второму и третьему поясам: 1) запрещается отведение в реки и водоемы сточных вод, не отвечающих требованиям правил охраны поверхностных водоемов от загрязнения сточными водами; 2) выявляются объекты, загряз- -няющие водоем, с составлением планов осуществления водоохранных мероприятий и определением сроков их выполнения; 3) регулируется и ограничивается отведение территории для нового строительства жилых, промышленных и сельскохозяйственных объектов, создание и эксплуатация которых связаны с повышением степени опасности загрязнения сточными водами поверхностных вод.

По второму поясу ЗСО, кроме указанных мероприятии, предусматривается также следующее:

1) запрещается расположение объектов, обусловливающих опасность химического (накопители промышленных стоков, шла-мохранилища, склады горюче-смазочных материалов, ядохимикатов и минеральных удобрений и др.) и микробного (поля ассенизации и фильтрации, земледельческие поля орошения, кладбища, скотомогильники, навозохранилища, животноводческие и птицеводческие предприятия и др.) загрязнений подземных вод, применение удобрений и ядохимикатов, промышленная рубка леса, добыча из водоема песка и проведение дноуглубительных работ, создание пастбищ в прибрежной полосе шириной не менее 300 м; 2) санитарное благоустройство территории населенных пунктов и других объектов (создание канализационной системы, устройство водонепроницаемых выгребов); 3) выполнение мероприятий по предупреждению загрязнений, вносимых водным транспортом; 4) обеспечивается специальный режим испольаования поверхностных вод для купания, туризма, водного спорта, рыбной ловли и т. д.

Из изложенного выше видно, что в некоторых природных и хозяйственных условиях для создания ЗСО водозаборов подземных вод и проведения соответствующих водоохранных мероприятий могут потребоваться значительные финансовые затраты, что должно быть определено и учтено проектной организацией при разработке технико-экономического обоснования выбора подземных вод в качестве источника водоснабжения.

При выяснении эффективности водоохранных мероприятий в ЗСО нельзя ограничиваться наблюдениями за составом воды только в водозаборных скважинах; необходим, особенно для крупных водозаборов подземных вод, гидрогеологический контроль на всей площади ЗСО, что позволит своевременно принять дополнительные меры для сохранения качества воды в водозаборе.

Вопросы методики гидрогеологических исследований в связи с контролем за охраной подземных вод рассмотрены в работах [3, 7, 10, 15, 18, 22]. Следует отметить, что гидрогеологические наблюдения нужны и за пределами ЗСО, так как расчетные размеры ЗСО являются в известной мере приближенными; последнее обстоятельство связано с необходимостью схематизации природных условий при расчетах и с использованием усредненных значений гидрогеологических параметров, оценок интенсивности источника загрязнения, количества и состава загрязнений и т. п. Хотя, с одной стороны, при расчетах границ ЗСО физико-химические трансформации веществ в подземных водах обычно не учитываются и это приводит к завышению размеров ЗСО, с другой стороны, при изысканиях могут быть не выявлены в водоносном горизонте отдельные слои и пропластки с высокими показателями фильтрационных свойств, что не исключает возможность подтягивания к водозабору воды из участков водоносного горизонта, находящихся за пределами расчетных границ ЗСО. Поэтому в районах крупных водозаборов существование источников загрязнения подземных вод недопустимо и за пределами третьего пояса ЗСО, по крайней мере на расстоянии 0,5 — 1 км при песчаных и песча-но-гравелистых породах и 2 — 4 км при трещиноватых и закар-стованных породах. В связи с этим здесь следует усилить гидрогеологический контроль и при необходимости ликвидировать источники загрязнения, находящиеся вблизи ЗСО.

При проведении целенаправленного гидрогеологического конт-роля в районе ЗСО большое значение имеет выбор точек размещения наблюдательных скважин. При этом следует руководствоваться гидродинамической обстановкой на территории между источником загрязнения и водозабором и учитывать скорости и направления движения подземных вод, изменившиеся, по сравне-нию с естественными условиями, под влиянием отбора воды водо-заборами и дренажами, а также и инфильтрации воды в водоносный горизонт из накопителей сточных вод, искусственных прудов и других гидродинамически активных объектов.

Направления движения подземных вод определяют по достаточно детальной карте гидроизогипс, желательно также с помощью аналитических расчетов или моделирования построить гидродинамическую сетку фильтрации.

При создании режимной сети наблюдательных скважин должна учитываться возможность вертикальной неоднородности и стратификации химического состава подземных вод, что нередко встречается на участках распространения минерализованных вод, обладающих повышенной плотностью, а также при загрязнении подземных вод углеводородами и нефтепродуктами, что вызывает снижение плотности подземных вод. В этих случаях загрязнения соответственно концентрируются в нижней и верхней частях водоносного горизонта. Рекомендуется проводить опробование подземных вод поинтервально по глубине водоносного горизонта. Для этого могут быть применены разнообразные приспособления, например пробоотборник с четырьмя надувными пакерами, разделяющими скважину на три зоны, причем откачка осуществляется из всех трех зон, а отбор пробы — только из средней зоны.

Известны наблюдательные скважины, в которых в обсадную трубу врезаны на разных глубинах несколько пьезометров, при этом изоляция отдельных опробуемых зон осуществляется в за-трубном пространстве скважины. Несколько пьезометров в одной скважине могут быть опущены на разную глубину, а интервалы опробования разделены в скважине участками цементации. К. Эд-вэрси в 1983 г. предложил способ поинтервального отбора проб воды из скважины при помощи двухкамерного устройства, которое должно быть установлено в средней части песчаной засыпки высотою 2 м, охватывающей интервал исследования. Выше за-сыпки устраивается глиняная пробка. Подземная вода поступает через сетчатый фильтр, установленный в одной из камер, и через клапан проходит во вторую камеру, откуда может быть выдавлена пневматическим способом на поверхность. Таких устройств в скважине может быть несколько.

Метод отбора проб для определения в подземных водах малых концентраций органических веществ разработан Дж. Пэнковом в 1983 г. Устройство для отбора проб воды, опускаемое в наблюдательную скважину на трубке, состоит из небольшого цилиндрического патрона с сорбирующим материалом. Патрон соединен с насосом; движение поршня в насосе создается при помощи вакуума.

При этом вода проходит через патрон с сорбентом. Затем патрон отделяется от насоса и поднимается на поверхность. В лаборатории из него удаляют излишек воды, проводят термальную десорбцию патрона через силикатную капиллярную трубку и определяют органические вещества методом газовой хроматографии. Этим методом в подземных водах были определены трихлорэтан, хлорбензол, пара-дихлорбензол в средних концентрациях от 14 до 0,88 мкг/дм$^3$.

Наблюдения за химическим составом подземных вод и положением уровня воды следует проводить не только в эксплуатируемом водоносном горизонте, но и в выше- и нижележащих водоносных горизонтах, если в последних имеются или могут появиться некондиционные по составу воды и в пределах ЗСО возможен переток этих вод в эксплуатируемый горизонт.

## ОСНОВЫ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ

Вопросы изучения структуры фильтрационного потока к водозабору, оценки времени движения и концентрации загрязнений в водоносных горизонтах, в связи с прогнозом качества подземных вод и обоснованием ЗСО, рассматривались в работах [1, 3 — 5, 7, 9 — 11, 16, 17 и др.].

Особенности фильтрационного потока к водозаборным сооружениям рассмотрим на примере работы одиночного водозабора в однородном, неограниченном по простиранию водоносном горизонте при наличии естественного потока подземных вод (рис. 13).

Область фильтрации к водозаборному сооружению может быть разделена на две части. Внутренняя область, прилегающая к водозабору, отличается тем, что траектория движения частиц-воды, содержащихся здесь, или линии тока подземных вод заканчиваются на водозаборе. Во внешней области траектории движения частиц воды или линии тока огибают водозаборное сооружение. Внутреннюю зону можно назвать областью питания подземного водозабора, так как она содержит объемы воды, непрерывна поступающие к водозабору (питающие водозабор) и извлекаемые им на поверхность в процессе эксплуатации.

Область питания водозабора отделяется от внешней части области фильтрации раздельной, или нейтральной, линией тока (траекторией движения). На этой линии располагаются одна или несколько важных с точки зрения охраны водозаборов раздельных, или критических, точек *N*. Вблизи этих точек образуется за-стойная зона, а в самих точках *N* скорость движения воды равна нулю.

Область питания следует отличать от области влияния водозабора, т. е. части водоносного пласта, в пределах которой эксплуатация водозабора вызывает практически ощутимые понижения; уровней подземных вод. Прежде всего, эти области могут существенно отличаться по расположению и площади. Например, точки *A* и *B* на рис. 13 расположены вблизи водозабора и поэтому могут находиться в области влияния водозабора, но в

то же время они находятся за пределами области его питания. Наоборот, точки *C* и *D* на рис. 13 располагаются внутри области питания, но настолько далеко от водозабора, что его влияние на положение уровней подземных вод здесь может быть практически незаметно. В отличие от области влияния, размеры которой в большинстве случаев не зависят от естественного потока подземных вод, форма и размеры области питания водозабора в значительной степени определяются направлением и скоростью естественного потока.

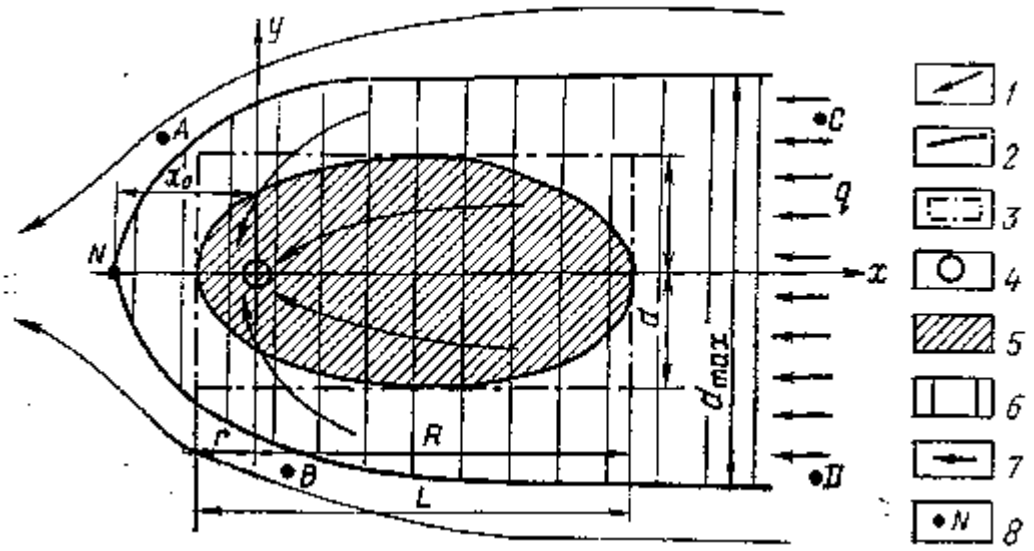



**Рис. 13. Схема фильтрации подземных вод к водозабору:**

**1 — линии тока; 2 — нейтральная линия тока; 3 — граница ЗСО; 4 — водозабор; 5 — область захвата; 6 — область питания; 7 — направление естественного потока подземных вод; S — раздельная точка, q — естественный поток подземных вод; R и г — максимальные расстояния по оси х от водозабора до верхней и нижней границ области захвата на время Т; L — длина ЗСО; Id — ширина ЗGO**

Из сказанного ясно, что зона санитарной охраны должна располагаться в пределах области питания водозабора. Для дальнейшего уточнения положения границ этой зоны выделим другой важный элемент фильтрационного потока — область захвата водозабора (см. рис. 13), которая представляет собой часть области питания. Все частицы воды, располагающиеся внутри области захвата, достигают водозабора за тот или иной конечный расчетный промежуток времени *T*. В плане область захвата одиночного водозабора на каждый момент времени приближенно может быть изображена в виде эллипса, вытянутого вдоль потока подземных вод. В процессе эксплуатации водозаборного сооружения область, непрерывно увеличивается. Предельное ее положение, достигаемое при теоретически бесконечном времени, устанавливается по раздельной (нейтральной) линии.

Как уже отмечалось, границы второго и третьего поясов зоны санитарной охраны назначаются таким образом, чтобы имеющиеся или возможные загрязнения подземных вод не могли поступить в водозабор в течение намеченного срока. Исходя из этого, задачей гидрогеологических расчетов для обоснования зон санитарной -охраны является определение основных размеров и конфигурации области захвата водозабора, соответствующей расчетному периоду *T*.

Как правило, область захвата водозабора имеет сложные очертания, что зависит от типа водозаборного сооружения, схемы размещения эксплуатационных скважин и гидрогеологических условий в районе расположения водозабора. Если реальная гидрогеологическая обстановка может быть схематизирована по основным расчетным показателям (обычно это возможно в относительно простых гидрогеологических условиях, а также на ранних стадиях проектирования), то область захвата водозабора и другие искомые величины для обоснования проекта ЗСО водозаборов подзем-:ных вод можно определить путем аналитических расчетов. При этом схематизируются не только гидрогеологические условия, но ;и сами водозаборы; обычно они представляются в виде одиночных или групповых сосредоточенных водозаборов («больших колодцев») или вытянутых линейных водозаборных систем.

Для проведения практических расчетов, кроме того, целесообразно упростить и конфигурацию зоны санитарной охраны водозаборных сооружений. Наиболее просто ее представить в виде прямоугольника, полностью включающего область захвата. При этом несколько завышаются размеры охраняемой территории и обеспечивается некоторый запас в инженерных расчетах.

Протяженность *R* зоны санитарной охраны вверх по потоку подземных вод от водозабора устанавливается по максимальному расстоянию от водозабора до верхней границы области захвата на расчетный промежуток времени *T*.

Вниз по потоку подземных вод протяженность *г* зоны санитарной охраны водозаборов определяется расстоянием от водозабора до нижней границы зоны захвата водозабора по оси *x* на тот же расчетный момент времени *T*.

Таким образом, общая длина зоны санитарной охраны водозабора *L* составит:

$$L=R+r. \quad (1)$$

Ширина зоны санитарной охраны *2d* на основании сказанного принимается равной максимальной ширине эллипса, ограничивающего область захвата водозабора (см. рис. 13). Расчетное время *T* устанавливается в зависимости от вида возможного загрязнения водоносного пласта.

Для защиты водозабора от устойчивых химических загрязнений при проектировании третьего пояса ЗСО величина $T_x$ определяется в соответствии со сроком эксплуатации водозабора; при проектировании водозаборов на длительный срок $T_x$ обычно принимается равным 25 — 50 лет ((1 — 2)-$10^4$ сут). При проектировании водозабора на неограниченный срок эксплуатации третий пояс ЗСО рассчитывается на 25 лет, а по истечении этого срока производится уточнение границ ЗСО с учетом данных эксплуатации водозабора, перспектив его дальнейшего развития, химического состава отбираемой воды и хозяйственной обстановки в прилегающем районе.

Для защиты водозабора от бактериальных загрязнений размеры второго пояса зоны санитарной охраны устанавливаются исходя из времени выживаемости бактерий $T_м$, составляющего 100 — 400 сут.

В безнапорных водоносных горизонтах, а также в неглубоко залегающих напорных пластах, перекрытых сверху слабопроницаемыми отложениями, при определении границы зоны санитарной охраны от бактериальных загрязнений целесообразно учитывать время *to* просачивания загрязненных вод по вертикали до основного эксплуатируемого пласта, т. е. принимать

$$T=T_u — t_0. \quad (2)$$

Величина $t_0$ может быть приближенно определена по следующим формулам [1]:

а) при малой интенсивности е инфильтрации загрязненных вод: ($e<k_0$), т. е. когда инфильтрация происходит с неполным насыщением пор водой:

$$t_0 \approx n_0 m_0 / \sqrt[3]{e^2 k_0}; \quad (3)$$

б) при значительной интенсивности инфильтрации ($e>k_0$), т. е. при инфильтрации с полным насыщением пор:

$$t_0=n_0 m_0/k_0; \quad (4)$$

в) при двух-трехслойном строении горизонта:

$$t_0 \approx n_0 m_0^2/(k_0 \Delta H), \quad (5)$$

где $k_0$ — коэффициент фильтрации пород зоны аэрации; $n_0$ и $m_0$ — пористость и мощность пород над эксплуатируемым горизонтом: (в первых двух случаях — это породы зоны аэрации, а в третьем — породы верхнего слабопроницаемого слоя); ДR — разность уровней воды основного и соседнего, питающего слоя.

Таким образом, задача гидрогеологического обоснования границ зоны санитарной охраны водозаборных сооружений в приближенной постановке сводится к определению параметров *R* (протяженность ЗСО вверх по потоку подземных вод); *г* (протяженность ЗСО вниз по потоку) и *d* (половина общей ширины ЗСО). При этом в качестве исходных данных для расчета ЗСО должны быть известны длительность расчетного интервала *T, а* также величины скоростей и направление движения подземных: вод в условиях эксплуатации водозаборных устройств.

Как следует из сказанного выше, задача выявления опасности загрязнения водозаборного сооружения сводится к исследованию траекторий движения частиц воды, располагающихся в начальный момент времени на различных участках области фильтрации подземных вод. Дифференциальные уравнения, количественно характеризующие закон движения или траектории движения частиц воды при плановой двухмерной фильтрации, имеют вид

$$\frac{\partial x}{\partial t} = v_x; \quad \frac{\partial y}{\partial t} = v_y, \quad (6)$$

где *x* и *y* — непрерывно изменяющиеся во времени *t* декартовы координаты движущейся точки; $v_x$ и $v_y$ — проекций вектора действительной скорости течения воды соответственно на оси *x* и *y*.

Составляющие $v_x$ и $v_y$ в системе уравнений (6) могут быть -найдены аналитически, путем теоретического решения соответствующей гидродинамической задачи или численно на основе решения краевой фильтрационной задачи на аналоговых устройствах или с использованием ЭВМ.

Для определения максимальной протяженности ЗСО вверх по потоку подземных вод от водозабора *R* уравнения (6) должны решаться при следующих условиях:

$$x = R, \ t = 0; \ x = x_0, \ y = y_0, \ t = T; \ \left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{x=R} = 0, \quad (7)$$

где $x_0$ и $y_0$ — координаты точек водозабора.

Первое из условий (7) означает, что отсчет времени начинается сразу для всех точек, располагающихся на прямой *x=R.* Вторым условием определяется длительность расчетного интервала *T,* необходимого для перемещения частиц воды от сечения *R* до водозабора. Третье условие (7) дает возможность выбрать из всех точек на прямой *x=R* ту, которая достигнет водозабора за наименьшее время (функция *T* имеет экстремум).

При определении расстояния г выражение (7) несколько изменяется:

$$x = -r; \quad t = 0, \quad x = x_0, \quad y = y_0, \quad t = T; \quad \left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{x=-r} = 0. \quad (8)$$

Ширина ЗСО также может быть найдена решением системы (6). При этом граничные условия принимают вид:

$$y = d,\ t = 0;\ x = x_0,\ У = У_0,\ t = T. \qquad \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{y=d} = 0. \qquad \textbf{(9)}$$

Систему дифференциальных уравнений (6) удобно использовать для численного определения параметров ЗСО. В дальнейшем таким способом построены таблицы численных значений *R, r* и *d* для наиболее сложных гидрогеологических условий работы водозаборных сооружений. Решение выражения (6) при этом проводилось по способу «предиктор — корректор», описанному Д. Мак Кракеном и У. Дорном в 1977 г.

Для получения аналитических выражений, определяющих параметры ЗСО, в некоторых сравнительно простых случаях фильтрационного потока к водозабору (симметричная зона захвата, простые краевые условия) удобно исследовать линии тока частиц воды, т. е. линии, касательные к которым в каждой точке показывают направление движения воды. При этом используется то обстоятельство, что траектории течения и линии тока в большинстве практических случаев совпадают. В частности, это имеет место при установившейся или квазиустановившейся фильтрации подземных вод, когда скорости движения воды во всех точках пласта не изменяются как по величине, так и по направлению. При нестационарной фильтрации в общем случае линии тока и траектории движения могут не совпадать. Однако здесь можно выделить некоторые схемы чисто нестационарной фильтрации, когда такое совпадение будет иметь место. Например, случай работы водозабора в неограниченном пласте без естественного потока и другие схемы, когда вектор скорости движения частиц воды изменяется только по величине, но направление движения воды в процессе эксплуатации водозабора остается неизменным.

Уравнение линий тока можно получить из следующего дифференциального соотношения (двухмерная плановая фильтрация):

$$\frac{\partial x}{\partial y} = \frac{v_x}{v_y}. \qquad \textbf{(10)}$$

Для плоских подземных потоков, следующих линейному закону фильтрации, для исследования картины движения частиц воды по линиям тока можно применить аппарат функции комплексного переменного. При этом вводится в рассмотрение функция тока Ф, которая может быть найдена из известных условий Коши — Римана:

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{\partial \varphi}{\partial x};\quad \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \qquad \textbf{(11)}$$

где потенциал скорости фильтрации ф определяется по формуле

$$\varphi = -kH; \qquad \textbf{(12)}$$

*H* — напор подземных вод.

В настоящее время для некоторых простейших фильтрационных схем получены аналитические выражения для функций ф и *ty* [1, 3, 9 — 11, 16]. Используя их, можно найти расчетные зависимости, определяющие время движения отдельных точек воды до водозабора:

$$T = \int_{x}^{x_0} \frac{dx}{v_x[x,\ y(\psi,\ x)]} \quad \text{или} \quad T = \int_{y}^{y_0} \frac{dy}{v_y[x(\psi,\ y),\ y]}, \qquad \textbf{(13)}$$

где *x, y* — начальные координаты точек; $x_Q, y_Q$ — координаты водозабора.

# ГЛАВА 10. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

## РАСЧЕТ ЗСО ВОДОЗАБОРОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В УДАЛЕНИИ ОТ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДОТОКОВ

**Водозабор в изолированном водоносном горизонте**

Изолированные водоносные горизонты характеризуются отсутствием внешних источников питания подземных вод (инфильтрация, перетекание из соседних водоносных пластов и т. д.). Водозабором извлекается вода из естественного грунтового потока, т. е.

**Q=Qe.** **(14)**

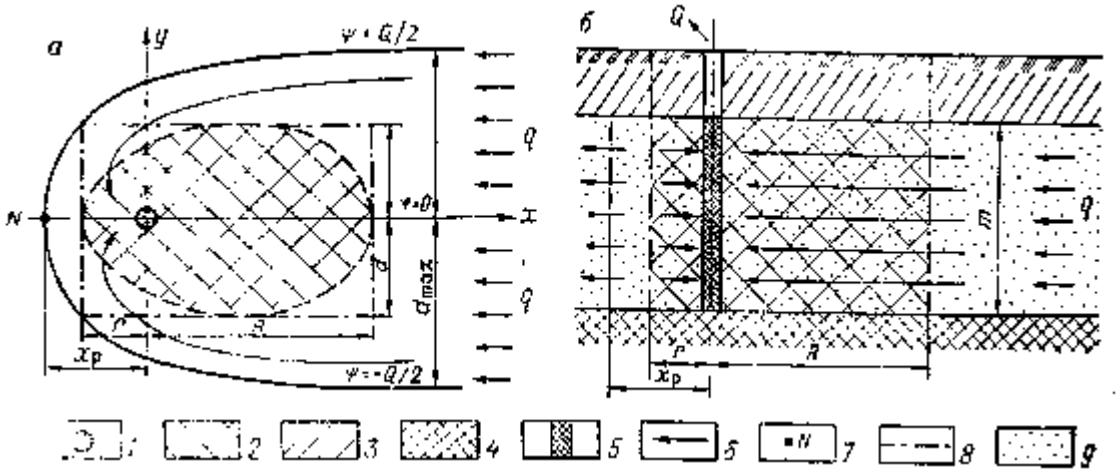



**Рис. 14. Схема к расчету ЗСО сосредоточенного водозабора в изолированном водоносном горизонте в удалении от поверхностных водотоков:**

***а* — план; б — разрез; 1 — водозабор; *2* — область захвата; *3* — суглинок- *4* — водоупор-*5* — фильтр скважины; *6* — направление естественного потока подземных вод- 7 — раздельная точка; *8* — граница ЗСО; *9* — водоносный горизонт**

Таблица 7

| Элементы потока | Расчетные зависимости |
|---|---|
| Уровень подземных вод | $H = H_0 + ix - \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{1{,}5\sqrt{at}}{\sqrt{x^2 + y^2}}$ (15) |
| Скорость фильтрации: | |
| вдоль оси $x$ | $v_x = -\left(\frac{q}{m} + \frac{Q}{2\pi m} \frac{x}{x^2 + y^2}\right)$ (16) |
| вдоль оси $y$ | $v_y = -\frac{Q}{2\pi m} \frac{y}{x^2 + y^2}$ (17) |
| Уравнения: | |
| линии тока | $\psi = qy + \frac{Q}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{y}{x}$ (18) |
| нейтральной линии тока | $x = \lvert y \rvert \operatorname{ctg} \frac{\lvert y \rvert}{x_p}$ (19) |
| Положение водораздельной точки $N$ | $x_p = Q/(2\pi q)$ (20) |
| Время движения частиц воды к водозабору | $t = \frac{mn}{q}\left[x - x_p \ln\left(\frac{x}{y} \sin \frac{y}{x_p} + \cos \frac{y}{x_p}\right)\right]$ (21) |

Примечания: $H_0$ — уровень в створе x=0; $i$ — уклон естественного потока; Q — Дебит водозабора; $k$ — коэффициент фильтрации; $m$ — мощность; $a$ — коэффициент пьезо-проводности; $q$ — удельный расход естественного потока; Ф — значение функции тока — — Q/2<Ф<Q/2; $t$ — время; $n$ — пористость.

Характерным для рассматриваемых водораздельных водозаборов является также неустановившийся режим фильтрации подземных вод в течение всего срока эксплуатации водозаборов. В связи с этим не только область захвата, но и область питания водозаборного сооружения в изолированных горизонтах непрерывно

расширяется, охватывая все большие площади. Для расчета положения ЗСО водозаборов подземных вод целесообразно исходить из условий квазиустановившейся фильтрации в пределах всей области захвата водозабора. При этом, как показывают расчеты, весьма незначительно увеличиваются скорости движения подземных вод и несколько завышаются размеры ЗСО. Использование указанной предпосылки дает возможность вместо рассмотрения траектории движения частиц воды при определении границ ЗСО использовать также линии тока подземных вод, что значительно упрощает расчеты.

Схема неограниченного водоносного горизонта соответствует условиям эксплуатации водозаборного сооружения в достаточно протяженном по площади водоносном горизонте, когда естественные границы горизонта (реки, водоемы, участки выклинивания пород) находятся за пределами области влияния водозабора.

*Сосредоточенный водозабор.* Расчетные зависимости (15) — (21) для определения основных элементов фильтрационного потока при работе одиночного или группового сосредоточенного водозабора в неограниченном изолированном горизонте при наличии естественного потока подземных вод с интенсивностью *q* (рис. 14) приведены в табл. 7. Используя эти формулы и данные Приложения, можно определить основные параметры ЗСО водозаборов в рассматриваемых гидрогеологических условиях.

Используя выражение (16), при *y=0* и x>0 по формуле (13) можно получить уравнение для определения протяженности ЗСО вверх по потоку подземных вод [13]:

$$\bar{T} = \bar{R} - \ln(1 + \bar{R}), \qquad (22)$$

где $T=qT/(mnx_p)$; $R=R/x_9$.

Подставляя в формулу (13) выражение (16) при *y — Q* и x<0, получим выражение для определения протяженности ЗСО вниз по потоку подземных вод от водозабора:

$$\mathbf{T = -[\ln(1 - r) + r];} \qquad (23)$$

где $r=r/x_p$. Очевидно, что максимально возможное значение параметра г равно 1, т. е.

$$\bar{r}_{max} = 1; \quad \bar{r}_{max} = x_p. \qquad (24)$$

Ширина ЗСО в данном случае может быть найдена следующим образом. Сначала определим абсциссу и ординату точки, находящейся на границе зоны захвата и максимально удаленной от оси *x(x — x*; y=d).* Для этого используем то обстоятельство, что время движения этой точки до водозабора минимально в сравнении с соответствующим временем движения других точек с линии *y=d* до водозабора. Следовательно, должно выполняться условие

$$\left.\frac{\partial t}{\partial x}\right|_{y=d} = 0. \qquad (25)$$

Подставляя в выражение (25) уравнение (21), получим

$$\bar{x}^* = 1 - \bar{d}\,\mathrm{ctg}\,\bar{d}, \qquad (26)$$

где $x^*=x^*/x_p$; $d=d/x_p$.

После подстановки (26) в (21) найдем соотношение, связывающее ширину SCO *d* с расчетным временем *T:*

$$\boldsymbol{T = 1 - d\,\mathrm{ctg}\,d - \ln(\sin d/d).} \qquad (27)$$

Из уравнения (27) видно, что максимальное значение параметра *d,* теоретически достигаемое при бесконечном расчетном времени 7, равно я, т. е.

$$\mathbf{d_{max} = \pi;\ } \boldsymbol{d = \pi x_p = Q/2q.} \qquad (28)$$

Графики изменения функций *R, г,* и *d в* зависимости от величины *T,* определенные по формулам (22), (23) и (27), показаны на рис. 15; в табл. 8 приведены численные значения параметров ЗСО. При T<20 — 30 для оценки величины *d* с погрешностью не более 10% может быть использовано приближенное балансовое соотношение

$$\boldsymbol{d = 2TQ/(\pi mnL),} \qquad (28а)$$

где *L=R+r.*

При q=0, т. е. при отсутствии бытового потока подземных вод $x_p$->оо и из соотношений (22), (23) и (27) следует, что

$$R = r = d = \sqrt{QT/(\pi mn)}. \qquad (29)$$

*Пример расчета. Водозабор представлен одной эксплуатационной скважиной производительностью Q = 2 тыс. м$^3$/сут. Намечаемый к использованию водоносный горизонт имеет среднюю мощность m=40 м, коэффициент фильтрации k=50 м/сут, водопроводимость km = 40*50 = 2 тыс. м$^2$/сут, активную пористость n= 0,2. Уклон естественного потока в районе проектируемой скважины i=0,001 (q=kmi = 2 м$^2$/сут).*

*Требуется определить границы третьего пояса ЗСО водозабора (T=10* сут). Установим сначала положение водораздельной точки N. По формуле (20) получим $X_p$ = 2000/(2*3,14*2) = 160 м. Исходный параметр т, полученный по формуле (22), в данном случае будет равен $T=2*10^4/(40*0{,}2*160)$ = 15,6. Следовательно (см. табл. 8), R=18,6; r=1; 3=2,9. Переходя к размерным величинам R, r и d, получим R= 18,6*160~2980 м; r= 1*160= 160 м; d=2,9*160=470 м.*

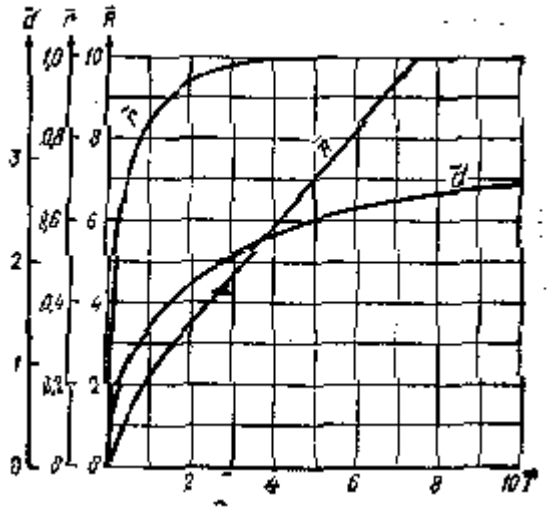


**Рис. 15. График для определения *R, r, d* при действии сосредоточенного водозабора в изолированном неограниченном водоносном горизонте: R = R/$x_p$; *r = r/$x_p$; d=d/$x_p$;* $x_p$ = *Q/(2πq);* T= *qT/(mnXp)***

*Линейный водозабор.* Такие сооружения чаще всего располагаются нормально к направлению естественного потока подземных вод. Схема фильтрации к водозабору для этого случая представлена на рис. 16. В табл. 9 даются [3, 11, 12, 16, 25] соотношения, характеризующие гидродинамические показатели фильтрационного потока к линейному водозабору: распределение напоров, скорости течения подземных вод, потенциальная функция, функция тока и т. д.

Таблица 8

**Величины R, r и d в зависимости от расчетного времени *m* к формулам (22), (23) и (27)**

| *m* | *R* | *r* | *d* | *T* | R | r | *d* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,01 | 0,149 | 0,135 | 0,142 | 5 | 7,091 | 0,998 | 2,415 |
| 0,02 | 0,213 | 0,187 | 0,200 | 6 | 8,222 | 0,999 | 2,522 |
| 0,05 | 0,351 | 0,284 | 0,315 | 7 | 9,336 | | 2,605 |
| 0,1 | 0,517 | 0,384 | 0,445 | 8 | 10,437 | | 2,670 |
| 0,2 | 0,773 | 0,507 | 0,626 | 9 | 11,528 | | 2,722 |
| 0,3 | 0,987 | 0,589 | 0,762 | 10 | 12,611 | | 2,765 |
| 0,5 | 1,358 | 0,699 | 0,973 | 15 | 17,942 | | 2,895 |
| 1 | 2,147 | 0,842 | 1,338 | 20 | 23,186 | | 2,961 |
| 2 | 3,506 | 0,948 | 1,789 | 30 | 33,543 | | 3,025 |
| 3 | 4,750 | 0,982 | 2,074 | 50 | 54,008 | | 3,074 |
| 4 | 5,937 | 0,994 | 2,271 | 100 | 104,661 | 1 | 3,109 |

Конфигурация области питания линейного водозабора, работающего в неограниченном изолированном пласте, аналогична области питания сосредоточенного водозаборного сооружения. Раздельная линия, ограничивающая область питания водозабора, в данном случае также имеет водораздельную точку *N*. Ее положение определяется соотношением (35). Очевидно, что в питании водозабора участвуют только подземные воды естественного потока, которые полностью определяют качество воды, извлекаемой водозабором.

Протяженность ЗСО линейного водозабора вверх *R* и вниз r по потоку подземных вод, а также ширину ЗСО удобно рассчитывать по формуле (36), характеризующей движение отдельных частиц воды при работе водозаборного сооружения. Для решения уравнения (36) применен метод «предиктор — корректор» с использованием ЭВМ.

Величину *R* можно найти с помощью табл. 10 и графика (*рис.* 17). В некоторых случаях можно использовать приближенные зависимости, полученные путем интегрирования выражения (36) с учетом приближенных соотношений arcctgx=n/2 — *x* при x<1 и arcctgx~1/*x* при x>1. Эти зависимости имеют вид:

$$\bar{R} = (\bar{q}+\pi/2)\{1-\exp[-\bar{T}/(2\pi)]\} \quad \text{при } \bar{R}\leqslant 1; \tag{37}$$

$$\bar{T} = 2\pi\left(\frac{\bar{R}-1}{2\bar{q}} + \ln\frac{\bar{q}+1{,}57}{\bar{q}+0{,}57} - \frac{1}{\bar{q}^2}\ln\frac{\bar{q}\bar{R}+1}{\bar{q}+1}\right) \quad \text{при } \bar{R}>10. \tag{38}$$

Формула (37) применима при расчетах на относительно малые промежутки времени в основном для обоснования размеров второго пояса ЗСО, а выражение (38) используется для расчетов третьего пояса на большие интервалы времени.

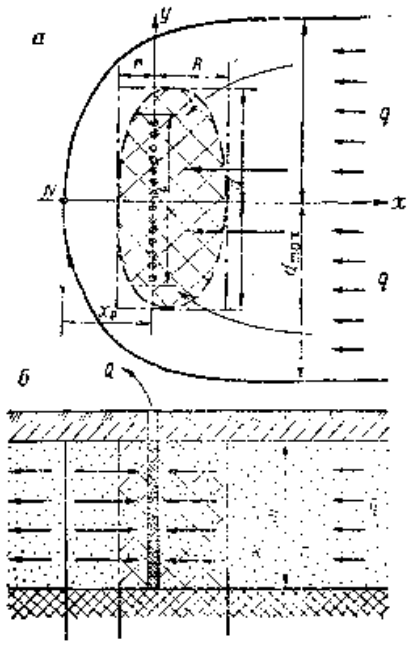



**Рис. 16. Схема фильтрации к линейному водозабору в неограниченном пласте: *а* — план; *б* — разрез. Условные обозначения см. на рис. 14**

**Таблица 9**

**Расчетные зависимости для определения основных элементов фильтрационного потока к линейному водозабору в изолированном неограниченном пласте**

| Элементы потока | Расчетные зависимости |
|---|---|
| Уровень подземных вод | $H = H_0 + ix - \frac{Q}{2\pi km}\left[\ln\frac{r_{вл}}{r_{вр}} + f(\bar{x}, \bar{y})\right]$ |
| | $f(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{1}{2}\left[2 + \ln\frac{\bar{x}^2+\bar{y}^2+1}{\sqrt{[(1+\bar{x})^2+\bar{y}^2]\,[(1-\bar{x})^2+\bar{y}^2]}} - \frac{\bar{x}}{2}\ln\frac{(1+\bar{x})^2+\bar{y}^2}{(1-\bar{x})^2+\bar{y}^2} - \bar{y}\left(\operatorname{arctg}\frac{\bar{x}+1}{\bar{y}} - \operatorname{arctg}\frac{\bar{x}-1}{\bar{y}}\right)\right]$ (30) |
| Скорость фильтрации: | |
| по оси $x$ | $v_x = -\left[\frac{q}{m} + \frac{Q}{2ml}\operatorname{arctg}\left(\frac{l}{x}\right)\right]$ (31) |
| по оси $y$ | $v_y = -\frac{Q}{8ml}\ln\frac{x^2+(y+l)^2}{x^2+(y-l)^2}$ (32) |
| Уравнения: | |
| линии тока | $\psi = qy + \frac{Qx}{4\pi l}\left[\frac{y+l}{x}\operatorname{arctg}\frac{y+l}{x} - \frac{y-l}{x}\operatorname{arctg}\frac{y-l}{x} - \ln\left(\sqrt{(y+l)^2+x^2}/\sqrt{(y-l)^2+x^2}\right)\right]$ (33) |
| нейтральной линии тока | Выражение (33) при $\psi = Q/2$ (34) |
| Положение водораздельной точки $N$ | $x_p = l\ \operatorname{ctg}(2\pi q\, l/Q)$ (35) |
| Время движения частиц воды до водозабора по оси $x$ | $t = \frac{mn}{q}\int_0^x \frac{d\alpha}{1+\{[Q/(2\pi q l)]\operatorname{arctg}(l/\alpha)\}}$ (36) |

Примечания: $r_{вл} = 1{,}5\sqrt{at}$; $r_{вр} = \sqrt{x^2+y^2+l^2}$; $\bar{x} = x/l$; $\bar{y} = y/l$; $l$ — половина длины водозабора.

Таблица 16

**Величины *R=R/l* в зависимости от *T=QT/mnl²* и *q=2ngl/Q***

| *R* | ***T* при различных значениях *q*** | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *0* | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 1 1,0 | | l.l | 1.2 | 1,3 | 1.4 \| 1,5 | |
| 1 | 5,75 | 5,25 | 4,84 | 4,47 | 4,19 | 3,91 | 3,69 | 3,47 | 3,28 | 3,12 | 2,97 | 2,83 | 2,72 | 2,59 | 2,50 | 2,39 |
| 2 | 16,46 | 14,38 | 12,78 | 11,53 | 10,50 | 9,66 | 8,94 | 8,31 | 7,78 | 7,31 | 6,91 | 6,53 | 6,20 | 5,91 | 5,62 | 5,38 |
| 3 | 33,00 | 27,44 | 23,59 | 20,75 | 18,53 | 16,78 | 15,31 | 14,13 | 13,09 | 12,22 | 11,44 | 10,77 | 10,16 | 9,62 | 9,16 | 8,72 |
| 4 | 55,56 | 44,03 | 36,72 | 31,59 | 27,78 | 24,84 | 22,47 | 20,53 | 18,91 | 17,55 | 16,34 | 15,31 | 14,41 | 13,61 | 12,89 | 12.2E |
| 5 | 84,31 | 63,75 | 51,69 | 43,69 | 37,94 | 33,56 | 30,14 | 27,38 | 25,08 | 23,16 | 21,50 | 20,08 | 18,84 | 17,75 | 16,78 | 15,91 |
| 6 | 119,3 | 86,19 | 68,25 | 56,78 | 48,75 | 42,81 | 38,19 | 34,50 | 31,50 | 28,97 | 26,83 | 25,00 | 23,39 | 22,00 | 20,75 | 19,64 |
| 7 | , 160,4 | 111,0 | 86,03 | 70,65 | to, is | 52,44 | 46,53 | 41,88 | 38,08 | 34,94 | 32,28 | 30,00 | 28,03 | 26,31 | 24,80 | 23,44 |
| 8 | 207,8 | 138,0 | 104,9 | 85,19 | 71,94 | 62,38 | 55,13 | 49,41 | 44,81 | 41,02 | 37,83 | 35,09 | 32,75 | 30,70 | 28,91 | 27, 3C |
| 9 | 261,5 | 167,0 | 124,8 | 100,3 | 84,06 | 72,53 | 63,88 | 57,09 | 51,66 | 47,19 | 43,44 | 40,27 | 37,53 | 35,13 | 33,03 | 31,15 |
| 10 | 321,4 | 197,6 | 145,3 | 115,8 | 96,50 | 82,94 | 72,78 | 64,91 | 58,63 | 53,44 | 49,13 | 45,47 | 42,34 | 39,61 | 37,22 | 35,09 |

**Таблица 11 Значения r*=r/ctgq в зависимости от *T =QT/(mnl²)* и *q — 2nql/Q***

***T* при различных значениях *q***

| *r** | 0.1 1 0,2 1 0,3 | | 0,4 | | 0,5 1 0,6 1 0,7 | | | 0,8 | 0,9 | 1,0 1 1,1 | | 1.2 | 1,3 | 1.4 | 1,5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,091 | 5,56 | 2,44 | 1,62 | 1,25 | 1,03 | 0,88 | 0,81 | 0,75 | 0,62 | 0,62 | 0,62 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| 0,182 | 16,28 | 6,09 | 3,81 | 2,81 | 2,31 | 2,000 | 1,75 | 1,62 | 1,50 | 1,38 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,00 | 1,00 |
| 0,273 | 34,44 | 11,44 | 6,69 | 4,81 | 3,88 | 3,25 | 2,88 | 2,62 | 2,38 | 2,25 | 2,12 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 1,50 |
| 0,364 | 62,25 | 19,16 | 10,63 | 7,41 | 5,78 | 4,19 | 3,75 | 3,50 | 3,25 | 3,00 | 3,00 | 2,75 | 2,50 | 2,50 | 2,00 |
| 0,454 | 103,0 | 30,06 | 16,00 | 10,78 | 8,25 | 6,75 | 5,81 | 5,19 | 4,75 | 4,38 | 4,12 | 4,00 | 3,75 | 3,50 | 3,00 |
| 0,545 | 161,3 | 45,34 | 23,28 | 15,28 | 11,44 | 9,25 | 7,88 | 6,94 | 6,31 | 5,88 | 5,50 | 5,25 | 5,00 | 5,00 | 4,50 |
| 0,636 | 245.4 | 67,09 | 33,50 | 21,43 | 15,69 | 12,50 | 10,50 | 9,19 | 8,25 | 7,62 | 7,12 | 6,75 | 6,50 | 6,25 | 5,50 |
| 0,727 | 370,1 | 99,06 | 48,31 | 30,25 | 21,69 | 17,00 | 14,12 | 12,19 | 10,87 | 9,94 | 9,25 | 8,75 | 8,50 | 8,00 | 7,50 |
| 0,818 | 569,1 | 149,8 | 71,56 | 43,87 | 30,94 | 23,81 | 19,44 | 16,63 | 14,69 | 13,31 | 12,38 | 11,63 | 11,00 | 10,75 | 10,00 |
| 0,909 | 949,1 | 246,3 | 115,5 | 69,44 | 48,00 | 36,25 | 29,19 | 24,56 | 21,44 | 19,25 | 17,63 | 16,50 | 15,75 | 15,25 | 14,50 |

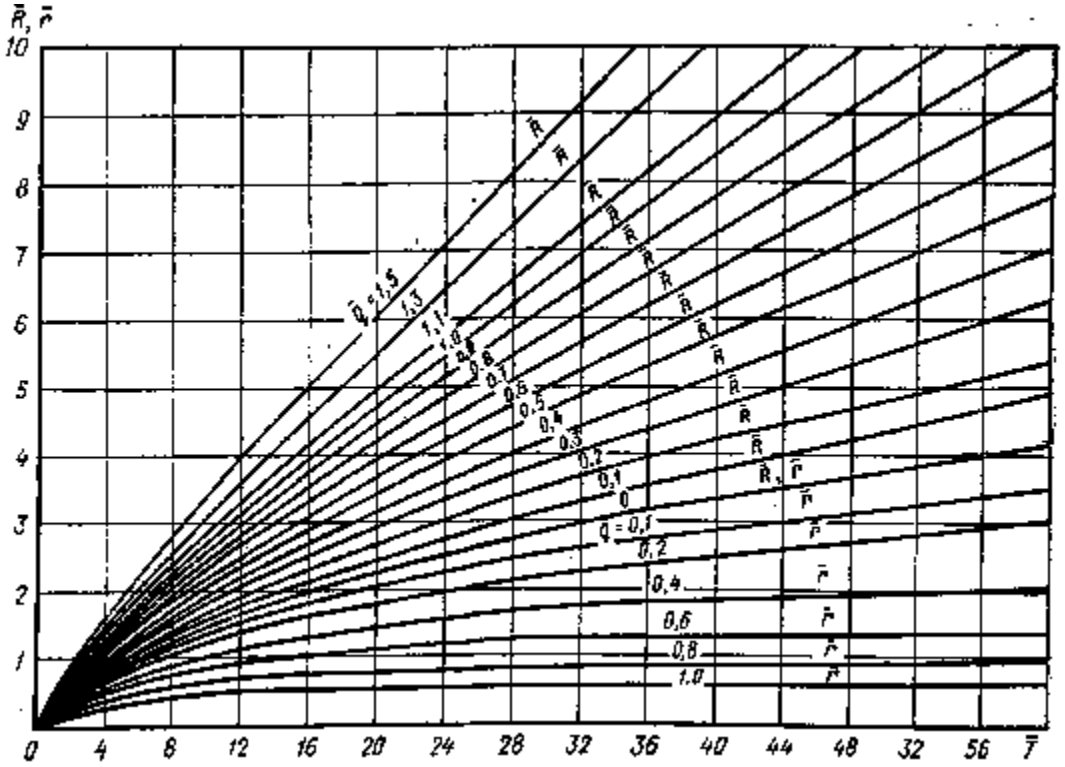



**Рис. 17. График для определения Лиг при действии линейного водозабора в изолированном неограниченном водоносном горизонте:** $\bar{R}=R/l$; $\bar{r}=r/l$; $\bar{q}=2\pi ql/Q$; $\bar{T}=QT/(mnl^2)$

При отсутствии бытового потока (д = 0) соотношения (37) и (38) упрощаются и принимают следующий вид: при R<1

$$\bar{R} = \pi/2\,[1 - \exp(-\bar{T}/2\pi)];$$

$$\bar{R} = \sqrt{(\bar{T}/\pi) - 1}. \qquad \textbf{(39) (40)}$$

при R>10

Величины расстояний *r* до нижней границы ЗСО линейного водозабора, также найденные путем решения уравнения (36) по методу «предиктор — корректор» с использованием ЭВМ, даны в табл. 11 и на графике (см. рис. 17).

Приближенно величина $r=r/l$ может быть оценена по следующим расчетным зависимостям:

при r<1

$$\bar{r} = \left(\frac{\pi}{2} - \bar{q}\right)\left[1 - \exp\left(-\frac{\bar{T}}{2\pi}\right)\right] \qquad (41)$$

$$\bar{T} = 2\pi\left(\frac{\bar{r}+1}{\bar{q}} + \ln\frac{1{,}57-\bar{q}}{0{,}57-\bar{q}} - \frac{1}{\bar{q}^2}\ln\frac{1-\bar{q}\,\bar{r}}{1-\bar{q}}\right). \qquad (42)$$

или при r > 1.

Очевидно, что максимальная протяженность $r_{max}$ ЗСО линейного водозабора в направлении вниз по потоку подземных вод равна $x_p$. При $q=Q$ $r=R$.

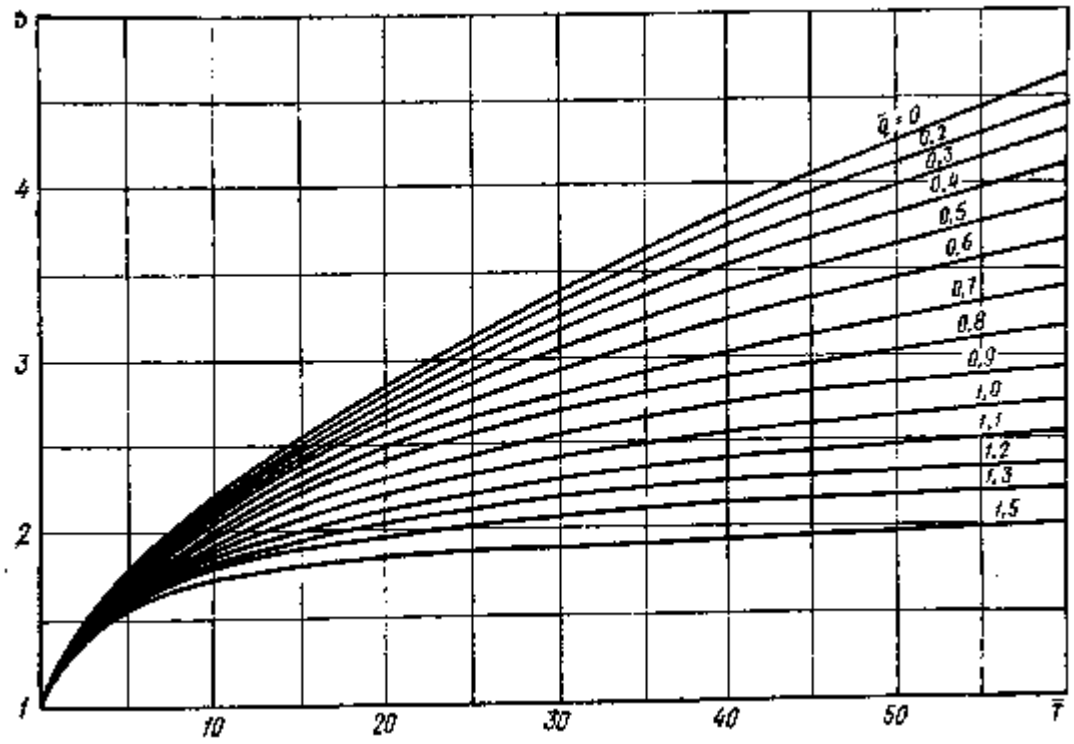



**Рис. 18. График для определения ширины ЗСО линейного водозабора в изолированном неограниченном водоносном горизонте:** $\bar{d}=d/l$; $\bar{q}=2\pi ql/Q$; $\bar{T}=QTl/(mn\beta)$

На рис. 18 приведен график изменения максимальной ширины области захвата и, следовательно, ширины ЗСО линейного водозабора, ориентированного нормально к направлению потока подземных вод. График построен по результатам решения на ЭВМ системы уравнений, описывающих траекторию движения частиц воды. Численное решение системы также осуществлялось по методу «предиктор — корректор».

При относительно малых промежутках времени (T<20 — 30) для практических расчетов ширины ЗСО линейного водозаборного сооружения можно использовать простое балансовое соотношение

$$d=2QT/(nmnL). \qquad \textbf{(43)}$$

При расчетах на большие интервалы времени (R>10) ширину ЗСО водозаборов в виде прямолинейных рядов скважин можно оценивать так же, как при рассмотрении сосредоточенных водозаборных сооружений.

В предельном случае *(T->oo)*

$$d=d_{max}=Q/2q. \qquad \textbf{(44)}$$

Пример расчета. Пусть проектный дебит линейного ряда скважин Q = e=10,5 тыс. $м^3$/сут, длина водозаборного ряда 2100 м (l=1050 м), мощность водоносного горизонта т=25 м, коэффициент фильтрации k=80 м/сут, удельный расход бытового потока $q$ — $l$ $м^2$/сут, пористость водоносных пород $n$=0,2.

Требуется выделить около проектируемого линейного водозабора третий пояс ЗСО, рассчитанный на 25 лет ($T\sim10^4$ сут).

Протяженность ЗСО водозабора вверх и вниз по потоку получаем по графику приведенному на рис. 17.

Значения безразмерных параметров, определяющих величины *R* и r, равны: *T*= (10 500*$10^4$)/(0,2*25*$1050^2$)=19; *q*= (2*3.14*1050)710500=0,6 и, следовательно, *Я* = 3,6, r=1,2, откуда *R*=*Rl*=3,6-1050=3700 м, r=rl= 1,2*1050=1260 м, *L* = *R*+*r*=3700+1260=4960 м.

Ширину ЗСО находим по графику на рис. 18. При Г=19 и #=0,6 3=2,5. Следовательно, d=2,5*1050=2600 м. По приближенному соотношению (43)

d=(2*1050*$10^4$)/(3,14*25*0,2*4960)=270 м.

**Водозабор в водоносном горизонте с перетеканием**

Фильтрационная схема с перетеканием подземных вод из соседних по разделу с эксплуатируемым водоносных горизонтов весьма характерна для обширных районов развития артезианских подземных вод. Рассмотрим простейший, но весьма типичный для таких районов случай, когда эксплуатация основного водоносного горизонта сосредоточенным водозабором не сопровождается существенным изменением уровней подземных вод в соседних питающих водоносных горизонтах. При этом дополнительное питание эксплуатируемого пласта непрерывно возрастает во времени и при некотором относительно небольшом промежутке времени полностью компенсирует водоотбор из пласта. Установившееся распределение уровней подземных вод при этом может быть записано следующим образом:

$$H=H_0+ix - [Q/(2nkm)]Ki(r/B), \qquad (45)$$

где *Но* — уровень при у = 0; Q — производительность водозабора; *km* — водопроводимость эксплуатируемого горизонта; &$_0$ и то — соответственно коэффициент фильтрации и мощность слабопроницаемого разделяющего слоя; *г* — расстояние от водозабора до расчетной точки:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2},$$

*B* — параметр перетекания: $B = \sqrt{m_0 k m / k_0}$.

Выражения для составляющих $v_x$ и $v_y$ скорости фильтрации подземных вод в рассматриваемой схеме определяются следующим образом:

$$v_x = -\left[\frac{q}{m} + \frac{Qx}{2\pi mBr} K_1\left(\frac{r}{B}\right)\right]; \quad v_y = \frac{Qy}{2\pi mBr} K_1\left(\frac{r}{B}\right), \qquad (46)$$

где $K_1$ — функции Бесселя первого порядка второго рода.

Область питания и область захвата сосредоточенного водозабора в условиях эксплуатационного дополнительного подпитывания водоносного горизонта за счет процессов перетекания через слабопроницаемые раздельные слои схематично изображены на рис. 19. Так же как и в изолированном пласте, здесь имеется водораздельная точка *N*. Положение ее определяется расстоянием %, которое может быть найдено по соотношению

$$1 - \bar{Q} K_1(\bar{Q}\bar{x}_p) = 0, \qquad (47)$$

где $\bar{Q} = Q/(2\pi qB)$, $\bar{x}_p = 2\pi q x_p / Q$

или по графику на рис. 20.

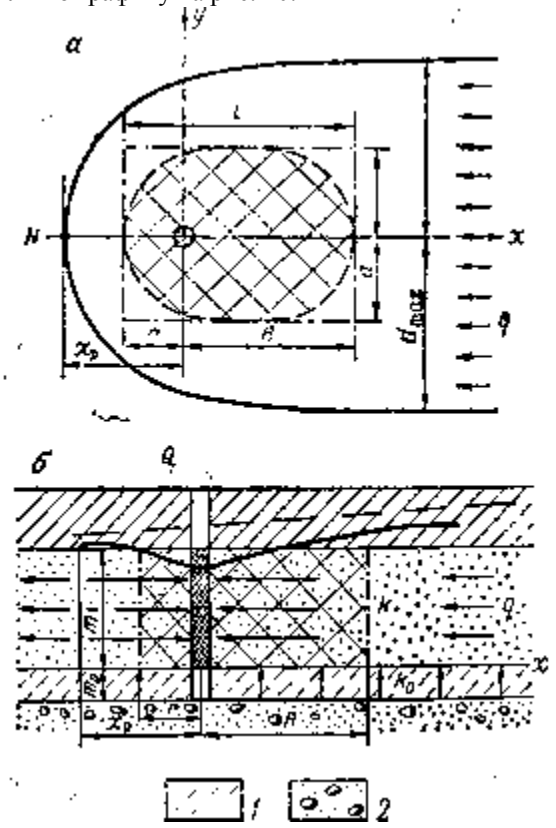



**Рис. 19. Схема фильтрации к водозабору в слоистом водоносном комплексе:**

***а* — план; *б* — вертикальный разрез; 1 — слабопроницаемый слой; *2* — хорошо проницаемый слой. Остальные условные обозначения см. на рис. 14**

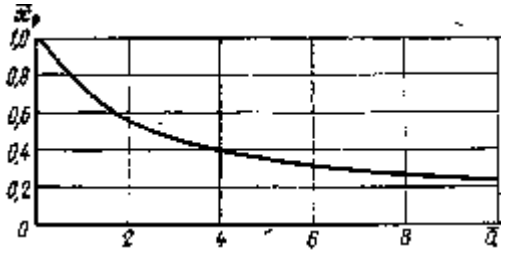



**Рис. 20. График для определения положения водораздельной точки *N*:** $\bar{x}_p = 2\pi q x_p / Q$; $\bar{Q} = Q/(2\pi qB)$

**Таблица 12**

**Значения** $T=2nq^2T/(Qmn)$ **для сосредоточенного водозабора в горизонте с перетеканием в зависимости от** $R=2nqR/Q$ и $Q = Q/(2nqB)$

| *к* | ***T* для различных значений *Q*** | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **0,1** | **0,2** | **0,5** | **1** | **2** | **4** | **8** | **10** | **15** | **20** |
| **0,1** | **0,005** | **0,005** | **0,005** | **0,005** | **0,005** | **0,005** | **0,006** | **0,006** | **0,003** | **0,010** |
| **0,5** | **0,094** | **0,095** | **0,097** | **0,101** | **0,115** | **0,152** | **0,231** | **0,264** | **0,320** | **0,353** |
| **0,7** | **0,169** | **0,170** | **0,175** | **0,187** | **0,221** | **0,300** | **0,422** | **0,460** | **0,519** | **0,553** |
| **1** | **0,307** | **0,310** | **0,323** | **0,355** | **0,431** | **0,570** | **0,720** | **0,759** | **0,819** | **0,853** |
| **2** | **0,907** | **0,924** | **0,994** | **1 125** | **1,339** | **1,558** | **1,720** | **1,769** | **1,819** | **1,853** |
| **5** | **3,264** | **3,369** | **3,679** | **4 019** | **4 327** | **4,558** | **4,720** | **4,759** | **4,819** | **4,853** |
| **10** | **7,810** | **8,080** | **8,621** | **9 016** | **9 327** | **9,558** | **9,720** | **9,759** | **9,819** | **9,853** |
| **15** | **12,611** | **13,004** | **13,618** | **14,016** | **14,327** | **14,558** | **14,720** | **14,759** | **14,819** | **14,853** |
| **20** | **17,513** | **17,981** | **18,617** | **19,016** | **19,327** | **19,558** | **19,720** | **19,759** | **19,819** | **19,853** |

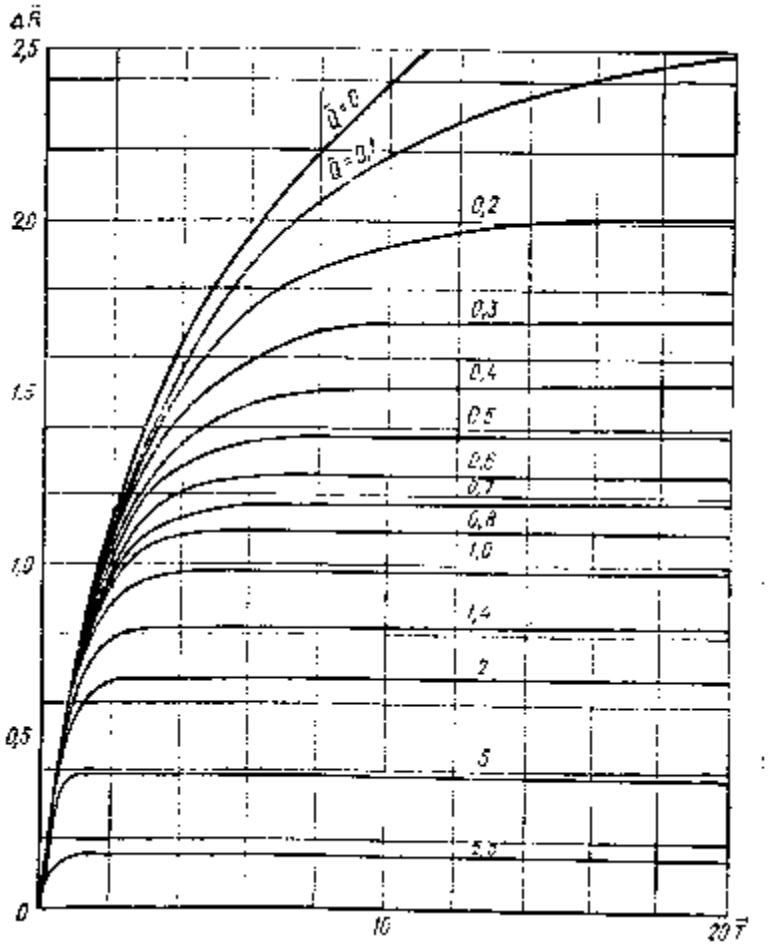



**Рис. 21. График для определения протяженности *R* ЗСО сосредоточенного водозабора при перетекании:**

$\overline{\Delta R}=2\pi q\Delta R/Q;\quad \overline{T}=2\pi q^2T/(Qmn);\quad \overline{Q}=2\pi qB;\quad R=R_q+\Delta R$

При Q = 0 или *B = oo* (изолированный пласт) $лг_р$=1. Величина основных параметров ЗСО водозабора в данной схеме рассчитывается по выражению (13) с учетом соотношений (10).

В табл. 12 приведены значения безразмерного показателя *R,* характеризующего протяженность ЗСО вверх по потоку подземных вод от водозабора, и связанного с ним параметра *T,* определяющего длительность расчетного интервала времени, а на рис.21 изображены кривые изменения величины ДЯ, используемые для графического определения расстояний до верхней границы ЗСО. Табл. 13 содержит значения параметров *T* и *r=2nqr/Q,* с помощью которых можно определить протяженность ЗСО сосредоточенного водозабора вниз по потоку подземных вод; с помощью кривых, изображенных на рис. 22, это определение можно выполнить графически.

**Таблица 13**

**Значения $T=2nq^zT/(Qmn)$ для сосредоточенного водозабора в горизонте с перетеканием в зависимости от $r = 2\pi qr/Q$ и Q==Q/(2πqB)**

| *г* | *T* Для различных значений *Q* | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 0,7 | 10 | 1,2 | 1,6 | 1,8 | 2,0 |
| 0,1 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,006 | 0,006 |
| 0,2 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,025 | 0,025 | 0,025 |
| 0,3 | 0,057 | 0,057 | 0,058 | 0,059 | 0,061 | 0,062 | 0,065 | 0,067 | 0,069 |
| 0,4 | 0,111 | 0,113 | 0,115 | 0,119 | 0,125 | 0,131 | 0,144 | 0,153 | 0,163 |
| 0,5 | 0,193 | 0,195 | 0,206 | 0,218 | 0,240 | 0,259 | 0,315 | 0,357 | 0,418 |
| 0,6 | 0,318 | 0,323 | 0,353 | 0,386 | 0,462 | 0,547 | 1,082 | 00 | со |
| 0,7 | 0,510 | 0,525 | 0,613 | 0,728 | 1,212 | 00 | 00 | | |
| 0,8 | 0,826 | 0,869 | 1,222 | 4,228 | со | | | | |
| 0,9 | 1,471 | 1,678 | со | со | | | | | |
| 1,0 | оо | 00 | | | | | x | | |

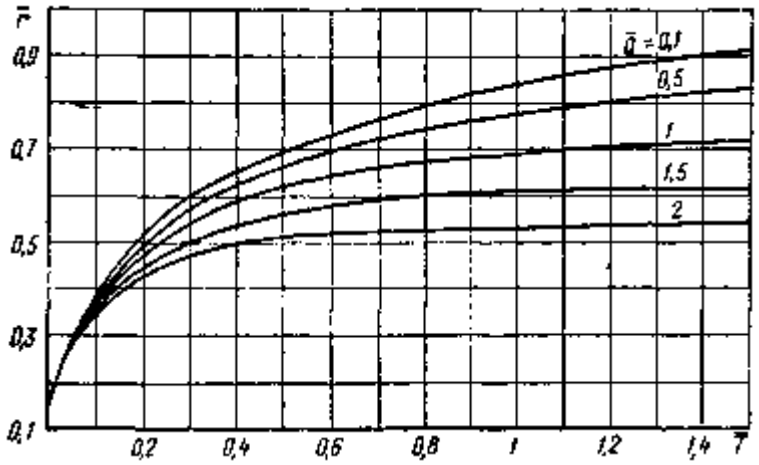



**Рис. 22. График для определения протяженности г ЗСО сосредоточенного водозабора при перетекании:**

$\bar{r}=2\pi qr/Q$; $\bar{T}=2\pi q^2T/(Qmn)$; $\bar{Q}=Q/(2\pi qB)$

## РАСЧЕТ ЗСО БЕРЕГОВЫХ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

**Некоторые особенности фильтрации к береговым водозаборам**

Большая часть водозаборов подземных вод сосредоточена вблизи рек, каналов и водоемов. Они располагаются обычно в пределах поймы или надпойменных террас, в небольшом удалении от водотоков или водоемов, и носят поэтому название береговых. В таких условиях поверхностные воды играют существенную роль в восполнении запасов подземных вод эксплуатируемых водоносных горизонтов и обеспечивают стабильность и высокую производительность береговых водозаборов. В некоторых случаях водозаборными сооружениями перехватывается также часть естественного потока, в ненарушенных условиях (до начала работы водозабора) дренируемого рекой. Движение подземных вод к береговым водозаборам быстро приобретает стационарный характер.

Таким образом, взаимосвязь подземных и поверхностных вод является одним из существенных факторов, которые должны учитываться как при оценке производительности береговых водозаборов, так и при расчетах зон их санитарной охраны.

В зависимости от степени и характера взаимосвязи подземных вод с речными принято различать два вида поверхностных потоков:

1) имеющие полную гидравлическую связь с эксплуатируемым водоносным горизонтом (гидравлически совершенные реке);

2) имеющие затрудненную гидравлическую связь с подземными водами (гидравлически несовершенные реки).

Гидравлически совершенные реки характеризуются тем, что на их урезе уровень подземных вод совпадает с уровнем воды в реке, т. е. инфильтрация речных вод в водоносный пласт происходит практически без потерь напора. Это имеет место при достаточно глубоком врезе русла реки в водоносный пласт (на 0,6 — 0,8 его мощности) и отсутствии кольматированного слоя на дне реки. К этому виду можно отнести также достаточно широкие реки (ширина которых значительно больше мощности водоносного горизонта),

слабозакольматированные и незаиленные.

Затрудненная гидравлическая связь водоносного горизонта с рекой может быть обусловлена наличием в ее русле разделяющего слоя с низкими фильтрационными свойствами (пойменные отложения, заиление русла и т. п.) или неполной врезкой русла в водоносный пласт (менее чем на 0,6 его мощности).

Другой важный фактор, который необходимо учитывать при проектировании ЗСО водозаборов, — направление движения подземных вод в зоне действия берегового водозабора.

В областях с гумидным климатом, т. е. на большей части территории СССР, речные долины являются дренами подземных вод и движение последних постоянно, за исключением сравнительно коротких паводковых периодов, происходит из берегов в реки.

В областях с аридным климатом (Средняя Азия, Казахстан), где испарение преобладает над осадками, наблюдается обратное соотношение, когда реки теряют сток в результате постоянной фильтрации в подрусловые и береговые водоносные отложения. В этом случае свободная или пьезометрическая поверхность подземных вод понижается от реки в глубь берега и естественный поток направлен от реки.

Для районов с сухим жарким климатом характерны также речные долины с непостоянным речным стоком. В таких условиях подземные воды, заключенные в аллювиальных отложениях, получают только периодическое восполнение в многоводные периоды года, когда появляется сток в реках; в остальное время года воды рек расходуются на испарение и стекают вдоль по долине. Таким образом, естественный поток подземных вод здесь, как и в горных долинах, направлен параллельно руслу реки.

Рассмотрим основные схемы движения подземных вод к береговым водозаборам с учетом перечисленных основных особенностей фильтрационного потока в речных долинах.

**Сосредоточенный береговой водозабор**

Пусть водозабор подземных вод, состоящий из одиночной скважины или компактной группы взаимодействующих скважин, эксплуатирует водоносный горизонт вблизи совершенной реки (водоема). Урез реки для большинства случаев схематически можно рассматривать как прямолинейный контур бесконечной длины. Считается также, что водозабор работает с постоянным расходом $Q$ и удален от реки на расстояние $Xo$ (рис. 23). В дальнейшем будем полагать, что ось $y$ совпадает с урезом реки, а ось $x$ проходит через центр сосредоточенного водозабора или линейного ряда скважин. На урезе реки, т. е. при л:=0, задается условие постоянства напора (или уровня) подземных вод.

Расчетные формулы для определения границ ЗСО получены для условий стационарной фильтрации. Как показано в работе В. М. Гольдберга **[12],** время продвижения подземных вод при стационарном режиме незначительно отличается от времени движения при нестационарном режиме, особенно на сравнительно небольших удалениях от водозабора. Так, если путь фильтрации? до водозабора равен 1000 м, то это расхождение составляет (в бесконечном пласте) всего 3,7%. Поскольку при нестационарном режиме скорость перемещения частиц воды меньше, чем при стационарном, расчеты по формулам для стационарного режима дают некоторый запас прочности [12].

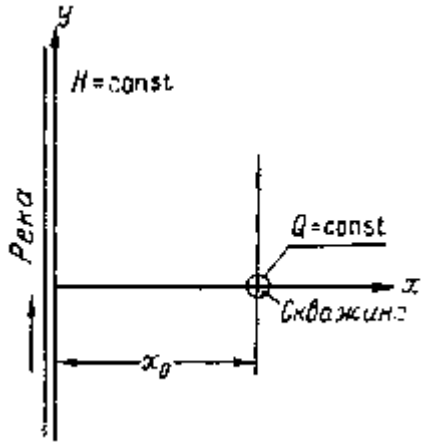



**Рис. 23. Схема расположения сосредоточенного берегового водозабора**

Береговой водозабор подземных вод может работать при наличии естественного потока, направленного к реке или от нее, а также в условиях бассейна, т. е. без естественного потока.

*Естественный поток направлен к реке.* Зона захвата берегового водозабора для рассматриваемого случая, когда естественный поток подземных вод направлен к реке, представлена на рис. 24.

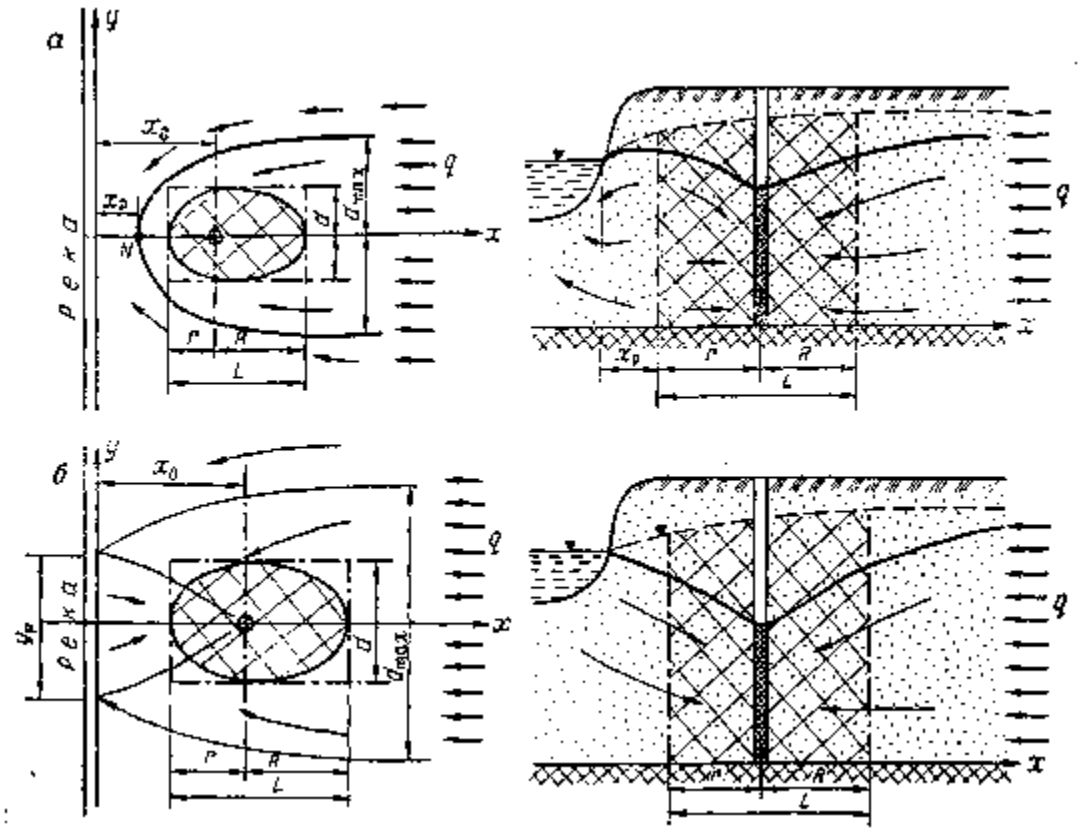


**Рис. 24. Схемы фильтрации к сосредоточенному береговому водозабору при естественном потоке, направленном к реке:**

***а* — относительно малый расход водозабора (Q<πx$_0$q); *б* — большой расход водозабора (*Q*>πx$_0$*q*). Условные обозначения см. на рис. 14**

Схема на рис. 24,а характеризует фильтрационный поток, когда дебит водозабора *Q* полностью компенсируется естественным потоком (т. е. Q=Q$_e$), а речные воды не участвуют в питании водозабора (Qp = 0). При этом образуется водораздельная точка *N* с координатами *x — x$_p$,* и *y=0,* располагающаяся между водозабором и рекой и ограничивающая предельные размеры ЗСО вниз по естественному потоку подземных вод. Положение этой точки, лежащей на нейтральной линии тока, определяется координатой., для которой имеется следующее выражение:

$$\bar{x}_p = \sqrt{1-\bar{Q}}, \qquad (48)$$

где $x_ф = x_p/x_0$; $Q = Q/(\pi g x_0)$.

Формула (48) справедлива при относительно малом дебите водозабора *(Q<1),* при котором только и возможна рассматриваемая схема течения.

Выражения для составляющих скоростей $v_x$, $v_y$ и функции тока в этом случае можно представить в таком виде:

**(49) (50) (51)**

$$v_x = (Q/2\pi m)\{[(x+x_0)/\rho^2] - (x-x_0)/r^2\} - q/2\pi m;$$

$$v_y = (Q/2\pi m)[(y/\rho^2) - (y/r^2)];$$

$$\psi = (Q/2\pi\{\operatorname{arctg}[2\bar{y}/(1-\bar{x}^2-\bar{y}^2)] - 2\bar{y}/\bar{Q}\},$$

где $y=y/x_0$.

Из формулы (51) можно получить уравнение нейтральной линии тока

$$\bar{x} = \sqrt{1 - \bar{y}^2 - 2\bar{y}\operatorname{ctg}(2\bar{y}/\bar{Q})}, \qquad (52)$$

ограничивающей область питания водозабора.

С помощью того же уравнения (51), полагая- x->oo, можно также определить максимально возможную ширину области за-хвата $d_{max}$

$$d_{max} = \pi Q/2, \qquad (53)$$

где $d=d/x_0$.

Ширина области захвата, выражаемая по (53), соответствует времени *t — >oo.*

Используя выражение (49) по формуле (R = R$_q$+AR), можно получить зависимость между расчетным

периодом времени *T* и протяженностью *R* ЗСО вверх по потоку:

$$R=T+ДR \qquad (54)$$

где $R = R/x_0$; $T=qT/(mnx_0)$;

$$ДR=[(l-x_P^2)/2xv]ln[l+2x_pR/(l+R-x_pR)]. \qquad (55)$$

Первое слагаемое в уравнении (54) $T=R_q$ (где $R_Q=R_{Cl}/X_0$) представляет собой расстояние $R_q$, преодолеваемое частицами воды за время *T* в естественных условиях при отсутствии водозабора (при движении со скоростью бытового потока *q),* т. е. $R_q$ — $=qT/(mn)$.

Второе слагаемое (ДR = $ДR/x_0$) определяет дополнительное расстояние, которое проходит частица воды при эксплуатации водозабора за то же время *T.* Величина *R* входит в выражение (55) неявным образом. На рис. 25,а представлены графики для определения величины Д*R* в зависимости от задаваемого периода времени *T* и значений $x_p$.

Из выражения (55) можно получить, что при $x_p$->0 (раздельная точка смещается к урезу реки) ДR->1, т. е. $ДR_{max}$<1. Поскольку обычно ДR>$x_p$, заменяя в формуле (55) логарифм первым членом его разложения, можно получить

$$ДR=(1-x_p^2)R/(1+R)=R/(1+R). \qquad (56)$$

Подставляя выражение (56) в формулу (54), получим приближенное выражение величины *R:*

$$\bar{R} \approx 0.5\bar{T}\left(1+\sqrt{1+4/\bar{T}}\right). \qquad (57)$$

При $x_p$<0,5 вычисления по приближенной формуле (57) дают относительную погрешность не более 10%. При *T>8* она с той же погрешностью справедлива для любых значений $я_p$.

Протяженность ЗСО *г* вниз по потоку подземных вод от водозаборного сооружения может быть найдена из выражения

$$T=[(l — x_p^2)/2x_p]\ ln[l+2x_pr/(l-r-x^2-x_pr)]-r, \qquad (58)$$

где r=*r/x₀.* Для определения величины *г* можно воспользоваться графиками на рис. 25,6. Понятно, что максимально возможное значение величины r равно расстоянию между водораздельной точкой и водозаборам, т. е. $r_{max}=1 — x_p$.

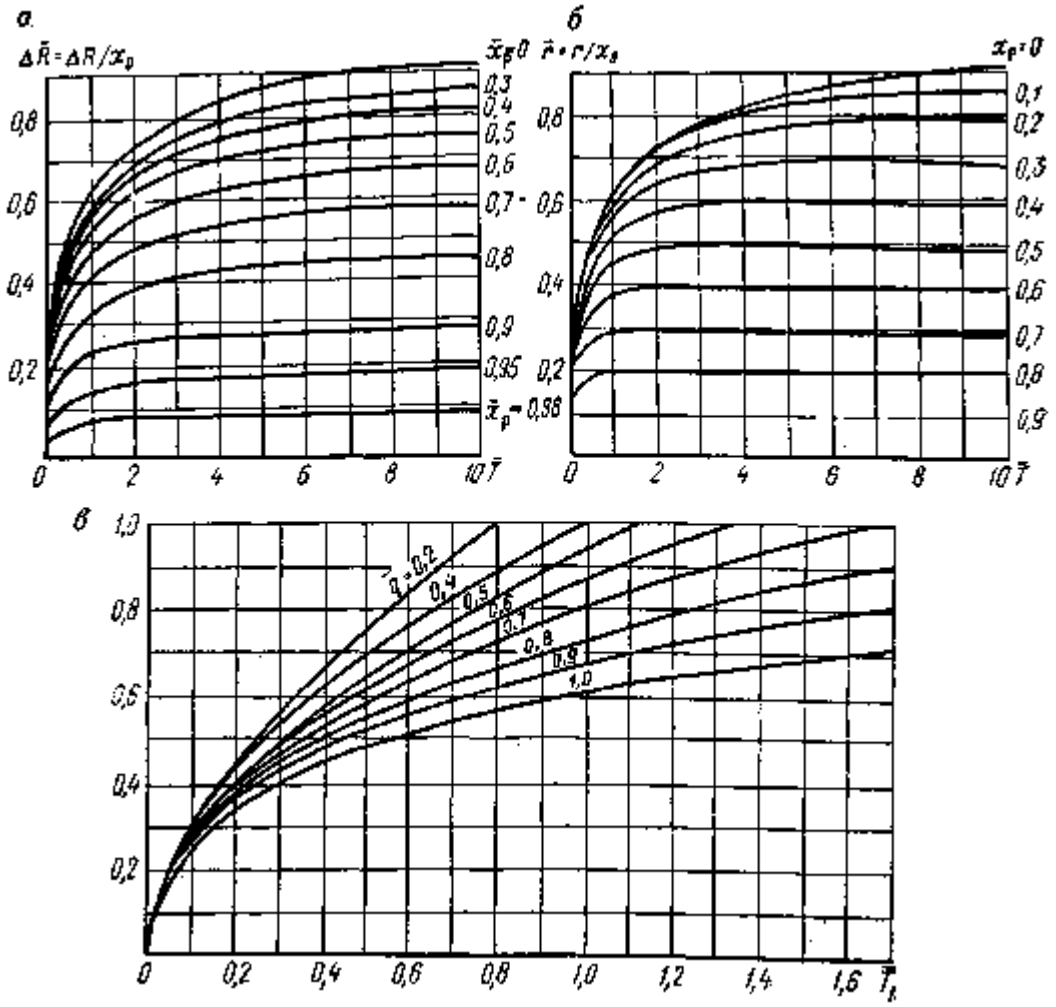



**Рис. 25. Графики для определения протяженности ЗСО AR *(а)* и r *(б, в):***
**Графики на рис. *а, б к* схеме на рис. 24,а, на рис. *в к* схеме на рис. 24,6:**

$$\bar{T}=\frac{qT}{mnx_0},\quad \bar{q}=\frac{\pi x_0 q}{Q}=\frac{1}{\bar{Q}},\quad \Delta\bar{R}=\frac{\Delta R}{x_0};$$

$$\bar{T}=\bar{Q}\bar{T}=\frac{QT}{\pi mnx^2_0},\quad \bar{q}=\frac{\pi x_0 q}{Q}=\frac{1}{\bar{Q}},\quad d=\frac{d}{x_0},\quad d_{max}=\frac{d_{max}}{x_0}$$

Ширина *d* области захвата и ЗСО водозабора в данном случае приближенно может быть установлена на основе следующих соображений. Площадь захвата *F=QTl(mn).* Приравнивая величину *F* к площади эллипса с осями *L=R+r* и *2d,* которым схематично изображается область захвата, можно получить следующее выражение для определения максимальной ширины области захвата:

$$d=2\bar{Q}T/(R+r), \qquad (59)$$

где $d = d/x_0$.

При увеличении дебита водозабора водораздельная точка *N* смещается в сторону реки и в предельном случае, когда *Q* = =1, располагается на урезе реки ($x_р = 0$).

При дальнейшем увеличении дебита водозабора, когда Q> 1, отбор подземных вод частично компенсируется поступлением в водоносный пласт речных вод. Схема для данного случая приведена на рис. 24,6. Дебит водозабора Q в таких условиях складывается чз фильтрующихся речных вод $Q_Р$ и части бытового потока подземных вод $Q_е$: $Q=Q_Р+Q_е$, где Qp = 2Q arctg $y_p$ — $2y_p$,

здесь $y_р = — y_0/x_0$, $Qp=Q_Р/(qx_0)$]; $Q_e=2Q\ arctg\ y_p+2y_p$,

здесь $Q_е = Qe/(qx_0)$}.

Из этих выражений видно, что соотношение между составляющими дебита водозабора в значительной степени зависит от величины $y_p$ — половины ширины фронта фильтрации речных вод на урезе реки, которая определяется следующим образом:

$$\bar{y}_р=\sqrt{\bar{Q}-1}. \qquad (60)$$

В табл. 14 приведены значения отношения $Q_Р/Q_е$ для различных величин $y_р$ и *Q*.

Из данных, приведенных в таблице, видно, что при $y_p$= = (2 — 2,5)$x_0$ речные воды составляют примерно половину дебита водозабора. При увеличении его производительности доля привлекаемых речных вод возрастает.

Протяженность *m* ЗСО в области между рекой и водозабором может быть найдена из зависимости

$$T=[(l+y_P^2)/y_P]arctg[ry_9/(l+y_P^2-r)]-r. \qquad (61)$$

Понятно, что величина *г* не может быть больше расстояния $x_и$ между рекой и водозабором, т. е. $г_{тах}$=1. График для определения величины r по формуле (61) приведен на рис. 25,0.

Выражение (61) может быть использовано также для определения времени $T_{реч}$, в течение которого речная вода достигает водозабора. В этом случае необходимо принять $r=x_0$ (r=l) и тогда

$$T_{Реч}=[(1+y_р^2)/y_Р]\ arctg\ (1/y_р)-1. \qquad (62)$$

Вверх по потоку подземных вод протяженность *R* ЗСО можно определить из выражения

$$\bar{T}=\bar{R}-\Delta\bar{R}, \qquad (63)$$

где

$$\Delta\bar{R}=[(1-\bar{y}_р^2)/\bar{y}_р]\,\mathrm{arctg}[\bar{y}_р\bar{R}/(1+\bar{y}_р^2+\bar{R})].$$

**Таблица 14**

| Q | $y_Р$ | $Q_р/Q_е$ | Доля речных вод в дебите водозабор $Q_р/Q$, % |
|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1,0 | 0,2 | 18,2 |
| 3 | 1,4 | 0,4 | 30,7 |
| 4 | 1,7 | 0,6 | 39,1 |
| 5 | 2,0 | 0,8 | 45,0 |
| 6 | 2,2 | 1#0 | 50,0 |
| 7 | 2,4 | 1,1 | 52,3 |
| 8 | 2,6 | 1,3 | 55,6 |
| 9 | 2,8 | 1,4 | 58,2 |
| 10 | 3,0 | 1,5 | 60,4 |

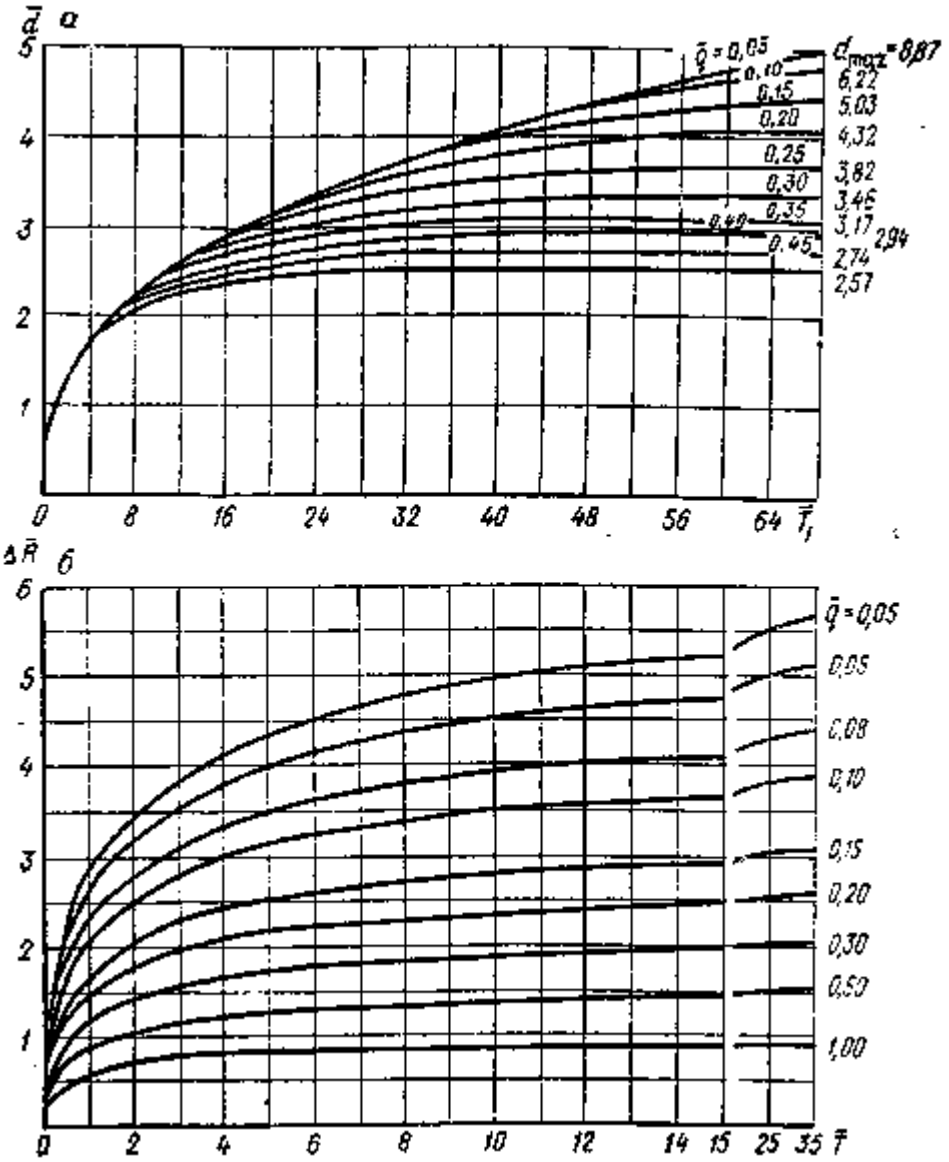



**Рис. 26. Графики для определения параметров SCO *d (а)* и AR *(б) к* схемам на рис. 24,6. См. формулы к рис. 25**

На рис. 26,6, приведены графики изменения величины AR, получаемой с помощью формулы (63), в зависимости от *T*.

Ширина области захвата в данном случае устанавливается по времени движения частиц воды к водозабору. В общем виде это время определяется по формуле

**(64)**

$$\bar{T} = \frac{2}{\bar{Q}} \int_0^{\bar{y}} \frac{1 + \operatorname{ctg}^2 [2(\bar{\psi} - z/\bar{Q})]}{\sqrt{1 - z^2 + 2z \operatorname{ctg} [2(\bar{\psi} - z/\bar{Q})]}} z dz,$$

где $\bar{\psi} = 0{,}5 \operatorname{arctg} [2\bar{y}/(\bar{y}^2 + r^2 - 1)] + \bar{y}/\bar{Q}$.

Ширина *d* ЗСО находится **из** условия *dT/dΦ = 0.* График для определения величины *d,* полученный таким образом, представлен **на** рис. 26,с. Из него видно, что при относительно малых значениях времени *T* (TQ<6 — 10) ширина ЗСО практически не зависит от величины естественного расхода *q.* В этот период она может быть найдена по формуле (59). При более длительных периодах времени величина *d* растет и достигает максимального значения $d_{max}$, которое может быть найдено по формуле

$$\bar{d}_{max} = Q_e/2q = \bar{Q} \operatorname{arcctg} \sqrt{\bar{Q} - 1} + \sqrt{\bar{Q} - 1}, \qquad \textbf{(65)}$$

где *(d — d/x₀).*

На рис. 26,а приведены некоторые значения $d_{max}$ для различных *q=1/Q.* Из графиков на этом рисунке видно, что при *Q*<5 величина *d* сравнительно быстро достигает своего максимального значения.

Пример расчета. Для водоснабжения поселка проектируется пробурить в аллювиальных отложениях на расстоянии $x_0$=100 м от реки скважину с проектируемым дебитом скважины Q=2000 м$^3$/сут. Средний коэффициент фильтрации аллювиальных отложений k = 30 м/сут, мощность водоносного горизонта т = 30 м,

активная пористость водоносных пород n = 0,25, уклон естественного потока i = 0,001.

Требуется определить размеры второго пояса ЗСО, исходя из возможности бактериального загрязнения пласта ($T_м$ = 400 сут), и третьего пояса, рассчитанного на весь срок эксплуатации водозабора $T_х$=25 лет ($10^4$ сут).

Для расчета искомых величин найдем сначала расход естественного потока q = kmi=30*30*0,001 = 0,9 $м^2$/сут. В данном случае $Q>\pi x_0 q$, так как 2000> >3,14*100*0,9 и, следовательно, условия работы водозабора соответствуют схеме на рис. 24,6.

Для определения протяженности r ЗСО от водозабора в сторону реки используем график на рис. 25,в. Найдем сначала значения безразмерных параметров: 9=1/Q = 3,14*100*0,9/2000=0,14; $T_1$ = TQ=2000*400/(3,14*30*0,25*$100^2$) = 3,4 при Т=400 сут; $T_1$ = TQ=2000*$10^4$/(3,14*30*0,25*$100^2$) =85 при Т=$10^4$ сут.

По графику, приведенному на рис. 25,*в* (схема на рис. 24,6), устанавливаем, что данным значениям $T_1$ и $q$ соответствует величина r>1. Это значит, что $T$ больше времени движения воды от реки до водозабора ($T>T_{реч}$) и, следовательно, нужно принять $r=x_0$=100 м.

Ширину фронта фильтрации речных вод на урезе реки $y_p$ можно определить по формуле (60):

$$y_p = x_0\bar{y}_\mu = 100\cdot\sqrt{[(2000:(3,14\cdot100\cdot0,9)]-1} = 246 \text{ м}.$$

Время, за которое речные воды дойдут до водозабора, определим по формуле (62):

$$T_{реч} = mnx_0\bar{T}/q = \frac{30\cdot0,25}{0,9}\left(\frac{100^2+246^2}{246}\operatorname{arctg}\frac{100}{246}-100\right) = 98 \text{ сут}.$$

Определим теперь протяженность $R$ ЗСО вверх по потоку подземных вод. По формуле (54) найдем сначала расстояние $R_q$, которое проходит частица воды, двигаясь со скоростью естественного потока: *Rq=0,*9*400/(30*0,25) =48 м при $T_м$=400 сут; $R_q$ = 0,9*$10^4$/(30*0,25) = 1200 м при $T_х$=$10^4$ сут.

Далее по графику на рис. 26,6 находим дополнительное расстояние AR, обусловленное действием водозабора: q = 0,14; *T*=0,9*400/(30*0,25*100)=0,48 при $T_м$ = 400 сут; 7=0,9*$10^4$/(30*0,25*100) = 12 при $T_х$=$10^4$ сут. Следовательно, ДR = =1,25, а ДR= 1,25*100= 125 м при $T_м$=400 сут; ДR = 3,0, а ДR = 3,0*100 = 300 м при $T_х$=$10^4$ сут.

Далее по формуле (54) получим: R = 48+125= 170 м при $Г_м$ = 400 сут; *R*= = 1200+300=1500 м при $T_х$=$10^4$ сут, а общая протяженность второго и третьего поясов составит: L=100+170=270 м при $Г_м$ = 400 сут; 1=100+1500=1600 м при Г, = 10* сут.

Для определения ширины ЗСО используем график на рис. 26,а. При этсм (7 = 0,14; f i = 3,14 для $Г_м$=400 сут и f,=85 для $Г_х$ = $10^4$ сут.

Этим значениям безразмерных параметров соответствуют: 5=1,6 ($Г_м$= =400 сут) и *3*=5 ($Г_х$=$10^4$ сут). Следовательно, *d*= 1,6-100=160 м и d=5-100= =500 м.

Дебит водозабора в рассматриваемом случае складывается из фильтрующих речных вод $Q_р$ и бытового потока подземных вод $Q_е$. Значения этих величин следующие:

$$Q_р = \frac{2\cdot2000}{3,14}\operatorname{arctg}\frac{246}{100}-2\cdot0,9\cdot246 = 1070 \text{ м}^3/\text{сут};$$

$$Q_е = \frac{2\cdot2000}{3,14}\operatorname{arctg}\frac{100}{246}+2\cdot0,9\cdot246 = 930 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

*Естественный поток отсутствует.* Структура течения подземных вод к сосредоточенному береговому водозабору в условиях, когда естественный поток практически отсутствует, изображена на рис. 27. Очевидно, что питание водозабора в этом случае при установившемся режиме фильтрации полностью осуществляется речными водами (Q = Qp), а питание из естественного потока отсутствует ($Q_е$ = 0).

Расчетные зависимости для определения протяженности ЗСО имеют следующий вид:

для расчета *R* (в сторону берега)

$$\bar{T} = \bar{R}^2(1+\bar{R}/3)/\bar{Q}; \qquad \textbf{(66)}$$

для расчета *r* (в сторону реки)

$$\bar{T} = \bar{r}^2(1-\bar{r}/3)/\bar{Q}. \qquad \textbf{(67)}$$

Выражение (67) при r=1 дает формулу для расчета минимального времени продвижения речных вод к водозабору по кратчайшей линии тока:

$$\textbf{T}_{\textbf{реч}}\textbf{=2/(3Q).} \qquad \textbf{(68)}$$

График для определения величины *r* приведен на рис. 28,а. Значение *R* может быть получено по графику на рис. 28,6, *ad* — по графику на рис. 28,б (для больших значений времени $T_1$) и рис. 28,г (для малых значений $T_1$).

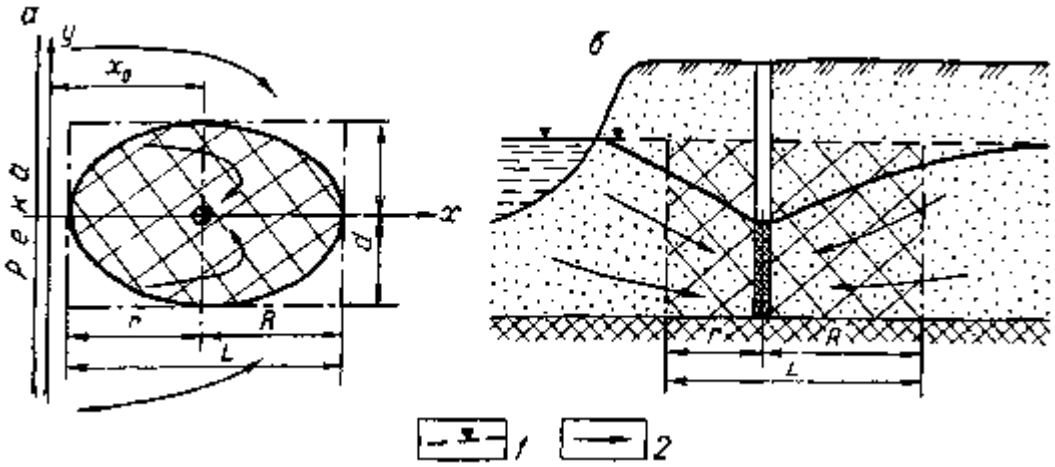



**Рис. 27. Схема фильтрации к береговому сосредоточенному водозабору при отсутствии естественного потока (q=0): *а* — план; *б* — разрез. 1 — уровень подземных вод; *2* — линии тока. Условные обозначения см. на рис. 14**

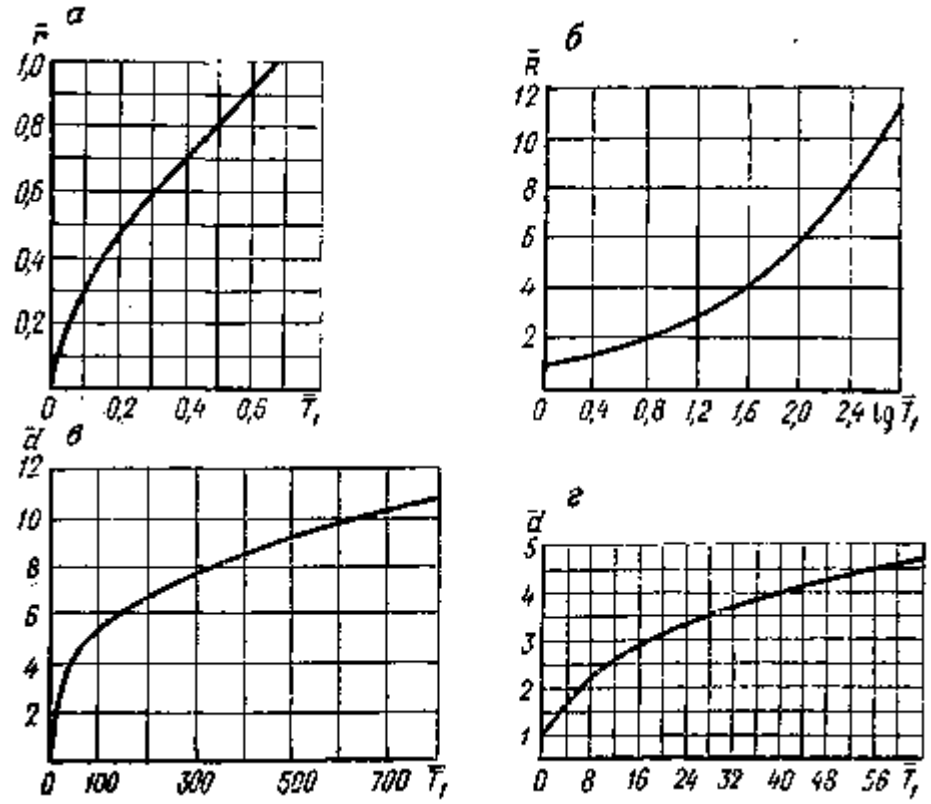



**Рис. 28. Графики для определения протяженности ЗСО (к схеме на рис. 27).**

$а$ — $r$: $\bar{r} = r/x_0$, $\bar{T}_1 = \bar{Q}\bar{T} = \frac{QT}{\pi m n x_0}$; $б$ — $R$: $\bar{R} = \frac{R}{x_0}$, $\bar{T}_1 = \bar{Q}\bar{T} = \frac{QT}{\pi m n x_0^2}$; $в$ — $d$ (большие значения $T_1$); $\bar{d} = \frac{d}{x_0}$; $T_1 = \bar{Q}\bar{T} = \frac{QT}{\pi m n x_0^2}$; $г$ — $d$ (малые значения $T_1$)

Пример расчета. Определим размеры второго и третьего поясов ЗСО при отсутствии естественного потока подземных вод *(i=Q, q = 0).*

Для определения протяженности ЗСО от водозабора в сторону реки используем график на рис. 28,а. Значения безразмерных параметров будут следующими:

Ti=2000*400/(3,14*30*0,25*l00$^2$)=3,4 для $\Gamma_м$ = 400 сут и $T_1$ = 2000*10$^4$/(3,14*30*0,25*100$^2$)=85 для $\Gamma_х$=10$^4$ сут.

По графику r=$r_m$ax=l, тогда r=100 м, т. е. расчетное время больше времени движения воды от реки до водозабора.

Минимальное время движения речных вод к водозабору можно определить по формуле (68): $T_{реч}$= (2/3) * (3,14-30 -0,25-100$^2$)/2000 = 79 сут.

Определим протяженность *R* ЗСО от водозабора в сторону берега, для чего воспользуемся графиком на рис. 28,б. Значения безразмерных параметров будут следующими:

для Тм = 400 сут:

$T_1$=3,4; lg$T_1$ = 0,53, тогда R =1,5, следовательно, R=1,5-100=150 м, а общая длина ЗСО L=100+150=250 м,

для $T_x=10^4$ сут:

$T_1$ = 85; lgr, = l,92, тогда R = 5,5, следовательно, R=5,5-100=550 м, а общая длина ЗСО L= 100+550 = 650 м.

Для определения ширины ЗСО используем графики, приведенные на рис. 28,6 и 28,г: при $T_м$=400 сут $T_1$=3,4, и по графику на рис. 28,г d=1,6 и d=l,6-100=160 м; при $T_x=10^4$ сут $T_1$=85, и по графику на рис. 28,s d=5 и d=5*100 = 500 м.

В рассмотренном случае дебит водозабора обеспечивается только за счет поступлений речных вод; т. е. *Q=Qp.*

*Естественный поток направлен от реки.* На рис. 29 представлена схема фильтрации к береговому сосредоточенному водозабору при естественном потоке, направленном от реки в сторону берега. При этом на оси *x* образуется водораздельная точка *N,* координата которой *Xp* определяется из выражения

$$\bar{x}_p = \sqrt{\bar{Q}+1}. \qquad (69)$$

Протяженность *R* ЗСО в сторону реки (вверх по потоку) в этом случае может быть найдена из соотношения

$$T = \bar{R} - \Delta\bar{R}, \qquad (70)$$

где $\Delta\bar{R} = [(\bar{x}_p^2 - 1)/2\bar{x}_p] \ln\{[1+\bar{R}/(\bar{x}_p-1)]/[1-\bar{R}/(\bar{x}_p+1)]\}.$

Величину *K* можно также найти по графику, приведенному на рис. 30,а. При этом очевидно, что *R<1.*

При *R=l (R=x0),* т. е. если частица воды начинает свой путь от уреза реки, выражение (70) даст формулу для определения времени $\Gamma_{реч}$ начала поступления речных вод в водозабор:

$$T_{реч} = 1 - 1n[(x_p-1)/(x_p+1)], \qquad (71)$$

Размер *г* ЗСО вниз по потоку (в сторону берега) определяется для данной схемы из выражения

$$T = [(x_P^2-l)/(2x_p)]ln\{[l+r(x_p+l)]/[l-r/(x_p-l)]\}-r. \qquad (72)$$

На рис. 30,6 приведены также графики зависимости величины r от времени *T* и координаты $X_p$. Очевидно, что в предельном случае $r_{max}$ = Xp — 1.

Ширина *d* ЗСО в зависимости от величины $T_1$ и *q=l/Q* может быть определена по графикам, приведенным на рис. 30,0. Из рис. 30,0 видно, что при относительно небольших дебитах водозабора Q<2 (или q>0,5) ширина ЗСО быстро достигает своего максимального значения $d_{ma}x=yp$ и далее остается постоянной.

Понятно, что для данной схемы дебит водозабора полностью обеспечивается притоком речных вод, т. е. Q = $Q_P$, а $Q_e$ — 0.

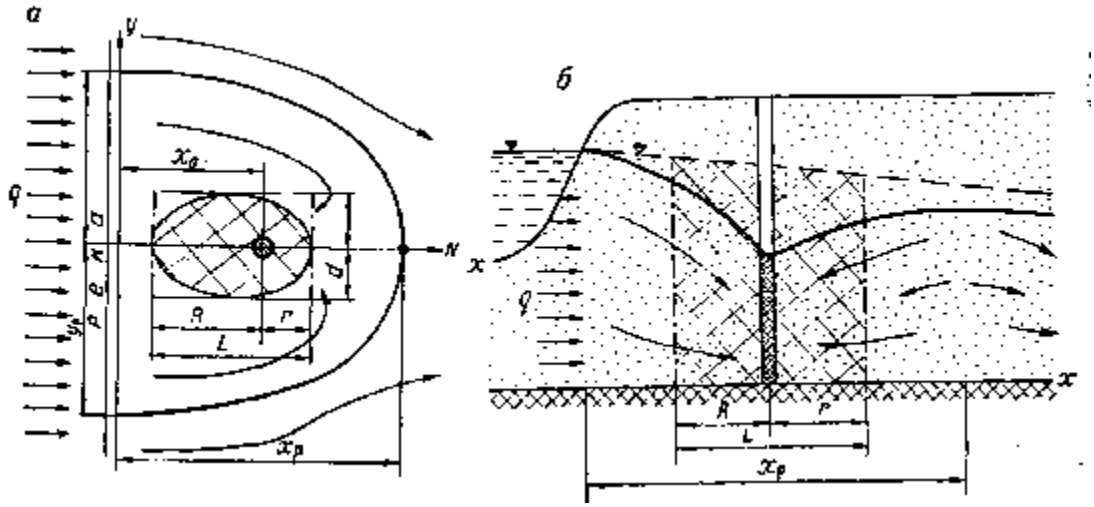



**Рис. 29. Схема фильтрации к береговому сосредоточенному водозабору при естественном потоке, направленном от реки:**
***а* — план; *б* — разрез. Условные обозначения см. на рис. 14**

Пример расчета. Требуется рассчитать границы ЗСО для берегового водозабора, работающего в условиях, когда естественный поток направлен от реки с уклоном i — 0,001. Остальные исходные данные такие же, как и в предыдущих примерах: $x_З$=100 м; Q = 2000 м$^3$/сут; 6 = 30 м/сут, т = 30 м; «=0,25; *q*= = 0,9 м$^2$/сут; $Г_м$=400 сут, $7_X=10^4$ сут.

Сначала по формуле (69) найдем параметр $x_p$, определяющий положение водораздельной точки *N:*

$$\bar{x}_p = \sqrt{1 + [2000/(3,14 \cdot 100 \cdot 0,9)]} = 2,84,$$

а $x_p$ = 2,84 -100 = 284 м.

Далее по графику, приведенному на рис. 30,а, определим протяженность ЗСО вверх по потоку подземных вод, т. е. в данном случае в сторону реки. Безразмерные параметры, необходимые для нахождения величины *R,*

имеют следующие значения: a=3,14*100*0,9/2000 = 0,14; $T_1$=2000*400/(3,14*30*0,25*$100^2$) = 3,4 для $T_м$ = 400 сут; $T_1$= (2000*$10^4$)/(3,14*30*0,25*l$00^2$)=85 для $T_x$ =10* сут. При этих значениях безразмерных параметров Д = $R_{max}$=1, тогда #=100 м, т. е. ЗСО должна захватить всю территорию между рекой и водозабором. Время Греч по формуле (71) составит:

$$T_{реч} = \frac{30 \cdot 0{,}25}{0{,}9}\left(100\,\frac{284^2 - 100^2}{2 \cdot 284}\ln\frac{284+100}{284-100}\right) = 71 \text{ сут.}$$

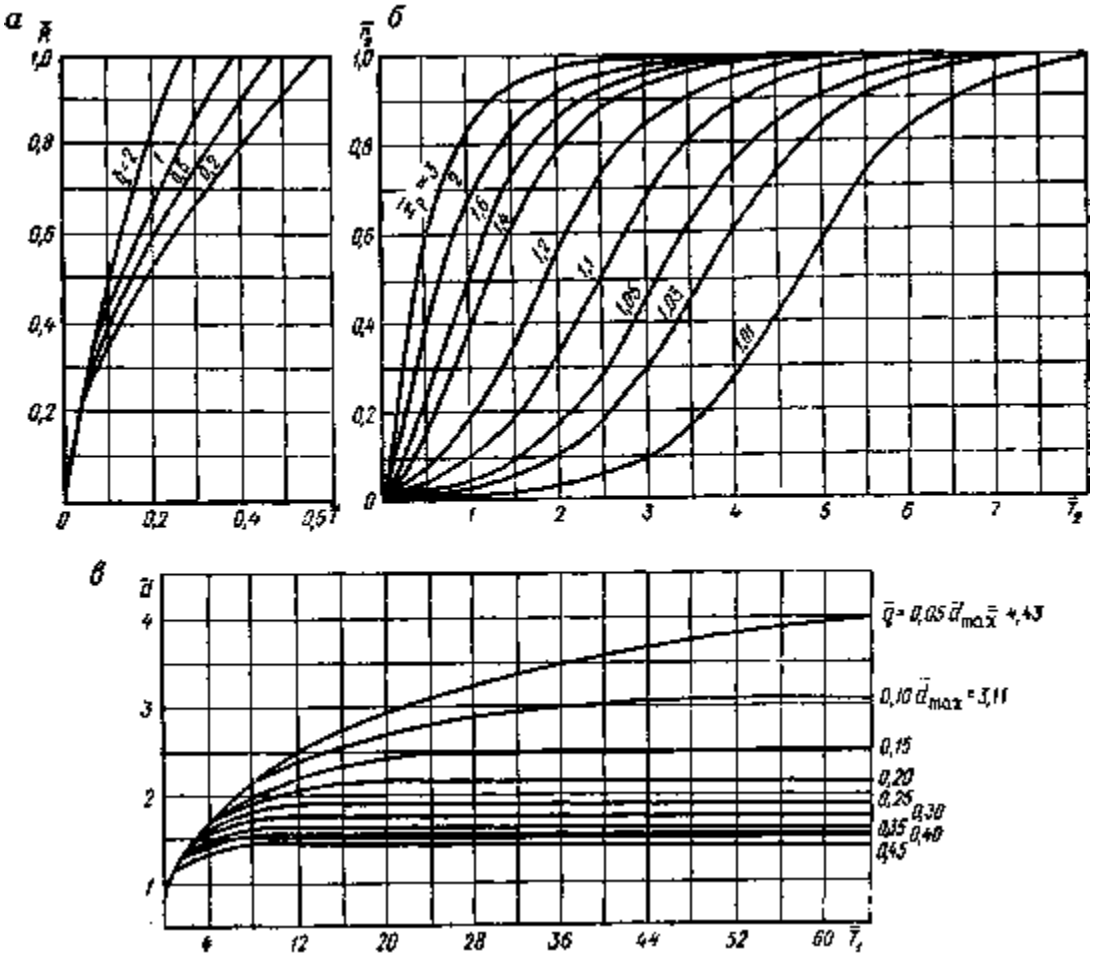



**Рис. 30, Графики для определения протяженности ЗСО (к схеме на рис. 29):**

$а$ — $R$: $\bar{R}=R/x_0$; $б$ — $r$: $\bar{r}_1 = \frac{r}{x_p - x_0}$, $\bar{T}_1 = \frac{qT}{mn(x_p - x_0)}$, $\bar{x}_p = \sqrt{1+(Q/\pi q x_0)}$; $в$ — $d$: $\bar{d} = \frac{d}{x_0}$;

$$\bar{q} = \frac{1}{\bar{Q}} = \frac{\pi x_0 q}{Q}; \quad \bar{T}_1 = \frac{QT}{\pi m n x_0^2}; \quad \bar{d}_{max} = \frac{d_{max}}{x_0}$$

Для определения протяженности ЗСО в глубь берега воспользуемся графиком на рис. 30,6.

Безразмерные параметры, необходимые для определения л по графику, будут иметь следующие значения:

$$\bar{T}_2 = \frac{0{,}9 \cdot 400}{30 \cdot 0{,}25\,(284 - 100)} = 0{,}26 \text{ для } T_м = 400 \text{ сут;}$$

$$\bar{T}_2 = \frac{0{,}9 \cdot 10^4}{30 \cdot 0{,}25\,(284 - 100)} = 6{,}52 \text{ для } T_x = 10^4 \text{ сут.}$$

При $x_р$ = 2,84 и $7_М$=400 сут г=0,45, а г=0,45(284 — 100)=83 м. При $x_р$=2,84 и 7х = $10^4$ сут f=l,0, а г=1-(284 — 100) = 184 м. Таким образом, общая длина ЗСО составит: L=l00-f83=183 м при 7„= =400 сут и L = 100+184 = 284 м при $7_Х$=$10^4$ сут.

Для определения ширины ЗСО используем график на рис. 30,в. При $T_1$=3,4 и q = 0,14 по графику d=l,5, а ширина ЗСО d= 1,5-100= 150 м (при $T_М$ = 400 сут). При $T_1$ = 85 и q = 0,14 по графику d = 2,5, а ширина ЗСО *d*= = 2,5*100=250 м (при $7_Х$=$10^4$ сут).

*Естественный поток параллелен реке.* Схемы фильтрации потока к сосредоточенному береговому водозабору, работающему в долине реки с естественным потоком, направленным вдоль реки, представлены на рис. 31. При этом возможны два случая, в каждом из которых схема течения подземных вод определяется соотношением дебита водозабора и расхода естественного потока.

Схема на рис. 31,а соответствует случаю сравнительно небольшого дебита водозабора, удовлетворяющего неравенству

$$0{,}5\bar{Q} \leqslant \bar{x}_р / (2\pi - \operatorname{arcctg} \bar{y}_р), \qquad (73)$$

где $x_р$ и $y_р$ — координаты водораздельной точки *N*, причем

$$\bar{x}_р^2 = 0{,}5\left(1 + \sqrt{\bar{Q}^2 + 1}\right) = \bar{y}_р^2 + \bar{x}_р^2; \qquad (74)$$

$$\bar{y}_р^2 = \bar{Q}^2 / 4\bar{x}_р^2 = \bar{Q}^2 / 2\left(1 + \sqrt{\bar{Q}^2 + 1}\right). \qquad (75)$$

Особенностью этой схемы фильтрации является то, что речные воды при этом не поступают в водозабор, т. е. нейтральная линия тока (а следовательно, и область питания водозабора) не пересекает линии уреза реки.

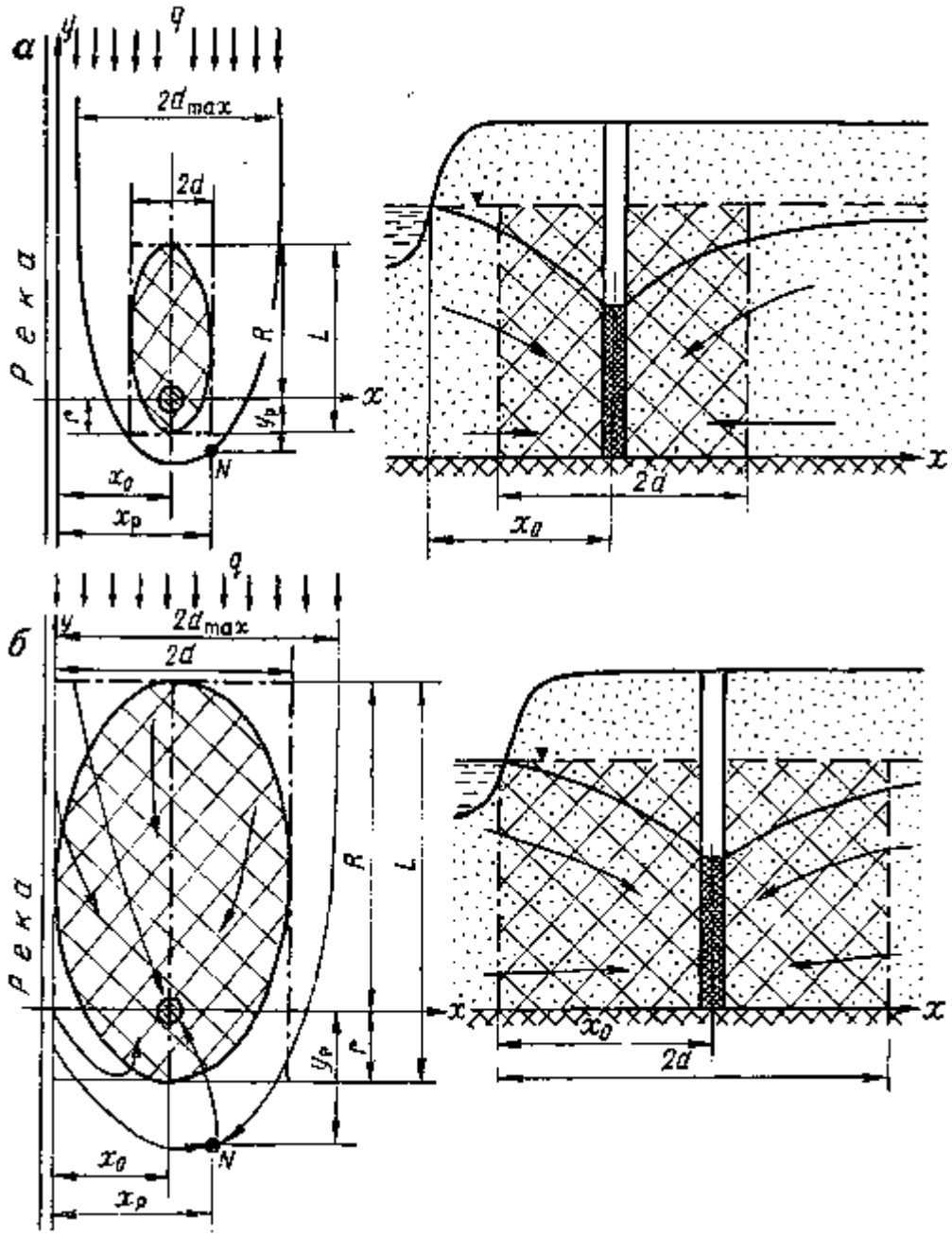
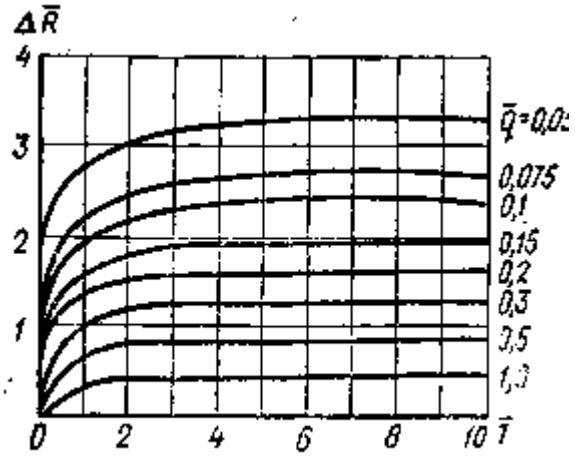



**Рис. 31. Схемы фильтрационного течения к береговому сосредоточенному водозабору при естественном потоке, параллельном реке:**

**а — относительно малый расход водозабора; *б* — большой расход водозабора Условные обозначения см. на рис. 14**

При более интенсивном водоотборе в область питания водозабора попадает и река (см. рис. 31,6). В этом случае дебит водозабора Q складывается из привлекаемых речных вод (их вклад в дебит составляет величину $Q_Р$) и части естественного бытового потока $Q_е$. Обе эти составляющие дебита водозабора можно опре-делить из выражений $пQ_е = 0{,}5Q\ \operatorname{arcctg} y_р + x_р$ и $пQ_р = 0{,}5Q(2л - - \operatorname{arcctg} y_р - x_р)$, где $Q_е = Qe/ (пqx_Q)$; $Q_Р = Q_Р/ (пqx_Q)$; $x_р$ и $y_р$ так же, как и для первой схемы, определяются по формулам (74) и (75).




124

**Рис. 32. График для определения протяженности ДR ЗСО (к схеме на рис. 31):**

$\Delta\bar{R}=\frac{\Delta R}{x_p}$; $\bar{q}=\frac{1}{\bar{Q}}=\frac{xx_{0g}}{Q}$; $\bar{T}=\frac{qT}{max_0}$

Из этих формул следует, что при $Q>2$ $x_р^2$~0,5(Q+1), $y_p^2$~0,5$Q^2$/(Q+1), при (Q>6 эти приближенные выражения еще более упрощаются: $xг_р$=V0,5Q и $y_Р$= — V0,5Q, т. е. водораздельная точка *N* лежит в этом случае на прямой $y$= — $x$.

Протяженность *R* ЗСО вверх по потоку подземных вод можно определить для обеих схем по такой приближенной формуле:

$$\bar{R}=\bar{T}+\Delta\bar{R},$$

$$\Delta\bar{R}=\bar{Q}\{\ln[(\bar{R}+1)^2(a^2+4)/(a^2+4+\bar{R}(\bar{R}-a)]+$$
$$+3a[\operatorname{arctg}(2\bar{R}+a)/\sqrt{16+3a^2}-\operatorname{arctg}a/\sqrt{16+3a^2}]/\sqrt{16+3a^2}\}/$$
$$/(4+3a^2), \qquad (76)$$

где $a=4/(\sqrt{3}\operatorname{sh}\varphi)$; $3\varphi=\operatorname{arsh}1{,}274\,\bar{Q}$.

Формула (76) получена на основе предпосылки о том, что линия тока, вдоль которой движение воды осуществляется с максимальной скоростью, совпадает с осью *y*. Величина *R* при этом несколько завышается. Значения величины AR представлены также на графиках на рис. 32.

Протяженность г ЗСО вниз по потоку можно приближенно оценить таким образом:

$$\mathbf{T_{max}=y_р.} \qquad \mathbf{(77)}$$

Ширина ЗСО для этих схем может быть приближенно установлена по формуле (59), а $d_{max}=Q_e/2q$. Следует иметь в виду$_г$ что ЗСО для рассматриваемых схем асимметрична: ее ширина в сторону реки несколько больше, чем в сторону берега.

Минимальное время $T_{реч}$ движения речных вод к водозабору для схемы на рис. 31,6 оценивается приближенно по формуле (68). При этом величина $T_{реч}$ будет несколько занижена.

Пример расчета. Для расчета границ второго и третьего поясов ЗСО одиночного водозабора, расположенного у реки, при естественном потоке с уклоном $i$ =0,001 (q = 0,9 м$^2$/сут), направленном вдоль долины, используем те же исходные данные, что и в предыдущих примерах.

Найдем сначала координаты $x_p$ и $y_p$ водораздельной точки *N* по формулам (74), (75): Q = 2000/(3,14*0,9*100)=7,08;

$$\bar{y}_р=\frac{7{,}08}{\sqrt{2(1+\sqrt{7{,}08^2+1}}}=1{,}75;\ y_р=175$$

$$x_р=\sqrt{100^2+175^2}=201\ \text{м},\quad \bar{x}_р=2{,}01.$$

В данном случае 7,08>2,01 (6,28 — arcctg 1,75), т. е. неравенство (73) не выполняется и, следовательно, схема фильтрации к водозабору соответствует схеме на рис. 31,6.

Протяженность ЗСО вниз по потоку подземных вод — величину *г* — приближенно можно оценить по положению водораздельной точки: r=$y_р$=175 м.

Определим теперь протяженность *R* ЗСО по потоку подземных вод. Найдем сначала расстояние $R_q$, которое проходит частица воды, двигаясь со скоростью естественного потока: $R_в$ = 0,9*400/(30*0,25) =48 м для $T_м$ = 400 сут; Д,=0,9X X10$^4$/(30*0,25) = 1200 м для $T_х$=10$^4$ сут.

Далее по графику на рис. 32 находим дополнительное расстояние *AR,* обусловленное действием водозабора: 9=0,14; *T*=0,9*400/(30*0,25-100) =0,48 для $T_м$ = 400 сут; T=0,9*10$^4$/(30*0,25*100)=12 для $T_х$=10$^4$ сут.

Следовательно, ДR=1,4, а *AR* = 1,4*100=140 м (7$_М$ = 400 сут) и *АЛ=2,* а ДR=2*100=200 м ($T_х$=10$^4$ сут).

Далее имеем: R=484+140~190 м и R=1200+200=1400 м, а общая протяженность второго и третьего поясов составит: L= 175+190 = 365 м для $T_м$ и *L* — = 175+14004-1575 м для *T**.

Найдем теперь составляющие баланса подземных вод, поступающих к водозабоу:

$$\bar{Q}_e = \frac{1}{6,28}(3,54 \operatorname{arcctg} 1,75 + 2,01) = 0,61;$$

$$Q_e = 0,61 \cdot 6,28 \cdot 100 \cdot 0,9 = 345 \text{ м}^3/\text{сут};$$

$$\bar{Q}_p = \frac{1}{6,28} \cdot 3,54 (6,28 - \operatorname{arcctg} 1,75) - 2,01 = 2,92;$$

$Q_p$ = 2,92-6,28-100-0,9 = 1650 м$^3$/сут.

Время поступления речных вод к водозабору определим по формуле (68): $T_{Реч}$=2/3*(3,14*30*0,25*100$^2$/2000)=79 сут.

Для расчета ширины ЗСО используем формулу *2d=$Q_e$/q:* 2d=345/0,9 = =380 м.

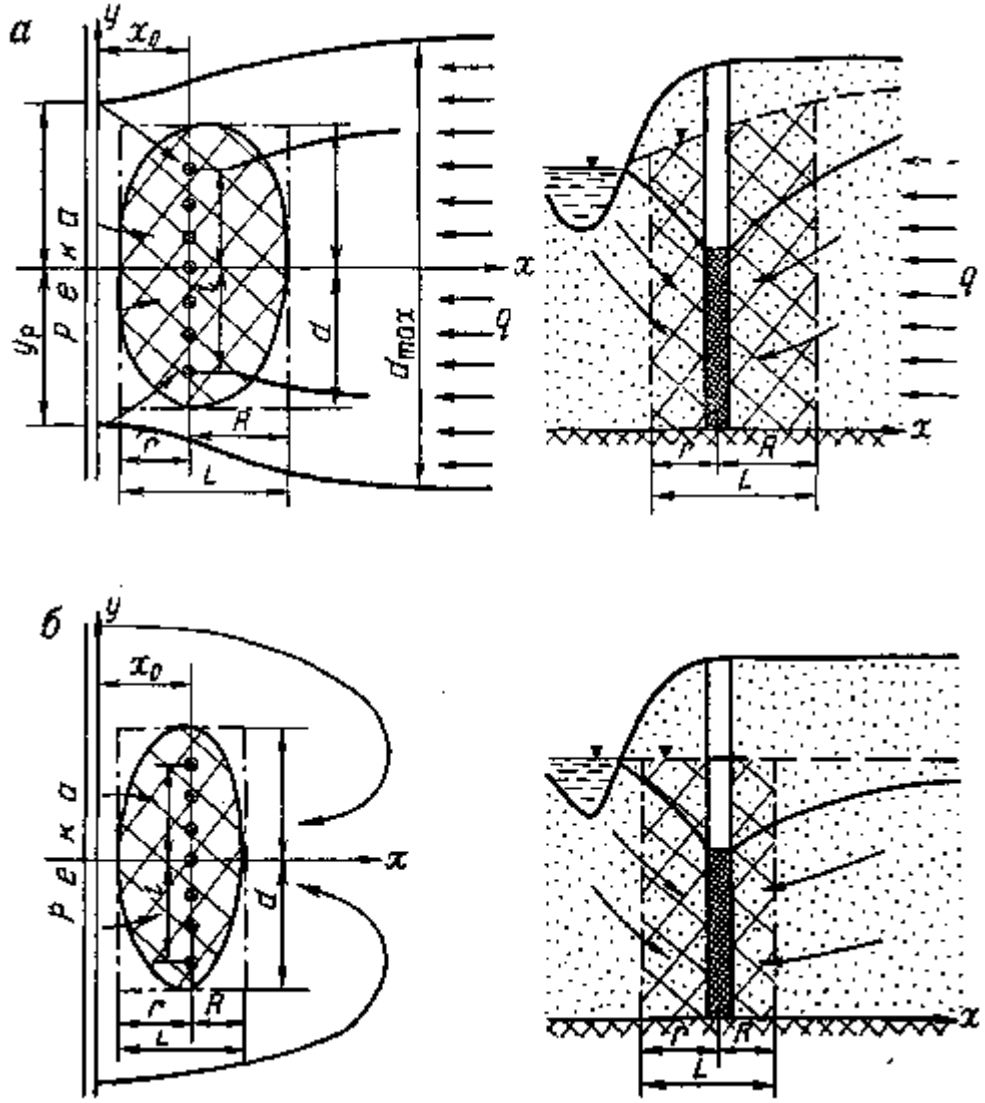



**Рис. 33. Схемы фильтрации к линейному береговому водозабору. Естественный поток направлен к реке (а), отсутствует *(б),* направлен от реки *(в),* параллелен ей (г). Условные обозначения см. на рис. 14**

## Линейный береговой водозабор

Другая наиболее распространенная схема предусматривает расположение водозаборных скважин по линии вдоль уреза реки. Протяженность таких линейных береговых водозаборов обычно намного превосходит расстояние от них до реки, вследствие чего на большей части области влияния водозабора фильтрация может рассматриваться как одномерная.

На рис. 33 приведены основные кинематические схемы фильтрации подземных вод к линейным водозаборам (линейным рядам скважин, горизонтальным галереям, дренам и т. п.), работающим вблизи совершенных водотоков и водоемов.

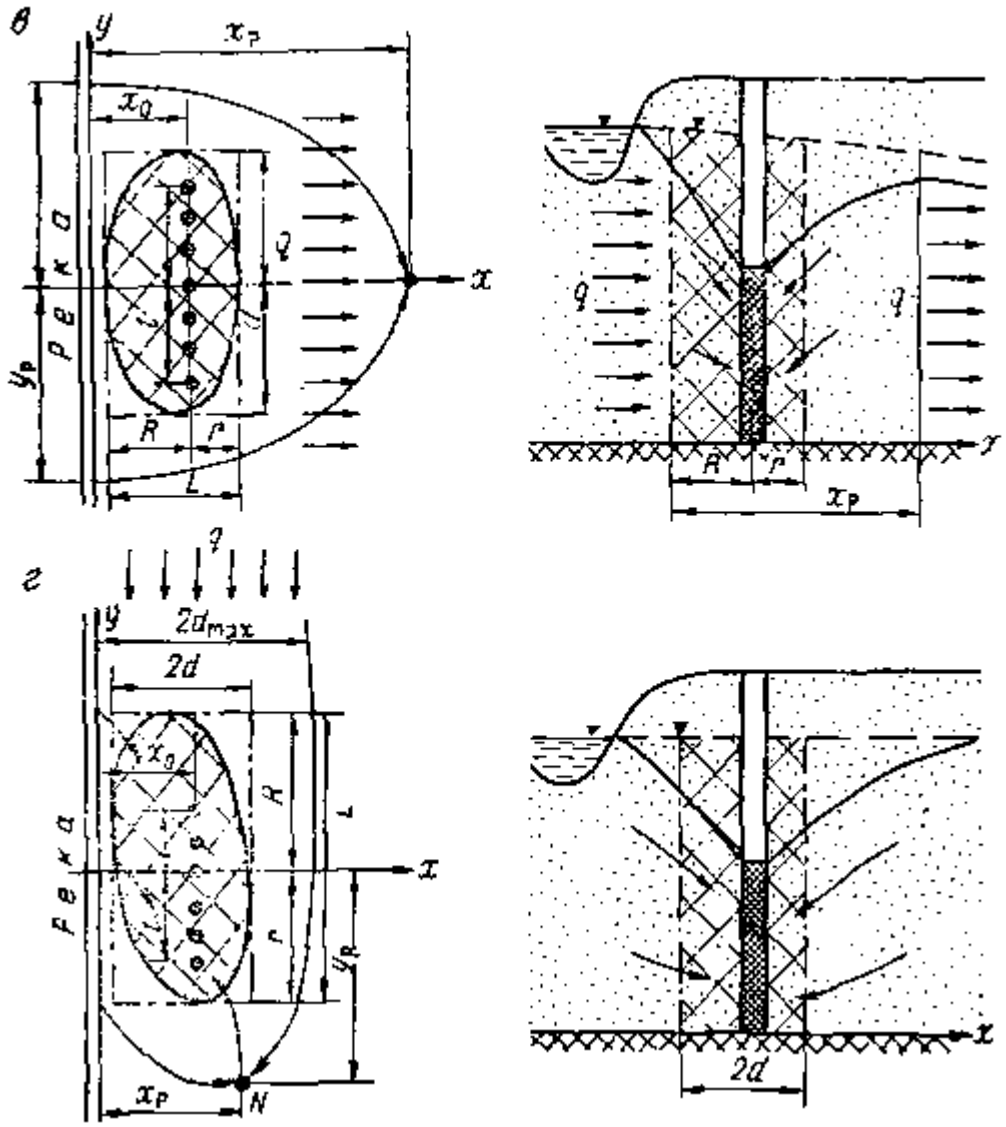



**Рис. 33. Продолжение**

*Естественный поток направлен к реке.* В случае, когда естественный поток подземных вод направлен к реке (рис. 33,а), дебит линейного ряда скважин, как и в случае одиночного берегового водозабора, складывается из фильтрующихся речных вод и части естественного потока, т. е. Q=Qp+Qe.

Составляющие $Q_P$ и $Q_e$ дебита водозабора можно найти из следующих выражений:

$$Q_e = [(Q/\pi l)]\{0{,}5\ \ln [\bar{y}_p+\bar{l})^2+1] / [\bar{y}_p-\bar{l})^2+1]) + \\ +\operatorname{arctg}(\bar{y}_p+\bar{l}) - \operatorname{arctg}(\bar{y}_p-\bar{l})\} \quad (78)$$

и $Q_P=Q - Q_e$, где $l=l/x_0$ (l — половина длины ряда скважин); $Y_P=Y_P/X_0$,, $y_p$ — половина ширины фронта фильтрации подземных вод к водозабору на урезе реки, определяемая по формуле

$$\bar{y}_p = \sqrt{\bar{l}^2 - 1 + 2\bar{l}\operatorname{ctg}(2\bar{l}/\bar{Q})}. \quad (79)$$

Значения составляющей расхода $Q_e$, подсчитанные по формуле (78), графически представлены на рис. 34,а.

Протяженность *R* ЗСО линейного берегового водозабора вверх по естественному потоку подземных вод может быть найдена из выражения

$$\bar{T} = \bar{R} + \bar{Q}/(\bar{Q}+\bar{l}^2) - \bar{Q}(\bar{Q}+\bar{l}^2)^{-0,5}\operatorname{arctg}[(\bar{R}+1)/(\bar{Q}\pm\bar{l}^2)^{0,5}]. \quad (80)$$

На рис. 34,б представлены графики изменения величины *AR* в зависимости от времени *T* и расхода Q.

Расстояние *г* от водозабора до нижней границы ЗСО определяется по формуле

$$\bar{r} = \bar{T}[(\pi\bar{Q}/2\bar{l}) - 1]. \quad (81)$$

Очевидно, что $r_{шах}=1$. Из уравнения (81), считая, что *f=l,* можно получить выражение для $T_{ре}ч$, в течение которого речная вода достигает водозабора:

$$T_{реч} = 2\bar{l}/(\pi\bar{Q} - 2\bar{l}). \quad (82)$$

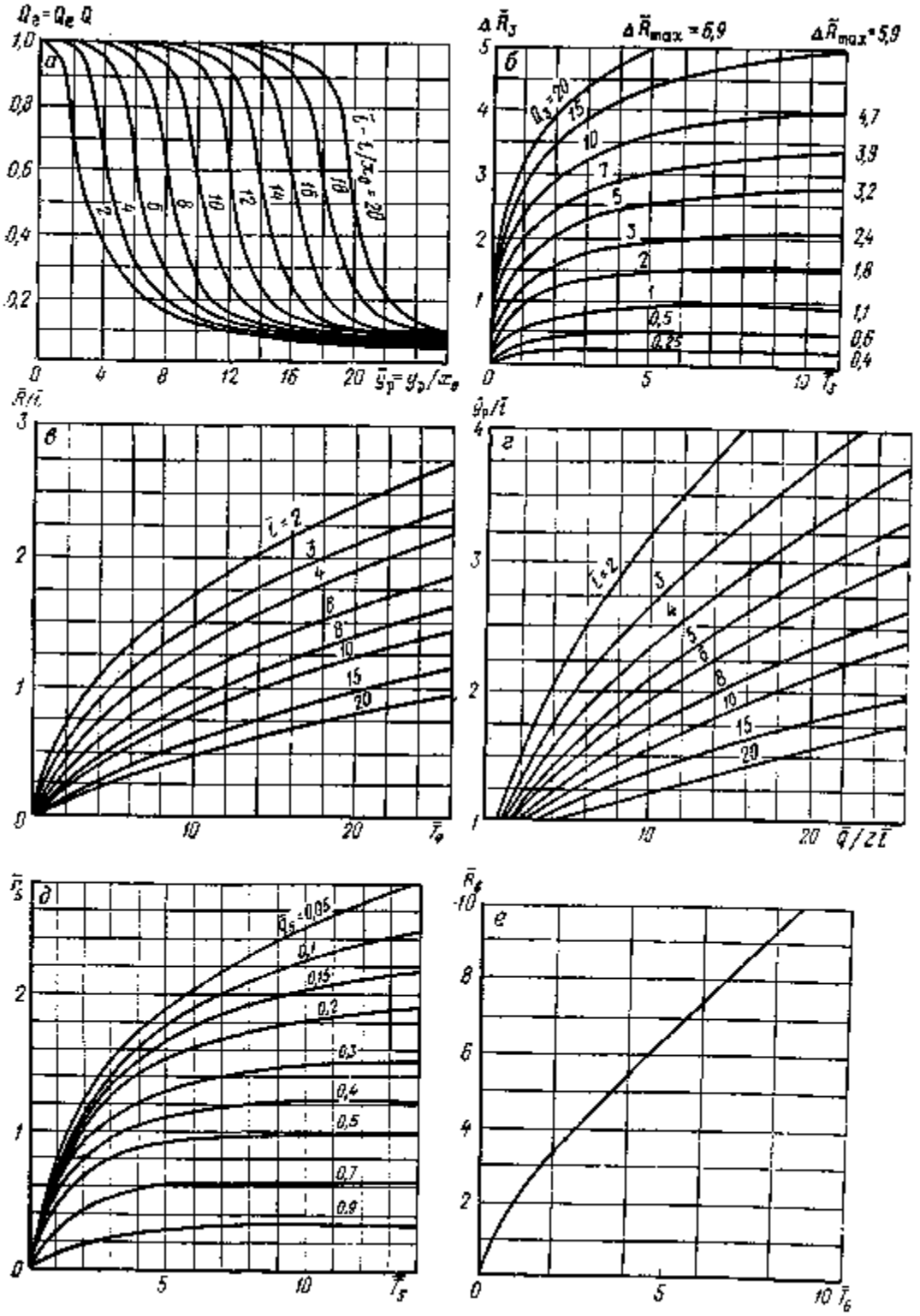



**Рис. 34. Графики для определения расхода $Q_e$ и протяженности *R* ЗСО:**

$$\Delta\bar{R}_3=\frac{\Delta R}{l}+\frac{\bar{Q}x_0}{l\,(1+\bar{Q})},$$

***а* — для $Q_e$ (к схеме на рис. *32, а); б* — для *R (к* схеме на рис. 33, *а) :***

$$\bar{T}_3=\frac{Tq}{mnl}+\frac{x_0}{l\,(1+\bar{Q})},\quad \bar{Q}_3=\frac{\bar{Q}}{\bar{l}^2}=\frac{Q}{\varepsilon q l^2},\quad \bar{l}=l/x_0,\quad \Delta\bar{R}_{max}=\Delta R_{max}/x_0;\ в — для\ R\ (к\ схеме$$

на рис. 33, б); $\overline{T_0} = \frac{QT}{\kappa m n l^2} = \frac{\overline{Q}\overline{T}}{\overline{l}^2}$, $\overline{R}/\overline{l} = R/l$, $\overline{T} = l/x_0$; *в — для* $y_p$ *(к схеме на рис. 33,в);*

$\overline{y_p}/\overline{l} = y_p/l$, $\overline{T} = l/x_0$, $\frac{\overline{Q}}{2\overline{l}} = \frac{Q}{2\kappa q l}$; *д — для r (к схеме на рис. 33, в):* $\overline{T_0} = \frac{x_0 QT}{\kappa m n l^2} +$

$+ \frac{x_0}{\overline{l}(1-\overline{q_s})}$, $\overline{r_0} = \frac{r + x_0}{l}$, $\overline{q_s} = \overline{q}\,\overline{l} = \frac{\pi l^2 q}{Q x_0}$; *е — для R (к схеме на рис. 33, г):* $\overline{R_0} =$

$= \frac{R-l}{2x_0\sqrt{\overline{Q_0}}} = \frac{\overline{R}-\overline{l}}{\sqrt{\overline{Q}/\overline{l}}}$; $\overline{Q_0} = \frac{Q}{4\kappa q l} = \frac{\overline{Q}}{4\overline{l}}$, $\overline{T_0} = \frac{t_q}{2mnx_0\sqrt{\overline{Q_0}}} = \frac{\overline{T}\sqrt{\overline{l}}}{\sqrt{\overline{Q}}}$.

Формулы (81), (82) справедливы для l> (3 — 5)$x_0$. Если длина линейного водозабора меньше указанной, то его можно рассматривать как сосредоточенный и проводить расчеты по описанной выше методике, изложенной выше.

Соотношения (81) и (82) имеют место при Q>2ql, т. е. когда дебит водозабора превышает расход естественного потока на фронте, длина которого равна длине водозабора.

Получить простые аналитические зависимости для определения ширины ЗСО при работе линейного берегового водозабора

Оказалось весьма затруднительно, поэтому для приближенной оценки величины *d* может быть использована формула (59), полученная на основе балансовых сопоставлений.

В общем случае для расчета ширины ЗСО линейного берегового водозабора можно использовать следующие расчетные зависимости:

***d=d₀+l;*** **(83)**

где $d_0=d_1+$ Ф*Дd; $d_1$ — максимальная ширина области захвата для скважины линейного берегового водозабора в случае, если бы она была одиночной, дебит этой скважины *Qo=Q/p* (величина $d_1$ определяется с использованием графика, приведенного на рис. 26,а); $d_2$ — то же, но для дебита скважины $2Q_0$; Ф*=(2/п) [(сумма от p=1 до i=1) arcctg(2бj/$x_0$)]; Ad=$d_2$ — $d_1$; *p* — число водозаборных скважин; 2а — расстояние между эксплуатационными скважинами линейного водозабора. Остальные обозначения показаны на рис. 33,а.

Коэффициент ф* в равенствах (83) физически может быть представлен как показатель взаимовлияния водозаборных скважин. Некоторые его значения в зависимости от расстояния между скважинами 2а и числа скважин приведены в табл. 15.

Полученная величина *do* может быть оказаться меньше расстояния 2а; это значит, что эксплуатационные скважины настолько далеко располагаются друг от друга, что зона захвата водозабора в целом разбивается на отдельные участки, примыкающие к водозаборным скважинам.

Пример расчета. Хозяйственно-питьевое водоснабжение металлургического комбината и поселка проектируется осуществить водозабором в виде линейного ряда из семи скважин на расстоянии 2а=200 м одна от другой, располагающегося вдоль реки на среднем расстоянии от нее $x_0$=100 м. Общая длина водозаборного ряда *21=200-7*= 1400м. Дебит каждой скважины $Q_0$=2500 м$^3$/сут; суммарный водоотбор Q=2500-7= 17 500 м$^3$/сут. Намечаемый к эксплуатации аллювиальный водоносный горизонт представлен песками мощностью т=40 м с коэффициентом фильтрации k=50 м/сут и пористостью л = 0,2.

Гидравлическая связь подземных вод с поверхностными хорошая, уклон естественного потока к реке i= 0,0005 (q=50*40*0,0005=1 м$^2$/сут).

Таблица 15

Значения коэффициента Ф*

| **2б/$x_0$** | **Ф* при различных значениях *p*** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **5** | **I ?** | **10** | **1 15** | **1 20** | **30** | **1 50** |
| **0,25** | **2,64** | **3,44** | **4,33** | **5,37** | **6,11** | **7,15** | **8,47** |
| **0,5** | **1,87** | **2,32** | **2,79** | **3,33** | **3,70** | **4,24** | **4,89** |
| **0,75** | **1,44** | **1,74** | **2,06** | **2,42** | **2,67** | **3,02** | **3,46** |
| **1,0** | **1,16** | **1,39** | **1,63** | **1,90** | **2,08** | **2,35** | **2,67** |
| **1,5** | **0,82** | **0,98** | **1,H** | **1,32** | **1,44** | **1,74** | **2,01** |
| **2,0** | **0,64** | **0,75** | **0,87** | **1,01** | **1,10** | **1,23** | **1,40** |
| **2,5** | **0,44** | **0,53** | **0,63** | **0,74** | **0,81** | **0,92** | **1,05** |
| **3,0** | **0,43** | **0,51** | **0,59** | **0,68** | **0,74 j** | **0,83** | **0,94** |

Требуется рассчитать границы третьего пояса ЗСО, чтобы обеспечить сохранение качества откачиваемой воды в течение всего срока эксплуатации ($T_x$ =10$^4$сут).

Протяженность ЗСО вверх по потоку подземных вод находим по графику на рис. 34,6.

Параметр *Q/1*$^2$ определяем по формуле Q/l$^2$=17 500*100/(3,14*1*700$^2$) = 1,13, следовательно, безразмерная величина *Тз,* необходимая для определения AR по графику на рис. 34,6, составит:

$$\bar{T}_3 = \frac{1 \cdot 10^4}{(40 \cdot 0{,}2 \cdot 700)} + \frac{100}{700\,(1 + 1.13)} = 1{,}85.$$

По графику на рис. 34,6 находим ДR$_3$ = 0,8, следовательно, ДR=08*700 — — [1,13*100/(l+1,13)1 =560 — 53=507.

При сохранении естественных условий частицы воды за расчетный интервал времени *T** прошли бы расстояние $R_q$ — *1* *10$^4$/(40*0,2) = 1250 м, следовательно R=Rq+дR=1250+507=1760 м.

Расстояние до нижней границы ЗСО находим по формуле (81):

$$r = \frac{17500 \cdot 10^4}{2 \cdot 40 \cdot 0{,}2 \cdot 700}\left(1 - \frac{2 \cdot 1 \cdot 700}{17\,500}\right) \approx 14\,400 \text{ м};$$

так как г>100 м, принимаем г=100 м. Общая протяженность ЗСО, таким образом, составит: 1 = 1760+10=1770 м.

Найдем теперь количество подземных вод, привлекаемых водозабором из естественного потока. По формуле (79) имеем: 2l/Q= (2*3,14*700*1)/17500= =0,25; y$_P$=V(700$^2$ — 100$^{2+}$2*700*100ctg0,25) = 1010 м; y$_P$ = 1010/100=10,l; l= 700/100 = 7.

При полученных значениях $y_p$ и 7 по графику на рис. 34,а находим: $\$_e$ = 0,2; Q$_e$ = 0,2-17 500=3500 м$^3$/сут. Таким образом, водозабор будет в основном обес-яечиваться речными водами: Q$_p$=17500 — 3500=14 тыс. м$^3$/сут.

Минимальное время движения речной воды к скважинам водозабора, вычисленное по формуле (82), составит: T$_{реч}$= (2*40*0,2*700*100)/(17500 — 2-IX X700) =70 сут.

Ширину *d* ЗСО находим по формуле (83), а $d_1$ и $d_2$ определяем по графику на рис. 26,а.

При Q$_0$ = 2500 м$^3$/сут T$_1$=(2500*10$^4$)/(3,14*40*0,2*100$^2$) = 100 и q=(3,14-100X X1)/2500=0,13, следовательно, d$_1$ = 5 и d$_1$=5*100=500 м.

При Qo=5000 м$^3$/сут T$_1$==200 и q=0,07, следовательно, $d_2$=*7* и $d_2$ = *7*-100= =700 м.

По табл. 15 находим, что при *p=7* 2б/x$_0$ = 200 : 100=2 и ф*=0,75. Таким образом, согласно формуле (83), Лд?=700 — 500 = 200 м, d$_0$=500+0,75* 200=650м, d=700-|-650=1350 м.

Максимальная ширина ЗСО по соотношению (59) составит: d$_{max}$ = 3500/(2X X1)=1750 м.

*Естественный поток отсутствует.* При отсутствии естественного потока схема фильтрации подземных вод к линейному береговому водозабору принимает вид, изображенный на рис. 33,6. В этой схеме область питания водозабора охватывает весь водоносный пласт. Раздельные линии потока подземных вод отсутствуют. При этом, очевидно, дебит водозабора полностью компенсируется притоком речных вод: Q$_P$=Q, Q$_e$=0.

Расстояние *R* до границы ЗСО в направлении берега приближенно может быть найдено по формуле (84) или по графику на рис. 34,0:

$$\bar{T} = \bar{R}l^2\,(1 + \bar{R}/l^2 + 0{,}33\bar{R}^2/l^2)\,/\bar{Q}. \qquad \textbf{(84)}$$

Протяженность ЗСО на участке между рекой и водозабором может быть найдена следующим образом:

$$r = (QT)l/(2mnl);\ r = \pi QT/l, \qquad \textbf{(85)}$$

причем r$_{max}$=x$_0$.

В соответствии с этим при $r=x_0$ находим наименьшее время движения речной воды к скважинам водозабора:

$$T_{реч} = 2mntx_0/Q. \qquad \textbf{(86)}$$

Для приближенной оценки ширины ЗСО линейного берегового водозабора при отсутствии естественного потока подземных вод также может быть использована формула (83). Однако в данном случае величины $d_1$ и $d_2$ должны определяться по графикам на рис. 28, в,г.

Пример расчета. Воспользуемся исходными данными, приведенными в предыдущем примере. При этом принимаем, что естественный поток подземных вод отсутствует (i=0, q=0). Нужно рассчитать границы третьего пояса ЗСО для T$_x$ = 10$^4$ сут.

— Протяженность ЗСО вверх по потоку подземных вод, т. е. в сторону берега, можно найти, воспользовавшись графиком на рис. 34,8.

Безразмерные параметры в этом случае следующие: T$_4$=17 500-10V(3,14*40*0,2*700$^2$)=14,2 и 7=700/100=7, следовательно (см. рис. 34,е), *R/1=1,25,* а R= 1,25-700 = 875 м.

Протяженность ЗСО на участке между рекой и водозабором находим из соотношения (85) r= 17 500*10$^4$/(2*40*0,2*700) = 15 625 м.

Полученный результат г>100 м, поэтому принимаем г=100 м. Общая протяженность ЗСО L=100+875 = 975 м.

Время продвижения речных вод к водозабору определяем по формуле (86): T$_{рсч}$ = 2*40*0,2*700*100/17 500=64 сут.

Для определения ширины ЗСО по формуле (83) используем график, приведенный на рис. 28,0.

При Q$_0$=2500 м$^3$/сут T$_1$=2500*10$^4$/(3,14*40*0,2*100$^2$) = 100; Я,=5,3 и d,= = 5,3*100=530 м.

При Q$_0$=5000 м$^3$/сут T$_1$=200; d$_2$=6,7 и d$_2$=6,7*100=670 м.

По табл. 15 при *p=7* и *2б/x$_0$=2* ф* = 0,75, следовательно, Ad — 670 — 530= = 140 м; $d_0$=530+0,75*140=640 м и d=700-f640-1340 м.

*Естественный поток подземных вод направлен от реки в сторону берега.* Фильтрационная схема,

соответствующая этому случаю, изображена на рис. 33, в. Область питания линейного берегового водозабора является ограниченной. Ее границами служат река и замкнутая раздельная линия тока с раздельной точкой *N*, имеющей координаты $x=x_p$ и y=0, причем

$$\bar{x}_p = \sqrt{1-\bar{r}^2} + 2\bar{l}\operatorname{ctg}(2\bar{l}/\bar{Q}). \quad (87)$$

На урезе реки ширина области питания водозабора составляет $2y_p$. Величина $y_p$ определяется из следующего соотношения:

$$Q/2\bar{y}_p = \pi + |(\bar{y}_p/\bar{l}) - 1|\operatorname{arctg}(\bar{y}_p - \bar{l}) - |(\bar{y}_p/\bar{l}) + 1|\operatorname{arctg}(\bar{y}_p + \bar{l}) + (1/2\bar{l})\ln\{[1+(\bar{y}_p+\bar{l})^2]/[1+(\bar{y}_p-\bar{l})^2]\}, \quad (88)$$

где $\bar{y}_p = y_p/x_0$.

Для численного определения ширины $y_p$ можно -использовать также график на рис. *34,г.* При $Q>27^2$ для этих целей удобно

применять приближенную расчетную зависимость

$$\bar{y}_p = \sqrt{\bar{Q}/\bar{l}}.$$

В данной схеме, как и в предыдущей, дебит водозабора полностью компенсируется поступлением речных вод: $Q_P=Q$ и $Q_e=0$.

Положение границы ЗСО на участке между водозабором и рекой (вверх по потоку подземных вод) устанавливается приближенно с помощью следующего равенства:

$$\bar{R} = \pi\bar{Q}\bar{T}(1+2\bar{l}/\pi\bar{Q})/2\bar{l} \text{ при } R \leqslant x_0. \quad (89);$$

При $R=XQ$ из соотношения (89) получается минимальное вре-движения речной воды к скважинам водозабора:

$$T_{\text{реч}} = 2mnlx_0/(Q+2ql). \quad (90)$$

Расстояние до верхней границы ЗСО, располагающейся в данном случае ниже по потоку подземных вод от водозаборного сооружения, приближенно может быть найдено из выражения

$$\bar{T} = \left[\bar{Q}/\left(\sqrt{(\bar{Q}/2\bar{l})-1}\right)\right]\operatorname{arcth}\left[(\bar{r}+1)/\bar{l}\sqrt{(\bar{Q}/2\bar{l})-1}\right] - \bar{Q}/(\bar{Q}-2\bar{l}) - \bar{r}. \quad (91)$$

При этом $r_{max}=x_p$ или приближенно $r_{max} = x_p\sqrt{0{,}5\bar{Q}\bar{l}-\bar{r}^2}$.

Для определения величины r по формуле (91) можно использовать график на рис. 34,д.

При выводе всех приведенных выше зависимостей по-прежнему использовалась упрощающая предпосылка об относительно большой протяженности водозабора: $l> (3 — 5)x_0$.

Ширина ЗСО в рассматриваемой схеме может быть найдена по формуле (83). В отличие от рассмотренных ранее случаев в данной схеме величины $d_1$ и $d_2$ находятся по графику на рис. 30,0. Максимальная ширина ЗСО, достигаемая при весьма большом (теоретически бесконечном) времени эксплуатации водозаборного сооружения, численно будет равна $y_p$, т. е. $d_{max} = y_p$.

Пример расчета. Используем исходные данные предыдущих примеров при условии, что естественный поток (i=0,001, q=1 $м^2$/сут) направлен в сторону берега. Требуется определить границы третьего пояса ЗСО для $T_X = 10^4$ сут.

Прежде всего найдем координату $x_p$ раздельной точки *N* по формуле (87). Для этого определим безразмерную величину *21/Q:* 2l/Q = *(2*пqt)* /Q=6,28 * 1* X700/17 500=0,25, тогда $x_p = X_0*p = V100^2 — 700^2 + 2*100*700$ ctg 0,25 = 260 м.

Ширину области питания водозабора на урезе реки определим по графику на оис 34 *г* где безразмерные параметры, необходимые для определения $y_f$, будут следующие: Q/2l=17500/(6,28*1*700)=3,98 и l=700/100=7. Тогда по графику $y_P/l=1{,}4$ и, следовательно, $y_p=1{,}4\text{-}700 = 980$ м.

Протяженность ЗСО вверх по потоку (в данном случае в сторону реки) определим по формуле (89):

$$R = \frac{17\,500\cdot 10^4}{2\cdot 40\cdot 0{,}2\cdot 700}\left(1+\frac{2\cdot 1\cdot 700}{17\,500}\right) \approx 16\,900 \text{ м},$$

т. е. $R>x_0$. В этом случае принимаем $R=x_0=100$ м, а время движения речной воды к скважинам водозабора рассчитываем по формуле (90): $7_{реч}$ = 2-40-0,2X X 700 * 100/ (17 500+2 * 1 * 700) = 59 -сут.

Для определения протяженности ЗСО вниз по потоку воспользуемся графиком на рис. 34Д Безразмерные параметры $q_5$ и *T$,* необходимые для определения *г,* имеют следующие величины:

$$\bar{q}_5 = \frac{3{,}14\cdot 700^2\cdot 1}{17\,500\cdot 100} = 0{,}88;$$

$$\bar{T}_5 = \frac{100\cdot 17\,500\cdot 10^4}{3{,}14\cdot 40\cdot 0{,}2\cdot 700^2} + \frac{100}{700(1-0{,}88)} = 3{,}22,$$

по графику $л_5 = 0{,}3$, а г=0,3-700 — 100=110 м.

Общая протяженность ЗСО составит: L=100-j-l 10=210 м.

Ширину ЗСО найдем по формуле (83). Для определения величин $d_1$ и $d_2$ используем графики, приведенные на рис. 30,*в.*

При $Q_0$=2500 $м^3$/сут f,=2500-$10^4$/(3,14-40-0,2-$100^2$) == 100 и ? = 3,14-100X X0,1/2500=0,13, следовательно, $d_1=2{,}7$ и di=2,7-100 = 270 м.

При $Q_0$=5000 м$^3$/сут $T_1$==200 и q = 0,07, следовательно, $5_2$ = 3,9 и $d_2$=3,9X X 100=390 м.

По табл. 15 при *p=7* и *2б/x₀=2 ф** = 0,75. Таким образом, Дс?=390 — 270= = 120 м; $d_o$=270+120*0,75=360 м и d=700+360 =1060 м.

В данном случае ширина ЗСО получилась близкой к максимальной, определяемой расстоянием $y_р$ = 980 м. Некоторое превышение ширины *d* над величиной $d_{max}=y_P$ объясняется приближенностью расчетных методик, и в частности тем, что величина $y_р$ соответствует водозаборной галерее, а величина *d* в формуле (83) — ряду водозаборных скважин.

*Естественный поток подземных вод параллелен реке.* Схема движения подземных вод к линейному береговому водозабору в условиях параллельного естественного потока приведена на рис. 33,г.

Область питания водозабора в данном случае ограничена раздельной линией и урезом реки. Раздельная линия проходит через раздельную точку *N*. Приближенно можно положить, что эта точка лежит на прямой *x&xQ*. Тогда можно оцен-ить ординату точки *N:*

$$\bar{y}_р \approx \bar{l}+2\,(\exp\{8\bar{l}/\bar{Q}\}-1)^{-0,5}. \qquad \textbf{(92)}$$

Параметры ЗСО в рассматриваемой схеме приближенно можно найти из следующих уравнений:

$$r \approx y_р;$$

$$\bar{T} = \bar{R} - \bar{l} - \sqrt{\bar{Q}/\bar{l}}\,\mathrm{arctg}\left[(\bar{R}-\bar{l})/\sqrt{\bar{Q}/\bar{l}}\right]. \qquad \textbf{(93) (94)}$$

Величину R по уравнению (94) можно найти также с помощью графика на рис. 34, е.

Общая ширина *2d* ЗСО (см. рис. 33,г) в данном случае приближенно (с завышением) может быть определена по формуле (84) при замене в ней *R* на величину *2d — x₀* или по графику на рис. 34,в при той же подстановке.

Пример расчета. Для расчета границ ЗСО линейного водозабора, расположенного у реки, в условиях, когда естественный поток подземных вод направлен вдоль долины и параллелен реке, воспользуемся исходными данными, изложенными в предыдущем примере.

По формуле (92) найдем координату $y_р$ раздельной точки *N*. Для этого сначала определим безразмерный параметр 8l/Q=8*3,14*700*1/17500=1, тогда $_{у_р}$=700-|-2-100(е — 1)-°-»=850 м.

Протяженность ЗСО вниз по потоку принимаем равной г=$y_р$=850 м, а протяженность вверх по потоку можно найти по графику на рис. *34,е.*

В данном случае $\bar{Q}/4\bar{T} = 17\,500/(4\cdot3,14\cdot1\cdot700) \approx 2$ и $\bar{T}/\sqrt{\bar{Q}/\bar{T}} = 10^4\cdot(2\cdot40\cdot0,2\times$ $\times\ 100\sqrt{2}) = 4,4.$

По графику находим $(\bar{R}-\bar{T})/\sqrt{\bar{Q}/\bar{T}} = 5,9$, следовательно, $R = 2\cdot100\cdot\sqrt{2}\times$ $\times 5,9 + 700 = 2370$ м.

Общая протяженность ЗСО 1=850+2376=3220 м.

Ширину ЗСО можно рассчитать по формуле (84) или по графику Ни рис. 34,0: $T_4$=17500*$10^4$/(3,14*40*0,2*$700^2$) = 14,2 и 7=700/100=7. По графику на рис. 34,8 находим величину *Rfi.* Заменяя в выражении для *R/l.* значение *R* на *2d* — *о, получим: *R/l=R/l=(2d — x₀)/1=1,2* и 2d= 1,2-700+100=940 м.

Учет фильтрационного несовершенства речного русла при расчетах зон санитарной охраны

Несовершенные речные русла характеризуются значительными потерями напора при фильтрации поверхностных вод в подземный поток. Это может быть обусловлено малой шириной реки и ее слабым заглублением в водоносный пласт, наличием неоднородных включений в подрусловых отложениях, а, также коль-матацией и заиленностью донных отложений.

Практически гидродинамические расчеты береговых водозаборов с учетом несовершенства речных русел обычно проводятся с использованием метода дополнительного слоя. В соответствии с этим методом, понижения уровня подземных вод и структуру фильтрационного потока на берегу расположения водозабора находят по обычным зависимостям, справедливым для гидравлически совершенных рек. Однако для учета несовершенства реки урез ее при проведении расчетов сдвигается на величину.

$$\mathbf{AL=cth}\ \textit{(2ba)/a,} \qquad \textbf{(95)}$$

где *2Ь* — ширина реки; а — показатель несовершенства реки, определяемый по опытным данным.

При двухслойном строении русловой зоны, когда в дне реки залегает слабопроницаемый экранирующий слой (заиленный, за-кольматированный) мощностью то с коэффициентом фильтрации &о, параметр а выражается следующим образом:

$a = YkJ(kmm_n)$, (96)

где *km* — водопроводимость основного водоносного горизонта.

Метод дополнительного слоя может быть использован также и при оценке понижений уровня подземных вод и исследовании фильтрационного потока на противоположном по отношению к водозабору берегу реки.

При этом действительный урез реки сдвигается от исследуемой точки в сторону водозабора на величину $x_0$+AL*, где

$$\mathbf{AL^*=l/[a\ sh}\ \textit{(2ba)]}. \qquad \textbf{(97)}$$

Наиболее распространенными схемами строения эксплуатируемого водоносного горизонта в разрезе являются: однородный и двухслойный пласты.

*Однородный пласт.* Принципиальная схема течения подземных вод к береговому водозабору вблизи

гидравлически несовершенной реки и с естественным потоком, в обоих берегах направленным к реке, представлена на рис. 35.

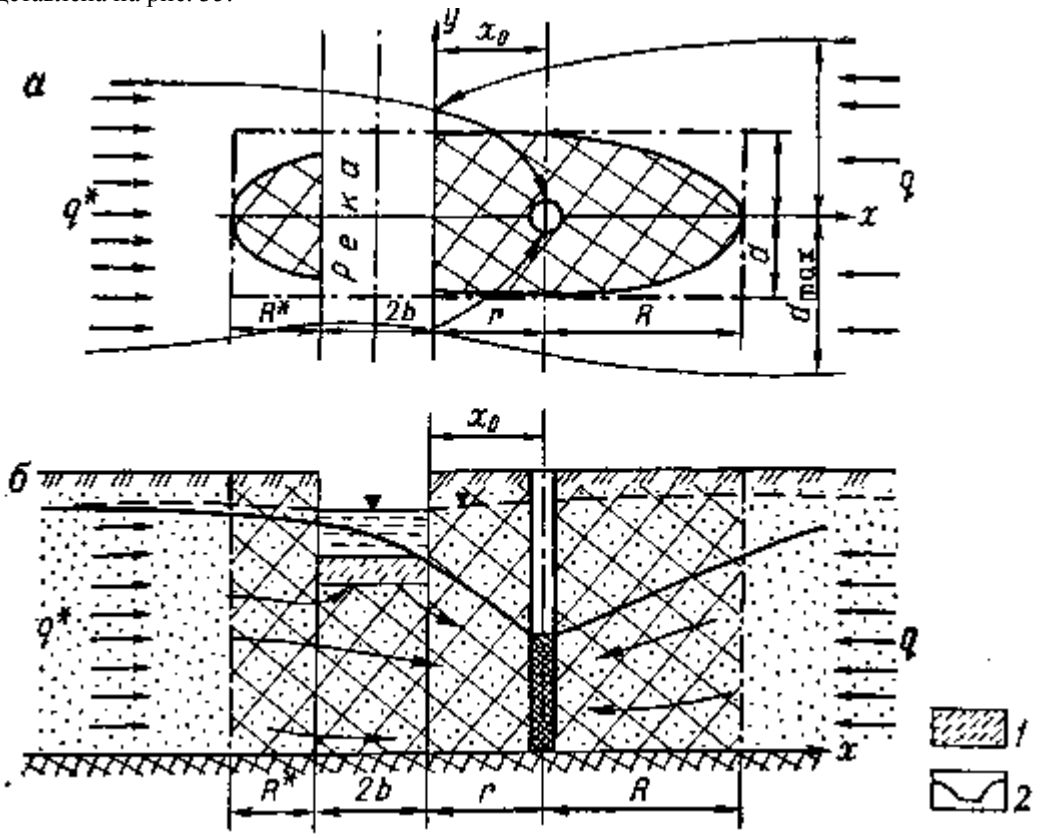



**Рис. 35. Схема водозабора у несовершенной реки:**

**а — план; *б* — разрез: 1 — слабопроницаемый слой под рекой; 2 — уровень подземны-х вод при работе водозабора. Остальные условные обозначения см. на рис. 14**

Область захвата берегового водозабора у несовершенной реки может включать оба ее берега. При этом расход водозабора *Q* компенсируется притоком воды из следующих основных источников:

$$\mathbf{Q=Qe+Q_P+Q^*e,} \qquad \mathbf{(98)}$$

где $Q_e$ — расход естественного потока, привлекаемого водозабором оо стороны берега; $Q^*_e$ — то же, со стороны противоположного берега; $Q_p$ — приток к водозабору речных вод.

Величину расхода $Q_e$ в случае, когда естественный поток на участке расположения водозабора направлен к реке, приближенно можно оценить по соответствующим формулам для сосредоточенных или линейных береговых водозаборных сооружений. Для учета фильтрационного несовершенства в соответствии с методом дополнительного слоя во всех приведенных там зависимостях следует заменить $X_Q$ на $X_L$:

$$\boldsymbol{x_L=x_0+ДL.} \qquad \mathbf{(99)}$$

Если бытовой поток *q* на участке расположения водозабора отсутствует или направлен в сторону коренного берега, то, очевидно, $Q_e=0$.

Составляющие $Q^*_e$ и $Q_p$ можно оценить следующим образом. Сначала рассчитывается величина $Q^{**}_e$ — расход подземных вод, поступающих к урезу реки в пределах области питания водозабора со стороны противоположного берега. Величина $Q^{**}_e$ находится по тем же зависимостям, что и $Q_e$, однако во всех формулах следует заменить $x_Q$ на $x^*_L=kL^*$.

Если поток $q^*$ отсутствует или направлен от реки, то $Q^{**}_e=0$.

При $Q^{**}_e>Q$ — $Q_e$ следует принимать

$$\mathbf{Q^*e=Q-Qe,} \qquad \mathbf{(100)}$$

а $Q_P=0$.

При **Q**e<Q — Qe Q*e = Q**e, 3 Qp=Q~Qe~Q**e.**

Протяженность и ширину ЗСО на берегу расположения водозабора (параметры *R, г* и *d)* следует определять по тем же формулам, что и для сосредоточенных и линейных водозаборов, работающих вблизи совершенных водотоков и водоемов, но при указанной выше подстановке (99) с учетом направления движения потока *q.*

Следует иметь в виду, что при движении естественного потока к реке или q = 0 $r_{max}=x_0$, а при естественном потоке, направленном от реки, $R_{max}=x_0$ (т. е. в данном случае замена $x_Q$ на $x_L$ не производится).

Время $T_{реч}$ находится по соответствующим зависимостям для совершенных рек при замене $X_0$ на $X_L$.

Важной особенностью рассматриваемой схемы фильтрации является то, что область захвата водозабора распространяется на противоположный от водозабора берег реки.

Протяженность области захвата и, следовательно, размеры ЗСО на противоположном берегу приближенно

можно оценить по скорости естественного потока подземных вод *q**. При этом

$$R^* = [q^*(T - T_{реч})/(mn)] - 2b. \quad (101)$$

Ширина области захвата и ЗСО водозабора на противоположном берегу ориентировочно (с завышением) принимается равной максимальной ширине области захвата на берегу расположения водозабора *d*.

Расчеты и выделение ЗСО на противоположном по отношению к водозабору берегу реки следует проводить только при наличии здесь опасности загрязнения подземных вод и относительно большой доле расхода $Q^*_e$ в общем расходе водоотбора Q, что может быть установлено расчетами по формуле смешения.

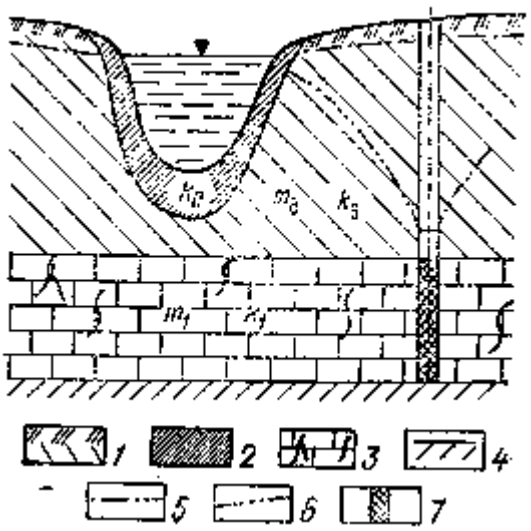



**Рис. 36. Береговой водозабор в двухслойной толще:**

**1 — пески, супеси, суглинки; 2 — слабопроницаемый слон; *3* — трещиноватый известняк; *4* — водоупор; 5 — естественный уровень подземных вод; *6* — уровень подземных вод при работе водозабора; 7 — фильтр скважины**

*Двухслойный пласт.* Отложения речных долин обычно не выдержаны по вертикали, и довольно часто наблюдается чередование сильно- и слабопроницаемых слоев. Для эрозионных долин, сформировавшихся -в результате размыва коренных пород и последующего отложения речных песчано-гравийно-галечниковых осадков, характерно двухслойное строение водоносной толщи в разрезе: нижний слой представлен цоколем поймы и террас, сложенным коренными породами, обычно более проницаемыми и водообильными; верхний — покровный слой — аллювиальными песками с прослоями глин, суглинков и супесей, в целом менее проницаемыми (рис. 36). Береговые водозаборы эксплуатируют преимущественно нижние горизонты.

Русло реки относительно нижнего эксплуатируемого горизонта может быть как совершенным, так и несовершенным. Э. М. Хох-латов установил, что наличие в области фильтрации контура питания заметно снижает роль покровной толщи как источника питания, которая имеет существенное значение в случае неограниченного по площади распространения пласта. При установившемся движении подземных вод наличие покровной толщи совсем не сказывается на эксплуатации водозабора. Питание нижнего слоя при этом полностью осуществляется за счет поступления речных вод.

Поэтому при расчетах ЗСО в таких условиях следует пользоваться теми же расчетными зависимостями и графиками, которые приведены для сосредоточенных или линейных береговых водозаборов, расположенных вблизи совершенных или несовершенных водотоков или водоемов.

Пример расчета. Используем исходные данные из примера расчета ЗСО для сосредоточенного водозабора. В дополнение к принятым там условиям положим, что река является несовершенной, показатель ее гидравлического несовершенства а = 0,01 м$^{-1}$, ширина реки 2b = 20 м. Поток на противоположном берегу направлен к реке, причем $q^*=q=0{,}9$ м$^2$/сут. Требуется определить размеры ЗСО, соответствующие времени $T_м$ = 400 сут.

Найдем величины сдвига уреза реки AL и AL*: по формуле (95) A1 = = cth (20-0,01)/0,01 =510 м и по формуле (97) AL*=1/[0,01 sh (20-0,01)] = = 500 м, следовательно, Хх. = 100+510=610 м и $x_L^*$=500 м.

Найдем составляющие расхода подземных вод, поступающих к водозабору. В данном случае $Q>nqx_L$, так как 2000>3,14-610-0,9. Определим расход $Q_e$. Предварительно по формуле (60) найдем параметр $y_p$

$$y_p = 610 \sqrt{\frac{2000}{3{,}14 \cdot 610 \cdot 0{,}9} - 1} \approx 240 \text{ м},$$

тогда

$$Q_e = \frac{2 \cdot 2000}{3{,}14} \operatorname{arctg} \frac{610}{240} + 2 \cdot 0{,}9 \cdot 240 = 1950 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Сопоставляя полученный результат с расчетом для случая совершенной реки, видим, что несовершенство речного русла существенно снижает долю речных вод в питании водозабора за счет дополнительного привлечения естественного потока.

С использованием тех же зависимостей найдем величину расхода $Q_e$**. В этом случае

$$y_p = 500\sqrt{\frac{2000}{3,14\cdot 500\cdot 0,9} - 1} \approx 320 \text{ м};$$

$$Q_e^{**} = \frac{2\cdot 2000}{3,14}\operatorname{arctg}\frac{500}{320} + 2\cdot 0,9\cdot 320 = 1850 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Принимая во внимание выражение (100), заключаем, что $Q_e$*=2000 — 1950= =50 м$^3$/сут и $Q_P$=0.

Таким образом, в данном случае речные воды не будут привлекаться к водозабору и расход естественного потока, поступающего к водозабору с противоположного берега, составит примерно 50 м$^3$/сут.

Найдем теперь параметры ЗСО на берегу расположения водозабора.

Для определения положения верхней границы ЗСО — расстояние *R* — в соответствии с рекомендациями, данными ранее, используем график на рис 26 *б* Найдем сначала $R_g$: *Rq*=0,9*400/(30-0,25) =48 м.

Значения исходных параметров будут следующие: q=3,14*610*0 9/2000=0 9 и T=0,9*400/(30*0,25*610) =0,1.

По графику находим AR = 0,3, следовательно, ДR = 0,3-610= 180 м а *R*= = 180+48~230 м.

По графику на рис. 25,0 определим положение границы ЗСО на участке между рекой и водозабором. В данном случае *q* — 0,9; $T_1$=2000-400/(3 14*30* X0,25*610$^2$)=0,1 и r=0,25, r=0,25*610~150 м. Полученное значение r>$r_{max}$= = 100 м, поэтому принимаем r=100 м. Следовательно, L = 230+100=330 м.

Время Греч находим по формуле (62) при соответствующих указанных выше заменах:

$$T_{реч} = \frac{30\cdot 0,25}{0,9}\left(\frac{610^2 + 240^2}{240}\operatorname{arctg}\frac{100\cdot 240}{610\,(610 - 100) + 240^2} - 100\right) = 140 \text{ сут}.$$

Ширину ЗСО находим по графику на рис. 26,а. При этом q = 0,9 и 7 = 0,1, следовательно, d=0,2 и d=0,2*610= 120 м.

Приток подземных вод к водозабору с противоположного берега весьма мал (2 — 3 % дебита водозабора), поэтому расширение ЗСО на противоположный берег в данном случае, по-видимому, необязательно. Однако рассчитаем по формуле (101) возможную протяженность ЗСО и на противоположном берегу:

R*=[0,9*(400 — 140)/(30*0,25)] — 20=10 м.

## ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ

Расчеты ЗСО графоаналитическим способом проводятся с использованием гидродинамической сетки фильтрации подземных вод, которая представляет собой систему линий равного напора (гидроизогипс) и нормальных к ним линий тока.

Построение такой сетки начинается обычно с проведения гидроизогипс грунтового потока в условиях эксплуатации водозаборного сооружения. Для этого определяется :положение уровня подземных вод в различных точках пласта по всей области фильтрации. Эти точки могут располагаться по некоторой заданной сетке, которая должна сгущаться на участках расположения водозаборных скважин, а также вблизи характерных точек подземного потока (раздельных точек). Уровень подземных вод в фиксированных точках определяется аналитически (в простейших случаях) или с использованием разнообразных моделирующих и цифровых устройств, широко применяемых при гидрогеологических исследованиях. Далее, путем интерполяции известных значений уровня в точках строятся изолинии уровня подземных вод при работе водозабора.

Линии тока проводятся нормально к гидроизогипсам. Для предварительного графического построения линий тока можно использовать следующий прием.

Выбирается какая-либо точка на одной из гидроизогипс с большим значением уровня, из этой точки восставляется перпендикуляр к ней (рис. 37,а). Далее на перпендикуляре находится точка, располагающаяся на середине расстояния между выбранной гидроизогипсой и соседней с ней с меньшим значением уровня; из этой точки опускается перпендикуляр на соседнюю гидроизогипсу, и его пересечение с этой гидроизогипсой дает точку, лежащую примерно на одной линии тока с выбранной вначале точкой.

Полученная таким образом система линий тока после этого уточняется с использованием следующего соотношения:

$$\mathbf{Q_i - Q_{i+1} = e_i — e_{i+1},} \qquad \mathbf{(102)}$$

где $Q_i$ и $Q_{i+1}$ — расходы подземного потока в соседних ячейках гидродинамической сетки (см. рис. 37,6) в пределах полосы тока; gj и e;+i — расходы воды, поступающие в рассматриваемые ячейки из внешних источников, или расходы воды, извлекаемые из этих ячеек (перетекание, суммарный расход водозаборных скважин в пределах ячейки и т. д.), в последнем случае величины $e_г$ и e;+1 должны быть отрицательными.

Из равенства (102) вытекает следующее условие, которое должно выполняться для ячеек гидродинамической сетки, расположенных в пределах одной полосы тока:

$$\frac{l_i}{l_{i-1}} = v\frac{\Delta H_i b_i}{\Delta H_{i+1} b_{i+1}} - \frac{(\vec{e}_{i+1} - \vec{e}_i) l_i}{(km)_{i+1} b_{i+1} \Delta H_{i+1}}, \qquad \mathbf{(103)}$$

где $l_i$ и $l_{r+1}$ — длины соседних ячеек сетки в пределах полосы тока; v=$(km)_i/(km)_{i+1}$ — отношение величин водопроводимости в этих ячейках; $АН_i$ и $ДН_{i+1}$ — разность отметок гидроизогипс, ограничивающих

рассматриваемые ячейки; $b_i$ и $b_{i+1}$ — средняя ширина этих ячеек.

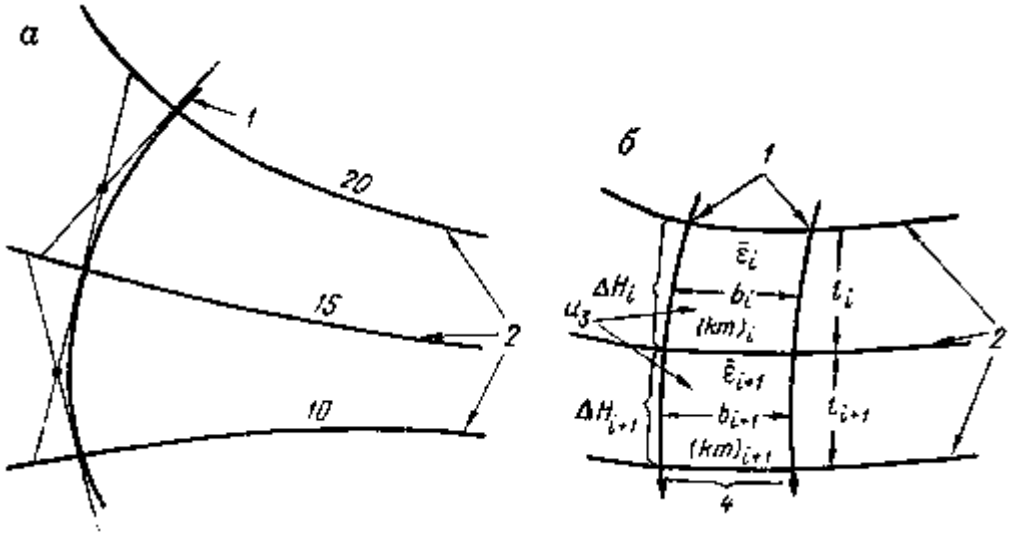



**Рис. 37. Схемы к построению гидродинамической сетки:**
**а — построение линий тока; б — фрагмент гидродинамической сетки; 1 — линии тока; 2 — гидроизогипсы; 3 — ячейки сетки; 4 — полоса тока**

Под полосой тока понимается площадь между двумя соседними линиями тока, при этом ячейки представляют собой участки, ограниченные двумя соседними гидроизогипсами и линиями тока.

В случае, когда водопроводимость пласта на исследуемом участке одинакова (v=l), а гидроизогипсы приводятся через равные интервалы ($ДН_i = ДН_{i+1}$) и, кроме того, $e_i=e_{i+1}$ соотношение (103) приобретает вид:

$$l_i/l_{i+1}=b_i/b_{i+1}. \qquad \textbf{(104)}$$

Корректировка линий тока проводится таким образом, чтобы соотношения (103) или (104) выполнялись в пределах каждой полосы тока во всей рассматриваемой области.

Анализ гидродинамической сетки начинается с отыскания особых (раздельных) точек фильтрационного потока подземных вод к водозабору. Эти точки характеризуются тем, что в них сходятся несколько линий тока и изолиний напора, а скорость движения воды равна нулю. Раздельные линии, т. е. линии тока, проходящие через раздельные точки, ограничивают участки фильтрации подземных вод к водозабору из различных источников питания (рис. 38). Соответствующие фильтрационные расходы из этих источников определяются по формулам

$$Q = \sum_{i+1}^{n} Q_i;\ Q_i = (km)_{i,j}\Delta H_{i,j}(b_{i,j}/l_{i,j}) + \bar{\varepsilon}_{сум\ i,j}, \qquad \textbf{(105)}$$

где Qi — расход подземных вод из данного источника в пределах i-й полосы; i=1, 2, ..., n; *n* — число полос тока между раздельными линиями, ограничивающими область фильтрации из данного источника; *(km)i,j,* $ДН_{i,j}$, $b_{i,j}$ и $l_{i,i}$ — параметры j-й ячейки в пределах i-й полосы; $e_{Сум\ i,j}=e_{i,1}+e_{i,2}+ \ldots +e_{i,j}$ — суммарный расход воды из дополнительных источников питания (перетекание, инфильтрация, скважины), причем суммирование проводится по ячейкам, располагающимся выше по потоку от рассматриваемой i-й ячейки.

Средняя действительная скорость *v*i,,-* в пределах j-й ячейки i-й полосы тока находится по зависимости

$$v^{*}_{i,j} = \frac{k_{i,j}\Delta H_{i,j}}{n_{i,j}l_{i,j}}, \qquad \textbf{(106)}$$

где $k_{i,j}$ — коэффициент фильтрации в пределах ячейки; $n_{i,j}$ — пористость.

Время, в течение которого частицы воды пройдут путь длиной $l_{i,j}$, можно найти по формуле

$$\Delta t_{i,j} = \frac{n_{i,j}l^2_{i,j}}{k_{i,j}\Delta H_{i,j}}. \qquad \textbf{(107)}$$

Полное время движения подземных вод между двумя точками, расположенными в ячейках с номерами *p* и *m* в полосе тока, получаем из выражения

$$T = \sum_{j=p}^{m}\left[\frac{n_{i,j}l^2_{i,j}}{k_{i,j}\Delta H_{i,j}}\right]. \qquad \textbf{(108)}$$

Задаваясь расчетным интервалом времени *T,* по формуле (108) можно найти расстояние до границ ЗСО в пределах каждой полосы тока, а по соотношениям (105) оценить расходы основных источников, питающих водозабор, и, следовательно, результирующую концентрацию $С_в$ тех или иных компонентов в воде, отбираемой водозабором (по формулам смешения). Примеры зон санитарной охраны, рассчитанных графоаналитическим

методом с использованием карты гидроизогипс, построенной по данным полевых наблюдений в условиях действующего водозабора и численного моделирования фильтрации на ЭВМ, описаны в гл. 11. В моделях отражены фильтрационная неоднородность эксплуатируемого водоносного горизонта, гидравлическая связь реки с аллювиальным и эксплуатируемым водоносными горизонтами, инфильтрационное питание и другие природные факторы, одновременный учет которых в аналитических расчетах фильтрации и миграции практически невозможен. Рассчитанные контуры второго и третьего поясов ЗСО имеют довольно сложные очертания, а размеры этих зон значительны, что определяется большой скоростью движения подземных вод в трещиноватых породах с высокой водопроницаемостью и малой активной пористостью.

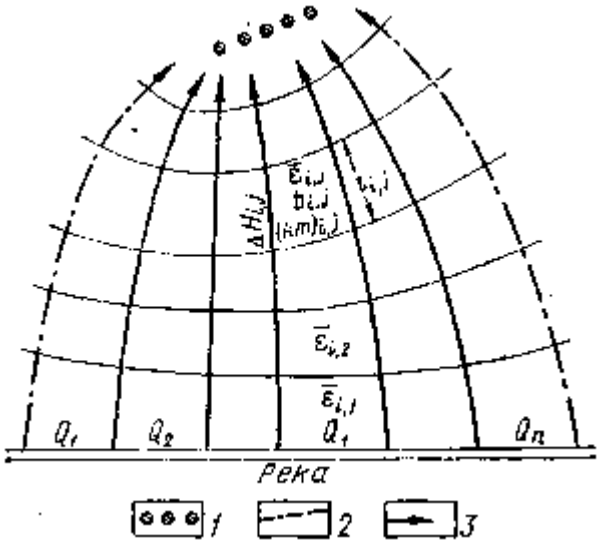



**Рис. 38. Схема к определению расхода подземных вод по гидродинамической сетке:**
**1 — водозабор; *2* — раздельная линия; *3* — линии тока**

# ГЛАВА 11. ПРИМЕРЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ПРОЕКТИРУЕМЫХ И ДЕЙСТВУЮЩИХ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Как указывалось выше, в методическом отношении обоснование размеров ЗСО водозаборов подземных вод и санитарно-оздо-ровительных мероприятий в их пределах тесно связано с оценкой естественного и прогнозного качества подземных вод, привлекаемых водозабором. При этом выбор методов для решения этих задач определяется природной обстановкой в целом и гидрогеологическими условиями, а также схемой водозабора и характером хозяйственного использования окружающей территории. Большое значение имеет также методика разведки и оценки запасов подземных вод, выбор которой, в свою очередь, тесно связан с характером и сложностью гидрогеологических условий.

Сочетание различных методов обоснования ЗСО и оценки качества подземных вод в различных природно-хозяйственных условиях рассматривается ниже на примерах действующих и проектируемых водозаборов.

*Пример 1. Глубокозалегающий напорный водоносный горизонт в песках.* Для водоснабжения развивающихся старых и новых городов Западной Сибири в последнее время используются глубокозалегающие подземные воды Западно-Сибирского артезианского бассейна. Здесь на палеозойском складчатом фундаменте залегает мощный (до 3 тыс. м) осадочный чехол рыхлых отложений мезо-кайнозойского возраста, содержащий серию водоносных горизонтов и комплексов. В осадочной толще мезо-кайнозоя выделяются верхний и нижний гидрогеологические этажи, разделяемые толщей (до 750 м) водоупорных глинистых осадков олигоцен-туронского возраста, в кровле которой залегает чеган-ская свита глин. Нижний этаж, охватывающий основную часть осадочного чехла, сложен морскими и прибрежно-морскими отложениями (песчаники, аргиллиты, алевролиты, глины), содержащими горизонты высокоминерализованных и термальных подземных вод. Верхний этаж, имеющий мощность около 300 м, сложен континентальной пачкой пород олигоцен-четвертичного возраста, содержащей водоносные горизонты пресных вод.

Характерной особенностью континентальных олигоцен-чет-вертичных отложений является преобладание песчано-глинистых разностей пород и их пестрая ли-толого-фациальная изменчивость.

В континентальной песчано-глинистой толще выделены три основных водоносных горизонта, заключающих пресные воды (рис. 39):

1) четвертичный, мощностью 15 — 45 м в песчано-гравелистых отложениях поймы и надпойменных террас, не защищенный от поверхностного загрязнения;

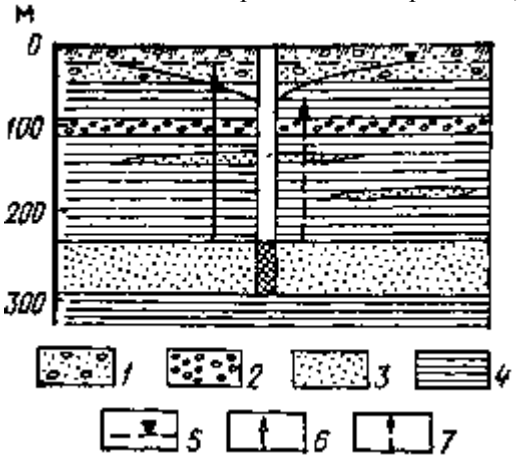



**Рис. 39. Глубокозалегающий напорный водоносный горизонт в песках:**

***1 — 3* — водоносные горизонты *(1* — четвертичный, *2* — новомихайловский, *3* — атлымский); *4* — олигоцен-туронские глины; 5 — естественный уровень подземных вод; *6, 7* — напор в атлымском водоносном горизонте *(6* — до эксплуатации водозабора, 7 — при эксплуатации водозабора с производительностью 70 тыс. м$^3$/сут)**

2) новомихайловский, в прослоях песка, залегающих на глубине 6 — 180 м, напор составляет в среднем 75 м, мощность и водообильность горизонта непостоянны. В кровле залегают глины, в подошве — многолетнемерзлые породы;

3) атлымский, приуроченный к пескам, имеет мощность 40 — 70 м, залегает на глубинах 200 — 240 м. Горизонт выдержан по мощности и литологическому составу, напор составляет 200 м, пьезометрические уровни устанавливаются на глубине 10 — 16 м от поверхности земли. В кровле горизонта залегают глины и многолетнемерзлые породы, в подошве — глины и алевриты чеган-ской свиты, имеющей региональное распространение. Питание горизонта осуществляется в долинах крупных рек, где местами отсутствуют многолетнемерзлые породы.

Для водоснабжения города проектируется водозабор, использующий подземные воды подмерзлотного атлымского водоносного горизонта.

На участке разведки мощность горизонта составляет 70 м, глубина залегания изменяется от 180 до 200 м, напор над кровлей пласта 180 — 200 м. Водопроводимость горизонта равна 1120 м$^2$/сут, коэффициент пьезопроводности 4,9*10$^5$ м$^2$/сут.

Производительность водозабора оценивалась с помощью гидродинамического метода применительно к неограниченному в плане водоносному горизонту для схемы линейного ряда скважин. При суммарном расходе водозабора 70 тыс. м$^3$/сут, получаемом из 70 скважин, размещенных на двух параллельных линиях длиною по 5100 м (расстояние между линиями 200 м, между скважинами 150 м), в центре линейных рядов через25лет понижение напора составит 45 м, а в крайних скважинах — 42м. При размещении скважин в виде четырех параллельных линий длиною 2550 м (расстояние между линиями и скважинами в ряду 150 м) при такой же суммарной производительности водозабора понижения составят соответственно 52 и 48 м. При этом остаточный напор над кровлей горизонта все еще будет значительным (130 — 150 м). Это обстоятельство в сочетании с наличием в кровле горизонта мощной толщи слабопроницаемых мно-голетнемерзлых пород позволяет считать атлымский водоносный горизонт хорошо защищенным от поверхностного загрязнения.

Расчет размеров ЗСО выполнен аналитическим методом. Для первого варианта линейного водозабора в неограниченном водоносном пласте при наличии естественного потока подземных вод с уклоном r=0,001 размеры третьего пояса ЗСО следующие: *г*== = 2300 м; R=3800 м; L=r+R = 6100 м; d=5200 м. Для второго варианта водозабора, характеризующегося большей величиной нагрузки на 1 м длины ряда, размеры третьего пояса ЗСО составляют: r-=3200 м; R=4200 м; L=r+R = 7400 м; d=4300 м. Как видно из приведенных цифр, площадь ЗСО для рассматриваемых вариантов на длительный срок $\Gamma_x$ = 25 лет практически одинакова. Граница второго пояса ЗСО по расчету характеризуется следующими размерами: для первого варианта г=160 м;

R = 230 м, L = 390 м; d=3260 м; для второго варианта г=330 м;

R = 370 м; L=700 м; d=1800 м. Однако, в связи с хорошей защищенностью водоносного горизонта, в данном случае можно не выделять второй пояс ЗСО и не назначать в его пределах мероприятий, направленных против микробного загрязнения используемого водоносного горизонта. Для всех поясов ЗСО основным защитным мероприятием против химического загрязнения должно быть запрещение бурения глубоких скважин (разведочных, эксплуатационных на нефть и др.). В пределах первого пояса ЗСО следует соблюдать все мероприятия, предусмотренные Положением о ЗСО [24].

*Пример 2. Водозабор в неоднородном по гидрохимическим условиям неглубоко залегающем водоносном горизонте.* Проектируемый водозабор предназначен для хозяйственно-питьевого водоснабжения нескольких небольших населенных пунктов, расположенных в степной местности; территория используется для выпаса скота, орошаемого и богарного земледелия. Население получает воду из неглубоких колодцев, в которых вода часто имеет повышенную минерализацию и загрязнена нитратами. Небольшая река, средний годовой расход которой составляет 340 л/с, зарегулирована водохранилищем, используемым для орошения. В реке средняя

минерализация воды составляет 2,3 — 2,5 г/дм$^3$, иногда и выше; содержание нитратов достигает 36, а нитритов — 12,5 мг/дм$^3$. По данным разведочных работ, здесь на кристаллическом фундаменте залегают осадочные отложения мелового, палеогенового, неогенового и четвертичного возраста, имеющие общую мощность 120 — 190 м (рис. 40). Верхнемеловые отложения (трещиноватые мергели, реже пески) являются относительным водоупо-ром для вышележащих водоносных пород; палеогеновые отложения представлены песками и песчаниками; в верхней части толщи залегают углистые пески со слабопроницаемыми прослоями бурых углей и углистых глин, которые отделяют палеогеновый водоносный горизонт от вышележащего водоносного горизонта в неогеновых отложениях, представленных песками с прослоями глин и песчаников. Разделяющий слабопроницаемый слой имеет небольшую мощность и местами отсутствует. На неогеновых породах на водораздельных пространствах залегают среднесармат-ские глины и пески, верхнеплиоценовые — нижнечетвертичные глины и четвертичные элювиально-делювиальные суглинки и глины. В пойме рек и балок развиты аллювиально-делювиальные отложения, представленные суглинками и песками.

В районе водозабора водоносный горизонт приурочен к палеогеновым отложениям и нижней части неогеновых. Обводнены также четвертичные отложения на водораздельных склонах, а также аллювиальные и аллювиально-делювиальные образования в долинах рек.

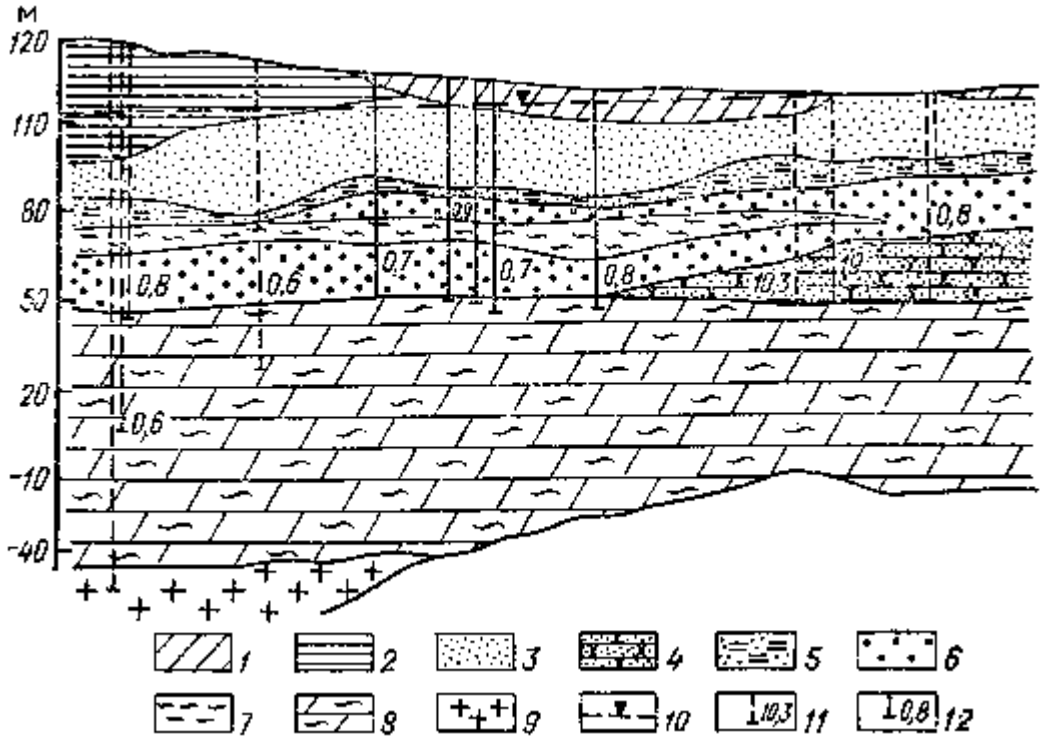



**Рис. 40. Гидрогеологический разрез по линии водозабора в неоднородном по гидрохимическим условиям неглубоко залегающем водоносном горизонте:**

**1 — четвертичный суглинок; *2* — неогеновая глина; 3 — неогеновый водоносный песок; *4* — палеогеновый песчаник; 5 — углистые пески с прослоями бурого угля и углистых глин; *6* — палеогеновый песок; 7 — палеогеновая глина; 8 — глинистый мергель позднемелового возраста; *9* — гранит; *10* — уровень подземных вод; 11 — разведочные скважины и минерализация воды, г/дм$^3$; *12* — скважины водозаборные и минерализация воды, г/дм$^3$**

Подземные воды в палеогеновых и неогеновых породах тесно связаны. На участке водозабора полная мощность водоносного горизонта в неоген-палеогеновых отложениях составляет 53 м, эффективная мощность 35 м, водопроводимость 458 м$^2$/сут, средний коэффициент фильтрации 8,6 м/сут.

Для оценки эксплуатационных запасов подземных вод на участке рассматриваемого водозабора применялось численное моделирование фильтрации. Модель охватывает большую территорию, где кроме рассматриваемого водозабора располагаются и другие проектируемые водозаборы. Для центральной и южной части территории на модели реализована схема из двух водоносных горизонтов с разделительным слабопроницаемым слоем. Для северной и северо-западной частей, где находится участок разведки рассматриваемого водозабора, на модели реализован один водоносный горизонт, объединяющий неогеновые, палеогеновые и меловые отложения; в речных долинах, кроме того, учитывался аллювиальный водоносный горизонт. На модели отражены взаимосвязь подземных вод с поверхностными водами, инфильтрация атмосферных осадков по долинам рек в аллювиальные и неогеновые отложения, питание основного водоносного горизонта «дождеванием» из четвертичных отложений через глинистые слои. Для рассматриваемого участка разведки характерна неоднородность подземных вод по общей минерализации и содержанию отдельных компонентов.

На формирование состава подземных вод аллювиальных и делювиальных отложений кроме климатических факторов влияют слабая дренированность водоносного горизонта в связи с преобладанием глинистых пород в разрезе и незначительным уклоном зеркала подземных вод, а также небольшая глубина залегания воды, способствующая ее интенсивному испарению в теплый период года. Вместе с тем для отдельных участков горизонта характерны хорошие условия инфильтрации атмосферных осадков и паводковых вод. На территории населенных пунктов и на площадях интенсивного применения навозных минеральных удобрений вблизи животноводческих объектов отмечена загрязненность подземных вод соединениями азота.

Взаимодействие указанных факторов определило пестроту химического состава и минерализации подземных вод аллювиальных отложений: обычно преобладают сульфатно-хлоридные натриево-кальциевые воды с минерализацией 1,3 — 2,2 г/дм$^3$ при колебании минерализации от 0,7 до 6,3 г/дм$^3$.

Подземные воды нижне- и верхнечетвертичных отложений, развитых на водораздельных склонах, также имеют неоднородный состав. Среди них преобладают сульфатные, бикарбонатно-сульфатные натриево-кальциевые воды; минерализация по площади изменяется от 0,8 до 11,3 г/дм$^3$, чаще встречаются значения 2 — 3 г/дм$^3$.

Качество подземных вод намеченного к эксплуатации горизонта неогеновых отложений также непостоянно по площади. Встречаются воды сульфатно-хлоридные, сульфатные натриево-кальциевые с минерализацией 2 — 3 (реже 3 — 5) г/дм$^3$. Местами есть воды с минерализацией 0,5 — 1,5 г/дм$^3$ хлоридно-сульфатно-бикарбонатного кальциево-магниевого и бикарбонатно-сульфат-ного натриево-кальциевого состава. Вблизи мест разгрузки вод четвертичных отложений, на отдельных участках развития аллювиальных отложений, в неогеновом горизонте встречаются ареалы вод повышенной (2 — 3 г/дм$^3$) минерализации хлоридно-сульфатного натриево-кальциевого состава. Качество палеогеновых вод также неоднородно: минерализация по площади изменяется от 0,6 до 1,8 г /дм$^3$.

В связи с гидрохимической неоднородностью водоносного горизонта при изысканиях большие усилия были затрачены на поиски участка с пресными подземными водами; последний был определен на расстоянии 0,5 км от реки (см. рис. 40), и здесь вначале был намечен водозабор из пяти скважин, размещенных по площадной схеме. Для проверки возможности ухудшения качества воды в водозаборе из-за привлечения минерализованных подземных вод с участка правобережной поймы был сделан контрольный расчет времени движения некондиционных минерализованных подземных вод от ближайшего «пятна» таких вод в аллювиальных отложениях и от реки к водозабору. При этом были использованы расчетные понижения уровня воды в скважинах и данные моделирования фильтрации. На карте гидроизогипс, построенной на прогнозный период, были выделены отдельные линии тока, соединяющие «пятно» и реку с водозабором и по «им выполнены расчеты по выражениям (107) и (108) с учетом изменения гидрогеологических параметров на отдельных участках линий тока. Поскольку время движения к ближайшим водозаборным скважинам оказалось равным пяти годам, т. е меньше допустимого срока, намеченное расположение водозаборных скважин было изменено, а водозабор был запроектирован в виде линейного ряда, причем ближайшая к «пятну» скважина удалена от него уже на расстояние около 1 км, что обеспечивает на расчетный срок защиту водозабора от подтягивания минерализованных вод по пласту. Однако эксплуатируемый водоносный горизонт, кроме того, плохо защищен от поступления загрязнений сверху — зона аэрации, сложенная проницаемыми песками, супесями и суглинками, имеет мощность не более 10 м. Для защиты подземных вод от поверхностного загрязнения на площади всех трех поясов ЗСО запрещено использование сельскохозяйственных удобрений и ядохимикатов, а также размещение участков орошения.

Граница первого пояса определена в 50 м от скважин (незащищенный горизонт). Размеры второго и третьего поясов ЗСО на время 400 сут и 25 лет определены графоаналитическим расчетам по методике, аналогичной описанному выше методу оценки времени движения к водозабору некондиционных вод. По результатам расчетов граница второго пояса должна быть удалена от водозаборных скважин на 200 м; граница третьего пояса, с учетом того, что на территорию ЗСО не должны поступать подземные, талые и дренажные воды с участков орошения, находящихся за ее пределами, отодвинута до линии водораздела между оврагами.

*Пример 3. Безнапорный песчаный водоносный горизонт.* Водозабор в виде линейного ряда скважин длиною 8 км с производительностью 50 тыс. м$^3$/сут проектируется для хозяйственно-питьевого водоснабжения города, расположенного в 15 км к югу от водозабора. Здесь же находятся действующие городские водозаборы, часть из которых загрязнена, и вода отбирается только для технических целей.

Проектируемый водозабор размещен в низине в области слияния двух крупных рек; река вблизи водозаборного участка — приток одной из этих рек (рис. 41). Эксплуатируемый безнапорный водоносный горизонт приурочен к разнозернистым пескам аллювиальных верхне- и нижнечетвертичных отложений.

Гидроизогипсы имеют сложные очертания, что связано с движением подземных вод к двум расположенным под углом региональным дренам, а также с влиянием действующих водозаборов и сбросом сточных вод в некоторые из озер.

Для проектируемого водозабора актуален вопрос о возможности его загрязнения, так как промышленные сточные воды города отводятся в реку вблизи водозабора по коллектору, который начинается трубопроводом длиною 4 км, а затем переходит в открытый незакрепленный канал, проложенный на протяжении 3,7 км до верховьев реки. По каналу сбрасывается более 50 тыс. м$^3$/сут в значительной степени очищенных сточных вод, однако раньше сточные воды почти не очищались, и это вызывало загрязнение подземных вод при инфильтрации стоков через русло и разливах сточных вод в периоды высоких уровней воды в реке. При

изысканиях вдоль русла реки были пробурены разведочные скважины, по которым в подземных водах установлена повышенная до 14,9 мг-экв/л жесткость; содержание железа (общего) достигает 50, аммония 7, бензола 0,1, цианидов 0,12, формальдегидов 0,8 и нефтепродуктов 2,5 мг/л. Ширина зоны загрязнения вдоль реки достигает 500 м.

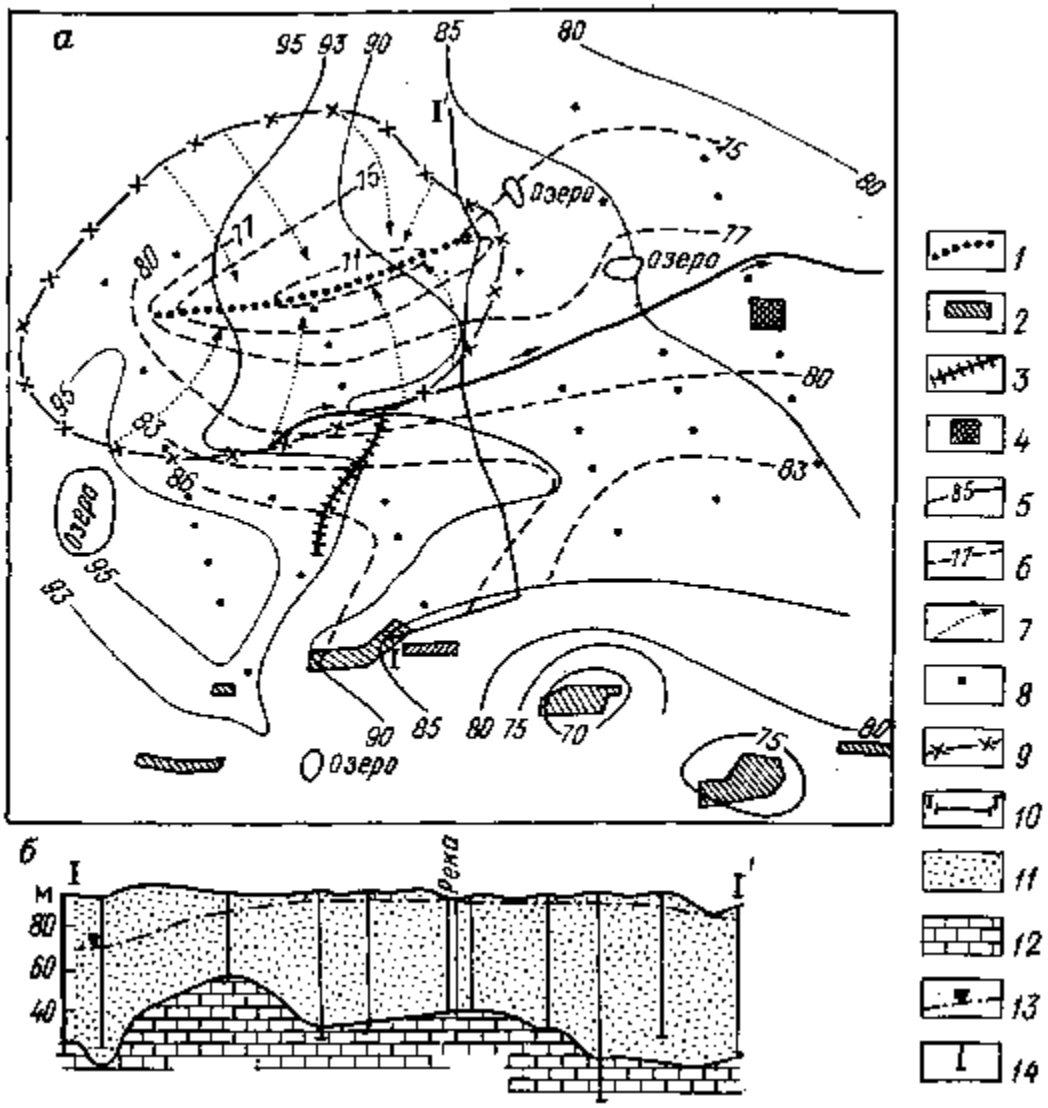



**Рис. 41. Безнапорный песчаный водоносный горизонт:**

**а — план; б — разрез, 1 — скважины проектируемого линейного водозабора; *2* — действующие водозаборы; *3* — коллектор промышленных сточных вод; *4* — свалка промышленных отходов; 5 — гидроизогипсы на период изысканий и их отметки; *6* — то же, на расчетный срок эксплуатации водозабора и их отметки; 7 — линии тока при работе водозабора; *8* — расчетные точки для определения величины прогнозных понижений уровня; *9* — граница третьего пояса ЗСО; *10* — линия гидрогеологического разреза; *11* — аллювиальные отложения; *12* — отложения пермского возраста; *13* — уровень подземных вод; *14* — скважины проектируемого водозабора**

Еще один очаг загрязнения подземных вод выявлен на участке свалки промышленных отходов, где складируется в основном кислый гудрон. По данным разведочного бурения и режимных наблюдений, здесь установлена повышенная до 8,4 г/л минерализация подземных вод, а также высокие значения содержания (в г/л) ряда компонентов: сульфаты 4,7; хлориды 1,6; аммоний 0,098; железо (общее) 0,018 г/л; окисляемость достигает 2,88 г/л. В воде обнаружены также нефтепродукты (до 50 мг/л), фенолы (до 0,15 мг/л), бензол (до 0,4 мг/л), цианиды (до 0,025 мг/л), формальдегид (до 0,05 мг/л) и ацетон (до 0,06 мг/л). В районе свалки загрязнения опустились на глубину до 70 м от поверхности, т. е. достигли подошвы водоносного горизонта. В плане ареал загрязнения продвинулся вниз по потоку и распространился на 2,5 км к северо-востоку от свалки промышленных отходов.

Для выяснения возможности влияния на новый водозабор загрязненных подземных вод, находящихся вблизи реки и участка свалки, было определено положение границ третьего пояса ЗСО, что одновременно позволяло оценить и прогнозное качество воды в водозаборе на 25 лет. В связи с более или менее однородными фильтрационными свойствами водоносного горизонта и сложным характером гидроизогипс потока подземных

вод в естественных условиях, для расчета был применен графоаналитический метод.

Вначале аналитическими расчетами с использованием ЭВМ были определены для нестационарного режима прогнозные понижения уровня подземных вод при работе взаимодействующих 25 скважин, входящих в состав проектируемого водозабора. Прогнозные уровни вычислены для водозаборных скважин и для расположенных по сетке отдельных расчетных точек водоносного горизонта. Расчеты выполнены применительно к следующим параметрам: коэффициент фильтрации 20 м/сут, мощность водоносного горизонта 60 м, коэффициент уровнепроводности $7*10^3$ $м^2$/сут, расстояние между скважинами 300 м, радиус фильтра скважины 0,16 м, расчетный срок эксплуатации 25 лет. По рассчитанным понижениям с учетом карты гидроизогипс, составленной на период изысканий, установлено положение прогнозных уровней подземных вод и построены гидроизогипсы на расчетный срок работы водозабора.

Затем на прогнозной карте гидроизогипс выделены характерные линии тока и на каждой из них рассчитано расположение точки, от которой через 25 лет вода придет к водозабору. Оконтуренная таким образом зона захвата водозабора на 25 лет (см. рис. 41), являющаяся в то же время границей третьего пояса ЗСО, построена с некоторым «запасом», т. е. имеет завышенные размеры, поскольку при оценке расчетных понижений не учитывалось дополнительное инфильтрационное питание водоносного горизонта, уменьшающее понижения в скважинах, и, кроме того при расчете скорости продвижения подземных вод к водозабору не учитывался нестационарный характер фильтрации.

Из рис 41 видно что очаг загрязнения вблизи свалки находится далеко от границы ЗСО и поэтому не будет влиять на качество отбираемой воды в пределах 25-летнего срока при указанной выше производительности водозабора. Вместе с тем для сохранения в перспективе возможности значительного увеличения производительности водозабора с использованием всех запасов месторождения пресных вод (более 100 тыс. $м^3$/сут) поставлен вопрос о необходимости защиты подземных вод от загрязнения путем ликвидации свалки и проведения специальных мероприятий по локализации создавшегося в водоносном горизонте очага загрязнения.

Очаг загрязнения вдоль русла реки находится на границе ЗСО поэтому в проекте внеплощадочного водоснабжения города в связи со строительством нового водозабора намечены следующие мероприятия: расчистка русла реки на протяжении 20 км и устройство коллектора из железобетонных труб для отвода сточных вод в реку ниже створа проектируемого водозабора. Продвижение к водозабору накопившихся ранее загрязнении может быть остановлено с помощью гидравлической завесы в виде ряда дренажных скважин, откачивающих загрязненные воды. Однако учитывая намечаемое прекращение действия источника загрязнения (сброс сточных вод в реку вблизи водозабора), а также возможность сорбции и разбавления оставшихся в водоносном горизонте загрязняющих веществ по пути от реки к водозабору вопрос о необходимости и сроках создания дренажного ряда следует решать по результатам натурных наблюдении за изменением уровней и направления движения подземных вод в рассматриваемом районе после включения водозабора, а также наблюдений за скоростью продвижения загрязнении к водозабору. Дчя этого в проекте водозабора предусмотрено создание нескольких поперечников наблюдательных гидрохимических скважин от реки в направлении к водозабору, причем рекомендуется начать наблюдения за полгода-год до включения водозабора.

*Пример 4 Линза пресных вод в песках.* Для хозяйственно-питьевого водоснабжения населенных пунктов, расположенных в полупустынном безводном районе, намечено использовать грунтовые воды, залегающие в виде линзы пресных вод среди минерализованных вод (рис. 42)

Климат района резко континентальный, территория используется преимущественно для выпаса скота. Месторождение пресных фунтовых вод приурочено к большому песчаному массиву, который представляет собой аккумулятивную аллювиально-дель-товую равнину позднечетвертичного возраста, возвышающуюся на 5-8 м над окружающей морской равниной хвалынского возраста Песчаные гряды чередуются с ложбинами временных водотоков и котловинами выдувания, расчлененность рельефа благоприятствует инфильтрации атмосферных осадков и паводковых вод из временных водотоков в пески. Поэтому, несмотря на малое количество атмосферных осадков (средняя многолетняя годовая норма составляет 150 мм, а в маловодный период — примерно 100 мм), в песках формируется горизонт грунтовых вод, приуроченный к верхнечетвертичным аллювиально-дельтовым отложениям, представленным песками с прослоями и линзами глин. Он имеет мощность от 2 — 4 м в краевых частях песчаного массива до 18 — 20 м в его центре. Глубина залегания уровня подземных вод изменяется от 1 до 5 м. На площади песчаного массива пресные подземные воды распространены среди минерализованных в виде крупных линз неправильной формы, причем пресные воды приурочены обычно к песчаным грядам и барханам, а более минерализованные — к долинам временных водотоков и выполненным глинистыми отложениями понижениям в рельефе, где залегающие вблизи поверхности подземные воды интенсивно испаряются. Увеличение минерализации грунтовых вод отмечается и на отдельных участках внутри площади распространения пресных вод, что связано с местными изменениями литологии пород и рельефа (см. рис. 42).

Подстилающим водоупором для водоносного горизонта являются в основном глины плиоцена, реже — меловые отложения Маастрихта.

Водозабор проектируется в юго-западной части месторождения в виде четырех линейных рядов скважин. Средняя мощность водоносного горизонта в пределах области влияния водозабора составляет 10 м для линейных рядов I — III и 12 м для линейного ряда IV. Средние взвешенные (по площади) значения коэффициента фильтрации, определенные по кустовым откачкам, составляют 10,8 и 3,5 м/сут соответственно для

I — III и IV рядов. Коэффициент водоотдачи, вычисленный по наблюдениям за понижениями уровней в наблюдательных скважинах опытных кустов, равен 0,15. Общая проектная производительность водозабора составляет 11016 м$^3$/сут при следующих параметрах линейных рядов скважин: длина ряда IV 13 км; нагрузка на скважину 130 — 432 м$^3$/сут, понижение уровня воды 5 — 9 м.

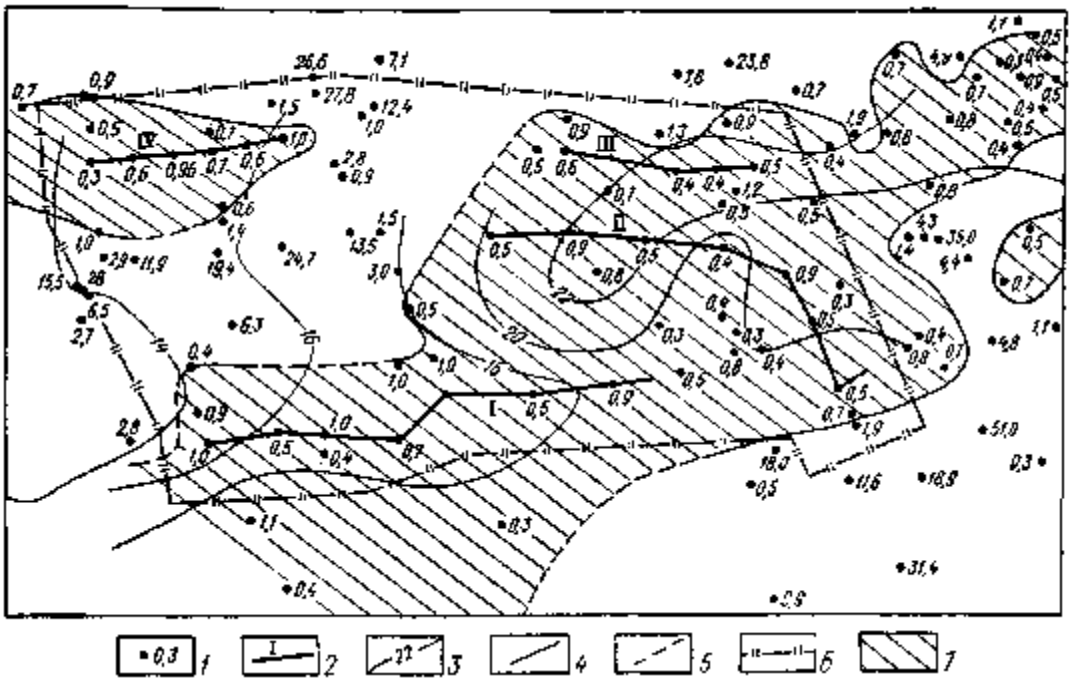



**Рис. 42. Линза пресных вод в песках:**

***1* — разведочная скважина и величина минерализации, г/дм$^3$; *2* — проектируемый линейный ряд водозаборных скважин и его номер; *3* — гидроизогипсы естественного потока и их отметки; *4, 5* — границы между пресными и минерализованными водами; *(4* — установленная; 5 — предполагаемая); *6* — граница третьего пояса ЗСО водозабора; 7 — линзы пресных вод**

Подсчет эксплуатационных запасов подземных вод выполнен гидродинамическим методом применительно к схеме безнапорного неограниченного водоносного горизонта с учетом взаимодействия скважин в рядах. Эксплуатационные запасы на 25 лет обеспечиваются осушением пласта; извлечение 30 % естественных запасов в контуре приведенного радиуса влияния водозабора дает примерно 12, тыс. м$^3$/сут. Естественные ресурсы, количество которых определено для условий маловодного года, достаточны для восполнения срабатываемых запасов подземных вод.

Для оконтуривания линз пресных вод выполнен большой объем разведочных работ, сопровождавшихся изучением изменения состава подземных вод водоносного горизонта по глубине и в плане. Линии водозаборных скважин намечены на участках, где при разведке были вскрыты воды с минерализацией от 0,3 до 1 г/л; средняя (по разведочным скважинам в ряду) минерализация для линейных рядов I — IV составила соответственно 0,75; 0,6; 0,5 и 0,7 г/л. По всем показателям вода удовлетворяет требованиям к питьевой воде, за исключением бактериальной загрязненности и высокого содержания во многих скважинах нитритов (часто до 2 мг/л) и аммиака (часто 2 и даже 7 мг/л), что связано с использованием земель для выпаса скота. В отдельных скважинах отмечены повышенные значения жесткости и концентрации железа и марганца.

В целях определения прогнозного состава воды для каждого линейного ряда скважин рассчитана область захвата на срок 25 лет. Расчет выполнен при вариантах возможности естественного потока подземных вод к водозабору с обеих сторон, что обусловлено невыдержанностью направления движения подземных вод в естественных условиях. Граница второго пояса для расчетного срока 400 сут проходит на расстоянии 150 м от линейных рядов, а граница третьего пояса — на расстоянии 1 — 1,6 км. Граница первого пояса находится на расстоянии 50 м от водозаборных скважин.

После оконтуривания зоны захвата на 25 лет (что соответствует границе третьего пояса ЗСО) оказалось, что к некоторым скважинам через шесть — десять лет будут подтянуты минерализованные воды. Прогнозная минерализация отбираемых водозабором подземных вод (1,1 г/л) была вначале определена как средняя взвешенная по площади с учетом минерализации воды во всех разведочных скважинах, входящих в область захвата. Однако, с учетом недостаточно полной изученности гидрохимических условий в области захвата скважин, входящих в состав линейных рядов I и частично IV, где также могут залегать минерализованные воды, а также вероятности ухудшения условий питания подземных вод после завершения строительства плотины на реке, подпитывающей временные водотоки, уточненная прогнозная минерализация отбираемых подземных вод оценена в размере до 1,5 г/л. Из-за отсутствия других источников хозяйственно-питьевого водоснабжения использование воды с минерализацией до 1,5 г/л и общей жесткостью до 10 мг-экв/л разрешено

органами здравоохранения с условием, что вода будет обеззараживаться. В связи с неоднородностью химического состава воды на отдельных участках водоносного горизонта, воду из всех линейных рядов рекомендовано смешивать перед подачей потребителям.

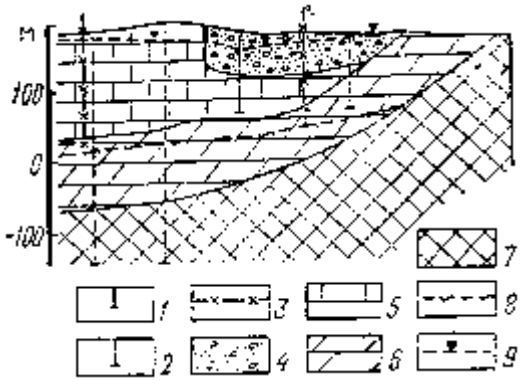



**Рис. 43. Гидрогеологический разрез участка водозабора в безнапорных трещинных подземных водах:**
**1 — водозаборная скважина; *2* — разведочная скважина; *3* — граница второго пояса ЗСО; *4* — аллювиальные четвертичные отложения (песок, галечник, супесь); 5 — верхнесоликамская подсвита уфимского яруса (плитчатые известняки, мергели); *6* — нижнесоликамская подсвита уфимского яруса (мергели и глины с прослоями песчаников, алевролитов и гипсов); 7 — нижнепермские отложения «уйгурского и артинского ярусов (алевролиты, песчаники, аргиллиты, глины и мергели); *8* — граница минерализации 1 г/дм$^3$ в нижнесоликамском водоносном горизонте; *9* — уровень подземных вод**

Строительство и эксплуатацию водозабора намечено начинать с линейного ряда II, как обеспеченного менее минерализованной водой. В проекте водозабора третий пояс ЗСО запроектирован общим для всего водозабора; на территории ЗСО запрещены выпас и проход скота, размещение животноводческих объектов. *Пример 5. Безнапорные трещинные подземные воды.* Проектируемый водозабор располагается в малообжитом районе; вода в количестве 75 тыс. м$^3$/сут предназначается для хозяйственно-питьевого водоснабжения города, удаленного на несколько десятков километров. Участок водозабора занимает основание коренного склона и зону сопряжения склона с дном широкой долины реки, протекающей по равнине в области развития трещиноватых пород пермского возраста (рис. 43). Четвертичные отложения, распространенные в основном по дну долины реки и по долинам ее многочисленных притоков, представлены рыхлыми делювиальными, элювиальными, ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями. Отложения верхней перми представлены уфимским ярусом верхнего отдела пермской системы; в соликамской свите P2Uisl выделяются верхнесоликамская $P_2Uisl_2$ (из-вестняково-мергелистая толща) и нижнесоликамская $P_2u_isl_1$ (глинисто-мергелистая толща) подсвиты. Для водоснабжения выбран первый от поверхности водоносный горизонт в отложениях верхнесоликамской толщи, содержащей прослои алевролита, реже песчаника, аргиллита и глин. Горизонт содержит безнапорные трещинные подземные воды, и лишь в дне долины под перекрывающими четвертичными отложениями воды становятся слабонапорными. Подземные воды верхнесоликамского горизонта пресные, хорошего качества, за исключением обнаруженного в некоторых разведочных скважинах повышенного до 1 мг/л содержания двух- и трехвалентного железа. В нижней части водоносного горизонта нижнесоликамской толщи содержатся минерализованные воды. Верхне- и нижнесоликамский водоносные горизонты разделены слабопроницаемыми прослоями глин и аргиллитов мощностью не менее 9 м; пьезометрический уровень верхнего горизонта выше уровня воды в нижнем горизонте. Из-вестняково-мергелистая толща очень неоднородна по фильтрационным и емкостным свойствам: коэффициент фильтрации изменяется по площади от 5 до 225 м/сут, а водопроводимость — от 500 до 11000 м$^2$/сут. Водозабор размещен по линии максимальной водопроводимости пород вдоль коренного склона долины. Определенные мощной групповой откачкой (30 тыс. м$^3$/сут) обобщенные гидрогеологические параметры участка водозабора составили: £т=6000 м$^2$/сут; а=3*10$^5$ м$^2$/сут; *м*=0,02.

Проектируемый водозабор намечен в виде линейного ряда, состоящего из 18 скважин и имеющего длину 10 км; проектная нагрузка на скважины составляет 40 — 50 л/с.

Источниками формирования эксплуатационных запасов подземных вод здесь являются атмосферные осадки, привлекаемая разгрузка водоносного горизонта в русла водотоков и в четвертичные отложения, а также привлекаемый транзитный сток реки. В связи со сложными гидрогеологическими условиями, обусловленными фильтрационной неоднородностью горизонта, невозможностью надежного определения границ горизонта и количественной оценки основных источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод, последние были определены методом экстраполяции темпа снижения уровня и расхода длительной групповой откачки с дебитом, составляющим 40 % производительности проектируемого водозабора. Для установления общей величины обеспеченных на расчетный срок эксплуатационных запасов подземных вод приближенно оценены привлекаемый расход естественной разгрузки в левобережные притоки реки (по гидрологическим наблюдениям), фильтрация из реки и сокращение испарения из болот.

Использован также метод гидрогеологической аналогии — фактические данные наблюдений при эксплуатации двух водозаборов, расположенных вблизи проектируемого в сходных геологических и

гидрогеологических условиях. На водозаборах-аналогах ухудшение качества подземных вод наблюдалось только по немногим скважинам, которые были заглублены в нижне-соликамскую толщу. Учитывая это обстоятельство, забой скважин на проектируемом водозаборе предусматривается размещать значительно выше границы раздела пресных и минерализованных вод.

Ухудшение качества воды может произойти в связи с увеличением содержания железа из-за привлечения к водозабору подземных и поверхностных вод с участков развития болот, занимающих 15 % площади питания водозабора; поэтому в проекте водозабора предусмотрено обезжелезивание воды, хотя при изысканиях железо в воде обнаружено в количестве менее ПДК.

Граница первого пояса ЗСО водозабора должна находиться на расстоянии 50 м от скважин, поскольку водоносный горизонт не защищен от поверхностного загрязнения. Расчет границы второго пояса выполнен аналитическим методом соответственно указаниям, содержащимся в главах 9 и 10, в двух вариантах — с учетом питания из реки и без него. Использованы следующие расчетные параметры: единичный расход естественного потока $q$= = kmi=600*0,01=6 м$^2$/сут, единичный расход водозабора на наиболее нагруженных участках 12 м$^2$/сут, средняя мощность горизонта 56 м, активная пористость 0,02, расстояние до реки 1,25 — 4 км. При расчетном сроке $T_м$ = *400* сут граница второго пояса должна проходить на расстоянии 2,5 км от водозабора (см. рис. 43).

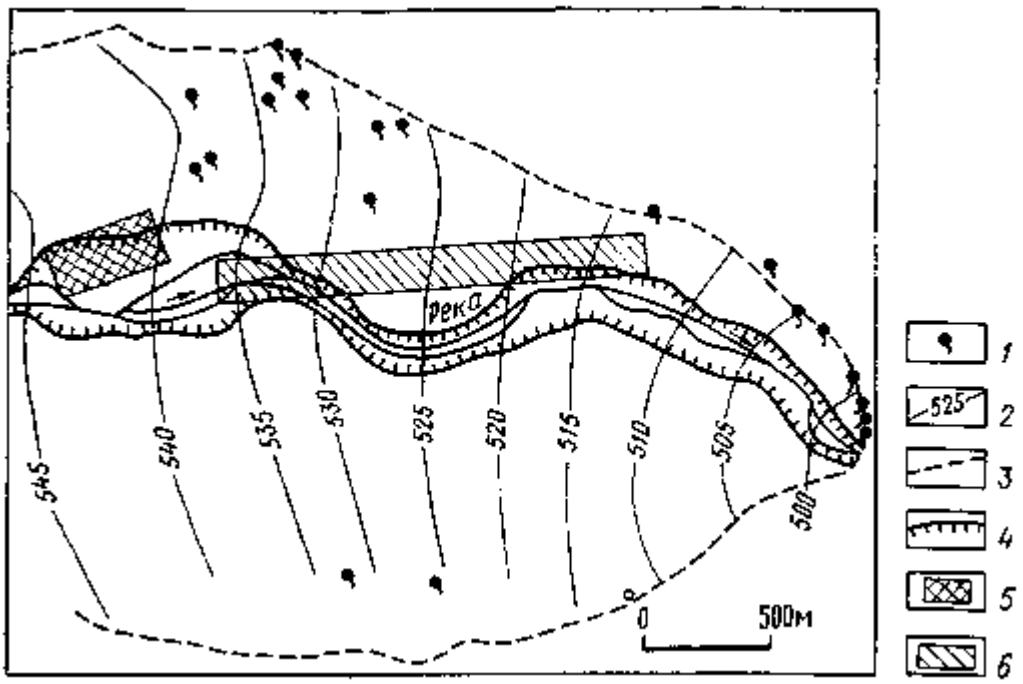



**Рис. 44. Использование подземных вод аллювиально-пролювиальных галечников в межгорной долине:**

***1* — родники; 2 — гидроизогипсы и их отметки; *3, 4* — контуры распространения *(3* — четвертичных отложений, *4* — галечников современного русла и поймы реки); 5 — птицеферма; *6* — водозабор**

Границы третьего пояса ЗСО, охватывающего большую территорию с существенно неоднородными гидрогеологическими параметрами, определены с использованием общих представлений о возможных размерах области захвата рассматриваемого водозабора. Учитывая условия питания водоносного горизонта, которое происходит в основном за счет инфильтрации атмосферных осадков практически на всей площади его распространения, и результаты групповой откачки, показавшие, что влияние водо-отбора только в течение одного месяца распространилось на расстояние более 5 км вдоль долины, в состав третьего пояса включили всю территорию участка, ограниченного ближайшими водоразделами по правому и левому бортам долины (см. рис. 43). Организация ЗСО практически не потребует затрат, поскольку на участке нет действующих или потенциальных источников загрязнения подземных и поверхностных вод. Создаваемые зоны будут иметь сугубо предупредительное значение.

*Пример 6. Использование подземных вод аллювиально-пролю* виальных галечников в межгорной долине.* Межгорная долина, по которой протекает река, выполнена мощной толщей водоносных четвертичных и неогеновых отложений. В нижней части долины, в области разгрузки подземных вод крупными родниками, намечено строительство береговых водозаборов большой производительности (рис. 44). По данным предварительной разведки, в разрезе толщи сверху вниз залегают: 1) безнапорный водоносный горизонт в современных аллювиальных отложениях поймы и I надпойменной террасы (галечники с песчаным заполнителем). Мощность горизонта достигает 10 м в прирусловой части долины и уменьшается в глубь берегов до 4 м и менее; 2) слабопроницаемые верхнечетвертичные аллювиально-пролюви-альные галечники с суглинистым

заполнителем, мощность слоя 20 — 30 м; 3) напорные подземные воды в верхне-, средне- и нижнечетвертичных отложениях, залегающих на глубине 30 — 70 м. Коэффициент фильтрации верхнего безнапорного водоносного горизонта 80 — 150 м/сут, а нижней напорной толщи 5 — 23 м/сут. Средний коэффициент фильтрации 60-метровой толщи, включающий указанные три слоя, составляет примерно 30 м/сут Проект водозабора разработан в двух вариантах: 1) вертикальный скважинный левобережный с расчетным расходом 2 $м^3$/с. 40 скважин размещаются на левом берегу в 70 — 100 м от реки; расстояние между скважинами 50 м, длина линейногс ряда 2200 м, глубина скважин 70 м; 2) горизонтальный с дренами на правом и левом берегах. Максимальные расходы дрены на левом берегу — до 69 тыс. $м^3$/сут, на правом берегу — дс 77 тыс. $м^3$/сут. В зависимости от расходов и уровней воды Е реке расходы дрен могут изменяться. Длина продольной несовершенной дрены на левом берегу составляет 2500 м, на правом берегу — 2700 м; кроме того, предусматривается создание коротких поперечных дрен длиною по 200 — 400 м. Глубина заложения дрен 6 — 7 м. Эксплуатационные запасы подземных вод в районе рассматриваемого водозабора формируются в основном за счет расхода реки и разгрузки подземного потока вблизи водозаборного участка.

В связи с недостаточной изученностью режима неравномерного стока реки (расходы реки изменяются в течение года от более чем 4 до 1 $м^3$/с), величины отбора речных вод на орошение, родникового стока, а также гидрогеологических параметров водоносного горизонта, схема и производительность водозабора будут уточнены после проведения детальной разведки. Однако независимо от этих уточнений препятствием к строительству водозабора является его близкое расположение от участка, на котором начато строительство крупной птицефермы. Строящаяся птицеферма находится на берегу реки выше водозабора, на расстоянии всего 250 — 300 м от первой проектной водозаборной скважины или начала горизонтальной дрены.

Первый пояс ЗСО здесь должен быть установлен так, как это предусматривается для недостаточно защищенных подземных вод, т. е. на расстоянии не менее 50 м от водозабора с учетом площади, предназначенной для перспективного развития водозабора. В первый пояс должна быть включена также вся прибрежная территория между водозабором и рекой.

Гидрогеологический расчет размеров второго и третьего поясов ЗСО проведен по выражениям (92) — (94) с учетом уклона естественного потока, направленного вдоль реки и достигающего значения 0,01; значение активной пористости условно принято равным 0,3. Территория второго пояса имеет вид прямоугольника, вытянутого вдоль реки; ширина его *2d* отсчитывается от реки, длина $L=l_1+2l+l_2$ (где *21* — длина водозабора, $1_1$ — расстояние вверх по потоку от начала водозабора, $l_2$ — расстояние вниз по потоку от конца водозабора). Для горизонтального левобережного водозабора 2d=250 м, $l_1$ = 2000 м, $l_2$=50 м; для горизонтального правобережного водозабора 2d=300 м, $l_1$=1000 м, $l_2$ = 50 м.

Таким образом, строящаяся птицеферма оказывается расположенной во втором поясе ЗСО, что недопустимо, поскольку такие объекты, как показывает практика, очень часто становятся источниками загрязнения подземных вод не только микробами и органическими веществами, но и азотсодержащими химическими соединениями; по этой причине птицеферма должна быть вынесена и из третьего пояса ЗСО. Поступление азота и органических веществ к водозабору в рассматриваемом случае может происходить различными путями: а) по поверхности земли с ливневым стоком, поскольку ферма располагается на более высоких отметках поверхности; б) по водоносному горизонту при фильтрации загрязненных сточных и ливневых вод в грунты; в) из реки, если в нее будут поступать загрязненные сточные воды птицефабрики и загрязненный пометом поверхностный сток.

При скважинном варианте водозабора загрязнение подземных вод от птицефабрики также не исключено, так как в водозабор будут поступать подземные воды из верхнего безнапорного горизонта и из реки. В данной ситуации предстоит трудный выбор — продолжить строительство птицефермы и отказаться от использования подземных вод или прекратить начатое строительство и строить водозабор.

Этот пример иллюстрирует возможность экономического ущерба и нерационального использования природных ресурсов при несогласованной работе органов, выделяющих территории для разведки подземных вод и строительства объектов — потенциальных источников загрязнения подземных и поверхностных вод.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

## Формулы и графики для расчета параметров ЗСО

| Схема фильтрации (рис.) | Обозначение параметра | Номер формулы | График, таблица | Безразмерные параметры |
|---|---|---|---|---|
| *Водозаборы в удалении от поверхностных водотоков* | | | | |
| Сосредоточенный водозабор (14) | $x_р$ | 20 | — | $\bar{T}=qT/(mnx_р)$; |
| | $R$ | 22 | Рис. 15, табл. 8 | $\bar{R}=R/x_р$; |
| | $r$ | 23 | | $\bar{r}=r/x_р$; |
| | $d$ | 27—29 | | $\bar{d}=d/x_р$; |
| Линейный водозабор (16) | $R$ | 36—40 | Рис. 17, табл. 10 | $\bar{R}=R/l$; |
| | | | | $\bar{d}=d/l$; |
| | $r$ | 41—42 | Рис. 17, табл. 11 | $\bar{q}=(2\pi ql)/Q$; |
| | $d$ | 43—44 | Рис. 18 | $\bar{T}=QT/(mnl^2)$; |
| | | | | $\bar{r}=r/l$; |
| | | | | $\bar{r}^*=\bar{r}/\operatorname{ctg}\bar{q}$ |
| Сосредоточенный водозабор с перетеканием (19) | $x_р$ | 47 | Рис. 20 | $\bar{x}_р=(2\pi qx_р)/Q$; |
| | $R$, $\Delta R$ | — | Рис. 21 табл. 12 | $\bar{r}=(2\pi qr)/Q$; |
| | | | | $\bar{T}=(2\pi q^2T)/(Qmn)$; |
| | $\bar{r}$ | — | Рис. 22, табл. 13 | $\bar{R}=(2\pi qR)/Q$; |
| | | | | $\bar{Q}=Q/(2\pi qB)$; |
| | | | | $\Delta\bar{R}=(2\pi q\Delta R)/Q$ |
| *Береговые водозаборы* | | | | |
| Сосредоточенный водозабор: 1) естественный поток к реке $\bar{Q}\leqslant 1$ (24, а) | $x_р$ | 48 | — | $\bar{x}_р=x_р/x_0=\sqrt{1-\bar{Q}}$; |
| | $R$, $\Delta R$, $R_q$ | 55—57 | Рис. 25, *а* | $\bar{d}=d/x_0$; |
| | | | | $\bar{Q}=Q/(\pi qx_0)$; |
| | $r$ | 58 | Рис. 25, *б* | $\bar{R}=R/x_0$; |
| | $d$ | 59 | — | $\bar{r}=r/x_0$; |
| | | | | $\bar{T}=qT/(mnx_0)$; |
| | | | | $\bar{R}_q=R_q/x_0$; |
| | | | | $\Delta\bar{R}=\Delta R/x_0$ |

## Продолжение прилож.

| Схема фильтрации (рис.) | Обозначение параметра | Номер формулы | График, таблица | Безразмерные параметры |
|---|---|---|---|---|
| $\bar{Q} > 1$ (24, *б*) | $y_р$, $Q_р$ $Q_е$ | 60 | Табл. 14 | $\bar{y}_р = y/x_0$; $\bar{Q}_р = Q_р/qx_0$; |
| | $r$ | 61 | Рис. 25, *в* | $\bar{Q}_е = Q_е/qx_0$; $\bar{d} = d/x_0$; |
| | $T_{реч}$ | 62 | — | $\bar{T}_1 = \bar{T}\bar{Q} = QT/(\pi mnx_0^2)$; |
| | $R$, $\Delta R$, $R_Q$ | 63 | Рис. 26, *б* | $\bar{T} = qT/(mnx_0)$; $\Delta\bar{R} = \Delta R/x_0$; |
| | $d$ | — | Рис. 26, *а* | $\bar{q} = (\pi x_0 q)/Q = 1/\bar{Q}$; |
| | $d_{max}$ | 65 | — | $\bar{r} = r/x_0$; $\bar{d} = d/x_0$; |
| 2) естественный поток отсутствует (27) | $R$ | 66 | Рис. 28, *б* | $\bar{r} = r/x_0$; $\bar{R} = R/x_0$; |
| | $r$ | 67 | Рис. 28, *а* | $\bar{T}_1 = \bar{Q}\bar{T} = QT/(\pi mnx_0^2)$; |
| | $T_{реч}$ | 68 | — | $\bar{d} = d/x_0$ |
| | $d$ | — | Рис. 28, *в*. Рис. 28, *г* | |
| 3) естественный поток от реки (29) | $x_р$ | 69 | — | $\bar{R} = R/x_0$; $\bar{Q} = Q/(\pi q x_0)$; |
| | $R$, $\Delta R$ | 70 | Рис. 30, *а* | $\bar{r}_2 = r(x_р - x_0)$; |
| | $T_{реч}$ | 71 | — | $\bar{T}_2 = qT/[mn(x_р - x_0)]$; |
| | $r$ | 72 | Рис. 30, *б* | $\bar{q} = (\pi x_0 q)/Q = 1/\bar{Q}$; |
| | $d$ | — | Рис. 30, *в* | $\bar{x}_р = \sqrt{1+\bar{Q}}$; $\bar{d} = d/x_0$ |

Продолжение прилож.

| Схема фильтрации (рис.) | Обозначение параметра | Номер формулы | График, таблица | Безразмерные параметры |
|---|---|---|---|---|
| 4) естественный поток параллелен реке (31) | $\Delta R$ | 76 | Рис. 32 | $\bar{Q}_e = Q_e/(\pi q x_0)$; |
| | $r$ | 77 | — | $\bar{T} = qT/(mnx_0)$; |
| | $d$ | 59 | — | $\bar{Q}_0 = Q_0/(\pi q x_0)$; $\Delta\bar{R} = \Delta R/x_0$; $\bar{q} = (\pi x_0 q)/Q = 1/\bar{Q}$ |
| Линейный водозабор: 1) естественный поток к реке (33, *а*) | $Q_e$ | 78 | Рис. 34, *а* | $\bar{l} = l/x_0$; |
| | $\bar{y}_p$ | 79 | — | $\bar{y}_p = y_p/x_0$; |
| | $R$, $\Delta R$ | 80 | Рис. 34, *б* | $\bar{Q}_э = \bar{Q}/\bar{l}^2 = Qx_0/(\pi q l^2)$; |
| | $r$ | 81 | — | $\bar{T}_э = \frac{Tq}{mnl} + \frac{x_0}{l(1+\bar{Q})}$; |
| | $T_{реч}$ | 82 | — | |
| | $d$ | 83 | — | $\Delta\bar{R}_э = \frac{\Delta R}{l} + \frac{\bar{Q}x_0}{l(1+\bar{Q})}$; |
| | $d_1$, $d_2$ | — | Рис. 26, *а* | $\Delta\bar{R} = \Delta R/x_0$; |
| | $\varphi^*$ | — | Табл. 15 | $\bar{Q}_e = Q_e/Q$. |
| 2) естественный поток отсутствует (33, *б*) | $R$ | 84 | Рис. 34, *в* | $\bar{l} = l/x_0$; |
| | $r$ | 85 | — | $\bar{T}_4 = QT/(\pi mnl^2) = \bar{Q}\bar{T}/\bar{l}^2$; |
| | $T_{реч}$ | 86 | — | $\bar{R} = R/l$; |
| | $d$ | 83 | — | $\bar{y}_p = y_p/l$ |
| | $d_1$, $d_2$ | — | Рис. 28, *в* | |
| | | | Рис. 28, *г* | |
| 3) естественный поток от реки (33, *в*) | $x_p$ | 87 | — | $2\bar{l}/\bar{Q} = (2\pi q l)/Q$; |
| | $y_p$ | 88 | Рис. 34, *г* | $\bar{x}_p = x_p/x_0$; |
| | $R$ | 89 | — | $\bar{l} = l/x_0$; |

Продолжение прилож.

| Схема фильтрации (рис.) | Обозначение параметра | Номер формулы | График, таблица | Безразмерные параметры |
|---|---|---|---|---|
| 3) естественный поток от реки (33, в) | $T_{реч}$ | 90 | — | $\bar{q}_5 = \bar{q}l^2 = (\pi l^2 q)/(Qx_0)$; |
| | $r$ | 91 | Рис. 34, д | $\bar{T}_5 = \frac{x_0 QT}{\pi m n l^2} + \frac{x_0}{l(1-\bar{q}_5)}$; |
| | $d$ | 83 | — | $\bar{r}_5 = (r+x_0)/l$; |
| | $d_1 d_2$ | — | Рис. 30, в | $\bar{q} = (\pi x_0 q)/Q$ |
| 4) естественный поток параллелен реке (33, г) | $y_p$, $r$ | 92, 93 | — | $\bar{R}_6 = (R-l)/(2x_0\sqrt{\bar{Q}_6}) =$ |
| | $R$ | 94 | Рис. 34, е | $= (\bar{R}-\bar{l})/\sqrt{\bar{Q}/\bar{l}}$; |
| | $d$ | 84 | Рис. 34, в | $\bar{Q}_6 = Q/(4\pi q l) = \bar{Q}/4\bar{l}$; |
| | | | | $\bar{T}_6 = Tq/(2\pi x_0\sqrt{\bar{Q}_6}) = \bar{T}\sqrt{\bar{l}}/\sqrt{\bar{Q}}$ |

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Бочевер Ф. М., Орадовская А. Е.* Гидрогеологическое обоснование защиты подземных вод и водозаборов от загрязнения. М., Недра, 1972.

2. *Бочевер Ф. М. Орадовская А. Е.* О санитарной охране водозаборов подземных вод. — Разведка и охрана недр, 1977, № 5, с. 35 — 38.

3. *Бочевер Ф. М., Лапшин Н. Н., Орадовская А. Е.* Защита подземных вод от загрязнения. М., Недра, 1979.

4. *Бузаев В. В.* Методы прогноза миграции солей в слоистых водоносных пластах. — Автореф., канд. дисс. М., 1982.

5. *Веригин Н. Н., Шержуков Б. С.* Диффузия и массообмен при фильтрации жидкостей в пористых средах. — В кн.: Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917 — 1967). М., 1969, с. 237 — 313.

6. *Временные методические* указания по производству химико-аналитических исследований при поисках и разведке подземных вод хозяйственно-питьевого назначения/ И. Ю. Соколов, М. С. Галицин, Л. С. Язвин, С. Р. Крайнев — М., 1976 (ВСЕГИНГЕО).

7. *Гидрогеологические* основы охраны подземных вод. ЮНЕСКО-ЮНЕП. Центр международных проектов ГКНТ СССР. М., 1984.

8. *Гидродинамические* и физико-химические свойства горных пород / Н. Н. Веригин, С. В. Васильев, В. С. Саркисян, Б. С. Шержуков — М.. Недра, 1977.

9. *Гладышев Ю. А., Куликов А. Н.* Об особенностях работы водозаборных скважин при наличии загрязненных областей или загрязненных водных бассейнов — Проблемы теоретической гидродинамики, 1977, № 4, с. 10 — 18.

10. *Гольдберг В, М.* Гидрогеологические прогнозы движения загрязненных подземных вод. М., Недра, 1973.

11. *Гольдберг В. М.* Гидрогеологические прогнозы качества подземных вод на водозаборах. М., Недра, 1976.

12. *Гольдберг В. М.* Методические рекомендации по гидрогеологическим исследованиям и прогнозам для контроля за охраной подземных вод. М., 1980 (ВСЕГИНГЕО).

13. *Лапшин Н. Н., Орадовская А. Е.* Рекомендации по гидрогеологическим расчетам для определения границ второго и третьего поясов зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. М., 1983 (ВНИИ ВОДГЕО).

14. *Лукнер Л., Шестаков В. М.* Моделирование миграции подземных вод. М., Недра, 1986.

15. *Методические* указания по организации и проведению наблюдений и контроля за загрязнением поверхностных вод суши в системе Общегосударственной службы наблюдений и контроля за загрязнением объектов окружающей среды (ОГСНК). М., Гидрометеоиздат, 1977.

16. *Минкин Е. Л.* Исследования и прогнозные расчеты для охраны подземных вод. М., Недра, 1972.

17. *Минкин Е. Л.* Взаимосвязь подземных и поверхностных вод и ее значение при решении некоторых

гидрогеологических и хозяйственных задач. М., Стройиздат, 1973.

18. *Мироненко В. А., Румынии В. Г., У чаев В.* /С. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах. Л., Недра, 1980.

19. *Мироненко В. А., Румынии В. Г.* Теоретические основы опытно-миграционных исследований в водоносных пластах. — Изв. вузов, Геология и разведка, 1985, № 7, с. 65 — 74.

20. *Общесоюзные нормы* технологического проектирования систем удаления. обработки, обеззараживания, хранения и утилизации навоза и помета, АНТП17-77, М., 1977 (Минсельхоз СССР).

21. *Орадовская А. Е., Моложавая Е. И.* Миграция микробных загрязнений в подземных водах. М. Тр. ВОДГЕО, 1977, вып. 63, с. 70 — 77.

22. *Основы, гидрогеологии.* Использование и охрана подземных вод/ Н. А. Маринов, А. Е. Орадовская, Е. В. Пинекер и др. — Новосибирск, Наука, 1983.

23. *Оценка* изменения гидрогеологических условии под влиянием производственной деятельности/ Под ред. В. М. Фомина. — М., Недра. 1978.

24. *Положение* о порядке проектирования и эксплуатации зон санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно-питьевого назначения М., 1983 (Минздрав СССР).

25. *Проектирование* водозаборов подземных вод/ Под ред. Ф. М. Бочеве-ра. — М., Стройиздат, 1976.

26. *Рекомендации* по проектированию и эксплуатации систем искусственного пополнения запасов подземных вод (ИППВ). М., 1976, (ВНИИ ВОДГЕО).

27. *Решение задачи* о прогнозе изменения качества подземных вод в процессе эксплуатации в сложных гидрохимических условиях на ЭВМ ЕС/ Б. В. Боревский, А. А. Плетнев, Т. А. Плугина и др. — В кн.: Математическое моделирование гидрогеологических процессов (Тезисы докладов к научно-техническому семинару 8-11 июня 1981 г.). М., 1981 г., с. 56 (ВСЕГИНГЕО).

28. *Рошаль А. А.* Полевые методы определения миграционных параметров (Обзор ВИЭМС). — Гидрогеология и инженерная геология, 1980.

29. *Руководство* по проектированию сооружений для забора подземных вод. М., Стройиздат, 1978.

30. *Шестаков В. М.* Динамика подземных вод. М., Изд-во МГУ, 1979.

31 *Aquifer* contamination and protection. ProjeKt 8.3 of the International Hyd-rological Programme. Stud, and Repts. Hydrol., 1980 N 30, pp. 1-440.

32 *Anderson M P* Using models to simulate the movement of contamants through groundwater flow systems. CRC Grit. Rev. Environ. Contr., 1979, 9, N 2, pp. 97-156.

*33Bition G, Farrah S. R., Ruskin R. H.* Survival of pathogenic and indicator microorganisms in ground water. Ground Water, 1983 v. 21, N 4, pp. 405-410. 34. *Bredehoeft D. I., Finder G. F.* Mass transport m flowing groundwater. Water Resources Research. 1973, 9, pp. 194 — 210.

35 *Cartwright K-, Gilkeson R. H., Griffen R. A.* Hydrogeologic considerations in hazardouswaste disposal in Illinois. Environ. Geol. Notes. 111. State Geol. Surv., 1981, N 94. 20 pp.

36 *Forth I R* Modelling of nitrate transport in a regional groundwater system in South: Australia. Austral. Water Resour. Counc. Conf. Sen, 1981, N 1, pp. 101 — 118.

37 *Grove D B Beetem W. A., Sower F. B.* Fluid travel time between a recharging and discharging well pair in an aquifer having a uniform regional flow field. Water resourcis research, 1970. vol. 6, No. 5, pp. 1404-1410.

38. *Keswick B. H., Gerba C. P.* Viruses in groundwater. Enwiron. Sci. Technol., 1980, v. 14, pp. 1290 — 1297.

39 *Klotter H. E.* Moglichkeiten zur Demtnfikation von Grandwassern. Vom Wasser, 1969, Weinheim/Bergster, 1970, Bd. 36, 93 — 140

40 *MacFarlane D. S., Cherry J. A., Gillham R. W.* Migration of contaminants in grundwater at a landfill: A case study, I. Groundwater flow and plume delineation. J. Hydrol., 1983, 63, pp. 1-29.

41 *Met gods* and techniques of contaminant hydrogeology. Stud, and Repts Hydrol., 1980, N 30, pp. 124 — 190.

42. *Miller C. W., Benson L. V.* Simulation of solute transport m a chemically reactive heterogeneous system: model development and application. Water Resour. Res., 1983, 19, N 2, pp. 381 — 391. .

43 *Pelican X.* Hydraukic protection of ground waters against oil substances. Mezinar. symp. o znecist. podzemn. vod ropnymi uhlovod., Praha, 1978, Sb. pfed-nas. Praha, s. a., 61 — 71.

44 *Pekdeger A., Matthess G.* Factors of bacteria and virus transport m groundwater. Environ. Geol., 1983, v. 5, N 2 pp 49 — 52.

45 *Rubin Y Rubin H.* The development and use a simplified method for the simulation of mineralization processes in aquifers. «Hydrosoft 84: Hydraulic, Eng., Software Proc. Int. Conf., Portoroz, Sept. 10 — 14, 1984». Amsterdam e. a., 1984, 4/27 — 4/40.

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

Предисловие
**Глава 1. Охрана подземных вод в СССР**
**Глава 2. Оценка качества подземных вод используемых для водоснабжения**
**Глава 3. Состав подземных вод, используемых для водоснабжения .**
Подземные воды в природных условиях и при эксплуатации водозаборов
Причины антропогенных изменений качества подземных вод
Естественная защищенность водоносных горизонтов от поверхностного загрязнения
**Глава 4. Распространенные загрязнители воды в действующих водозаборах**
Нефтепродукты и нефть
Нитраты
Органические синтетические вещества
Микробиологическое загрязнение
Повышенные минерализация и общая жесткость
**Глава 5. Методы прогноза качества подземных вод на водозаборах**
**Глава 6. Санитарно-технические требования к устройству водозаборных сооружений**
**Глава 7. Улучшение качества подземных вод обработкой их в водоносном горизонте**
**Глава 8. Мероприятия по охране качества подземных вод**
**Глава 9. Гидрогеологическое обоснование границ зон санитарной охраны водозаборов подземных вод**
Принципы выделения и структура зон санитарной охраны водозаборов подземных вод
Водоохранные мероприятия на территории зон санитарной охраны водозаборов
Основы методики расчета зон санитарной охраны
**Глава 10. Аналитические методы расчета зон санитарной охраны водозаборов подземных вод**
Расчет ЗСО водозаборов, находящихся в удалении от поверхностных водотоков
Водозабор в изолированном водоносном горизонте
Водозабор в водоносном горизонте с перетеканием
Расчет ЗСО береговых водозаборов подземных вод
Некоторые особенности фильтрации к береговым водозаборам
Сосредоточенный береговой водозабор
Линейный береговой водозабор
Учет фильтрационного несовершенства речного русла при расчетах зон санитарной охраны
Графоаналитический метод построения зон санитарной охраны
**Глава 11. Примеры гидрогеологического обоснования зон санитарной охраны проектируемых и действующих водозаборов подземных вод**
**Приложение**
**Список литературы**

**ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ**

**Анна Ефимовна Орадовская Николай Николаевич Лапшин**

**САНИТАРНАЯ ОХРАНА ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Редактор издательства *О. Л. Виноградова*
Обложка художника *А. Е. Григорьева*
Художественный редактор *В. В. Шутько*
Технический редактор *Е. С. Сычева*
Корректоры *Н. А. Громова, К. И. Савенкова*

ИБ № 5915

Сдано в набор 26.12.86. Подписано в печать 27.02.87 Т.01 572

Формат 60 X 90 1/18. Бумага типографская № 2 Гарнитура Литературная
Печать высокая Усл. печ. л. 10,50. Усл.-кр-отт. 10,75. Уч.-изд. л. 12.20. Тираж 4300 экз. Заказ 5383/239-4. Цена 60 коп.
Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 125047, Москва, пл. Белорусского вокзала, 3.
Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова» Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113054, Москва, Валовая, 28.

OCR Pirat