

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И НЕФТЕГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
Кафедра общей геологии и гидрогеологии

Р. Х. МУСИН

ОЦЕНКА ЗАЩИЩЁННОСТИ
ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Учебно-методическое пособие

Казань-2022

УДК 556.3
ББК 26.35

*Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией ИГиНГТ
Протокол № 2 от 2 ноября 2022 года*

Рецензент:

кандидат геолого-минералогических наук,
доцент кафедры общей геологии и гидрогеологии **Ф. А. Муравьев**

Мусин Р. Х.

Оценка защищённости подземных вод от загрязнения: учебно-методическое пособие /Р. Х. Мусин. – Казань: Казан. ун-т, 2022. – 38 с.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов специальности (профиля подготовки) “Гидрогеология и инженерная геология”. Оно будет использоваться при изучении курса “Гидрогеоэкология”. В работе рассматриваются современные подходы к оценке защищённости подземных вод от загрязнения и подробно описывается широко используемая в России методика В. М. Гольдберга. Пособие позволит студентам самостоятельно проводить районирование территорий по степени защищённости подземных вод от загрязнения при проведении собственных исследований и составлении квалификационных работ. Учебно-методическое пособие также может быть полезным для студентов-бакалавров и магистрантов и других специальностей.

© Мусин Р. Х., 2022

© Казанский университет, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| Глава 1. ФАКТОРЫ ЗАЩИЩЕННОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ПОДХОДЫ К ЕЁ ОЦЕНКЕ | 6 |
| Глава 2. ОЦЕНКА ЗАЩИЩЁННОСТИ ГРУНТОВЫХ ВОД | 12 |
| 2.1. Качественная оценка защищенности грунтовых вод | 12 |
| 2.2. Количественная оценка защищенности грунтовых вод | 15 |
| Глава 3. ОЦЕНКА ЗАЩИЩЁННОСТИ НАПОРНЫХ ВОД | 20 |
| 3.1. Качественная оценка защищенности напорных вод | 21 |
| 3.2. Количественная оценка защищенности напорных вод | 24 |
| Глава 4. ПРИМЕРЫ ОЦЕНОК ЗАЩИЩЁННОСТИ ГРУНТОВЫХ И НАПОРНЫХ ВОД | 26 |
| 4.1. Качественная оценка защищённости грунтовых вод | 28 |
| 4.2. Количественная оценка защищённости грунтовых вод | 28 |
| 4.3. Качественная оценка защищённости напорных вод | 31 |
| 4.4. Количественная оценка защищённости напорных вод | 32 |
| Глава 5. ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД К ЗАГРЯЗНЕНИЮ | 32 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 37 |
| ЛИТЕРАТУРА | 37 |

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных экологических проблем современного мира является ресурсный кризис. К кризисным (ограниченным) ресурсам в большой степени относятся и природные пресные воды. В настоящее время недостаток пресной воды отмечается на 60 % площади континентов. Не менее 2 миллиардов людей страдают от недостатка питьевой воды. От употребления некачественной воды ежегодно умирают 20 миллионов человек [7].

Недостаток пресной воды обусловлен в основном следующими тремя факторами – природными условиями (аридные зоны), нерациональным использованием вод питьевого качества, загрязнением природных вод.

Под загрязнением понимается вызванное хозяйственной деятельностью изменение качества воды (физических, химических, биологических свойств) в сравнении с естественным состоянием и нормами качества воды по видам водопользования [4]. В большинстве случаев понятие “загрязнение” используют в отношении вод хозяйственно-питьевого назначения. В этом случае их загрязнение означает такое изменение качества, которое привело или может привести к ограничению или невозможности использования воды в питьевых целях без водоподготовки.

В настоящее время существенному загрязнению подвергнуты не только поверхностные, но и подземные воды. Так, в России к началу XXI в. были загрязнены около 70% объёма поверхностных и около 30% объёма пресных подземных вод [7]. Учитывая, что подавляющий объём пресных вод сосредоточен в ледниках и в верхней части разреза земной коры (доля поверхностных пресных вод не превышает 1%), вопросам охраны пресных подземных вод от загрязнения и истощения уделяется пристальное внимание практически во всех странах.

Пресные подземные воды могут подвергнуться загрязнению за счет инфильтрации каких-либо сточных вод с поверхности (пруды-отстойники, полигоны промышленных и бытовых отходов, и т.д., это так называемое

загрязнение “сверху”) или восходящего перетекания из зон развития соленых и рассольных вод (очень широко распространено на площадях нефтяных месторождений, разрабатываемых с поддержанием пластового давления, это загрязнение “снизу”). Преобладающим является загрязнение “сверху”.

Загрязняющие вещества с земной поверхности на уровень подземных вод попадают либо через какое-то определенное время (при этом возможна трансформация загрязняющих веществ), либо они задерживаются в зоне аэрации (т.е. вообще не попадают в подземные воды). В связи с этим, подземные воды обладают некоторой защищённостью от поверхностного загрязнения. Условия защищённости должны изучаться при любом хозяйственном освоении территорий, проектировании промышленных, сельскохозяйственных и иных объектов, при обосновании мероприятий по защите подземных вод и водозаборов от загрязнения.

В России для характеристики защитных свойств окружающей среды в отношении загрязнения подземных вод в основном используется понятие “защищённость подземных вод”, а в Европе и Северной Америке – “уязвимость подземных вод”.

Защищённость подземных вод – это свойства природной системы, позволяющие сохранить на прогнозируемый период состав и качество подземных вод, соответствующими требованиям их практического использования [7, 8].

Уязвимость подземных вод – природные свойства системы подземных вод, позволяющие справляться с природными процессами и техногенными воздействиями [8, 10].

Понятие “защищённость подземных вод” является обратным понятию “уязвимость подземных вод”. Чем выше защищённость подземных вод, тем меньше их уязвимость загрязнению.

Проблеме защищённости подземных вод большое внимание уделял Валентин Михайлович Гольдберг. Он первым в бывшем Советском Союзе разработал методику качественной и количественной оценки защищённости

грунтовых вод [5]. Она впоследствии была дополнена качественной и количественной оценкой защищённости и напорных подземных вод [4]. Данные методики ориентированы на оценку защищённости подземных вод от поверхностного загрязнения и до сих пор очень широко используются в России.

В данном учебно-методическом пособии рассматриваются основные факторы, определяющие защищённость подземных вод от загрязнения, разработки Гольдберга В. М. в отношении оценок защищённости грунтовых и напорных вод, а также подходы европейских и американских гидрогеологов к оценке уязвимости подземных вод к загрязнению.

Глава 1. ФАКТОРЫ ЗАЩИЩЕННОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ПОДХОДЫ К ЕЁ ОЦЕНКЕ

Защищённость подземных вод от проникновения в них загрязняющих веществ с поверхности земли (загрязнение “сверху”) зависит от многих факторов. Гольдберг В.М. эти факторы подразделяет на три группы – природные, техногенные и физико-химические [4, 5].

Основные природные факторы – глубина залегания подземных вод; мощность, литология и фильтрационные свойства пород, перекрывающих водоносный горизонт; поглощающие (сорбционные) свойства пород; соотношение уровней исследуемого и вышележащего водоносных горизонтов.

Важнейшее значение имеет наличие слабопроницаемых пород в кровле водоносных горизонтов. Под слабопроницаемыми породами понимаются те, у которых коэффициенты фильтрации меньше 0,1 м/сут. Такие коэффициенты фильтрации характерны для глинистых песков, супесей, суглинков, глин, слабо трещиноватых скальных пород. Приблизённо можно считать, что глинистым пескам, супесям и лёгким суглинкам соответствуют коэффициенты фильтрации в диапазоне 0,01-0,1 м/сут, тяжёлым суглинкам и песчанистым глинам – 0,001-0,01 м/сут, глинам – менее 0,001 м/сут.

В общем, роль основных природных факторов может быть выражена следующим образом. Защищённость подземных вод от загрязнения “сверху” тем выше, чем на большей глубине они залегают и чем надёжнее перекрыты слабопроницаемыми отложениями (чем больше мощность и ниже фильтрационная способность слабопроницаемых пород).

Основные техногенные факторы – условия нахождения загрязняющих веществ на земной поверхности (хранение отходов в каких-либо промышленных бассейнах (различные накопители, шламохранилища, хвостохранилища, сбросные котлованы), сброс сточных вод на поля фильтрации, орошение сточными водами и др.) и характер проникновения загрязняющих веществ в подземные воды. Наибольшую опасность для подземных вод представляют загрязняющие вещества в жидкой фазе, поэтому далее рассматриваются именно такие загрязняющие вещества.

Несмотря на всё многообразие условий нахождения загрязняющих веществ на земной поверхности, техногенные условия могут быть сведены к двум наиболее распространённым случаям. Это хранение сточных вод в промышленных бассейнах при относительно постоянной высоте столба сточных вод в хранилищах и второй случай соответствует сбросу сточных вод на поверхность с относительно постоянным расходом. В первом случае фильтрация сточных вод происходит в условиях постоянного напора (относительно постоянная высота столба сточных вод), а во втором – фильтрация сточных вод при постоянном расходе.

Основные физико-химические факторы – миграционная способность загрязняющих веществ, их сорбируемость и особенности взаимодействия в системе “вода-порода”, а также время распада (или химическая стойкость) загрязняющих веществ.

Важнейшее значение имеет время распада веществ. Это время, в течение которого загрязняющие вещества подвергаются разложению, и, соответственно,

теряют свои токсичные свойства. Время распада варьирует в чрезвычайно широких пределах. Так, например, растворы хлоридов являются чрезвычайно устойчивыми. Это определяется хорошей растворимостью хлоридов, их химической и биологической устойчивостью, а также неучастием в процесса сорбции, ионного обмена и комплексообразования. В связи с этим, в верхней части гидрогеологического разреза хлориды, при наличии источников их поступления, только концентрируются в подземных водах. В верхней части разреза также довольно устойчивыми являются растворы сульфатов, бромидов и нитратов. Менее устойчивыми являются растворы многих органических веществ, из которых наиболее широко распространёнными являются нефтепродукты и пестициды. Время распада последних варьирует от нескольких десятков суток до 5–10 лет. Наиболее стойкими являются хлорорганические пестициды (ДДТ, альдрин, гептахлор и др.), а наименее стойкими – фосфоорганические (глифосат, дихлофос, карбофос и др.). Сравнительно нестойким является и бактериальное загрязнение – 30–400 сут.

Одним из наиболее опасных считается радиоактивное загрязнение территорий. Периоды полураспада некоторых широко распространённых радиоизотопов приведены в таблице 1 [3].

К снижению концентраций загрязняющих веществ ведут процессы сорбции. Преобладающим является сорбция катионов (в том числе тяжёлых металлов, являющихся весьма токсичными), которые компенсируют отрицательный заряд минеральных частиц. Максимальной сорбционной способностью обладают многие виды почв и глины, а минимальной – скальные породы. В связи с этим, наличие в кровле водоносных горизонтов глинистых пород повышает защищённость подземных вод от поверхностного загрязнения не только благодаря их низким фильтрационным свойствам, но и благодаря высокой сорбционной емкости, достигающей 150 мг-экв. на 100 грамм породы.

Из физико-химических факторов необходимо учитывать и изменение свойств пород при взаимодействии с загрязняющими веществами. В контексте нашего рассмотрения очень интересным является изменение фильтрационных

свойств пород, в первую очередь слабопроницаемых. Экспериментальными исследованиями было выявлено [6]: проницаемость глин по отношению к минерализованным растворам значительно выше, чем по отношению к пресной воде; проницаемость глин при фильтрации через них вод с температурой 60-80° С может быть в несколько раз выше, чем при фильтрации вод с температурой 20° С.

Таблица 1

Периоды полураспада некоторых радиоактивных изотопов

| Радио-нуклид | Период полураспада, годы | Тип распада | Радио-нуклид | Период полураспада, годы | Тип распада |
|-------------------|--------------------------|----------------|-------------------|--------------------------|-------------|
| ²³⁸ U | 4,5 · 10 ⁹ | α-распад | ¹³⁷ Cs | 30,2 | β-распад |
| ²³² Th | 1,4 · 10 ¹⁰ | α, γ - распады | ¹³⁴ Cs | 2,05 | β-распад |
| ⁴⁰ K | 1,3 · 10 ⁹ | β, γ - распады | ⁹⁵ Zr | 0,18 (65 сут.) | β-распад |
| ⁵⁰ V | 5 · 10 ¹⁴ | γ-распад | ²²² Rn | 0,01 (3,8 сут.) | α-распад |
| ⁸⁷ Rb | 4,7 · 10 ¹⁰ | β-распад | ²²⁰ Rn | 0,000 (54 сек.) | α-распад |
| ¹¹⁵ In | 6 · 10 ¹⁴ | β-распад | ²¹⁰ Po | 0,44 (160 сут.) | α-распад |
| ¹³⁸ La | 1,1 · 10 ¹¹ | β, γ - распады | ³ H | 12,3 | β-распад |
| ¹⁴⁷ Sm | 1,2 · 10 ¹¹ | α-распад | ¹³¹ I | 0,02 (8 сут.) | β-распад |
| ¹⁷⁶ Lu | 2,1 · 10 ¹⁰ | β, γ - распады | ⁸⁹ Sr | 0,14 (50,5 сут.) | β-распад |
| ²²⁶ Ra | 1600 | α-распад | ⁹⁰ Sr | 28,6 | β-распад |
| ¹⁴ C | 5730 | β-распад | ¹³³ Xe | 0,01 (5,2 сут.) | β-распад |

Из трёх групп рассмотренных факторов важнейшее значение имеют природные факторы. Именно они и должны учитываться при проведении региональных или предварительных оценок степени защищенности подземных вод. Полная и детальная оценка защищённости подземных вод предполагает учёт всех трёх групп факторов.

Оценка защищённости подземных вод может быть **качественной и количественной**. Качественная оценка основывается на учёте природных факторов, а количественная – природных, техногенных и физико-химических факторов.

Важно учитывать, что как качественная, так и количественная оценки защищённости в основном имеют относительный характер. Так водоносный горизонт может быть достаточно хорошо защищён по отношению к эпизодическим и небольшим по объёму сбросам загрязняющих веществ на земную поверхность. Этот же водоносный горизонт может оказаться практически незащищённым в случае фильтрации сточных вод из крупных поверхностных хранилищ отходов. Водоносный горизонт может быть защищён по отношению к нестойким, быстросазлагающимся и хорошо сорбируемым загрязняющим веществам. В то же время его защищённость будет значительно хуже при фильтрации стойких и плохо сорбируемых веществ.

В отдельных случаях оценки защищённости могут быть абсолютными. Такие оценки могут быть приведены для отдельных напорных водоносных горизонтов, а также для конкретных загрязняющих веществ с известным временем распада и (или) известной сорбируемостью. Абсолютно защищённым является напорный горизонт, перекрытый выдержанным и достаточно мощным водоупором, когда его уровни превышают уровни вышележащего загрязнённого водоносного горизонта. Во-втором случае сравнивая время фильтрации со временем распада загрязняющего вещества, можно судить достигнет оно уровня грунтовых вод или не достигнет его за время распада. Также зная концентрацию загрязняющего вещества в источнике и его сорбируемость можно рассчитать концентрацию этого вещества на глубинном уровне зеркала грунтовых вод, где она уже может и не превышать соответствующую предельно-допустимую концентрацию (ПДК).

Качественная оценка защищённости обычно производится по сумме условных баллов, которые присваиваются определенным защитным элементам окружающей среды (гидрогеологическим параметрам и показателям). Чем больше сумма баллов, тем выше защищённость. Именно такой принцип положен в основу методики В. М. Гольдберга. В ней баллами отражаются легко выявляемые в процессе гидрогеологического изучения территорий показатели –

глубина залегания грунтовых вод, мощность и фильтрационные свойства слабопроницаемых отложений.

Качественная оценка защищённости подземных вод может быть выполнена и на основе учета некоторых других показателей и параметров. В таком качестве могут выступать:

- инфильтрационное питание подземных вод;
- емкость поглощения пород, перекрывающих водоносный горизонт;
- дефицит влажности пород зоны аэрации.

Районирование территорий по этим показателям будет наглядно отражать площади с различной степенью защищённости подземных вод. Так участки с более интенсивным инфильтрационным питанием являются менее защищёнными, зоны с максимальной емкостью поглощения пород – более защищёнными, участки с минимальным дефицитом влажности будут являться и наименее защищёнными. Качественная оценка защищённости по этим показателям затрудняется необходимостью экспериментального или расчетного определения соответствующих показателей.

Количественная оценка защищённости чаще всего проводится либо на основе учета времени фильтрации загрязняющих веществ с поверхности земли до уровня грунтовых вод, а для напорных вод – времени фильтрации через водоупор, отделяющий напорный горизонт от загрязнённого грунтового горизонта; либо на основе расчета смешения поступающих в водоносный горизонт загрязнённых вод с чистыми подземными водами. Во втором случае необходимо определение расхода загрязнённых вод, поступающих в водоносный горизонт. Количественные оценки защищённости по времени фильтрации (t) и расходу (Q) фильтрующихся загрязнённых вод тесно связаны и коррелируются между собой. Защищённость тем лучше, чем хуже фильтрационные свойства перекрывающих пород, а, следовательно, чем больше t и меньше Q .

При изучении и картировании защищённости подземных вод возможно составление карт защищённости двух типов:

- 1) **карты качественных оценок защищённости;**
- 2) **карты количественных оценок защищённости.**

Первый тип карт составляется как при региональных, так и при локальных исследованиях. При этом, как ранее отмечалось, учитываются лишь группа природных факторов защищённости. Второй тип карт строится при детальном исследовании на локальных площадях, когда есть данные по конкретным загрязняющим веществам – концентрация, объём, условия поступления и нахождения на земной поверхности. В этом случае необходим учет всех вышерассмотренных трёх групп факторов защищённости.

Контрольные вопросы к главе 1

- 1. Какие параметры являются основными в группе природных факторов защищённости подземных вод от загрязнения?*
- 2. На чём базируется качественная оценка защищённости подземных вод?*
- 3. Что лежит в основе количественной оценки защищённости подземных вод?*

Глава 2. ОЦЕНКА ЗАЩИЩЁННОСТИ ГРУНТОВЫХ ВОД

Грунтовые воды являются безнапорными и не перекрываются надёжными водоупорами. Фильтрация стоков с земной поверхности в грунтовые воды возможна практически всегда. В связи с этим, грунтовые воды в целом характеризуются невысокой защищённостью или же являются вообще незащищёнными.

2.1. Качественная оценка защищённости грунтовых вод

Качественная оценка проводится на основе следующих показателей:

- глубины залегания уровня грунтовых вод;
- строения и литологии пород зоны аэрации;
- мощности слабопроницаемых отложений в разрезе зоны аэрации;

– фильтрационной способности пород зоны аэрации, прежде всего, слабопроницаемых пород.

Баллы присваиваются первому из отмеченных показателей (табл. 2), а также мощности и фильтрационной способности слабопроницаемых пород (табл. 3).

Таблица 2

Градации глубин залегания уровней грунтовых вод и соответствующие им количества баллов

| | | | | | |
|--------------------|-----------|------------------|------------------|------------------|--------|
| Номер градации | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Глубина (H , м) | ≤ 10 | $10 < H \leq 20$ | $20 < H \leq 30$ | $30 < H \leq 40$ | > 40 |
| Кол-во баллов | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

Таблица 3

Градации мощностей слабопроницаемых отложений зоны аэрации и соответствующие им количества баллов

| Номер градации | Мощность отложений (m_0 , м) | Группа отложений | | |
|----------------|---------------------------------|---|---|---|
| | | Супеси, легкие суглинки ($k \approx 0,01-0,1$ м/сут) | Суглинки, песчанистые глины ($k \approx 0,001-0,01$ м/сут) | Тяжелые суглинки и глины ($k < 0,001$ м/сут) |
| 1 | ≤ 2 | 1 | 1 | 2 |
| 2 | $2 < m_0 \leq 4$ | 2 | 3 | 4 |
| 3 | $4 < m_0 \leq 6$ | 3 | 4 | 6 |
| 4 | $6 < m_0 \leq 8$ | 4 | 6 | 8 |
| 5 | $8 < m_0 \leq 10$ | 5 | 7 | 10 |
| 6 | $10 < m_0 \leq 12$ | 6 | 9 | 12 |
| 7 | $12 < m_0 \leq 14$ | 7 | 10 | 14 |
| 8 | $14 < m_0 \leq 16$ | 8 | 12 | 16 |
| 9 | $16 < m_0 \leq 18$ | 9 | 14 | 18 |
| 10 | $18 < m_0 \leq 20$ | 10 | 15 | 20 |
| 11 | > 20 | 12 | 18 | 25 |

Примечание. При отсутствии в разрезе зоны аэрации слабопроницаемых пород (например, при её сложении песками) в оценке защищённости грунтовых вод учитываются лишь баллы, обусловленные глубиной залегания их уровня.

Далее вычисляется сумма баллов, которая определяет защищённость грунтовых вод, выражаемую показателем защищённости (ε). По сумме баллов выделяются шесть категорий защищённости грунтовых вод (табл. 4).

Наименее благоприятными являются условия защищённости, соответствующие категории I, наиболее благоприятные – категории VI.

Таблица 4

Категории защищённости грунтовых вод
(качественная оценка защищённости)

| Категории защищённости | I | II | III | IV | V | VI |
|---|----------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------|
| Показатель защищённости (ε) | ≤ 5 | $5 < \varepsilon \leq 10$ | $10 < \varepsilon \leq 15$ | $15 < \varepsilon \leq 20$ | $20 < \varepsilon \leq 25$ | > 25 |

Обоснование баллов, отражённых в таблицах 2 и 3, проведено В. М. Гольдбергом на основании времени достижения фильтрующимися с поверхности земли загрязняющими веществами уровня грунтовых вод [4]. Так, если время фильтрации через зону аэрации, сложенную хорошо проницаемыми породами ($k \approx 2$ м/сут), мощностью 10 м составляет t_1 , то время фильтрации через зону аэрации мощностью 20 м, сложенную такими же породами ($k \approx 2$ м/сут), примерно в 2 раза больше ($t_2 \approx 2t_1$); через зону аэрации мощностью 30 м – втрое больше ($t_3 \approx 3t_1$) и т.д. Время фильтрации через слой пород мощностью 10 м с коэффициентом фильтрации 2 м/сут примерно равно времени фильтрации через слой пород мощностью 2 м с коэффициентом фильтрации 0,02 м/сут, или времени фильтрации через слой пород мощностью 1 м с коэффициентом фильтрации 0,002 м/сут, или времени фильтрации через слой пород мощностью 0,5 м с коэффициентом фильтрации 0,0002 м/сут.

На карте качественной оценки защищённости грунтовых вод целесообразно отразить (изолиниями, крапом, цветом, внемасштабными знаками):

– глубины залегания грунтовых вод;

- мощности слабопроницаемых отложений зоны аэрации;
- литологию слабопроницаемых отложений зоны аэрации;
- категории защищённости;
- основные источники загрязнения грунтовых вод (крупные промышленные предприятия, поверхностные хранилища жидких и твердых отходов, поля фильтрации, поля орошения сточными водами, крупные животноводческие комплексы и склады удобрений, и др.);
- водозаборы подземных вод;
- участки развития карста.

При высокой загруженности карты на неё можно нанести только участки разных категорий защищённости. При этом данные участки оптимально выделить цветом. Можно к категории I и II применить оттенки желтого цвета, категорию III отразить оранжевым цветом, категории IV–VI – оттенками коричневого цвета (густота оттенков возрастает с увеличением категории защищённости).

2.2. Количественная оценка защищенности грунтовых вод

В основе количественной оценки защищённости грунтовых вод в методике В. М. Гольдберга лежит определение времени, за которое фильтрующиеся с земной поверхности загрязнённые воды достигнут уровня грунтовых вод.

Оценка этого времени дается для двух схем:

- фильтрации из поверхностных бассейнов сточных вод с постоянным уровнем;
- сброса сточных вод на поверхность земли с постоянным расходом.

Как ранее указывалось (глава 1), именно этим двум схемам отвечает преобладающий вариант содержания сточных вод на земной поверхности.

Для первой схемы используются следующие уравнения.

При однородном строении зоны аэрации и постоянстве уровня сточных вод в хранилище время фильтрации через зону аэрации можно определить по формуле Цункера:

$$t = \left(\mu \frac{H_0}{k} \right) \left[\frac{m}{H_0} - \ln \left(1 + \frac{m}{H_0} \right) \right], \quad (1)$$

где H_0 – высота столба сточных вод в хранилище; k и m – соответственно, коэффициент фильтрации и мощность зоны аэрации; μ – недостаток водонасыщения пород зоны аэрации ($\mu = n - n_e$), n – пористость, n_e – начальная влажность пород зоны аэрации.

Вместо μ в расчетах можно использовать значение пористости (n), т.к. n_e обычно бывает неизвестно и значение этого параметра может варьировать во времени.

Очень часто зона аэрации имеет двухслойное строение, при этом её верхняя часть слабопроницаемая (обычно она сложена покровными суглинками), а нижняя – представлена более проницаемыми породами. В таких случаях время инфильтрации стоков с поверхности земли до уровня грунтовых вод складывается из времени движения в верхнем (t_1) и нижнем (t_2) слоях ($t_{\text{сум}} = t_1 + t_2$).

Время t_1 определяется по формуле 1, в качестве параметров мощности и коэффициента фильтрации используются соответствующие данные по первому слою. Время t_2 рассчитывается по формуле:

$$t_2 = \frac{n_2 H_0}{k_2} \left\{ \frac{m_2}{H_0} - \left[1 - \frac{m_1}{H_0} \left(\frac{k_2}{k_1} - 1 \right) \right] \ln \left(1 + \frac{m_2}{H_0 + m_1} \right) \right\}, \quad (2)$$

где n_2 , m_2 , k_2 – соответственно, пористость, мощность и коэффициент фильтрации нижнего, относительно хорошо проницаемого слоя, а m_1 и k_1 – мощность и коэффициент фильтрации верхнего, относительно слабопроницаемого слоя.

При неоднородном многослойном строении разреза зоны аэрации его можно привести к однородному с расчетом среднего коэффициента фильтрации по формуле:

$$k_{\text{ср}} = \frac{m}{\left(\frac{m_1}{k_1} + \frac{m_2}{k_2} + \dots + \frac{m_i}{k_i}\right)}, \quad (3)$$

где m_1, m_2, \dots, m_i и k_1, k_2, \dots, k_i – соответственно, мощности и коэффициенты фильтрации отдельных слоёв; m – мощность зоны аэрации ($m = m_1 + m_2 + \dots + m_i$).

Расчет времени инфильтрации сточных вод через неоднородный многослойный разрез далее проводится по формуле 1.

При проведении расчетов по формулам 1 и 2 в случае наличия реальных промышленных хранилищ сточных вод берется существующая высота столба сточных вод (параметр H_0). При отсутствии таких действующих хранилищ и проведении предварительных расчетов времени инфильтрации параметр H_0 приравнивается 5 метрам. Такое унифицированное значение высоты столба сточных вод соответствует его среднему значению, полученному в результате обработки данных по многим десяткам промышленных бассейнов в России.

Для второй расчётной схемы (сброс сточных вод на поверхность земли с постоянным расходом) одним из основных параметров является удельный расход сточных вод (q , м/сут):

$$q = \frac{Q}{F}, \quad (4)$$

где Q – постоянный расход сточных вод ($\text{м}^3/\text{сут}$), F – площадь приёмника сточных вод (м^2).

В этой расчетной схеме возможны два случая, зависящие от соотношения удельного расхода и коэффициента фильтрации пород зоны аэрации. При $q \leq k$ (k – коэффициент фильтрации пород зоны аэрации в случае однородного разреза) сточные воды полностью уйдут на инфильтрацию, не образовав на поверхности

столба воды ($H_0 = 0$). В этом случае время достижения стоками уровня грунтовых вод определяется по формуле:

$$t = \frac{mn}{\sqrt[3]{q^2k}}, \quad (5)$$

где m и n – соответственно, мощность и скважность (пористость) зоны аэрации.

При $q > k$ на поверхности образуется изменяющийся во времени столб сточных вод ($H_0 = f(t)$). Время фильтрации до уровня грунтовых вод может быть рассчитано по формуле:

$$t = \frac{m}{\frac{(1-n)k}{2n} + \sqrt{\frac{(1-n)^2k^2}{4n^2} + \frac{qk}{n}}}, \quad (6)$$

Формулы 5 и 6 используются при однородном строении зоны аэрации. Если этот разрез неоднородный, при этом коэффициенты фильтрации каждого слоя превышают значение удельного расхода (q), то неоднородный разрез приводится к однородному с использованием формулы 3, и расчет времени инфильтрации производится по формуле 5. Точно также поступают, если коэффициенты фильтрации каждого слоя меньше удельного расхода, только время рассчитывают по формуле 6.

Если разрез зоны аэрации неоднородный, при этом для одних слоёв $k > q$, а для других $k < q$, то время прохождения загрязнённых вод определяется для каждого слоя (для слоёв с $k > q$ по формуле 5, для слоёв с $k < q$ по формуле 6), далее частные значения суммируются.

При количественной оценке защищённости грунтовых вод на участках реального сброса сточных вод на поверхность рассчитываются реальные значения удельного расхода (q), фигурирующего в формулах 5 и 6. При предварительных расчетах, когда реального сброса ещё нет, в качестве унифицированного значения q берется – 0,03 м/сут (оно соответствует преобладающим значениям удельного расхода сточных вод на действующих полях фильтрации в России).

По времени достижения уровня грунтовых вод Гольдберг В.М. выделяет 6 категорий их защищённости (табл. 5).

Чем выше категория защищённости, тем лучше защищённость.

По отношению к отдельным видам загрязняющих веществ с известным временем их распада могут быть даны абсолютные оценки защищённости грунтовых вод. В первую очередь это относится к бактериальному загрязнению и к загрязнению некоторыми малоустойчивыми видами пестицидов.

Таблица 5

Категории защищённости грунтовых вод
(количественная оценка защищённости)

| Категории защищённости | I | II | III | IV | V | VI |
|--|-------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| Время достижения уровня грунтовых вод (t , сут) | $t \leq 10$ | $10 < t \leq 50$ | $50 < t \leq 100$ | $100 < t \leq 200$ | $200 < t \leq 400$ | $t > 400$ |

На карту количественной оценки защищённости грунтовых вод наносится та же информация, что и на карту качественной оценки защищённости. При её высокой загруженности можно отразить только участки разных категорий защищённости.

Контрольные вопросы к главе 2

1. *Каким показателям присваиваются баллы при проведении качественной оценки защищённости грунтовых вод?*

2. *Сколько категорий защищённости грунтовых вод выделяются в методике В.М. Гольдберга при проведении качественной и количественной оценок защищённости?*

3. *Что должно отражаться на картах защищённости грунтовых вод?*

Глава 3. ОЦЕНКА ЗАЩИЩЁННОСТИ НАПОРНЫХ ВОД

В рассматриваемой методике В. М. Гольдберга оценивается защищённость первого от поверхности напорного водоносного горизонта. Загрязняющие вещества в этот горизонт могут проникнуть из вышележащего водоносного горизонта, воды которого по тем или иным причинам могут быть загрязнены. Очень часто таким вышележащим водоносным горизонтом является горизонт грунтовых вод.

Поступление загрязняющих веществ в напорный горизонт через перекрывающий его водоупорный слой может происходить в результате перетекания (конвективного переноса), молекулярной диффузии или совместного действия этих процессов. Основная роль в поступлении загрязняющих веществ принадлежит конвективному переносу, масштабы которого в верхней части гидрогеологического разреза во много раз превышают диффузионный перенос.

Оценка защищённости напорных вод может быть выполнена на основе следующих показателей:

- мощности перекрывающего их водоупора;
- литологии этого водоупора;
- фильтрационных и миграционных параметров водоупора;
- соотношения уровней напорного и вышележащего водоносных горизонтов.

Очень важным для оценки защищённости напорного горизонта является четвертый показатель – соотношение уровней двух водоносных горизонтов, т.к. именно оно определяет механизм поступления загрязняющих веществ в напорный горизонт. Возможны три варианта соотношения уровней. Для удобства их отражения можно обозначить уровень верхнего (грунтового) горизонта через H_1 , а уровень нижележащего (напорного) горизонта через H_2 . Тогда возможные их соотношения выглядят так:

1) $H_2 > H_1$;

2) $H_2 \approx H_1$;

3) $H_2 < H_1$.

В первом случае, когда выполняется условие $H_2 > H_1$, при наличии выдержанного по площади и достаточно мощного водоупора, обеспечивающего сохранение этого перепада уровней, напорный горизонт может считаться защищённым для любых видов загрязняющих веществ. Это связано с тем, что при таком соотношении уровней вертикальный градиент фильтрационного потока направлен снизу вверх. Загрязняющие вещества в напорный пласт могут попасть только за счет диффузии, при этом диффузионный перенос будет тормозиться конвективным переносом (градиент концентрации, обуславливающий диффузию, и вертикальный градиент напора, определяющий фильтрацию, направлены навстречу друг другу). Данные гидрогеологические условия определяют наилучшую защищённость напорных вод от поступления в них загрязняющих веществ из вышележащего горизонта.

Во втором случае, при $H_2 \approx H_1$, поступление загрязняющих веществ в напорный горизонт возможно за счет диффузии, которая уже не будет тормозиться фильтрационным потоком.

Третий случай, $H_2 < H_1$, является наиболее неблагоприятным в отношении степени защищённости напорного горизонта. При таком соотношении напоров как диффузионный, так и фильтрационный потоки направлены сверху вниз – из вышележащего горизонта в нижележащий, что может привести к довольно существенному загрязнению напорных вод.

Таким образом, соотношение уровней определяет возможность и характер поступления загрязняющих веществ в напорный горизонт и имеет большое значение для его защищённости. При этом, соотношение уровней может измениться во времени, например, в результате эксплуатации горизонта напорных вод. Следовательно, может измениться и степень защищённости этого напорного горизонта (восходящее перетекание через водоупор, разделяющий два водоносных горизонта, в результате эксплуатации нижнего (напорного)

горизонта может смениться нисходящим перетеканием, что резко ухудшит защищённость напорных вод). Отсюда вытекают следующие важные следствия:

– соотношение уровней разных водоносных горизонтов на изучаемой территории должно контролироваться;

– карты защищённости напорных вод должны составляться по состоянию на определенный период времени;

– показатель соотношения уровней не может быть принят в качестве основного для оценки защищённости напорного горизонта.

В качестве основного показателя защищённости напорных вод целесообразно принять мощность водоупора. Другими важными показателями являются литология водоупора, его фильтрационные и миграционные свойства и уже вышерассмотренное соотношение уровней подземных вод.

Наиболее надёжными являются глинистые водоупоры. Их экранирующие свойства зависят от минерального состава. Максимальной емкостью поглощения (сорбционной способностью) среди глинистых минералов обладает монтмориллонит, минимальной – каолинит. Поэтому наиболее надёжными будут глинистые водоупоры, в составе которых преобладает монтмориллонит.

3.1. Качественная оценка защищённости напорных вод

Качественная оценка защищённости может производиться:

- 1) по мощности водоупора;
- 2) по отношению мощности водоупора к его коэффициенту фильтрации;
- 3) по мощности водоупора и соотношению уровней подземных вод.

Первый вариант качественной оценки защищённости напорных вод является наиболее простым. Гольдберг В.М. выделяет следующие шесть градаций мощности водоупоров, разделяющих грунтовый и первый от поверхности напорный водоносные горизонты (табл. 6).

Оценки защищённости на основе этих градаций являются сравнительными. Защищённость II лучше, чем I; а III лучше, чем II и т.д.

При наличии данных по фильтрационным свойствам водоупора (k_0) качественная оценка защищённости может быть выполнена по параметру α :

$$\alpha = \frac{m_0}{k_0}, \quad (7)$$

Таблица 6

Градации мощности водоупора

| Градация | I | II | III | IV | V | VI |
|---------------------------------|--------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------|
| Мощность водоупора (m_0 , м) | $m_0 \leq 5$ | $5 < m_0 \leq 10$ | $10 < m_0 \leq 20$ | $20 < m_0 \leq 30$ | $30 < m_0 \leq 50$ | $m_0 > 50$ |

Данный параметр физически отражает время фильтрации (сут) при вертикальном напорном градиенте, равном единице. Защищённости тем лучше, чем больше m_0 и меньше k_0 . Если для мощности водоупора взять значения согласно таблицы 6, а для коэффициента фильтрации интервал значений от 10^{-3} до 10^{-5} м/сут, то параметр α будет меняться от 10^3 до 10^7 сут. По его значениям могут быть выделены следующие шесть интервалов (табл. 7).

Таблица 7

Возможные интервалы значений параметра α

| Интервал | I | II | III | IV | V | VI |
|-------------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|
| Параметр α (сут) | $\alpha \leq 10^3$ | $10^3 < \alpha \leq 10^4$ | $10^4 < \alpha \leq 10^5$ | $10^5 < \alpha \leq 10^6$ | $10^6 < \alpha \leq 10^7$ | $\alpha > 10^7$ |

Оценка защищённости по параметру α , как и в предыдущем случае, имеет сравнительный характер.

Наиболее надёжной является оценка защищённости на основе учёта мощности водоупора (m_0) и соотношений уровней подземных вод (H_2 исследуемого напорного горизонта и H_1 – вышележащего горизонта). На основе сочетания этих двух показателей могут быть выделены следующие три основные группы защищённости напорных вод:

- I (защищённые);
- II (условно защищённые);

– III (незащищённые).

Первая группа (защищённые воды) характеризуется наличием выдержанного по площади и без нарушения сплошности водоупором при $m_0 > 10$ м и $H_2 > H_1$.

Вторая группа (условно защищённые) – напорные воды перекрыты выдержанным по площади водоупором без нарушения сплошности при $5 \text{ м} \leq m_0 < 10$ м и $H_2 > H_1$ (а) и $m_0 > 10$ м и $H_2 \leq H_1$ (б).

Третья группа (незащищённые) – водоупор небольшой мощности $m_0 < 5$ м и $H_2 \leq H_1$ или водоупор, невыдержанный по площади с нарушениями сплошности (литологические “окна”, зоны интенсивной трещиноватости, разломы) с различными соотношениями H_1 и H_2 ($H_1 \leq H_2 < H_1$). Также незащищёнными являются напорные воды и в следующих случаях:

- в речных долинах, при пересечении водоупора руслом реки;
- в карстовых районах, при затронутости водоупора карстовыми процессами;
- в районах с активными проявлениями неотектонических движений разного знака.

На карте качественных оценок защищённости напорных вод В. М. Гольдберг предлагает отражать:

- мощность водоупора (цветом);
- перепад уровней (условными знаками);
- группы защищённости I–III (штриховкой).

Кроме этого целесообразен показ водозаборов, эксплуатирующих исследуемые водоносные горизонты; участков с разведанными запасами подземных вод этих горизонтов; источников загрязнения; участков загрязнения водоносных горизонтов; направления движения подземных вод.

3.2. Количественная оценка защищённости напорных вод

Количественная оценка защищённости напорных вод базируется на определении времени фильтрации загрязнённых вод из вышележащего

горизонта в исследуемый напорный горизонт через разделяющий их водоупор. Это время зависит от мощности водоупора (m_0), его фильтрационных свойств (k_0) и вертикального напорного градиента ($\Delta H/m_0$):

$$t = \frac{m_0^2 n}{k_0 \Delta H}, \quad (7)$$

где t – время (сут); $\Delta H = H_1 - H_2$; n – пористость водоупорных пород.

Параметр пористости (имеется в виду активная пористость), входящий в формулу, является наиболее трудно определяемым параметром. При проведении расчётов пористость условно может быть принята равной 0,01.

Количественная оценка защищённости проводится при $H_1 > H_2$, т.к. именно в этом случае существуют гидродинамические условия для перетекания загрязнённых вод сверху вниз.

Защищённость напорных вод тем лучше, чем больше время фильтрации (нисходящего перетекания). Выделяются следующие градации этого времени (в годах):

$$t \leq 1; 1 < t \leq 5; 5 < t \leq 10; 10 < t \leq 20 \text{ и } t > 20.$$

Выделенным градациям времени фильтрации соответствуют следующие градации защищённости (табл. 8).

Таблица 8

Градации защищённости напорных вод

| Градация защищённости | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------------|------------|----------------|-----------------|------------------|----------|
| Время фильтрации (годы) | $t \leq 1$ | $1 < t \leq 5$ | $5 < t \leq 10$ | $10 < t \leq 20$ | $t > 20$ |

Эти градации по времени соответствуют выделенным при качественной оценке защищённости группе II “условно защищённые” (градации 2–5) и группе I “незащищённые” (градация 1).

На карте количественных оценок защищённости напорных вод отражаются:

– мощность водоупора (изопахитами);

- время фильтрации (цветом);
- перепад уровней (условными значками);
- градации защищённости и участки незащищённых напорных вод (штриховкой).

Как и в предыдущем случае важно иметь данные о пространственном расположении:

водозаборов, эксплуатирующих исследуемые водоносные горизонты; участков с разведанными запасами подземных вод этих горизонтов; источников загрязнения; участков загрязнения водоносных горизонтов, а также о направлении движения подземных вод.

Контрольные вопросы к главе 3

- 1. На основе учёта каких показателей может быть проведена оценка защищённости напорных вод?*
- 2. Какие гидродинамические условия наиболее благоприятны для сохранения качества напорных вод?*
- 3. На чём базируется количественная оценка защищённости напорных вод?*

Глава 4. ПРИМЕРЫ ОЦЕНОК ЗАЩИЩЁННОСТИ ГРУНТОВЫХ И НАПОРНЫХ ВОД

При проведении оценок защищённости подземных вод от поверхностного загрязнения (загрязнения сверху) в первую очередь необходимы данные о строении верхней части геологического разреза и данные по положению уровней подземных вод. Основной объём необходимой информации появляется при проведении буровых работ, а также при анализе материалов предшествующего бурения.

Примеры оценок защищённости грунтовых и напорных вод будут базироваться на гидрогеологическом разрезе абстрактного участка,

составленного по данным бурения двух наблюдательных гидрогеологических скважин (табл. 9).

Таблица 9

Схематический разрез одного абстрактного участка

| № слоя | Глубина залегания, м | | Мощность слоя, м | Литология | Индекс возраста | Глубина появления воды, м | Глубина установившегося уровня, м | Абсолютная отметка земной поверхности, м |
|--------|----------------------|--------------|------------------|---|---------------------|---------------------------|-----------------------------------|--|
| | От (кровля) | До (подошва) | | | | | | |
| 1 | 0 | 3 | 3 | Супесь лёгкая, желтовато-серая, известковистая | Q _{III-IV} | | | 100 |
| 2 | 3 | 7 | 4 | Песок серовато-коричневый, мелкозерн., полимиктовый | Q _{III-IV} | | | |
| 3 | 7 | 12 | 5 | Суглинок светло-коричневый, тугопластичный | Q _{III-IV} | | | |
| 4 | 12 | 20 | 8 | Песок коричневатосерый, мелко-среднезернистый, водоносный | Q _{III-IV} | 16 | 16 | |
| 5 | 20 | 26 | 6 | Глина серо-коричневая | Q _{III-IV} | | | |
| 6 | 26 | 40 | 14 | Известняк светло-серый, крепкий, трещиноватый, водоносный | P _{2kz2} | 26 | 18 | |
| 7 | 40 | 50 | 10 | Аргиллит коричневатосерый | P _{2kz2} | | | |

Разрез участка вскрыт на глубину 50 м. В его составе выделяются два водоносных горизонта – грунтовый безнапорный, локализованный в четвертичных песках, и межпластовый напорный в известняках верхнеказанского подъяруса. Первый залегает в глубинном интервале 16-20 м, а второй – 26-40 м. Водоносные горизонты разделены шестиметровым глинистым водоупором (слой № 5). Уровень грунтового горизонта характеризуется абсолютной отметкой 84 м (абсолютная отметка поверхности минус глубина залегания грунтовых вод). По существу, это напор грунтового горизонта (Н₁).

Напор нижележащего водоносного горизонта составляет 82 м (H_2), а его напор над кровлей пласта – 8 м (h). Соотношение напоров свидетельствует о наличии гидродинамической предпосылки для нисходящего перетекания из грунтового горизонта в межпластовый напорный горизонт ($H_1 > H_2$).

4.1. Качественная оценка защищённости грунтовых вод

Качественная оценка защищённости грунтовых вод базируется на условных баллах, которые присваиваются таким параметрам, как глубина залегания их уровней и строение зоны аэрации. В последнем случае важнейшее значение имеет наличие слабопроницаемых пород, их мощность и литологический состав.

Глубина залегания уровня грунтовых вод в нашем случае составляет 16 м. Согласно таблице 2 этой величине соответствует 2 балла. В строении зоны аэрации (табл. 9) принимают участие 2 слабопроницаемых слоя – супеси в глубинном интервале 0–3 м и суглинки в интервале 7–12 м. Супеси по таблице 3 являются представителями первой группы отложений, а тугопластичные суглинки – второй. В балльном отношении первые оцениваются 2 баллами, а суглинки – 4 баллами. Следовательно общее количество баллов составляет:

$$\varepsilon = 2 + 2 + 4 = 8$$

Отсюда вытекает вторая категория защищённости грунтовых вод (табл. 4).

4.2. Количественная оценка защищённости грунтовых вод

Количественная оценка защищённости грунтовых вод основывается на определении времени движения фильтрующихся с поверхности земли загрязнённых вод через зону аэрации. При этом расчёт этого времени возможен для двух различных схем:

– фильтрации из поверхностных бассейнов сточных вод с постоянным уровнем;

– сброса сточных вод на земную поверхность с постоянным расходом.

При применении первой схемы используют уравнения № 1-3, а второй схемы – уравнения № 4-6.

Зона аэрации на рассматриваемом участке имеет мощность 16 м и характеризуется неоднородным строением, которое обуславливается переслаиванием пород с различной проницаемостью (сверху вниз: супесь (мощность 3 м), песок (4 м), суглинок (5 м), песок (4 м)). В этом случае наиболее оптимально приведение разреза зоны аэрации к однородному с определением средневзвешенного коэффициента фильтрации согласно формулы 3:

$$k_{\text{ср}} = \frac{m}{\left(\frac{m_1}{k_1} + \frac{m_2}{k_2} + \dots + \frac{m_i}{k_i}\right)}$$

Значения коэффициентов фильтрации пород зоны аэрации при отсутствии прямых определений можно заимствовать из результатов ранее проведенных работ на близрасположенных площадях или использовать справочные данные. Наиболее вероятные значения фильтрационной способности пород рассматриваемого разреза составляют:

– легкие суглинки – 0,1 м/сут;

– мелкозернистые пески – 3,0 м/сут;

– суглинки – 0,01 м/сут;

– мелко- среднезернистые пески – 5,0 м/сут.

Отсюда средневзвешенный коэффициент фильтрации будет равен:

$$k_{\text{ср}} = \frac{16}{\left(\frac{3}{0,1} + \frac{4}{3} + \frac{5}{0,01} + \frac{4}{5}\right)} = 0,03 \text{ м/сут}$$

Для расчета времени движения через зону аэрации по первой расчетной схеме (фильтрация из бассейна сточных вод с постоянным напором – $H_0=5$ м) воспользуемся формулой № 1:

$$t = \left(\mu \frac{H_0}{k} \right) \left[\frac{m}{H_0} - \ln \left(1 + \frac{m}{H_0} \right) \right]$$

Вместо недостатка гравитационного водонасыщения (μ) можно воспользоваться значениями пористости (n), которую в нашем случае можно принять равной 0,1. Тогда время прохождения зоны аэрации составит:

$$t = \left(0,1 \frac{5}{0,03} \right) \left[\frac{16}{5} - \ln \left(1 + \frac{16}{5} \right) \right] = 29,42 \text{ сут.}$$

Полученное время достижения уровня грунтовых вод по таблице 5 соответствует второй категории защищённости грунтовых вод.

При расчете времени по второй схеме (сброс сточных вод на земную поверхность с постоянным расходом) неоднородный разрез зоны аэрации также можно привести к однородному с расчетом средневзвешенного коэффициента фильтрации по формуле 3. Так можно поступить, когда коэффициенты фильтрации всех слоёв больше или меньше значений удельного расхода (q), унифицированное значение которого при проведении предварительных расчетов принимается за 0,03 м/сут. В нашем случае, в первом, втором и четвертом слоях коэффициенты фильтрации превышают данное значение удельного расхода, а в третьем слое (в суглинках) – обратная картина. Следовательно, необходимо рассчитать время движения через каждый слой по формулам 5 и 6, далее частные времена суммировать. В расчетных формулах присутствует пористость. Значения этого параметра можно принять следующими: супесь – 0,1; мелкозернистый песок – 0,2; суглинок – 0,05; мелко-среднезернистый песок – 0,25.

Время движения через первый слой:

$$t = \frac{mn}{\sqrt[3]{q^2 k}} = \frac{3 \cdot 0,1}{\sqrt[3]{0,03^2 \cdot 0,1}} = 6,67 \text{ сут.}$$

Время движения через второй слой:

$$t = \frac{mn}{\sqrt[3]{q^2 k}} = \frac{4 \cdot 0,2}{\sqrt[3]{0,03^2 \cdot 3}} = 5,71 \text{ сут.}$$

Время движения через третий слой:

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{m}{\frac{(1-n)k}{2n} + \sqrt{\frac{(1-n)^2 k^2}{4n^2} + \frac{qk}{n}}} = \\
 &= \frac{5}{\frac{(1-0,05) * 0,01}{2 * 0,05} + \sqrt{\frac{(1-0,05)^2 0,01^2}{4 * 0,05^2} + \frac{0,03 * 0,01}{0,05}}} \\
 &= 22,98 \text{ сут.}
 \end{aligned}$$

Время движения через четвертый слой:

$$t = \frac{mn}{\sqrt[3]{q^2 k}} = \frac{4 * 0,25}{\sqrt[3]{0,03^2 * 5}} = 6,06 \text{ сут.}$$

Суммарное время:

$$t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = 6,67 + 5,71 + 22,98 + 6,06 = 41,42 \text{ сут.}$$

Отсюда, согласно таблице 5, вытекает вторая категория защищённости грунтовых вод (как и в случае с фильтрацией из бассейна сточных вод).

4.3. Качественная оценка защищённости напорных вод

Водоносный горизонт, сложенный пермскими известняками и залегающий в интервале глубин 26–40 м, является напорным. Его качественную оценку защищённости можно провести на основе двух показателей – мощности водоупорных глин пятого слоя, разделяющих грунтовый и напорный горизонты (m_0), а также соотношения уровней этих горизонтов (H_1 и H_2).

В нашем случае $m_0 = 6$ м и $H_1 > H_2$. Следовательно, мы имеем третью группу защищённости, и напорные воды рассматриваемого участка являются незащищёнными от поверхностного загрязнения.

4.4. Количественная оценка защищённости напорных вод

Количественная оценка защищённости напорных вод проводится по времени фильтрации через водоупор, разделяющий грунтовый и напорный водоносные горизонты (формула № 7):

$$t = \frac{m_0^2 n}{k_0 \Delta H}$$

Мощность водоупора (m_0) составляет 6 м; разница в напорах (ΔH) – 2 м; пористость водоупорных глин можно принять равной 0,01; а их коэффициент фильтрации – 10^{-3} м/сут (обычно редко когда бывает известна величина фильтрационной способности глин, в целом она варьирует в пределах – 10^{-3} – 10^{-9} м/сут, при задании максимального значения (10^{-3} м/сут) мы получим минимальное значения времени фильтрации через глинистый водоупор). Отсюда расчетное время составляет:

$$t = \frac{6^2 * 0,01}{0,001 * 2} = 180 \text{ сут.}$$

Время фильтрации меньше одного года, это отвечает первой градации защищённости (табл. 8), которая позволяет отнести напорные воды рассматриваемого участка к группе “незащищённые напорные воды”.

Глава 5. ОЦЕНКА И КАРТИРОВАНИЕ УЯЗВИМОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД К ЗАГРЯЗНЕНИЮ

Термин “уязвимость подземных вод к загрязнению” был введён французским гидрогеологом Дж. Марга в 1968 г. [9]. Первая карта уязвимости водоносного горизонта к загрязнению в масштабе 1:1 000 000 была опубликована во Франции в 1970 г. [8].

Концепция уязвимости подземных вод к загрязнению разрабатывается уже более 50 лет, при этом общепризнанного и общеприемлемого определения до сих пор не разработано. Широко используется следующее определение, данное

чешскими специалистами Врба (Vrba) и Запорозцем (Zaporozec): “Уязвимость подземных вод – это природное свойство, присущее системе подземных вод, которое зависит от способности этой системы справляться с природными процессами и техногенными воздействиями” [10].

При Национальном Научно-исследовательском Совете США есть Комитет по методам оценки уязвимости подземных вод. В этом Комитете уязвимость подземных вод к загрязнению определяется как “тенденция или вероятность загрязняющих веществ достичь определенного положения (концентрации) в системе подземных вод после попадания этих загрязняющих веществ в какое-то место над самым верхним водоносным горизонтом”. Уязвимость подразделяют на два основных типа – *специфическую и свойственную уязвимость*.

Специфическая уязвимость касается специфического (конкретного) загрязняющего вещества, класса загрязняющих веществ или деятельности человека. *Свойственная уязвимость* не зависит от поведения специфических загрязняющих веществ и по существу является функцией гидрогеологических факторов, а также воздействия землепользования и загрязнения [8].

Во введении было указано, что понятие “уязвимость подземных вод” является обратным ранее рассмотренному понятию “защищённость подземных вод”. Чем выше защищённость подземных вод, тем меньше их уязвимость к загрязнению. Своевременная оценка защищённости подземных вод или их уязвимости необходима для обоснования мероприятий по предотвращению загрязнения и ухудшения качества подземных вод.

Методы оценки уязвимости подземных вод

Все подземные воды, за исключением глубинных рассолов являются в различной степени уязвимыми к загрязнению. Уязвимость является относительным, неизмеряемым и безразмерным свойством подземных вод. Точность её оценки зависит, прежде всего, от объёма и качества фактического материала. Карты уязвимости базируются на оценке нескольких параметров,

которые являются функциями геологической среды и варьируют по регионам. Основными факторами, используемыми при оценке уязвимости подземных вод являются [8]:

- величина питания;
- почва;
- свойства и показатели ненасыщенной и насыщенной зон (т.е. показатели зоны аэрации и зоны водонасыщения).

Питание – количество воды, проходящее за определенный период времени через ненасыщенную зону в водоносный горизонт. Величина и режим питания существенно влияют на физические и химические процессы в системе “почва–порода–вода”. В общем, чем выше величина питания, тем более уязвимыми к загрязнению являются подземные воды. Так, в аридных зонах величина питания очень низкая, и она является практически нулевой в гипераридных областях. В этих регионах уязвимость подземных вод очень низкая. В полуаридных зонах низкая величина питания предполагает очень медленную миграцию загрязняющих веществ, что естественно понижает уязвимость подземных вод или увеличивает их защищённость от поверхностного загрязнения.

Низкая величина инфильтрационного питания благоприятна (происходит снижение уязвимости) при некондиционном его качестве и при разнотипном загрязнении земной поверхности или хранении загрязняющих веществ в поверхностных накопителях (хвостохранилища, пруды-отстойники, полигоны разнотипных отходов и т.д.). Высокая же величина инфильтрационного питания при его незагрязнённости будет приводить к самоочищению загрязнённых подземных вод первых от поверхности водоносных горизонтов.

Почва – является одним из основных природных факторов при оценке уязвимости подземных вод. Одними из главных параметров почв, имеющих отношение к уязвимости, являются: мощность, текстура и структура, содержание

органических веществ и глинистых минералов. Почвы представляют собой “первую линию защиты” относительно движения загрязняющих веществ, выпадающих на поверхность или складируемых на ней, с инфильтрационными потоками. Почвы имеют высокий вес при оценке уязвимости подземных вод к диффузным источникам загрязнения (удобрения, пестициды). Чем выше мощность почвенного покрова, чем выше содержание в нём органических веществ и глинистых минералов (особенно монтмориллонита), тем ниже уязвимость подземных вод (или выше их защищённость от поверхностного загрязнения). При составлении карт уязвимости подземных вод различают почвенные покровы, находящиеся в природных условиях и под влиянием антропогенной деятельности. В последнем случае уязвимость будет выше.

Ненасыщенную зону можно назвать “второй линией защиты” подземных вод первого от поверхности водоносного горизонта. Она задерживает поступление загрязняющих веществ посредством разнообразных химических и физических процессов (сорбция, ионный обмен, хемо- и биодеструкция). Важнейшее значение имеют мощность ненасыщенной зоны и её строение. Чем выше эта мощность и чем выше доля слабопроницаемых пород в разрезе ненасыщенной зоны, тем ниже уязвимость подземных вод.

Насыщенная зона (водоносный горизонт) представляет собой разнородную систему и её влияние на уязвимость подземных вод варьирует в пространстве и по глубине. При оценке уязвимости обычно учитывают следующие факторы и параметры:

- гидродинамический характер водоносного горизонта (безнапорный, напорный, субнапорный);
- положение в области фильтрации (область питания, транзита или разгрузки, важное значение это имеет для напорных горизонтов);
- водопроницаемость (коэффициент фильтрации) и емкостные характеристики водоносного горизонта.

Чем ниже мощность водоносного горизонта, чем меньше его водопроницаемость и ниже емкостные свойства, тем более уязвимыми к загрязнению являются подземные воды.

Единой методики оценки уязвимости подземных вод не существует. Авторы отдельных карт уязвимости на отдельные территории (Европы, Франции, Великобритании, некоторых районов США и др.) использовали различные подходы к ранжированию и оценке вкладов вышерассмотренных факторов.

Таким образом, широко используемая в России для оценки защищённости подземных вод от загрязнения методика Гольдберга В.М., разработанная во ВСЕГИНГЕО, отличается от западных методик в первую очередь отсутствием учета величины инфильтрационного питания подземных вод.

Крайняя важность проблемы оценки уязвимости подземных вод (или их защищённости) предполагает непрерывное совершенствование существующих методик и разработку новых. В нашей стране большой вклад в это направление гидрогеологических (гидрогеоэкологических) исследований внесла Анна Павловна Белоусова [1, 2]. Рассмотрение особенностей её подходов к оценке уязвимости (защищённости) подземных вод выходит за рамки данного учебно-методического пособия.

Контрольные вопросы к главе 5

4. *Чем отличаются и как соотносятся понятия “защищённость подземных вод” и “уязвимость подземных вод”?*

5. *Какие основные параметры (факторы) учитываются при оценке уязвимости подземных вод к загрязнению?*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование подземных вод для различных целей неуклонно увеличивается в масштабах всего мира. При этом наиболее ценными являются пресные подземные воды, которые в виде невыдержанного маломощного слоя (оболочки) залегают в самой верхней части земной коры. В последние десятилетия одними из наиболее острых вопросов становятся вопросы защиты пресных подземных вод от истощения и загрязнения. Поэтому оценка защищённости этих вод от загрязнения является важнейшим профилактическим защитным мероприятием, которая должна проводиться при любом хозяйственном освоении (использовании) территорий. В России для такой оценки, как уже ранее отмечалось, очень широко используется рассмотренная в данном учебно-методическом пособии методика В. М. Гольдберга. Её достоинством является относительная простота и наглядность, а также базирование на использовании фактического материала, который может быть получен при проведении рядовых геологических исследований с применением бурения без каких-либо длительных и дорогостоящих гидрогеологических работ. Студенты-гидрогеологи должны хорошо знать эту методику и иметь навыки её практического применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусова А. П. Качество подземных вод. Современные подходы к оценке. – М.: Наука, 2001. – 239 с.
2. Белоусова А. П. Основные принципы и рекомендации по оценке и картированию защищённости подземных вод от загрязнения //Водные ресурсы. – 2003. – Т .30, № 6. – С. 667–677.
3. Василенко О. И., Ишханов Б. С., Капитонов И.М., Селиверстова Ж. М., Шумаков А.В. Радиация: учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ, 1996. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/radiation/> (дата обращения 01.07.2022).

4. Гольдберг В. М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 245 с.
5. Гольдберг В. М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. – М.: Недра, 1984. – 263 с.
6. Гольдберг В. М., Скворцов Н. П. Проницаемость и фильтрация в глинах. – М.: Недра, 1986. – 160 с.
7. Зекцер И. С. Подземные воды как компонент окружающей среды. – М.: Изд-во Научный Мир, 2001. – 328 с.
8. Подземные воды Мира: ресурсы, использование, прогнозы /под ред. И.С. Зекцера. – М.: Наука, 2007. – 438 с.
9. Margat J. Vulnerabilite des nappes d'eau souterraine a la pollution: Bases de la cartographie. – Jrlaans, 1968. – 123 p.
10. Vrba J., Zaporozec` A. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. – Hannover, 1994. – 131 p.