

## Н. П. КАРПЕНКО

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## АНАЛИЗ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПОРОД ЗОНЫ АЭРАЦИИ И ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ ГРУНТОВЫХ ВОД В ЗОНЕ СБРОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ СТОКОВ

*Изучены основные защитные свойства пород зоны аэрации с целью оценки защищенности грунтовых вод. На основании характерных кривых изменения водно-физических свойств различных пород дан анализ структур порового пространства зоны аэрации. Предложена приближенная зависимость для оценки времени достижения уровня грунтовых вод фильтрующимися с поверхности загрязненными сточными водами для условий однородного разреза зоны аэрации и постоянства уровня стока загрязнителей.*

*Структура порового пространства, неоднородность среды, защитные свойства зоны аэрации, защищенность подземных вод, загрязняющие вещества.*

*There are studied protective properties of the aeration zone with an aim of assessment of ground water protectability. On the basis of character curves of the change of water – physical properties of different rocks there is given an analysis of pore space structures of the aeration zone. The approximate dependence is proposed for assessment of the time of reaching the ground water level by the contaminated waste water filtered from the surface for the conditions of the homogenous cut of the aeration zone and permanency of the level of pollutants runoff.*

*Structure of pore space, heterogeneity of the medium, protective properties of the aeration zone, protectability of underground water, polluting matters..*

Защитные свойства пород зоны аэрации и их структура порового пространства являются важнейшими характеристиками почв и почвенного покрова. Выбор той или иной модели структуры порового пространства определяется прежде всего литологическим строением и особенностями пористых сред и транзитного потока загрязнителей на уровень грунтовых вод.

Многие исследователи подчеркивают, что модели пористых сред наиболее адекватно и реально имитируют морфологическую характеристику почв, где первостепенное значение имеет макро- и микроморфология.

Структурные характеристики геометрии порового пространства почв и пород зоны аэрации дают возможность выявить особенности их строения, установить блочность или макронеоднородность пористых сред – именно с этими особенностями связано объяснение транзитного потока (by pass). В частности, модель макронеоднородности существенным образом определяет не только транзитную составляющую инфильтрационного потока на уровень грунтовых вод при орошении, но и определяет выбор расчетной модели солепереноса и ее структуру.

Установлена и экспериментально до-

казана тесная связь проницаемости (коэффициента фильтрации) и диаметра макропор, показывающая существенное увеличение проницаемости пород от гранулометрического состава, в частности диаметра зерна (рис. 1).

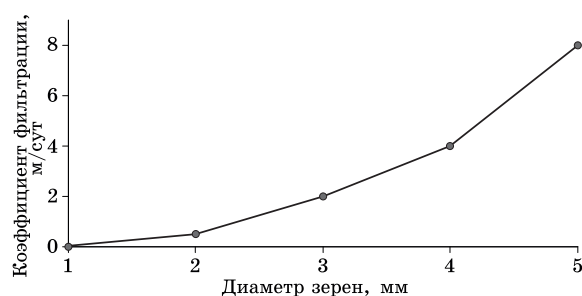


Рис. 1. Зависимость коэффициента фильтрации  $K_f$  пород зоны аэрации от размера диаметра зерен  $d$

При изучении процессов фильтрации и солепереноса, вопросов оценки поглощения и нейтрализации загрязнителей для верхней части почвенного покрова и пород зоны аэрации, а также в задачах защищенности подземных вод выбор модели структуры порового пространства и модели среды является определяющим.

В настоящее время экспериментальным путем доказано реальное существование двух моделей структуры порового пространства среды – модели сдвойной пористостью и модели макронеоднородности [1,2].

На основании анализа проведенных экспериментальных и собственных исследований предлагается использовать генетический подход к изучению структуры порового пространства и принять следующую классификацию моделей поровых сред:

гомогенные пористые среды (модели однородных гомогенных сред с равномерной упаковкой частиц песчаного и супесчаного состава; модели квазиоднородных гомогенных сред с неравномерной упаковкой частиц песчаного и супесчаного состава);

гетерогенные пористые среды (модели неоднородных гетерогенных сред с двойной пористостью; гетерогенные анизотропные и слоистые модели неоднородных сред;

гетерогенные модели макронеоднородности; гетерогенно-блоковые модели с мозаичной структурой).

Пористые среды в глинистых отложениях отражают специфику и структурные особенности среды ее формирования, которые заключаются в наличии активных в физико-химическом отношении зон и относительно застойных областей, которые в значительной степени отражают особенности формирования химического состава грунтовых вод и процессов фильтрации и миграции в этих отложениях.

Различие структур порового пространства и связанного с ним свойства содержать определенный и необходимый объем влаги для различных пород – песков, суглинков и глин – наглядно проявляются на характерных кривых изменения величин общей пористости, полевой влагоемкости и влажности завядания (рис. 2).

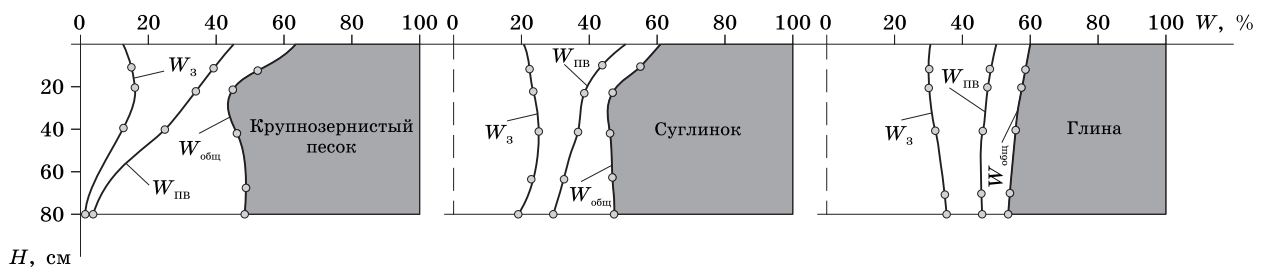


Рис. 2. Характерные кривые изменения величин общей пористости  $W_{общ}$ , полевой влагоемкости  $W_{пв}$  и влажности завядания  $W_з$  с глубиной для различных типов почв

Некоторые исследователи для характеристики защитных свойств зоны аэрации используют понятие экогеологического сопротивления (или удельного экогеологического сопротивления) – интегральной величины, обратной скорости движения загрязнителя, подъема уровня грунтовых вод и т. п. В это понятие включается мощность зоны аэрации, влажность пород, капиллярно-пленочный потенциал, коэффициент

влагопроводности, литологическое строение и т. д. Все это, в конечном счете, характеризует время прохождения (в сутках) фронта загрязнения одного метра пути движения [3].

Защитные свойства пород зоны аэрации были оценены количественно, получены характеристики некоторых защитных свойств пород зоны аэрации для различных зон России (табл. 1).

Таблица 1  
Результаты оценки некоторых защитных свойств пород зоны аэрации [3]

Регион и его литологическая характеристика	Инфильтрационное питание, мм/год	Скорость движения влаги в зоне аэрации, мм/год	Время прохождения одного метра зоны аэрации загрязнителем, сут
Каракумы, барханные пески	6,8	343	1064
Дагестан, пески	20,0	500	730,0
Дагестан, глинистое плато	10,0	135	1639,0
Воронежская область, глинистая равнина	50,0	431	841,0
Калужская область, пески, пашня	185,0	4700	77,5
Калужская область, суглинки	100,0	843	388,0
Калужская область, супеси, пашня	253,0	2369	154,0

Интегральная оценка поровой среды пород зоны аэрации тесным образом связана с естественной защищенностью грунтовых вод от поверхностного загрязнения. Степень естественной защищенности подземных вод зависит от многих факторов: состава почвенного покрова, строения и свойств пород зоны аэрации, геолого-гидрогеологических условий, наличия перекрывающих слабопроницаемых отложений и литологических «окон», направления и уклона фильтрационного потока, свойств загрязняющих веществ и их миграционной способности и т. д.

Основные вещества, загрязняющие грунтовые воды: промышленные отходы, нефть и нефтепродукты, бытовые отходы, воды шахтного и рудничного водоотлива, отходы сельского хозяйства, природные некондиционные воды. Так, растворы некоторых минеральных солей (хлоридов, сульфатов, нитратов и др.) и долгоживущие радиоактивные изотопы являются очень стойкими и распадаются медленно (период полураспада десятки и сотни лет).

Пестициды относятся к органическим соединениям и характеризуются периодом распада от нескольких десят-

ков суток до 10 лет. Наиболее стойкие – хлорорганические пестициды со сроком распада от 5 до 10 лет.

Бактериальное загрязнение – сравнительно нестойкое и сохраняется от 30 до 300 сут. Биологические организмы, преимущественно патогенные, представлены бактериями, вирусами, нематодами, простейшими, насекомыми и другими паразитами, переносчиками которых являются человек и животные. Они попадают в почву одновременно с различными отходами, в которых сохраняют жизнеспособность достаточно долгое время, например: стафилококки и стрептококки – в течение 50–150 дней; палочка брюшного тифа – 2–3 месяца; дифтерийная палочка – 20–30 дней; дизентерийная – 15–20 дней; туберкулезная – 300 дней.

При рассмотрении миграции загрязнителей по прочности сорбционных связей тяжелые элементы располагаются следующим образом:  $Cd < Ni < Zn < Pb < Cu$ . При этом кадмий способен мигрировать более интенсивно по сравнению с другими тяжелыми металлами.

При миграции кадмия через слой 1 м можно наблюдать следующие характерные значения миграции (табл. 2).

Таблица 2

**Результаты оценки некоторых защитных свойств почв и пород зоны аэрации при миграции кадмия [3]**

Тип почвы и литологический состав	Коэффициент фильтрации $K_f$ , м/сут	Величина инфильтрационного питания $W$ , мм/год	Время миграции до уровня грунтовых вод $T$ , лет
Пески	1,000	100	35
Супеси	0,100	100	75
Суглинки	0,010	100	150
Глины	0,001	100	250
Дерново-подзолистая песчано-супесчаная почва	0,500	100	100
Дерново-подзолистая суглинистая почва	0,010	100	200
Серая лесная почва	–	–	500
Чернозем лесостепной зоны	–	–	5000

Из радионуклидов наиболее опасным загрязнителем является стронций-90, период полураспада которого  $t_{1/2} = 28,4$  года. На степень защищенности подземных вод существенно влияют процессы влагопереноса, сорбции и деструкции загрязнителей (тяжелых металлов, нитратов, радионуклидов, нефтепродуктов и др.). Определяющую защитную роль при оценке защищен-

ности грунтовых вод играют почвенные слои – наиболее активный в физико-химическом отношении элемент зоны аэрации.

Оценку защищенности грунтовых вод от поверхностного загрязнения следует проводить, исходя из оценки времени достижения предельно-допустимой концентрации (ПДК) конкретного загрязнителя на уровень грунтовых вод.

Степень защищенности подземных вод можно определять непосредственно по времени фильтрации загрязненных вод от поверхности земли до водоносного горизонта.

Приближенная оценка времени достижения уровня грунтовых вод фильтрующимися с поверхности сточными водами для условий однородного разреза зоны аэрации и постоянства уровня стока загрязнителей может быть определена по следующей формуле [4]:

$$t = (\mu H / k) [m / H - \ln(1 + m / H)], \quad (1)$$

где  $H$  – высота столба сточных вод в хранилище;  $k$  и  $m$  – соответственно коэффициент фильтрации и мощность зоны аэрации;  $\mu$  – недостаток насыщения пород зоны аэрации.

При наличии в основании хранилища жидких стоков защитного экрана из слабопроницаемых пород время достижения уровня грунтовых вод фильтрующимися с поверхности сточными водами складывается из времени фильтрации через защитный экран  $t_1$ , определяемого по (1), и времени фильтрации через собственно зону аэрации  $t_2$ . Время  $t_2$  можно определить по следующей зависимости [4]:

$$t_2 = (n_2 H / k_2) \{m_2 / H [1 - (m_1 / H) \times (k_2 / k_1 - 1)] \times \ln [1 + m_2 / (H + m_1)]\}, \quad (2)$$

где  $k_1$  и  $m_1$  – коэффициенты фильтрации и мощность защитного экрана;  $n_2$ ,  $m_2$ ,  $k_2$  – активная пористость, мощность и коэффициент фильтрации зоны аэрации соответственно;  $H$  – высота столба сточных вод в хранилище.

Оценку защитных свойств пород зоны аэрации и защищенности грунтовых вод малоопасными загрязняющими веществами проводили на объекте сбросов химико-фармацевтического производства на территории комбината, расположенного в Ногинском районе Московской области. Исследуемая территория располагается на Мещерской озерно-ледниковой низменной равнине, отличающейся сложным гетерогенным сочетанием различных компонентов регионального ландшафта. Повсеместное распределение в границах типологического ландшафта песчаных, супесчаных почвообразующих средне- и верхнечетвертичных отложений аллювиального и водно-ледникового генезиса определило своеобразие почвенных условий. Геолого-гидрогеологический разрез района исследований представлен на рис. 3.

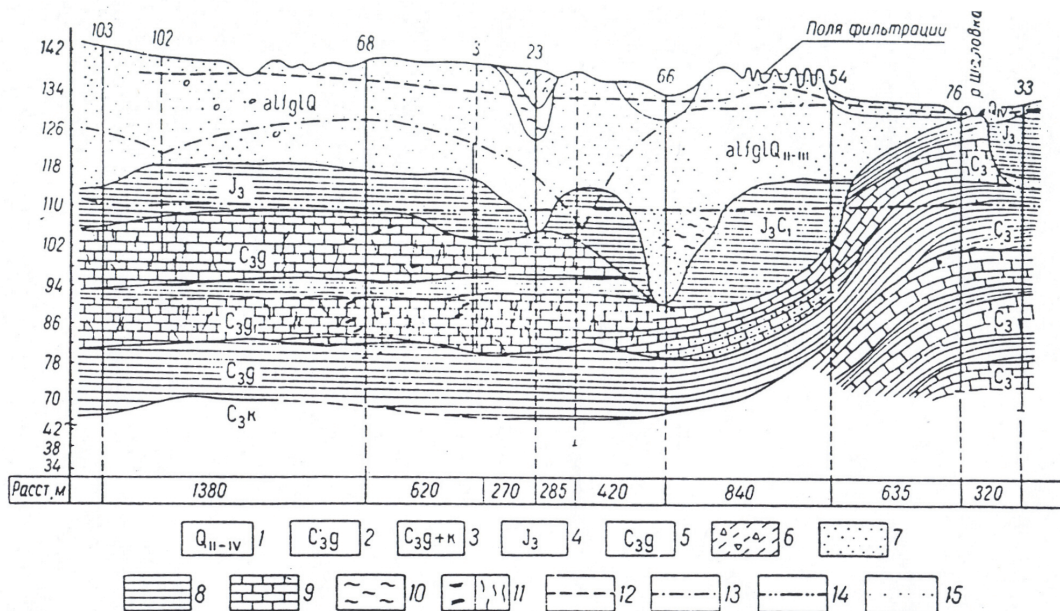


Рис. 3. Схематический геолого-гидрогеологический разрез района исследований (Е. С. Минкин, 1972): 1 – водоносный горизонт четвертичных отложений; 2 – гжельский водоносный горизонт верхнего карбона; 3 – касимовский водоносный горизонт верхнего карбона (включает нижнюю русавкинскую толщу гжельского яруса); 4 – верхнеюрские глины; 5 – глины шелковской толщи гжельского яруса; 6 – насыпной грунт; 7 – песок тонко- и мелкозернистый; 8 – глина; 9 – известняки; 10 – иловатость; 11 – окремелость и трещиноватость; 12 – уровень подземных вод четвертичного водоносного горизонта; 13 – то же гжельского водоносного горизонта; 14 – то же касимовского водоносного горизонта; 15 – границы между литологическими разностями пород

Результаты проведенных исследований позволили выявить, что в течение длительного времени сброса промышленных стоков в естественные понижения местности (овраги, понижения в долине реки Шаловки и др.) возникли серьезные геоэкологические проблемы, связанные с существенным загрязнением природных компонентов (почв, пород зоны аэрации, грунтовых вод и глубоких водоносных горизонтов). Было установлено загрязнение по следующим типам загрязнителей: тяжелым металлам, органическим соединениям (летучим и полуметучим), радиохимическим ингредиентам. Среди тяжелых металлов были обнаружены такие загрязнители, как медь, цинк, марганец, никель, хром, кадмий, свинец, ртуть. Установлены высокие концентрации для большинства зарегистрированных соединений: по метанолу; этанолу; 1, 2-дихлорэтану; толуолу; хлорбензолу; этиловому эфиру изоникотиновой кислоты; амидопирину и др. Проведенные исследования выявили загрязнение природной среды органическими соединениями, из которых наиболее опасны следующие: 1, 2-дихлорэтан, 1 и 1,2-трихлорэтан, хлорбензол, циклогексанон, бромбензол, фенол и анилин [5].

Количественная оценка защищенности грунтовых вод от локального поверхностного загрязнения может быть определена как отрезок времени (в годах), который необходим для проникновения несорбируемого загрязнителя через зону аэрации до уровня грунтовых вод по следующей упрощенной зависимости (Д. А. Манукьян, В. И. Сметанин, 2000):

$$t = 40 / W \cdot m(k)^{-1/n}, \quad (3)$$

где  $W$  – интенсивность инфильтрационного питания, мм/год;  $m$  – мощность зоны аэрации, м;  $k$  – коэффициент фильтрации, м/сут;  $n$  – безмерный показатель степени, учитывающий принятую модель влагопереноса (для песков  $n = 3,6$ ).

Для условий изучаемого объекта интенсивность естественного инфильтрационного питания  $W = 55$  мм/год при мощности зоны аэрации  $m = 10$  м и при среднем значении коэффициента фильтрации  $k = 4$  м/сут.

Время, в течение которого несорби-

руемый загрязнитель проникает через зону аэрации до уровня грунтовых вод, составляет  $t = 5$  лет. В период интенсивного сброса сточных вод на поля фильтрации интенсивность техногенного инфильтрационного питания достигала величины  $W = 450$  мм/год, а время продвижения контура загрязнителя через зону аэрации до уровня грунтовых вод составило  $t = 0,62$  года.

Таким образом, количественная оценка защищенности грунтовых вод позволяет обосновать необходимый комплекс природоохранных работ по рекультивации земель для восстановления благоприятной геоэкологической обстановки на исследуемой территории.

1. Манукьян Д. А., Галибин Н. С. Изучение процессов солепереноса с помощью радиоиндикационных методов: Коллекторно-дренажные системы в аридной зоне: сборник науч. трудов. – М.: ВНИИГиМ, 1986. – С. 92–104.

2. Карпенко Н. П. Исследование структуры порового пространства почв и пород зоны аэрации // Вестник РАСХН. – 2006. – № 2. – С. 61–63.

3. Чубаров В. Н. Питание грунтовых вод пустыни через зону аэрации (механизм, методы изучения, оценка). – М.: Недра, 1972. – 135 с.

4. Гольдберг В. М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. – М.: Недра, 1984. – 262 с.

5. Сметанин В. И. Методы и технологии рекультивации и восстановления водных объектов: дис. ... д-ра техн. наук. – М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2000. – 240 с.

Материал поступил в редакцию 30.01.14.

**Карпенко Нина Петровна**, доктор технических наук, профессор кафедры «Гидрология, гидрогеология и регулирование стока»

Тел. 8 (499) 976-22-27

E-mail: npkarpenko@yandex.ru