
ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 624.131

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КЛАДБИЩА НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2017 г. И. В. Галицкая, И. А. Позднякова, Г. И. Батрак, И. А. Костикова

*Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН,
Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия.
E-mail: galgeoenv@mail.ru*

Поступила в редакцию 28.07.2016 г.

Оценка влияния кладбища на загрязнение подземных вод выполнялась по материалам эколого-геохимических исследований на прилегающей к кладбищу территории в связи с ее застройкой. Из-за крайне недостаточной информации об источнике загрязнения основным инструментом исследований были имитационные расчеты переноса поступающих с территории кладбища загрязняющих веществ на основе разработанной численной модели геофильтрации и геомиграции. Расчеты помогли установить главный фактор, влияющий на загрязнение подземных вод; определить пути миграции загрязняющих веществ от кладбища, ограничить область его влияния, проанализировать возможные варианты формирования наблюдаемого распределения концентраций в подземных водах, дать текущую и прогнозную оценку влияния кладбища на подземные воды и определить границы санитарно-защитной зоны, за пределами которой возможна застройка.

Ключевые слова: *подземные воды, поверхностные воды, загрязнение, геофильтрация, геомиграция, модель, численные расчеты, хлор-ион, санитарно-защитная зона кладбища.*

ВВЕДЕНИЕ

В непосредственной близости к небольшому сельскому кладбищу, расположенному на склоне в долине р. Грязева, планируется построить жилой поселок. Основная проблема, возникающая при застройке прилегающей к кладбищу территории, – оценка возможного влияния кладбища на загрязнение почвы, подземных и поверхностных вод с целью определения необходимого удаления границ застройки от кладбища. Задача оценки текущего и прогнозного влияния кладбища на окружающую среду решалась в два этапа: на первом были выполнены геоэкологические исследования, включавшие опробование почв, подземных и поверхностных вод на территории, прилегающей к кладбищу, на втором – геофильтрационное и геомиграционное моделирование.

Результаты геоэкологических исследований показали, что спустя 35–40 лет существования кладбища приоритетными в разложении останков являются процессы нитрификации – биохимического окисления аммонийного азота до нитратов [1]. Концентрации индикаторов влияния кладбища (соединений азота, хлоридов, органических

соединений) в подземных и поверхностных водах незначительно превышают нормативные показатели. Особенность распределения в подземных водах индикаторов влияния кладбища заключается в том, что их максимальные значения зафиксированы в наиболее удаленных от кладбища скважинах. Аномальное распределение компонентов-индикаторов влияния кладбища в подземных водах, а также присутствие в почвах, водонасыщенных породах и подземных водах нетипичных для кладбища нефтепродуктов и кишечных палочек указывают на возможность существования иных кроме кладбища источников их поступления и сценариев формирования качества подземных вод.

Для проверки различных сценариев формирования качества подземных вод на территории, прилегающей к кладбищу; объяснения аномального распределения в подземных водах концентраций компонентов – индикаторов влияния кладбища; оценки текущего и долгосрочного влияния кладбища на подземные и поверхностные воды; обоснования необходимого расстояния, на которое должны быть удалены от кладбища границы застройки, выполнено геофильтрационное и геомиграционное моделирование.

Геофильтрационное моделирование осуществлялось с целью получения основных характеристик потока подземных вод и полей скоростей фильтрации для расчета траекторий и скоростей переноса загрязнения в геомиграционной модели. Геомиграционное моделирование заключалось в выполнении имитационных расчетов миграции компонентов – индикаторов влияния кладбища, с целью проверки разных сценариев формирования качества подземных вод.

ГЕОФИЛЬТРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЕРРИТОРИИ

Гидрогеологические условия территории характеризуются наличием в верхней части разреза нескольких водоносных горизонтов во флювиогляциальных (fgQ) и верхнеюрских (J_3v) песках, разделенных слабопроницаемыми моренными суглинками [1]. Водоносные горизонты гидравлически связаны между собой и имеют общие условия формирования. Мощность водонасыщенной толщи в четверичных и верхнеюрских отложениях изменяется от 40 м на водоразделе до 15 м в долине реки. Строение толщи неоднородное. Так, на водоразделе и склоне 1-й от поверхности водоносный горизонт в разнородных среднечетвертичных песках (fgQ_2ms) отделен от 2-го в нижне-среднечетвертичных песках (fgQ_1dns-Q_2ms) слабопроницаемыми суглинками московской морены (gQ_2ms). В долине реки из-за отсутствия разделяющих суглинков эти горизонты объединяются в единый. Водоносный горизонт в верхнеюрских песках повсеместно отделен от вышележающих горизонтов слабопроницаемыми суглинками днепровской морены (Q_1dns) и мощными слабопроницаемыми келловей-оксфордскими ($J_{2-3}kl-ox$) глинами от более глубоких водоносных горизонтов в каменноугольных известняках.

Соотношение напоров подземных вод во всем изученном интервале глубин указывает на существующие предпосылки перетекания подземных вод из вышележащих в более глубокие горизонты через слабопроницаемые отложения. Поток подземных вод в верхней части разреза формируется за счет местного инфильтрационного питания, разгрузка осуществляется в р. Грязева и водоносные горизонты в каменноугольных известняках в результате перетекания через слабопроницаемые келловей-оксфордские глины.

Концептуальная модель формирования загрязнения подземных вод под влиянием кладбища предполагает, что на участке кладбища специфические химические компоненты – индикаторы

влияния, образующиеся при биохимическом разложении останков, поступают с инфильтрационным питанием в первый от поверхности водоносный горизонт в слоистой толще водно-ледниковых отложений, затем переносятся латеральным потоком по горизонту и с вертикальным потоком в результате перетекания через слабопроницаемые моренные суглинки попадают в более глубокие водоносные горизонты, где переносятся латеральным потоком подземных вод. Основное требование к геофильтрационной модели в такой постановке заключается в том, что она должна позволять моделировать перенос в слоистой толще, т.е. воспроизводить наиболее подробно строение разреза и фильтрационную неоднородность.

Для создания численной модели выполнена геофильтрационная схематизация гидрогеологических условий территории, прилегающей к кладбищу, которая заключалась в обосновании режима фильтрации подземных вод, пространственной структуры и границ потока, фильтрационных параметров, параметров питания и взаимосвязи подземных и поверхностных вод.

Поскольку миграционные процессы протекают значительно медленнее фильтрационных, режим фильтрационного потока во времени рассматривался как стационарный напорно-безнапорный в верхнем горизонте и напорный в остальных. Основное допущение заключается в том, что наблюдаемые за период изысканий уровни подземных и поверхностных вод примерно соответствуют среднепогодным.

Пространственная структура потока трехмерная – плановая фильтрация в водоносных горизонтах и вертикальная в разделяющих их слабопроницаемых отложениях. Расчетная область фильтрации включала пять пластов:

- 1) водоносный пласт в среднечетвертичных флювиогляциальных разнородных песках (fgQ_2ms);
- 2) слабопроницаемый пласт в слабопроницаемых суглинках московской морены (gQ_2ms);
- 3) водоносный пласт в нижнечетвертичных флювиогляциальных отложениях (fgQ_1dns);
- 4) слабопроницаемый пласт в слабопроницаемых суглинках донской морены (gQ_1dns);
- 5) водоносный пласт в песках волжского яруса верхней юры (J_3v).

Размеры расчетной области в плане составили 2162 м (x) × 2256 м (y), что позволило включить территорию, на которой проводились

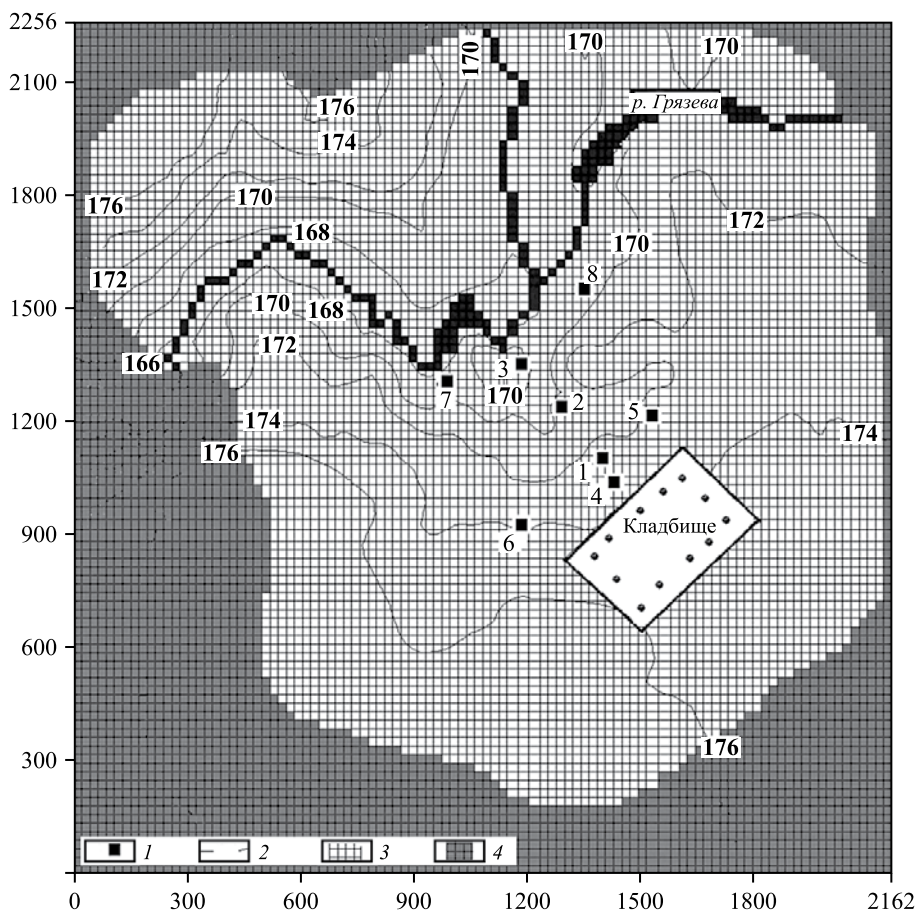


Рис. 1. Расчетная область в плане: 1 – скважина; 2 – изолиния равного напора 1-го от поверхности водоносного пласта, м; блоки 3 – расчетные, 4 – фиктивные.

геоэкологические исследования, и расположенный ниже по склону поверхностный водоток – р. Грязева (рис. 1). Вертикальный размер модели изменялся от 20 м в долине реки до 40 м на водоразделе.

В плане расчетная область фильтрации ограничивалась непроницаемыми границами по линиям местных локальных водоразделов и боковым линиям тока. В 1-м пласте по контуру водотоков задавалось внутреннее граничное условие 3-го рода. Отметки уреза воды в водотоке составили 167–170 м при глубине русла 1–2 м, параметр подрусловых отложений $A_0,5 = 200 \text{ сут}^{-1}$.

На уровень грунтовых вод в 1-й водоносный пласт задавалось инфильтрационное питание. Среднегодовое интенсивность инфильтрационного питания подземных вод в естественных условиях, оцененная при помощи программы HELP, входящей в программный комплекс по расчету влагопереноса в зоне аэрации WHI UnSat Suite, разработанный Waterloo Hydrogeologic, составила 150–160 мм/год.

На нижней границе модели по кровле келловей-оксфордских глин задавалось перетекание

подземных вод из юрского водоносного горизонта в каменноугольные при помощи граничного условия 3-го рода. Диапазоны начальных значений коэффициентов фильтрации разнородных песков составили 1–5 м/сут, слабопроницаемых суглинков $0.1-10^{-3}$, глин $10^{-3}-10^{-5}$ м/сут.

Для создания численной геофильтрационной и геомиграционной модели была использована лицензионная программа ввода, подготовки и вывода результатов Visual Modflow 4.3, разработанная Waterloo Hydrogeologic, со встроенными модулями по расчету фильтрации подземных вод MODFLOW и модулем по расчету миграции подземных вод MT3DMS. Расчетная область была разбита на блоки с размером 31 м (x) × 22 м (y) и 20 м (x) × 22 м (y). Общее количество блоков составило 98 (x) × 98 (y).

Калибровка модели проводилась в два этапа. На первом этапе геофильтрационная модель калибровалась без учета миграционных процессов и подбора миграционных параметров. На втором этапе при моделировании переноса загрязнения

Таблица 1. Сравнение наблюдаемых и расчетных уровней подземных вод

Номер скважины	Абсолютные отметки уровня подземных вод, м					
	замеренные	расчетные	замеренные	расчетные	замеренные	расчетные
	первый пласт		третий пласт		пятый пласт	
1	172.1	172.9	170.2	170.8	169.6	168.6
2	171.6	171.3			168.75	168.4
3	167.4	169.4	165.7	169.4		
4	173.2	173.1				
5	173.6	172.8	173.6	171.5		
6	172.5	172.6	172.5	172.5		
7	169.3	169.3	169.3	169.2		
8	168.1	169				

Таблица 2. Параметры геофильтрационной модели

Коэффициент фильтрации, м/сут	Значение	
	начальное	принятое в модели
1-го пласта	1–5	1–2
2-го пласта	0.1–0.00001	0.001
3-го пласта	1–5	1
4-го пласта	0.1–0.00001	0.001
5-го пласта	1–5	1
Фильтрационное сопротивление русловых отложений, сут ⁻¹	5–200	5–100
Инфильтрационное питание, м/сут	4.1×10^{-4} – 4.3×10^{-4}	4.2×10^{-4}

подбирались миграционные параметры и уточнялись параметры геофильтрационной модели таким образом, чтобы не менялась полученная на первом этапе принципиальная гидродинамическая и балансовая структура потока подземных вод. Основные калибровочные цели – подобрать значения фильтрационных параметров, при которых

– отклонение рассчитанных и измеренных в скважинах значений напоров подземных вод не превышает 10% от перепада напоров подземных вод в расчетной области;

– расход разгрузки подземных вод “надьюрско-го” водоносного комплекса в водоток соответствует его минимальному зимнему межennaleму расходу 95%-ной обеспеченности, т.е. 400–500 м³/сут;

– заданная в модели средняя интенсивность инфильтрационного питания соответствует оцененной среднегодулетней интенсивности инфильтрационного питания.

Результаты калибровки модели показаны в табл. 1–3. Наибольшее расхождение расчетных

Таблица 3. Составляющие баланса модели, м³/сут

Приходные статьи		Расходные статьи	
Инфильтрационное питание	1313.87	Испарение	160.9
Приток из реки	62.00	Разгрузка в реку	451.96
		Перетекание	763.01
Итого	1375.87	Итого	1375.87

и наблюдаемых уровней подземных вод получено в скв. 3. Если исключить ошибку при замере уровня подземных вод, то его самое низкое положение в этой точке по сравнению с соседними можно объяснить близостью к переуглубленному участку долины с фильтрационным окном в келловей-оксфордских глинах, параметры которого были подобраны на модели. Наличие фильтрационного окна является только предположением, поэтому этот вариант не рассматривался как основной при калибровке миграционной модели. Однако в миграционных расчетах влияние фильтрационного окна на перенос загрязнения было рассмотрено.

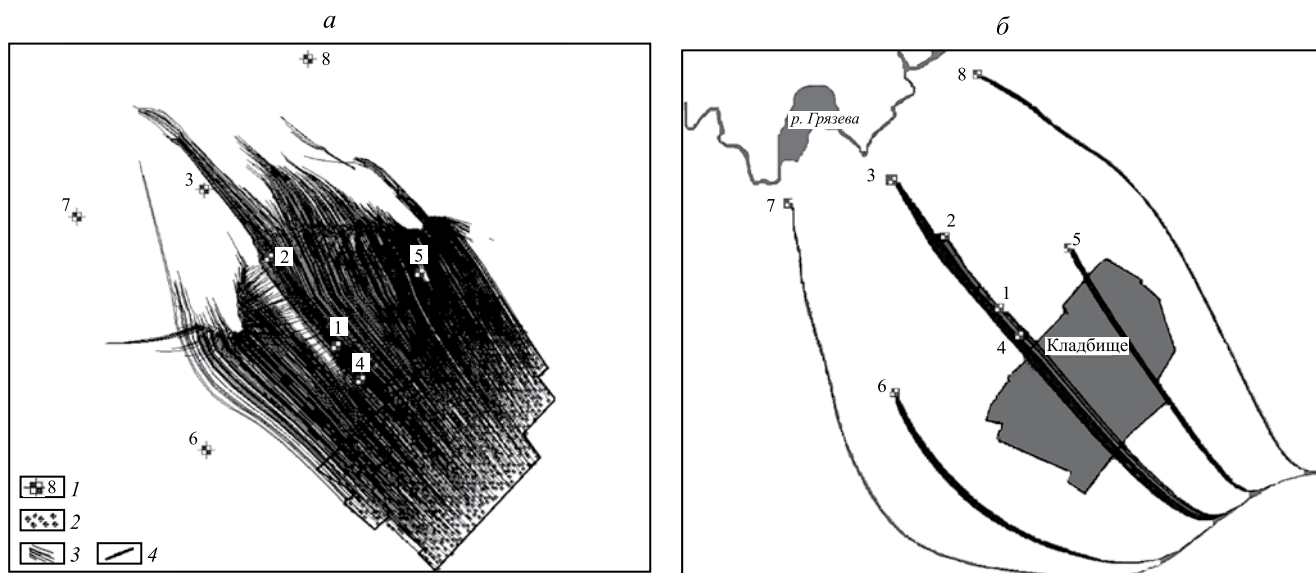


Рис. 2. Траектории движения частиц: *а* – от кладбища (1 – скважина; 2 – частицы; 3 – траектории движения; 4 – контур кладбища); *б* – к скважинам.

Полученная гидродинамическая структура фильтрационного потока подземных вод использовалась для оценки максимально возможной зоны влияния источника загрязнения и определения возможных путей поступления загрязнения к каждой скважине при помощи модуля расчета траектории частиц MODPATH.

Результаты расчетов показали, что от потенциального источника загрязнения – кладбища, возможно поступление загрязняющих веществ в подземные воды в скв. 1–5; в скв. 6–8 поступление загрязняющих веществ от кладбища невозможно (рис. 2*а*). К скв. 1–5 поступление загрязняющих веществ возможно не только от кладбища, но и от источников загрязнения, расположенных выше от него по потоку подземных вод (рис. 2*б*).

ГЕОМИГРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЕРРИТОРИИ

Миграционные расчеты выполнены при следующих допущениях:

- перенос загрязняющих веществ в подземных водах осуществляется с фильтрационным потоком и может быть описан в рамках конвективно-дисперсионной модели;
- рассматривается нестационарный режим переноса загрязняющих веществ;
- поступление загрязняющих веществ в подземные воды происходит с инфильтрационным питанием в источнике загрязнения (на территории кладбища) в 1-й водоносный пласт;

– активная пористость для водоносных пластов составляет 0.2, для разделяющих пластов – 0.25, продольная и поперечная дисперсия для водоносных пластов составляет 10 м и для разделяющих 0.1 м.

Из-за отсутствия достоверной информации об источнике загрязнения (какие, в каких концентрациях, как и когда поступали в подземные воды загрязняющие вещества) только на основе имеющейся одномоментной картины распределения загрязняющих веществ в подземных водах невозможно выполнить калибровку миграционной модели, т.е. подобрать значения миграционных и фильтрационных параметров, при которых воспроизводились бы существующие на данный момент в пределах выделенных границ гидродинамические и гидрогеохимические условия и решить эпигнозную и прогнозную задачи.

Тем не менее при помощи имитационного моделирования можно рассмотреть различные сценарии формирования такого нехарактерного распределения концентраций загрязняющих веществ в подземных водах на прилегающей к кладбищу территории. Например, под влиянием одного источника – кладбища, но с различной интенсивностью поступления загрязняющих веществ в подземные воды из этого источника (постоянной и максимальной в течение всего периода существования кладбища (42 года) и затухающей во времени за счет сокращения захоронений в последние годы).

Для имитационного моделирования переноса в подземных водах индикаторов влияния клад-

Таблица 4. Концентрации хлор-иона в подземных водах

Номер скважины	Абсолютное значение, мг/л	Относительное значение
первый пласт		
1	2.9	0.029
2	56.4	0.564
3	95.3	0.953
4	9.8	0.098
5	0	0
третий пласт		
1	19.4	0.194
3	95.5	0.955
пятый пласт		
1	4.0	0.04
2	1.74	0.0174

бища был выбран хлор-ион, несмотря на то что его содержание в подземных водах не превышает предельно допустимых концентраций (ПДК). Хлор-ион – нейтральный несорбируемый консервативный элемент, в то время как на перенос других индикаторов влияния, содержание которых превышает ПДК (например, соединений азота), накладываются биохимические трансформации азота из одной миграционной формы в другую при смене окислительно-восстановительных условий и сорбция аммонийного азота.

Расчеты выполнялись в относительных концентрациях, так как абсолютные концентрации, поступающие в подземные воды в источнике загрязнения, неизвестны. Принималось, что начальные относительные концентрации хлор-иона в подземных и поверхностных водах равны нулю, в инфильтрационном питании за пределами кладбища равны нулю во время всего расчета. Максимальные относительные концентрации хлор-иона, равные 1, поступают в подземные воды 1-го водоносного пласта с инфильтрационным питанием на территории кладбища. За

пределами кладбища относительные концентрации хлор-иона за счет процессов разбавления и смешения с чистыми инфильтрационным питанием и естественным потоком подземных вод с других территорий не могут быть больше, чем в источнике. Но максимальные значения относительных концентраций могут быть близки к 1.

Для пересчета абсолютных концентраций хлор-иона в относительные использованы данные по скв. 1–5 (табл. 4), а по скв. 6–8 не учитывались, так как в эти скважины поступление загрязняющих веществ с подземными водами от кладбища невозможно. На модели воспроизводились различные комбинации относительных концентраций хлор-иона, поступающих в подземные воды в источнике загрязнения, и периодов времени, в течение которого они поступают при постоянном расходе инфильтрационного питания: максимальные относительные концентрации хлор-иона, равные 1, поступают в подземные воды в источнике загрязнения от 30 до 42 лет (весь срок существования кладбища); минимальные 0–0.2 от 2 до 12 лет (период уменьшения захоронений).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Полученные расчетные относительные концентрации хлор-иона сравнивались с наблюдаемыми. Наибольшее совпадение было получено в варианте, когда в подземные воды в источнике загрязнения с инфильтрацией в течение 30 лет поступают максимальные относительные концентрации хлор-иона, равные 1, а остальное время (12 лет) равные 0.2 (табл. 5).

В этом варианте удалось получить принципиальную картину распределения концентраций хлор-иона, когда на конец расчетного периода (42 года) в ближних к источнику загрязнения скв. 1, 4 и 5 в первом пласте концентрации хлор-иона меньше, чем в наиболее удаленных скв. 2 и 3.

Таблица 5. Относительные концентрации хлор-иона

Номер скважины	Относительные концентрации хлор-иона					
	наблюдения		расчеты		наблюдения	
	первый пласт		третий пласт		пятый пласт	
1	0.029	0.02	0.194	0.23	0.04	0.01
2	0.564	0.25			0.0174	0.01
3	0.953	0.24	0.955	0.34		
4	0.098	0.003				
5	0	0				

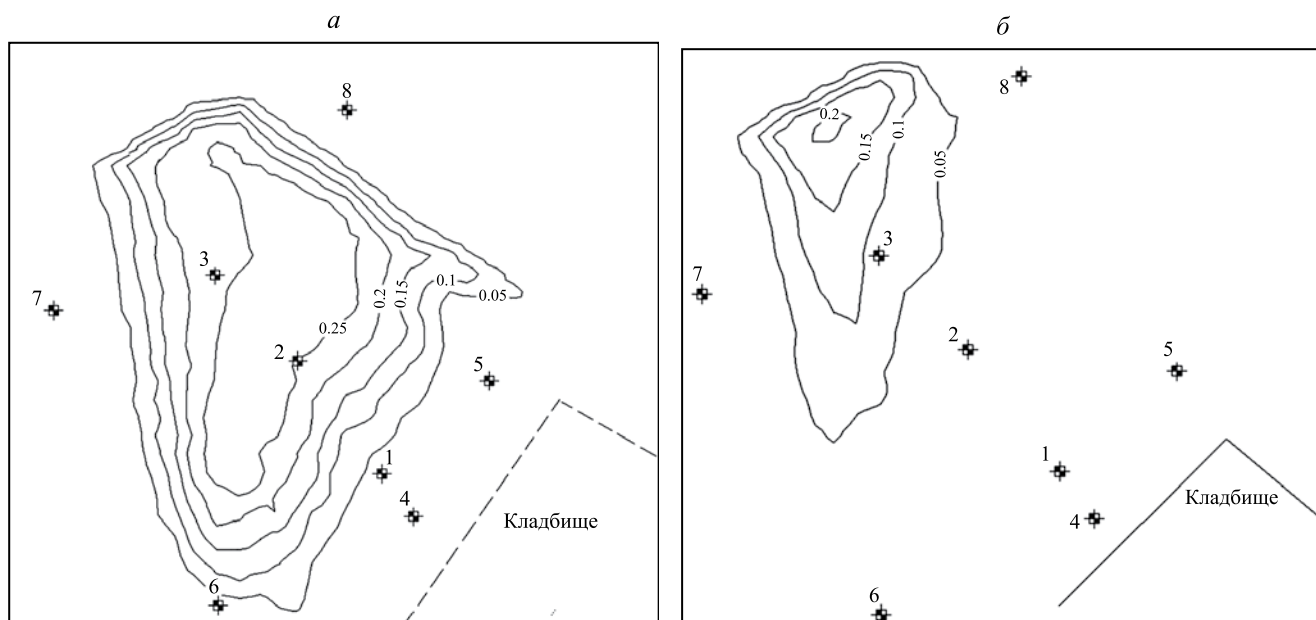


Рис. 3. Изолинии относительных концентраций хлор-иона в 1-ом водоносном пласте на конец расчетного периода: *а* – 42 года; *б* – 52 года.

Концентрации хлор-иона в 3-м пласте (скв. 1, 3) больше, чем в первом, а в 5-м пласте минимальные (скв. 1, 2). Моделирование показало механизм формирования такого распределения концентраций в подземных водах (по площади и в разрезе). За счет поступления в течение долгого времени с инфильтрационным питанием загрязняющих веществ в верхнем водоносном пласте на территории кладбища формируется область загрязнения, которая постепенно перемещается вниз по потоку в этом пласте и по разрезу в другие водоносные пласты за счет перетекания. При этом наблюдается постепенное падение концентраций от максимальных значений в очаге загрязнения под кладбищем до минимальных на удалении от него вниз по потоку и по глубине в разрезе (рис. 3*а*). Начиная с момента, когда новые захоронения прекращаются и начинаются редкие подзахоронения, концентрации загрязняющих веществ в инфильтрационном питании уменьшаются. В результате через несколько лет за счет смещения инфильтрационных и подземных вод горизонта под источником загрязнения формируется область относительно невысоких концентраций, а область с максимальными концентрациями смещается ниже по потоку и по разрезу.

Значения миграционных параметров, подобранные в этом варианте для наилучшего совпадения концентраций, показаны в табл. 6. Кроме того, были уточнены коэффициент фильтрации песков в 1-м водоносном пласте (1–2.5 м/сут) и слабопроницаемых суглинков в разделяющих

пластах (0.0001–1 м/сут), значение интенсивности инфильтрационного питания (0.0004 м/сут).

Расчеты показали, что если последующие 10 лет интенсивность поступления загрязняющих веществ в подземные воды из источника будет оставаться такой же пониженной, то максимальные относительные концентрации хлор-иона в 1-м пласте в скв. 3 уменьшатся до 0.1 (рис. 3*б*), полное очищение подземных вод этого пласта от загрязняющих веществ произойдет через 20 лет. Медленнее будет происходить очищение подземных вод 3-го и 5-го пластов, через 20 лет максимальные относительные концентрации хлор-иона в подземных водах указанных пластов соответственно составят 0.3–0.4 и 0.1–0.2.

Наибольшее расхождение расчетных и наблюдаемых относительных концентраций хлор-иона получилось в скв. 2 и 3, где расчетные концентрации существенно меньше наблюдаемых. Для того чтобы проверить, могут ли вообще доходить такие высокие концентрации к этим скважинам, был сделан вариант расчета, в котором в течение всего срока существования кладбища (42 года)

Таблица 6. Миграционные параметры пластов

№ пласта	Эффективная пористость	Общая пористость	Дисперсия, м
1	0.15	0.2	10
2, 4	0.25	0.3	0.001
3, 5	0.2	0.25	0.5

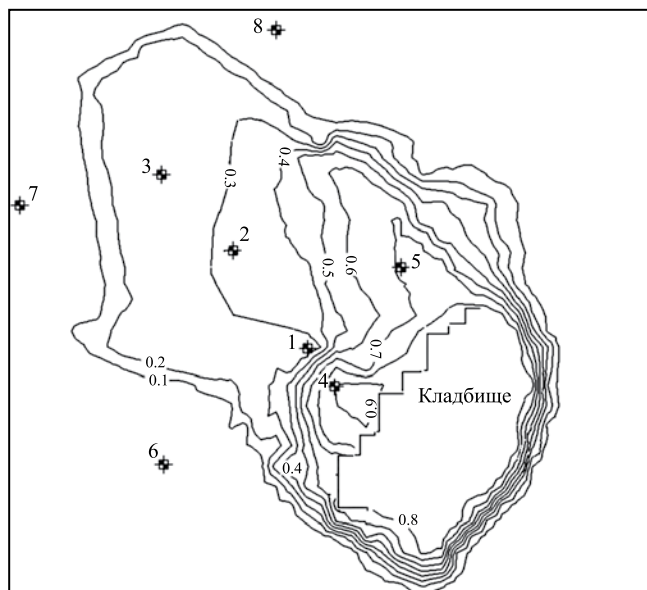


Рис. 4. Изолинии максимально возможных относительных концентраций хлор-иона в 1-ом водоносном пласте.

в источник поступают максимальные относительные концентрации, равные 1. Результаты расчета показали, что стационарный режим миграции, при котором продвижение фронта миграции и рост концентраций в подземных водах останавливается, наступает в 1-м пласте уже через 30 лет, в 3-м – через 40 лет, в 5-м – через 41 год. На этот момент максимальные относительные концентрации хлор-иона в подземных водах 1-го пласта составят 0.33 (скв. 2) и 0.23 (скв. 3), а в 3-м пласте 0.34, что существенно меньше наблюдаемых (рис. 4). Полученные результаты позволяют

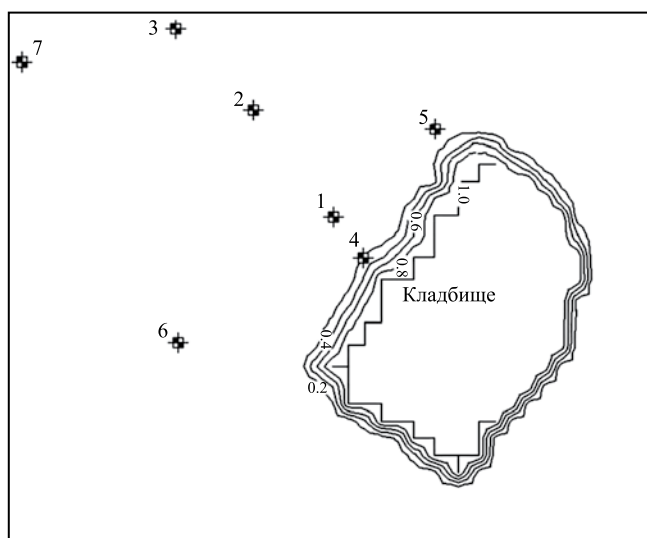


Рис. 5. Положение миграционного фронта на период выживаемости бактерий (400 сут).

предположить, что в подземные воды в районах этих скважин загрязнение поступает из дополнительных источников, которыми могли быть органические и минеральные удобрения, применявшиеся при выращивании сельскохозяйственных культур на этой территории ранее, сточные воды, поступающие при протечках подземного коллектора или экскременты лошадей и собак, которых выгуливают на этой территории в настоящее время.

Эти предположения подтверждаются наличием бактериального загрязнения почв и подземных вод в скв. 1, 2, 4, в то время как миграционный фронт за период выживаемости бактерий (400 сут) даже при условии высокой интенсивности захоронений на кладбище успевает доходить только до скв. 4, при этом максимальные относительные концентрации хлор-иона не превышают 0.2 (рис. 5).

Для оценки влияния фильтрационного окна в юрских отложениях в долине р. Грязева на перенос загрязняющих веществ от кладбища были выполнены миграционные расчеты, которые показали, что принципиальная картина распределения концентраций загрязняющих веществ в подземных водах не изменится. Миграционный фронт будет несколько суженным и продвигаться будет быстрее. Из-за более высоких скоростей миграции загрязняющих веществ раньше наступит стационарный режим миграции и при условии снижения интенсивности поступления загрязняющих веществ из источника очищение подземных вод в “надюрском” водоносном комплексе и “юрском” водоносном горизонте на территории исследований произойдет быстрее. Однако в случае наличия фильтрационного окна возможно загрязнение водозабора подземных вод в каменноугольных отложениях, расположенного ниже по течению реки.

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕЧНЫХ ВОД

Подземные воды, поступающие с территории кладбища и разгружающиеся в р. Грязева, содержат загрязняющие вещества, что может повлиять на качество речных вод. Задача оценки такого влияния актуальна для р. Грязева, так как эта малая река используется населением в культурно-бытовых и хозяйственных целях.

Река Грязева – левый приток р. Истра (левый приток р. Москвы); площадь водосбора составляет – 109.0 км²; протяженность – 26 км; число притоков с длиной менее 10 км – 6; средний многолетний годовой расход воды – 0.71 м³/с;

минимальный зимний и летний сток обеспеченностью 95% – 0.031 м³/с.

Основные процессы, которые происходят при разгрузке загрязненных подземных вод, – перенос речным потоком, смешение и разбавление речными водами, в результате турбулентной диффузии. Степень разбавления зависит от гидрологических и гидродинамических характеристик водотока, расхода разгружающихся подземных вод и механизма разгрузки.

Разгрузка подземных вод может происходить в результате постоянной относительно равномерной по площади всего русла реки фильтрации через донные отложения или сосредоточенной по линии уреза реки (береговой линии), или на уровне ее дна. В геофильтрационной модели было задано граничное условие, моделирующее разгрузку подземных вод в каждый расчетный блок по площади всего русла р. Грязева, т.е. площадную разгрузку.

Расчет средней концентрации загрязняющих веществ в речных водах в результате их смешения с подземными ниже зоны разгрузки выполнялся на основе уравнения баланса консервативного вещества в водотоке [2]:

$$C = \frac{C_1 Q_1 + C_2 Q_2}{Q_1 + Q_2},$$

где C_1 и Q_1 – концентрация вещества в подземных водах и расход подземных вод, поступающих с кладбища и разгружающихся в р. Грязева; C_2 и Q_2 – концентрация вещества в речных водах и расход речных вод выше зоны разгрузки соответственно.

В расчете не учитывалось влияние поверхностного стока на загрязнение речных вод и иных возможных источников загрязнения в зоне аэрации или в подземных водах на пути подземного стока с территории кладбища до р. Грязева.

Расчет проводился для двух наиболее опасных в данном случае соединений: нитрит- (NO_2) и нитрат-иона (NO_3).

Полученное на численной модели значение расхода поступающих с кладбища и разгружающихся в р. Грязева подземных вод составило 24 м³/сут, концентрация нитрит-ионов в подземных водах по наиболее загрязненным расположенным у реки скважинам – 8.08 мг/л, нитрат-ионов 74.5 мг/л.

Значение расхода р. Грязева составило 0.03 м³/с, что соответствует минимальному зимнему расходу 95% обеспеченности, фоновые концент-

рации в речных водах нитрит-ионов – 3.29 мг/л, что практически равно ПДК для водоемов культурно-бытового назначения (3.3 мг/л) и больше ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения (0.08 мг/л), нитрат-ионов – 8.2 мг/л.

Для оценки длины зоны смешения ниже зоны разгрузки использовалось решение задачи изменения концентрации вещества по мере его распространения по течению реки. Для этого выполнялось численное моделирование конвективной турбулентной диффузии примеси в русле реки при помощи программы “Зеркало ++”, версия 4.30 фирмы “Логус” с учетом существующего фона и без него.

Расчеты с учетом начального фона показали, что зона, в которой содержание нитрит-ионов будет превышать ПДК для культурно-бытового водопользования, охватит весь створ реки и будет простирается на расстояние до 58 м вниз по течению. Далее концентрации упадут ниже ПДК, и речная вода будет соответствовать фоновым характеристикам. При использовании рыбохозяйственных норм уже сами фоновые значения превосходят ПДК, так что расчет не проводился. Концентрации же нитрат-ионов почти мгновенно упадут до значений ниже ПДК как для рыбохозяйственных, так и культурно-бытовых водоемов.

Расчеты без учета начального фона показали, что концентрация нитрат-ионов, как и в первом случае, практически мгновенно падает ниже ПДК как для рыбохозяйственных, так и для культурно-бытовых водоемов. Содержание нитрит-ионов будет превышать ПДК для рыбохозяйственных водоемов лишь на участке длиной 14 м. При этом ширина зоны загрязнения не захватит весь створ реки, а составит только 3.0 м. Для культурно-бытовых водоемов при отсутствии фонового загрязнения концентрации нитрит-ионов, так же, как и нитрат-ионов, практически сразу после места разгрузки станут ниже ПДК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кладбище является примером такого потенциального источника загрязнения, о котором невозможно получить необходимую полную информацию для оценки его воздействия на загрязнение природной среды, в том числе подземных вод. Это касается как режима работы источника загрязнения – какие вещества, с какой периодичностью и в каком количестве поступают с мест захоронений, так и сведений о загрязнении почв, пород зоны аэрации и подземных вод на его территории. Вся информация, которой располагает исследователь,

характеризует территорию за границами источника, что еще больше усложняет задачу установления именно его вклада в загрязнение среди прочих других.

В связи с застройкой территорий, прилегающих к таким источникам загрязнения, актуальными становятся задачи определения области и степени влияния этого источника на природную среду, размеры его санитарно-защитной зоны, за пределами которой возможно строительство.

В условиях недостаточной информации об источнике загрязнения могут быть полезными имитационные расчеты переноса загрязняющих веществ, которые позволяют проанализировать разные сценарии формирования наблюдаемой картины их распределения в подземных водах на прилегающей к источнику территории и на их основе оценить влияние источника загрязнения на подземные воды.

Выполненные геофильтрационные и геомиграционные расчеты с целью оценки влияния кладбища на подземные воды на прилегающей к нему территории помогли установить главный фактор, влияющий на загрязнение подземных вод, определить пути миграции загрязняющих веществ и участки, к которым возможно поступление загрязнения из дополнительных источников, проверить возможные варианты формирования наблюдаемого увеличения концентраций в подземных водах по мере удаления от источника, на основе наиболее вероятной гипотезы дать текущую и прогнозную оценку влияния кладбища на подземные воды и определить границы санитарно-защитной зоны, за пределами которых возможна застройка.

Имитационные расчеты показали, что главный фактор, влияющий на загрязнение подземных вод в районе кладбища, – режим работы (интенсивность) источника загрязнения, а именно длительность периода поступления максимальных концентраций загрязняющих веществ при постоянном инфильтрационном питании.

Поступление загрязняющих веществ от кладбища с подземными водами возможно в скв. 1–5, при этом в скв. 2 и 3 загрязняющие вещества могут поступать из дополнительных источников. Скважины 6–8 находятся вне области влияния кладбища.

Наблюдаемая на момент исследований картина распределения в подземных водах консервативных загрязняющих веществ (на примере хлор-иона) могла сформироваться в ситуации, когда долгое время из источника загрязнения в подземные воды поступали высокие концентрации загрязняющих

веществ, которые затем сменились на более низкие, что соответствует снижению числа захоронений в последние несколько лет. В результате длительного поступления из источника максимальных концентраций загрязняющих веществ их концентрации в подземных водах за его пределами достигли пиковых значений и перестали увеличиваться. На конец этого периода распределение концентрации загрязняющих веществ в подземных водах при условии отсутствия других источников загрязнения традиционное – чем дальше от источника загрязнения, тем меньше концентрации. Со снижением числа захоронений концентрации загрязняющих веществ, поступающие из источника, уменьшаются. За счет этого, а также смешения с чистыми водами и перетекания вниз в подземных водах в ближайших к кладбищу скважинах начинается понижение концентраций, в то время как фронт максимальных концентраций в плане смещается в 1-м от поверхности водоносном горизонте к удаленным скважинам, а в профиле – во 2-й водоносный горизонт.

Таким образом, период, когда кладбище оказывало максимальное влияние на подземные воды, уже прошел. Наблюдаемые в настоящее время максимальные концентрации загрязняющих веществ в подземных водах в дальнейшем увеличиваться не будут. За счет сокращения числа захоронений будет происходить дальнейшее снижение концентраций в подземных водах. Граница санитарно-защитной зоны, за которой можно застраивать территорию, рассчитанная по времени выживаемости бактерий 400 сут, проходит у скв. 2. За это время и в этом месте концентрация нейтрального загрязняющего вещества в 1-м от поверхности водоносном горизонте не превысит 0.2 от концентрации в источнике, а в остальные водоносные горизонты загрязняющие вещества не поступают.

Расчеты показали также отсутствие значимой угрозы загрязнения поверхностных вод р. Грязева соединениями азота, поступающими с подземными водами со стороны кладбища, даже при максимальном для данной территории загрязнении подземных вод и минимальных расходах реки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галицкая И.В., Позднякова И.А., Батрак Г.И., Костинова И.А. Оценка влияния кладбища на загрязнение подземных вод и других компонентов природной среды // *Геоэкология*. 2014. № 6. С. 495–507.
2. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод / Ред. А.В. Караушев. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 286 с.

REFERENCES

1. Galitskaya, I.V. Pozdnyakova, I. A., Batrak, G I., Kostikova, I.A. *Otsenka vliyaniya kladbishch na zagryaznenie podzemnykh vod i drugikh komponentov prirodnoi sredy* [Assessment of cemetery impact on the contamination of groundwater and other environment components], *Geoekologiya*, 2014, no. 6, pp. 495–507 (in Russian).
2. *Metodicheskie osnovy otsenki i reglamentirovaniya antropogennogo vliyaniya na kachestvo poverkhnostnykh vod* [Methodical fundamentals of the assessment and regulation of anthropogenic impact on the surface water quality], Karau-shev A.V., Ed., Leningrad, Gidrometeoizdat, 1987, 286 p. (in Russian).

ASSESSMENT OF CEMETERY IMPACT ON GROUNDWATER AND SURFACE WATER CONTAMINATION USING NUMERICAL SIMULATION

I. V. Galitskaya, I. A. Pozdnyakova, G. I. Batrak, I. A. Kostikova

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences
Ulanskii per. 13, bld.2, Moscow, 101000 Russia. E-mail: galgeoenv@mail.ru*

The residential settlement is designed nearby a small rural cemetery. The cemetery impact on the soil, surface- and groundwater pollution must be assessed in order to justify the safe distance between residential buildings and the cemetery. To solve these problems, investigation was conducted in two stages. To assess the geological structure, hydrogeological conditions and the current environmental pollution of the territory, drilling, sampling and geochemical studies of soil, rocks, groundwater and surface water were carried out at the first stage. The results of investigations are already published. There are three aquifers and two aquitards in the Quaternary deposits within the upper 40 m part of the hydrogeological section. The nitrification-biochemical oxidation of ammonium to nitrate is the main decomposition process after 35–40 years of the cemetery existence. Concentrations of nitrate, chloride, organic compounds and other indicators of the cemetery influence in groundwater insignificantly exceed the permitted level. The maximum values are in the wells located far from the cemetery and in deeper part of the hydrogeological profile. Such abnormal distribution of chemical components as well as the presence of oil and pathogenic microorganisms in soil, rocks and groundwater may be caused by the transport of contaminants from other sources. At the second stage, the groundwater flow was simulated and the transport models were built for all possible options of the formation of the observed concentrations distribution in groundwater. This simulation helped us to identify the main factor affecting the pollution of groundwater, paths of contaminant transport to each observation well and outwards the cemetery. As a result, the cemetery impact boundaries were defined, the current and forecasted cemetery impact on groundwater were assessed, and the safety distance between residential buildings and the cemetery was established.

Key words: *groundwater, surface water, contamination, geofiltration, geomigration, model, numerical calculation, chlorine ion, sanitary protective zone of cemetery.*