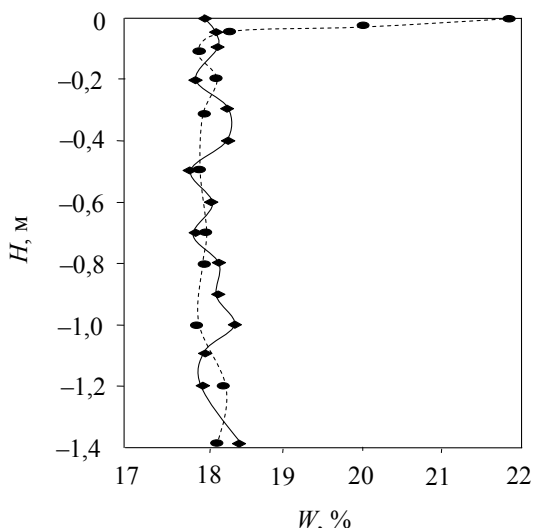




Р и с. 6. Исходная (♦) и измененная после года эксплуатации влажность (●) суглинка верхнего гидроизолирующего слоя покрытия по глубине

от промерзания и разрушающего воздействия температурных деформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Основы геокриологии.** Часть 5. Инженерная геокриология. Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 1999.
2. **Основы геокриологии.** Часть 4. Динамическая геокриология. Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 2001.
3. **Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Кондратьева К.А., Меламед В.Г.** Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. М.: Изд-во МГУ, 1974. 433 с.
4. **Справочное** руководство гидрогеолога. Под ред. В.М. Максимова. Л.: Недра, 1979.
5. **Тепло- и массообмен.** Теплотехнический эксперимент. Справочник. Под ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. М.: Энергоатомиздат, 1982.

Поступила в Редакцию 14.08.08

УДК 621.039.584+614.87

ФОРМИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ ВБЛИЗИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ХРАНИЛИЩ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Мартьянов В.В. (МосНПО «Радон», г. Москва)

Изменения гидродинамических параметров, геохимической и радиохимической обстановки во вмещающих породах, приводящие к выходу радионуклидов в окружающую среду, являются основными признаками разрушения хранилищ радиоактивных отходов. В настоящей статье рассмотрен один из этих признаков, который обусловлен изменением фильтрационных полей по мере разрушения хранилищ. Для этого проведены следующие работы:

проанализированы геолого-гидрогеологические и инженерно-геологические изменения площадки размещения приповерхностных хранилищ отходов с 1961 по 2000 г.;

обобщены исходные геолого-гидрогеологические данные для составления модели формирования фильтрационного потока вблизи хранилища;

рассмотрены в зависимости от изменения фильтрационных свойств инженерных барьеров хранилища три возможных сценария формирования фильтрационных полей;

разработаны методический подход и критерии оценки состояния инженерных барьеров в зависимости от изменения свойств фильтраци-

онного потока на примере одного из приповерхностных хранилищ.

Проведенные в 1980—1990-е гг. комплексные геолого-гидрогеологические и инженерно-геологические исследования показали, что в результате сооружения и эксплуатации хранилищ отходов изменились свойства геологического барьера (вмещающих пород) по сравнению с начальными, полученными при изысканиях под площадку в 1960—1961 гг. Причина выявленных отличий — изменение морфологии площадки при прокладке подъездных путей и коммуникаций, выемка грунтов из котлованов с образованием насыпей и понижений, асфальтирование и бетонирование значительных площадей, сооружение дренажных канав и прудов-отстойников для отвода поверхностных вод, бурение инженерно-геологических скважин. В частности, при уточнении геолого-гидрогеологических свойств площадки было зафиксировано постоянное обводнение вмещающих пород (покровные и моренные суглинки) до глубины 7—10 м. На 35% площади были вскрыты обводненные озерно-болотные отложения, отличающиеся по своим фильтрационным и сорбци-

онным свойствам от моренных и покровных отложений [1]. Зафиксированное постоянное обводнение, значительные мощности водонасыщенных грунтов позволили сделать вывод о том, что за истекший период эксплуатации хранилищ в верхней части геологического барьера сформировался грунтовый водоносный горизонт техногенного происхождения со свойствами, отличными от начальных.

Эксплуатация, а также рекомендации по прогнозированию возможной миграции радионуклидов [2, 3] показывают, что приповерхностные хранилища могут играть различную роль с точки зрения гидродинамики фильтрационного потока. Исходя из этого, рассмотрены три основных сценария формирования фильтрационного потока на участке размещения хранилища:

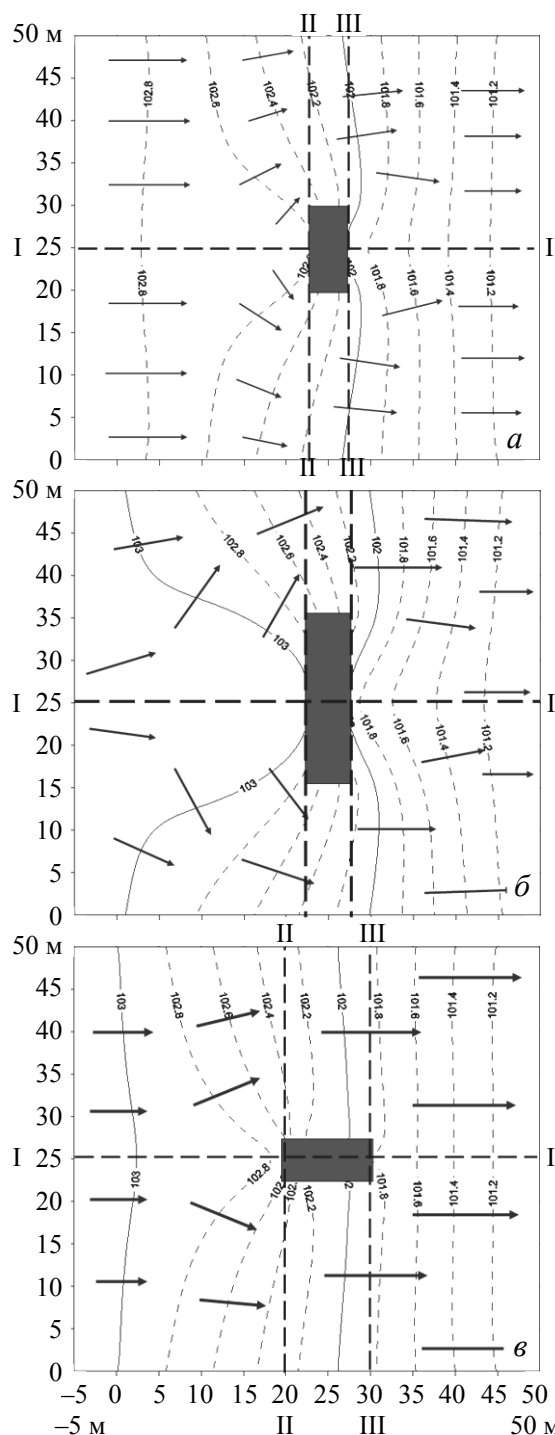
1) хранилище является непроницаемым барьером с коэффициентом фильтрации K_1 , во много раз меньшим коэффициента фильтрации вмещающих пород K_0 ($K_1 \ll K_0$);

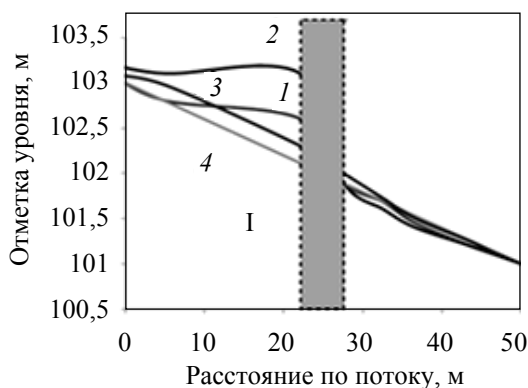
2) хранилище обладает близкими коэффициентами фильтрации с вмещающими породами ($K_1 = K_0$);

3) коэффициент фильтрации материала хранилища во много раз превышает коэффициент фильтрации вмещающих пород ($K_1 \gg K_0$).

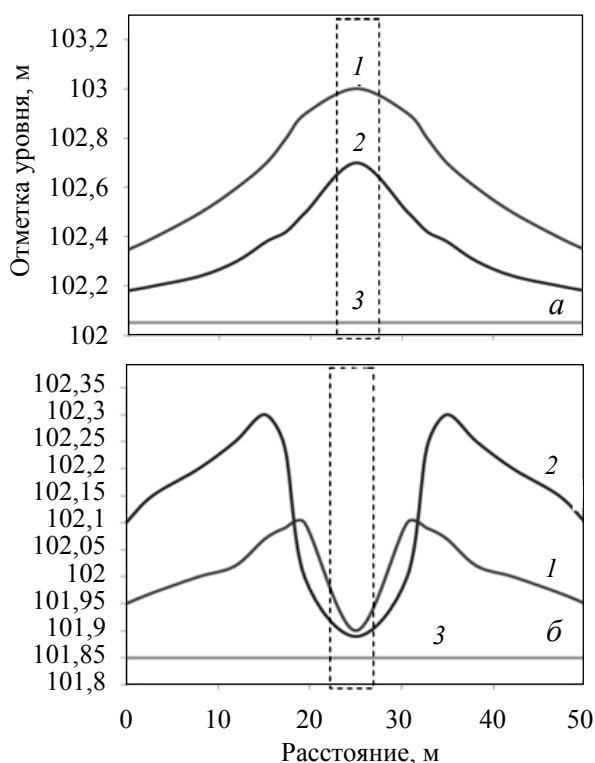
При построении фильтрационных полей на примере одного из хранилищ использовали известные уравнения фильтрации и граничные условия [4], зависящие от фильтрационных характеристик материала хранилища и вмещающих пород. Приняты однородно-изотропные условия формирования гидродинамического потока во вмещающих породах. В качестве основы для формирования базы данных использовали программу Excel (Microsoft Office), фильтрационные поля (изолинии уровня грунтовых вод и ориентация фильтрационного потока) строили с помощью программы Surfer (Golden Soft). При построении полей коэффициент фильтрации вмещающих пород принимали равным $K_0 = 0,1$ м/сут, материала хранилища для трех сценариев $K_1 = 0$, $K_1 = 0,1$ и $K_1 = 10$ м/сут, начальный градиент потока $J = 0,04$, размер хранилища $5 \times 10 \times 4$ и $5 \times 20 \times 4$ м, размер фильтрационного потока 55×50 м, начальный уровень грунтовых вод на левой границе ($X = -5$ м) 103,3 м, правой ($X = 50$ м) — 101 м.

На рис. 1, а, б, в показано поле фильтрационного потока на участке размещения хранилища размером $5 \times 10 \times 4$, $5 \times 20 \times 4$ и $10 \times 5 \times 4$ м соответственно по потоку грунтовых вод для сценария 1. На рис. 2, 3 приведены данные об изменении уровня грунтовых вод на различных





Р и с. 2. Изменение уровня грунтовых вод для хранилища размером 5×10×4 (1), 5×20×4 (2), 10×5×4 м (3) по сравнению с начальным (4): $\square$ — хранилище; I — фронтальная часть



Р и с. 3. Изменение уровня грунтовых вод по профилю II—II (а), III—III (б) (У от 0 до 50 м) для хранилища размером 5×10×4 (1), 5×20×4 м (2) по сравнению с начальным (3): $\square$ — хранилище

участках приконтурной зоны хранилища по гидродинамическим профилям I—I, II—II, III—III.

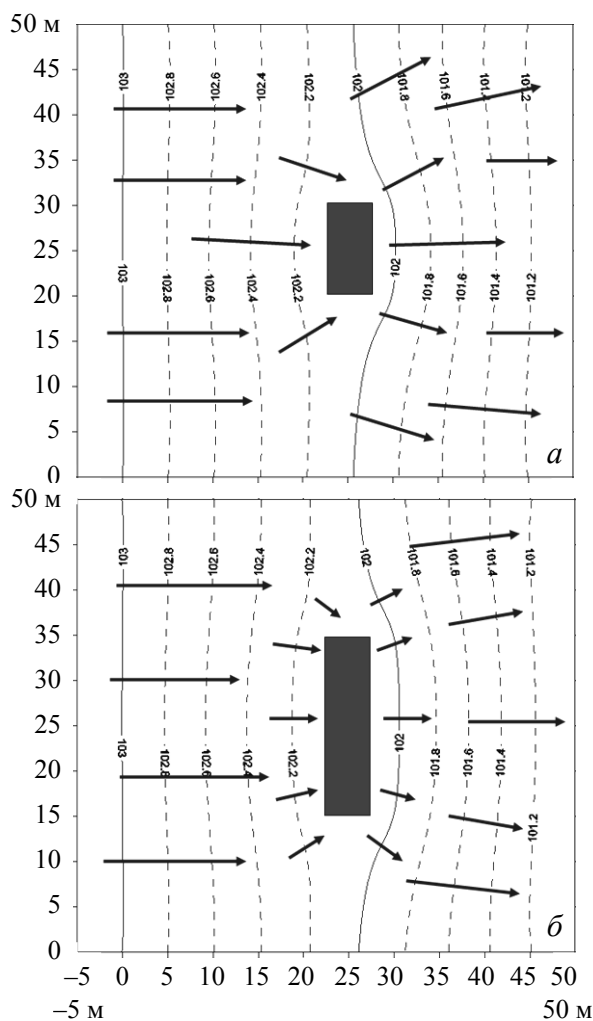
Из полученных результатов следует, что в пределах приконтурной зоны фильтрационный поток деформируется, огибая хранилище, являющееся для него непроницаемым барьером (см. рис. 1). Во фронтальной части создается гидродинамический подпор высотой, зависящей от длины хранилища и его ориентации в фильтрационном поле (см. рис. 2). Также следует отметить формирование положительных куполообразных структур потока во фронтальной (см.

рис. 3, а) и отрицательных в тыловой части (см. рис. 3, б) приконтурной зоны. Наличие таких структур деформирует поток грунтовых вод, который и огибает контуры хранилища. В зависимости от геометрических размеров хранилища и его ориентации в фильтрационном потоке следует отметить возможность создания таких условий, при которых подпираемый уровень грунтовых вод может приблизиться к поверхности земли. В частности, такой сценарий возможен при интенсивном выпадении атмосферных осадков.

Деформация фильтрационного потока в приконтурной зоне хранилища, формирование куполообразных структур во фронтальной и тыловой части, создание гидродинамического подпора являются признаками того, что хранилище является водонепроницаемым и инженерные барьеры сохранили защитные свойства.

Сценарий 2 характерен для случая, когда хранилище частично разрушено и фильтрационные характеристики материала близки к свойствам вмещающих пород ($K_1 = K_0$). Расчеты показали, что если все участки площадки обладают одинаковыми фильтрационными характеристиками, гидродинамическое поле не претерпевает существенных искажений в пределах контура хранилища. Таким образом, отсутствие деформации фильтрационного потока в приконтурной зоне и гидродинамического подпора является признаком того, что хранилище становится водопроницаемым и инженерные барьеры теряют свои защитные свойства.

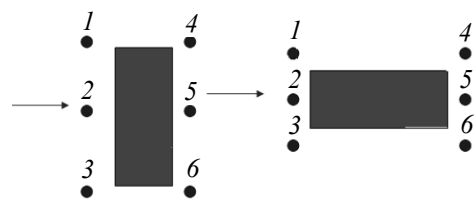
Фильтрационные поля для сценария 3 приведены на рис. 4. При значительном разрушении материала хранилища ($K_1 \gg K_0$) фильтрационное поле меняется таким образом, что уровень грунтовых вод в хранилище остается постоянным во всех его точках [4]. В этом случае хранилище становится самостоятельным источником формирования гидродинамического потока и возможного загрязнения, т.е. участок, где размещено разрушенное хранилище, является как ловушкой для грунтовых вод, так и источником. Ширина возможного контура загрязнения будет зависеть от уровня воды в хранилище и его параметров. Можно предположить, что при интенсивном выпадении атмосферных осадков уровень воды в хранилище может существенно превысить уровень грунтовых вод во вмещающих породах за счет его более высокой водопроницаемости. В этом случае, помимо



Р и с. 4. Фильтрационные поля на участке размещения хранилища размером 5×10×4 (а), 5×20×4 м (б) ($K_1 \gg K_0$) (обозначения см. на рис. 1)

миграции радионуклидов по направлению гидродинамического потока, возможны непосредственный их вынос на поверхность и обширное растекание радиоактивных растворов по периферии хранилища. Таким образом, равенство уровня воды в пределах контура хранилища, возможность формирования фильтрационного потока являются отличительными признаками того, что инженерные барьеры полностью утратили свои защитные свойства.

Контроль за изменением уровня грунтовых вод осуществляется с помощью наблюдательных скважин. Особенности формирования фильтрационного потока позволяют определить и разместить в приконтурной зоне оптимальное число таких скважин (рис. 5) и предложить критерии целостности хранилища (см. таблицу). Предложенное расположение скважин позволит изучить поведение уровня грунтовых вод во фронтальной и тыловой части хранилища (сква-



Р и с. 5. План размещения наблюдательных скважин в приконтурной зоне хранилища: ●2 — скважина и ее номер; → — направление потока; ■ — хранилище

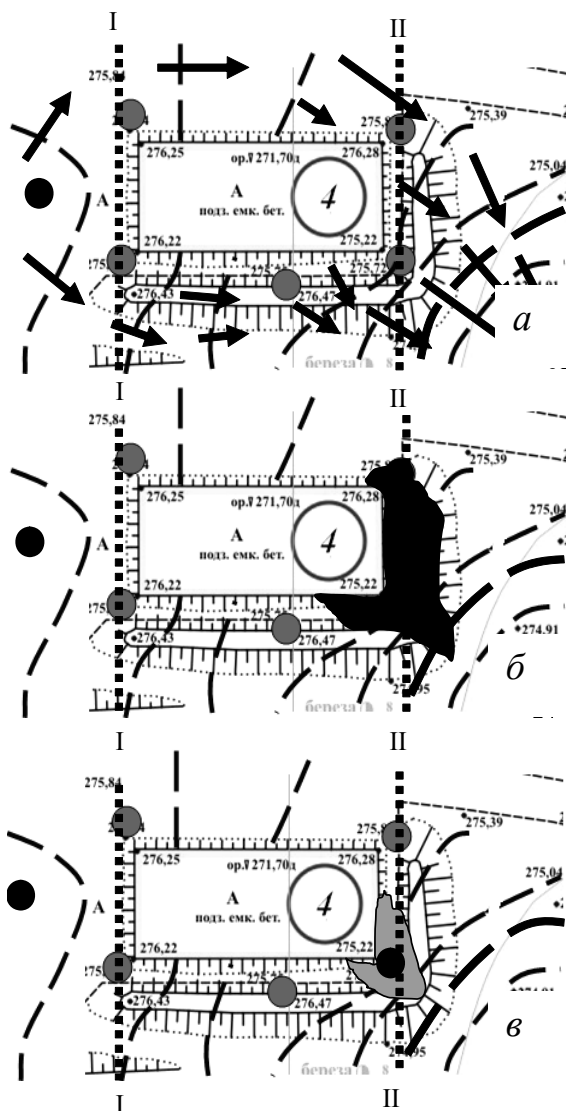
жины 1—3 и 4—6), а также в периферийной (скважины 1—4 и 1—6). Действительно, если выполняются условия для уровня воды в скважинах $H_1 < H_2 > H_3$ и $H_4 > H_5 < H_6$, можно уверенно говорить о том, что инженерные барьеры сохранили водонепроницаемые свойства, т.е. выполняется условие $K_1 \ll K_0$ и хранилище является водонепроницаемым барьером для грунтовых вод. Выравнивание уровней воды в скважинах 1—3 и 4—6 или иное изменение может свидетельствовать о разрушении хранилища и утрате его водонепроницаемых свойств.

Гидродинамические признаки (критерии) сохранения и разрушения хранилища радиоактивных отходов

Фильтрационные характеристики	Уровень грунтовых вод в наблюдательных скважинах	Состояние хранилища
$K_1 \ll K_0$	$H_1 < H_2 > H_3, H_4 > H_5 < H_6,$ $H_1 > H_4, H_3 > H_6$	Изолирующие свойства сохранены
$K_1 = K_0$	$H_1 = H_2 = H_3, H_4 = H_5 = H_6,$ $H_1 > H_4, H_3 > H_6$	Разрушено
$K_1 \gg K_0$	$H_1 = H_2 = H_3, H_4 = H_5 = H_6,$ $H_1 = H_4, H_3 = H_6$	Изолирующие свойства утрачены

Следует отметить, что данные критерии отражают рассмотренные однородно-изотропные условия формирования гидродинамического потока во вмещающих породах. При неоднородных условиях (разные коэффициенты фильтрации в хранилище и вмещающих породах) гидродинамический поток будет деформирован и для его фиксации и изучения, возможно, потребуется дополнительное число наблюдательных скважин как во фронтальной и тыловой части хранилища, так и на периферии.

На рис. 6, а показано гидродинамическое поле, которое сформировано вблизи одного из хранилищ, эксплуатируемого с 1961 г. На рис. 6, б показано повышение pH в связи с разрушением бетонной матрицы, на рис. 6, в —



Р и с. 6. Гидродинамическое поле, распространение pH и радионуклидов на участке размещения хранилища радиоактивных отходов с измененными условиями: 4 — хранилище; — — — — — изолинии уровней и направление потока грунтовых вод; I—I — линии гидродинамических профилей и их номер; — — — — — pH; — — — — — радионуклиды; ● — наблюдательные скважины

выщелачивание радионуклидов. Детальных исследований изменения гидродинамической, геохимической и радиохимической обстановки во вмещающих породах в 1961—1998 гг. не проводилось. Поэтому за прошедший период не было возможности оценить динамику процессов, происходивших в системе хранилище—вмещающие породы.

Коэффициенты фильтрации вмещающих пород по данным геолого-гидрогеологического обследования скважин (1998—2001 гг.), расположенных вдоль профиля I—I, составили $K_1 = 0,2$ м/сут (суглинки и супеси), вдоль профиля

II—II — $K_2 = 1,4$ м/сут (супеси и мелкозернистые пески).

Характер фильтрационного потока по профилю I—I показывает, что изолирующие свойства левого края хранилища сохранены, о чем свидетельствует деформация уровня грунтовых вод во фронтальной части согласно сценарию 1. Деформация уровня и характер направления потока по профилю II—II показывает, что правый край хранилища разрушен (сценарии 2 и 3). Подтверждением данного обстоятельства является увеличение pH в наблюдательных скважинах от начальных 7,2 до 9—12, что свидетельствует о начавшемся выщелачивании радионуклидов из цементной матрицы хранилища. Вторым значащим фактором разрушения правого края хранилища является формирование контура загрязнения радионуклидами, ориентированного по направлению потока грунтовых вод. Форма контура коррелируется с повышением pH.

Таким образом, на примере трех сценариев состояния хранилищ радиоактивных отходов показано, что по мере изменения защитных свойств инженерных барьеров меняется и техногенный гидродинамический поток. По характеру изменения уровня грунтовых вод в приконтурной зоне хранилища можно сделать вывод о состоянии его изолирующих свойств. На основании полученных результатов предложены методический подход и критерии определения признаков сохранения и разрушения хранилища радиоактивных отходов. Изменение фильтрационного поля, как и геохимической и радиохимической обстановки во вмещающих породах, является одним из основных признаков целостности хранилищ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартянов В.В., Шевцова Е.В., Склифасовская Ю.Г. Миграция радионуклидов цезия в различных глинистых отложениях. — Безопасность окружающей среды, 2007, № 4, с. 50—51.
2. Safety Assessment for Near Surface Disposal of Radioactive Waste. Safety Standards Ser. № WS-G-1.1. Vienna: IAEA, 1999.
3. Серебряков Б.Е., Иванов Е.А., Щукин А.П. Моделирование переноса ^{60}Co грунтовыми водами. — Атомная энергия, 2006, т. 100, вып. 3, с. 220—225.
4. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1995.

Поступила в Редакцию 14.08.08