

УДК 621.039.584+614.87

ТЕХНОГЕНЕЗ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА МИГРАЦИЮ РАДИОНУКЛИДОВ НА УЧАСТКАХ РАЗМЕЩЕНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ХРАНИЛИЩ

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

Участки для размещения приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов были выбраны в начале 1960-х годов [1]. Основным критерием их выбора являлось предотвращение попадания радионуклидов через зону аэрации в первый от поверхности водоносный горизонт вследствие вертикального инфильтрационного потока. Исходя из этого критерия, большинство приповерхностных хранилищ было приурочено к вмещающим породам, в основном, глинистым, обладающим низкой водопроницаемостью и большой сорбционной емкостью. Ближайший водоносный горизонт, используемый для различных нужд, в зависимости от географического региона находился на глубине 10—60 м от основания заложения хранилищ радиоактивных отходов [2, 3].

Однако, как показал опыт сооружения и эксплуатации хранилищ приповерхностного типа, под действием техногенного воздействия (техногенеза) начальные свойства геологических и инженерных барьеров изменяются [4, 5]. В конечном итоге техногенез может изменить основные пути миграции радионуклидов, включая непосредственный выход на поверхность в низменных участках [6].

В настоящей работе на примере нескольких площадок спецкомбинатов «Радон» рассмотрены сценарии возможного выхода радионуклидов с жидкой фазой в окружающую среду, которые

могут быть использованы для оптимизации размещения приповерхностных хранилищ. Для этого были:

проанализированы и обобщены данные многолетних геолого-гидрогеологических и природно-климатических исследований по пяти площадкам для обоснования основных путей выхода радионуклидов в окружающую среду;

на их основе схематизированы природные условия, рассчитаны пути переноса радионуклидов в окружающую среду по разным сценариям с оценкой значимости по сравнению с другим возможным выходом в окружающую среду;

оценена роль техногенеза.

В качестве объектов исследований выбраны пять площадок Центрального, Поволжского и Южного регионов: Московский, Самарский, Саратовский, Волгоградский и Ростовский спецкомбинаты. Эти площадки приурочены к глинистым отложениям (тяжелые супеси и суглинки четвертичного возраста), но находятся в разных природно-климатических условиях (табл. 1, 2, рис. 1).

Мощность пород зоны аэрации и средний уклон поверхности получены по результатам геологических и топографо-геодезических изысканий начала 1960-х годов, коэффициенты фильтрации и водоотдачи — в полевых и лабораторных условиях (наливы в шурфы и одиночные скважины, опыты в фильтрационных ко-

Т а б л и ц а 1. Основные свойства пород зоны аэрации (ненарушенные породы) в регионах размещения спецкомбинатов «Радон»

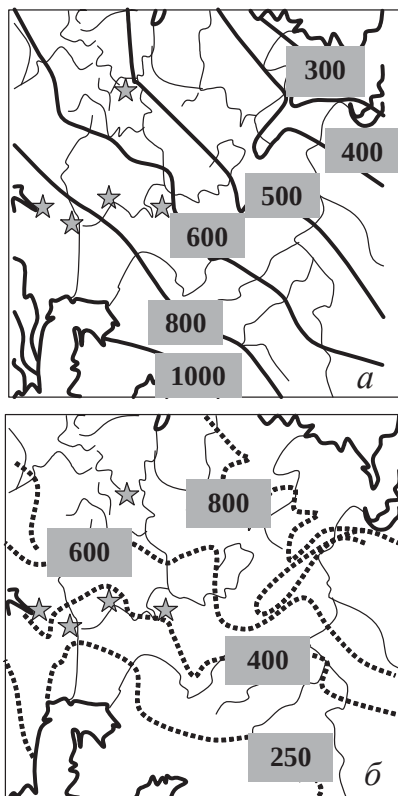
Гидрогеологические параметры	Регион				
	Московский	Самарский	Саратовский	Волгоградский	Ростовский
Мощность пород зоны аэрации, м	46 (60)	9	18	30	10
Интенсивность водопоглощения, мм/год	365	219	1600	11	73
Общая пористость пород зоны аэрации	0,46	0,4	0,53	0,42	0,4
Средний уклон поверхности	0,02	0,04	0,07	0,06	0,08
Средний коэффициент:					
фильтрации K_0 , м/сут	0,012	0,001	0,69	0,00021	0,0084
вертикального влагопереноса, м/сут	0,001	0,0006	0,044	0,00003	0,0002
водоотдачи	0,05	0,02	0,15	0,004	0,01
распределения ^{137}Cs , мл/г	340	3000	1100	1200	7650
замедления ^{137}Cs	1550	13 200	3990	4490	35 900
Объемная масса пород зоны аэрации, кг/м ³	2100	1760	1920	1570	1880

Таблица 2. Климатические параметры по площадкам спецкомбинатов «Радон»

Параметр	Регион				
	Московский	Самарский	Саратовский	Волгоградский	Ростовский
Среднегодовое количество атмосферных осадков, мм/год	650	720	350	478	480
Среднегодовое испарение, мм/год	500	700	800	900	900
Глубина промерзания, м	1,2—1,6	0,9	0,4—0,6	1,1	0,39—0,65

лоннах), объемная масса и общая пористость пород зоны аэрации — при проведении лабораторных работ по изучению инженерно-геологических свойств, коэффициент вертикального влагопереноса рассчитан по зависимости Дарси—Клюта [7] с учетом относительной влажности пород, коэффициент распределения — в лабораторных условиях на реальных радиоактивных растворах, кроме суглинков Самарского спецкомбината, где использовали модельные растворы [8], коэффициент замедления рассчитан по формуле $R_t = 1 + (\rho K_d/n)$ [9].

Первые три параметра табл. 1 были откорректированы на основании многолетних режимных метеонаблюдений на площадках размещения радиоактивных отходов и с учетом средне-статистических данных [10].



Р и с. 1. Карта испаряемости (а) и выпадения осадков (б) изучаемой территории: — 1000 — — испаряемость; ... 250 ... — осадки; ☆ — спецкомбинаты

Как следует из табл. 1, 2, выбранные площадки обладают, в основном, низкой водопроницаемостью 0,00021—0,69 м/сут и хорошими сорбционными характеристиками по отношению к основному радионуклиду ^{137}Cs ($K_d = 340—7650$ мл/г), что позволяет замедлить перемещение в тысячи раз по сравнению с миграцией несорбируемых компонентов, например, ^3H [11]. На основании данных табл. 1 и известных зависимостей для прогнозирования переноса радионуклидов с вертикальным фильтрационным потоком с учетом радиоактивного распада [9—12] была рассчитана миграция по консервативному сценарию, заключающемуся в полном разрушении хранилища, переходе отходов в жидкую фазу удельной активностью 10 кБк/л и последующей вертикальной миграции по направлению к водоносному горизонту (табл. 3). При этом определяли расстояние, на которое переместится жидкая фаза за 300 лет (10 периодов полураспада ^{137}Cs), и время, когда остаточная удельная активность достигнет уровня вмешательства, безопасного для окружающей среды [13].

Как следует из табл. 3, для ненарушенных пород расстояние перемещения загрязнения составит от нескольких сантиметров до нескольких метров. При этом на момент времени 300 лет удельная активность ^{137}Cs не превысит уровня вмешательства 11 Бк/л. Таким образом, основная задача предотвращения попадания радиоактивного загрязнения в водоносный горизонт выполняема. Такие результаты обусловлены низкой водопроницаемостью и высокими, иногда аномально высокими (Ростовский спецкомбинат) сорбционными свойствами.

Однако при эксплуатации хранилищ изменились свойства вмещающих пород. В частности, морфология площадки МосНПО «Радон» изменилась вследствие прокладки подъездных путей и коммуникаций, выемки грунтов из котлованов с образованием насыпей и понижений, асфальтирования и бетонирования, сооружения

Таблица 3. Расчетные параметры миграции ^{137}Cs для сценария разрушения хранилищ и перехода радионуклидов в жидкую фазу при ее начальной удельной активности 10 кБк/л

Параметр	Регион				
	Московский	Самарский	Саратовский	Волгоградский	Ростовский
Расстояние перемещения за 300 лет, м	1,41	0,25	8	0,18	0,06
Максимальная удельная активность через 300 лет, Бк/л	<1	<0,4	<0,1	10	<0,1
Время достижения уровня вмешательства для ^{137}Cs ($\text{УВ} = 11 \text{ Бк/л}$), лет	180	110	65	270	250

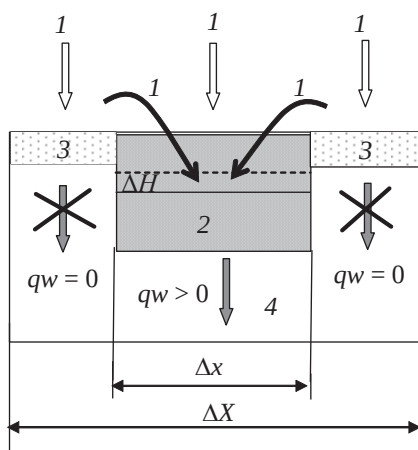
дренажных канав и прудов-отстойников для отвода поверхностных вод, бурения опорных инженерно-геологических скважин под хранилища. Наблюдалось формирование техногенных фильтрационных полей, в верхней части вмещающих пород изменилось вертикальное направление инфильтрационного потока на фильтрационное латеральное, интенсивность которого может превышать изначальный в десятки раз. Нижележащие ненарушенные породы стали выполнять функции нижнего водоупора [6]. В случае нарушения целостности хранилищ возможен выход радионуклидов непосредственно в дренажную сеть площадки, т.е. на поверхность. В настоящее время такой сценарий выхода радионуклидов в окружающую среду предотвращен благодаря восстановлению свойств инженерных барьеров, созданию многофункциональных экранов над хранилищами, оптимизации дренажа и другим инженерным мероприятиям [5].

Формирование вод техногенного происхождения в значительной степени обусловлено природно-климатическими факторами, в частности, интенсивностью выпадения и испарения атмосферных осадков. Для площадки МосНПО «Радон» характерно доминирование выпадения атмосферных осадков над испарением (см. табл. 2), что приводит к накоплению избыточной влаги на участках нарушенных пород. Другие площадки находятся в географических регионах, в которых испарение доминирует над интенсивностью выпадения осадков в 1,5—2 раза, за исключением Самарского спецкомбината «Радон», где наблюдается их примерное равенство. Это позволяет предположить, что дефицит влаги не создает условий для постоянного обводнения нарушенных пород в ближней зоне хранилищ. В частности, в процессе полевых работ на площадках Поволжского и Южного регионов в летний период (1997—2004 гг.) обводнения приконтурных зон хранилищ не об-

наружено. Таким образом, формирование постоянного техногенного латерального потока на этих участках в рассматриваемых природно-климатических условиях невозможно.

При нарушении целостности рассматриваемых хранилищ наиболее вероятным сценарием является выход радионуклидов в окружающую среду с жидкой фазой на поверхность [9]. Исходя из изначальной поставленной задачи (защита нижележащих водоносных горизонтов), такому сценарию не уделялось особого внимания, хотя при наличии определенных условий он может привести к выходу радионуклидов на поверхность. Такой сценарий выхода возможен только в весенний паводковый период и в случае нарушения целостности верхней части хранилища, которое происходит, как правило, в интервале глубины сезонного промерзания и оттаивания [5, 6]. Этот короткий период (5—15 сут) связан с весенним периодом снеготаяния. На его продолжительность влияют интенсивность снеготаяния и время оттаивания верхней части вмещающих пород, зависимое от глубины промерзания грунтов в конкретном регионе (см. табл. 2). В этом случае мерзлый грунт выполняет функции временного водоупора, который препятствует равномерной инфильтрации осадков, формирующихся при снеготаянии. Формирующийся на поверхности избыток влаги может попасть в разрушенное хранилище и при определенных условиях переполнить его с последующим выходом на поверхность (рис. 2).

Особенностью такого сценария является превышение во много раз области водосбора ΔX над областью инфильтрации Δx , т.е. в случае разрушения хранилища значительный объем талой воды, принадлежащий области ΔX , может попасть непосредственно в тело хранилища. Если приток воды в хранилище превысит отток из него, то создадутся предпосылки для его пе-



Р и с. 2. Схема возможного формирования поверхностного стока: 1 — атмосферные осадки, включая снеготаяние; 2 — хранилище; 3 — временный водоупор; 4 — вмещающие породы

реполнения и выхода избыточной жидкой фазы, содержащей радионуклиды, на поверхность.

Для данного сценария возможность выхода жидкой фазы на поверхность рассчитывается по балансовому уравнению Фурье [7]. При отсутствии бокового фильтрационного потока и испарения уравнение может быть записано в конечных разностях:

$$\mu(\Delta H/\Delta t)\Delta x = W_c\Delta X - KJ\Delta x, \quad (1)$$

где μ — коэффициент водоотдачи разрушенной части хранилища; ΔH — повышение уровня воды в хранилище, м; Δt — средняя продолжительность снеготаяния, сут; W_c — интенсивность снеготаяния, м/сут; K — коэффициент верти-

кального влагопереноса пород, м/сут; J — средний градиент потока через хранилище.

В случае надежной изоляции дна хранилища ($K = 0$) выражение (1) упрощается до $\mu(\Delta H/\Delta t)\Delta x = W_c\Delta X$.

При выполнении условия $\Delta H > M$, где M — мощность разрушенной части хранилища (глубина промерзания), возможен перелив жидкой фазы на поверхность.

Из табл. 4 следует, что условие перелива $\Delta H > M$ выполняется для участков размещения Самарского, Саратовского, Волгоградского и Ростовского спецкомбинатов. Если предположить, что хранилища потеряли свои защитные свойства на всю мощность (~5 м), то можно ожидать их полного насыщения водой. Приведенный методический подход может быть справедлив как для отдельных участков (пятен) загрязнения, так и для траншейного размещения радиоактивных отходов (без инженерных барьеров).

Возможные сценарии выхода радионуклидов в окружающую среду с жидкой фазой, приведенные в табл. 5, позволяют сделать следующие основные выводы:

сценарий 1 не представляет опасности для окружающей среды даже при потере хранилищами своих изолирующих свойств. Как показали прогнозные расчеты, перемещение загрязнения с инфильтрационным потоком в недрах не превысит первых метров;

Т а б л и ц а 4. Исходные параметры для расчета повышения уровня воды в хранилище

Параметр	Спецкомбинат			
	Самарский	Саратовский	Волгоградский	Ростовский
Продолжительность снеготаяния, сут	10	7	5	5
Интенсивность снеготаяния, м/сут	0,01	0,02	0,08	0,037
Коэффициент водоотдачи разрушенной части хранилища	0,15	0,15	0,15	0,15
Коэффициент вертикального влагопереноса, м/сут	0,0006	0,044	0,00003	0,0002
Градиент потока	1	1	1	1
Область инфильтрации, м	20	20	20	20
Область водосбора, м	145	145	145	145
Повышение уровня воды в хранилище ΔH , м	4,8	4,7	19,3	8,9
Повышение уровня воды в хранилище для случая изоляции дна $\Delta H(K = 0)$, м	4,83	6,77	19,33	8,94
Глубина промерзания M , м	0,9	0,4—0,6	1,1	0,39—0,65
Условие перелива	$\Delta H > M$	$\Delta H > M$	$\Delta H > M$	$\Delta H > M$

Таблица 5. Сценарии выхода радионуклидов в окружающую среду

Сценарий	Регион				
	Московский	Самарский	Саратовский	Волгоградский	Ростовский
1. Вертикальный инфильтрационный поток в ненарушенных породах	+	+	+	+	+
2. Латеральный техногенный фильтрационный поток в нарушенных породах	+	±	—	—	—
3. Перелив	—	+	+	+	+

+, — — есть выход, нет выхода соответственно.

сценарий 2 может представлять серьезную опасность для площадок, подвергшихся техногенезу и находящихся в природных условиях с превышением атмосферных осадков над испарением;

сценарий 3 может представлять серьезную опасность для площадок, подвергшихся техногенезу, в паводковые периоды даже при среднегодовом дефиците атмосферных осадков.

Выход радионуклидов с жидкой фазой по сценарию 3 может играть существенную роль для прогнозных оценок и оценки безопасности размещения приповерхностных хранилищ. На наш взгляд, его учет как следствие техногенеза участков размещения отходов необходим при эксплуатации хранилищ, поскольку, несмотря на скоротечность, он может привести к непосредственному залповому выходу радионуклидов на поверхность в отличие от продолжительной контролируемой миграции во вмещающих породах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Соболев И.А., Хомчик Л.М.** Обезвреживание радиоактивных отходов на центральных пунктах. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. **Соболев И.А., Хомчик Л.М., Баженов Ю.М. и др.** Опытное захоронение отходов низкого уровня активности в глинистых грунтах на Московской станции. — In: Proc. Symp. Disposal of Radioactive Wastes into the Ground. 29 May — 2 June. Vienna: IAEA, ENEA, 1967, p. 37—46.
3. **Прозоров Л.Б., Мартыанов В.В., Гуськов А.В.** Площадку оценили на «отлично». — Безопасность окружающей среды, 2006, № 2, с. 42—44.
4. **Мартыанов В.В.** Формирование фильтрационных полей вблизи размещения приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов. — Атомная энергия, 2008, т. 105, вып. 6, с. 334—338.
5. **Веселов Е.И., Прозоров Л.Б.** Обоснование оптимальной конструкции и толщины покрытия приповерхностного хранилища радиоактивных отходов. — Там же, с. 329—334.
6. **Мартыанов В.В.** О качестве свойств геологических барьеров в процессе сооружения и эксплуатации приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности. — Медицина труда и пром. экология, 2009, № 3, с. 7—10.
7. **Ленченко Н.Н.** Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГТУ, 2005.
8. **Мартыанов В.В., Шевцова Е.В., Склифасовская Ю.Г.** Миграция радионуклидов цезия в различных глинистых отложениях. — Безопасность окружающей среды, 2007, № 4, с. 50—51.
9. **Derivation of Activity Limits for Disposal of Radioactive Waste to Near Surface Facilities.** Working Material. Vienna: IAEA, 2001.
10. **ГОСТ 16350—80.** Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. М., 1981.
11. **Derivation of Quantitative Acceptance Criteria for Disposal of Radioactive Waste to Near Surface Facilities.** Operational Safety. Vienna: IAEA, 2000.
12. **Швец В.М., Прозоров Л.Б., Мартыанов В.В. и др.** Моделирование вертикальной миграции радионуклидов в моренных отложениях. — В сб.: Всерос. конф. по математическому моделированию в гидрогеологии. М., 2008, с. 91—92.
13. **Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).** Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Фед. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.

Поступила в Редакцию 2.07.10