

## РАДИОНУКЛИДЫ В ГРУНТОВЫХ ВОДАХ "РЫЖЕГО ЛЕСА"

Д.А.Бугай, В.В.Гудзенко, С.П.Джепо и А.С.Скальский

Институт геологических наук НАН Украины

(Принята к опубликованию 25 ноября 1995 г.)

Приведены результаты натуральных исследований миграции радионуклидов в районе приповерхностного захоронения РАО, именуемого "Рыжий лес". На участках с траншеями, контактирующими и не контактирующими с грунтовыми водами, интенсивно протекают процессы вертикальной и латеральной миграции  $^{95}\text{Sr}$ . В грунтовых водах наблюдаются концентрации  $^{90}\text{Sr}$  до 120000,  $^{137}\text{Cs}$  до 69,  $^{239+240}\text{Pu}$  до 0.6 Бк·л<sup>-1</sup>. Специфическая геохимическая обстановка, характеризующаяся относительно низкими значениями рН (4.4-5.4) и высоким содержанием органических веществ (до 92 мг·л<sup>-1</sup>) в грунтовой воде, способствует миграции радионуклидов. По данным натуральных определений установлены крайне низкие коэффициенты распределения радионуклидов при сорбции породами водоносного горизонта, составляющие для  $^{90}\text{Sr}$  0.5-2.0, а для  $^{137}\text{Cs}$  - 2.4-5.0 мл·г<sup>-1</sup>. С учетом гидродинамических условий безнапорного водоносного горизонта латеральные скорости миграции  $^{90}\text{Sr}$  в районе захоронений составляют 2-3 м·год<sup>-1</sup>. Учитывая небольшие расстояния между траншеями (20-50 м), можно предположить в ближайшем будущем смыкание ореолов загрязнения грунтовых вод в районе ПВЛРО.

Ключевые слова: *грунтовые воды, захоронения РАО, "Рыжий лес", радионуклиды,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , концентрация, коэффициент распределения, миграция.*

### Введение

За годы, прошедшие после аварии на Чернобыльской АЭС, название "Рыжий лес" многократно упоминалось в научной литературе и средствах массовой информации. Сначала им обозначали участок соснового леса в ближайших окрестностях станции, погибшего в результате воздействия радиации. Загрязненная древесина с этого участка летом 1986 г. была захоронена там же в траншее на глубину около 2 м, образовав тем самым Пункт Временной Локализации Радиоактивных Отходов (ПВЛРО) того же названия. Впоследствии разровненная поверхность территории была засажена молодым лесом.

Поскольку захоронения на территории "Рыжего леса" выполнялись армейскими подразделениями в условиях мощных радиационных полей "пожарным порядком", сколько-нибудь удовлетворительная привязка буртов, и особенно траншей, к местности отсутствовала, что потребовало в дальнейшем проведения специальных работ по картированию индивидуальных захоронений и оценке запасов радионуклидов в них [1, 2].

### Методы и результаты исследований

Подтопление части траншей грунтовыми водами обострило интерес к изучению миграции радионуклидов в растворенных формах. С этой целью в 1993-1994 гг. ИГН НАН Украины выполнил радиогидрогеологические исследования в пределах сектора 2.1 (рис. 1) ПВЛРО "Рыжий лес". Работы включали изучение: распределения радионуклидов в водовмещающих породах и водах трех траншей; макрохимического состава грунтовых вод; литологического и минералогического составов водовмещающих пород, как факторов, способных повлиять на миграционные параметры радиоцезия и радиостронция; коэффициентов распределения в системе вода-вмещающая порода и механизмов сорбции этих радионуклидов.

Обводненность траншей на момент опробования была различной. Траншея 22 не подтапливалась паводками 1991-1992 гг. и оставалась практически сухой летом и осенью 1994 г. Траншея 36 была подтоплена, а траншея 35 занимала промежуточное положение - она, вероятно, подтапливалась высокими паводками 1991-1992 гг., а на момент опробования расстояния от дна траншеи до уровня грунтовых вод (УГВ) не превышало 20-30 см. Удельные активности  $^{95}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в захороненных отходах колеблются соответственно в пределах 520 кБк-1.9 МБк·кг<sup>-1</sup> и 750 кБк-2.7 МБк·кг<sup>-1</sup>. Удельная активность плутония не превы-

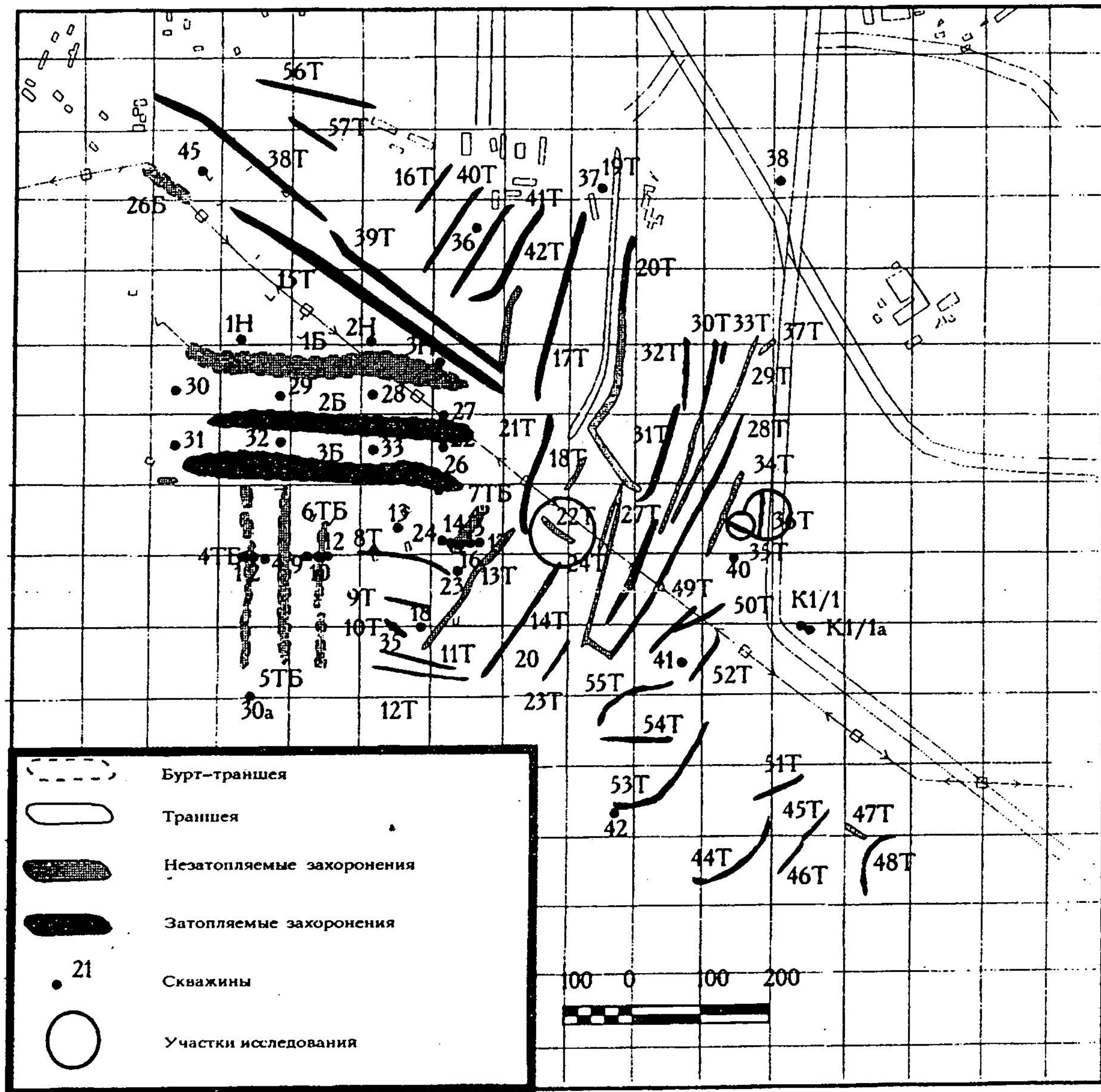


Рис. 1. Схема захоронений участка 2.1 ПВЛРО "Рыжий лес".

пает  $24 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$ , а мощность экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения на поверхности достигает  $91 \text{ мР/час}$ .

Пробы грунтов отбирались в процессе ручного бурения. Пробы воды – с помощью пробоотборника оригинальной конструкции [3] вакуумированием. Результаты  $\gamma$ -спектрометрических и  $\beta$ -селективных измерений концентраций  $^{90}\text{Sr}$   $^{137}\text{Cs}$  в исследуемых пробах воды приведены в табл. 1.

В пробах воды, отобранных под траншеями, присутствует также плутоний. Суммарная концентрация его изотопов с массовыми числами 239 и 240 достигает  $0.6 \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1}$ .

Грунтовые воды исследуемого участка ПВЛРО "Рыжий лес" пресные и ультрапресные сульфатно-кальциевые. Общая минерализация грунтовых вод колеб-

лется от 36 до  $169 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ , а рН между 4.4 и 5.4. Такие значения могут быть обусловлены высоким содержанием растворенного углекислого газа, накапливающегося в грунтовых водах вследствие разложения органических веществ (ОВ) в захоронениях.

По данным спектрофлуориметрических определений (С.П.Сулейманов), выполненных в ноябре 1994 г., концентрации ОВ составили:

- Траншея 22, скв. 7 –  $12.00 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$
- Траншея 35, скв. 1 –  $14.30 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$
- Траншея 36, скв. 1 –  $90.00 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$

Последняя проба имеет характерную желто-коричневую окраску и сильно пенится при взбалтывании.

Высокие содержания ОБ в исследуемых грунтовых водах обуславливают вероятность миграции радионуклидов в составе органоминеральных комплексов.

Совместное исследование поровых растворов, отбираемых *in situ*, и вмещающих пород позволило определить коэффициенты распределения для радиоцезия и

радиостронция (табл. 2).

В двух пробах вмещающих пород на периферии траншеи 22 методом последовательного выщелачивания определено процентное соотношение обменных и необменно сорбированных форм радиостронция по общепринятой методике (табл. 3) [4].

Таблица 1

Радионуклиды в грунтовых водах сектора 2.1 ПВЛРО

№ скв.	Глубина отбора, м	Расстояние от траншеи, м	Уровень грунтовых вод, м	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr
Траншея 22 (под траншеей, центр и края)					
1	3.2-3.5	-	3.2	4.9E+0	5.6E+4
2	3.3-3.7	-	3.3	1.1E+0	7.7E+4
2	4.5-4.8	-	3.3	7.0E-1	3.7E+4
3	3.15-3.5	-	3.15	3.4E+0	1.9E+4
12	4.0-4.5	-	3.2	6.2E+0	5.8E+3
Траншея 22 (до и после траншей по потоку)					
4	3.05-3.55	15CB	3.05	<2E-1	7.7E+2
5	3.05-3.30	30CB	3.05	7.8E-1	1.8E+2
6	3.05-3.30	47CB	3.05	9.1E-1	5.1E+2
7	2.00-2.25	38ЮЗ	2.00	2.1E-1	5.1E+2
8	2.20-2.45	47ЮЗ	2.20	3.6E-2	2.0E+2
9	3.35-3.60	11CB	3.35	1.4E+1	3.4E+2
10	3.50-3.75	29CB	3.50	<2E-1	2.5E+2
11	3.35-3.60	47CB	3.35	2.5E-1	1.2E+4
18	5.60-5.90	16CB	но	<5E-1	2.1E+2
Траншея 35 (под траншеей, центр)					
1	2.45	-	но	3.3E+1	7.6E+4
Траншея 35 (до и после траншей по потоку)					
2	2.40-2.90	13ЮЮЗ		1.6E+0	1.4E+4
4	2.45-3.18	2С		7.2E+0	9.0E+4
5	2.60-3.20	5С		5.0E+0	1.2E+5
3	2.45-3.05	11С		3.9E+0	4.5E+4
Траншея 36 (в траншее, края и центр)					
1	1.15	-		1.7E+1	6.1E+2
2	2.05	-		1.0E+1	3.6E+4
3	1.45	-		6.9E+1	1.0E+4

Таблица 2

Коэффициенты распределения радионуклидов в системе грунтовые воды—грунт

Место отбора проб	Глубина, м	Удельная активность грунта, Бк·кг <sup>-1</sup>		Объемная активность воды, Бк·л <sup>-1</sup>		K <sub>d</sub> , л·кг <sup>-1</sup>	
		<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs
Тр.22, скв.12	4.0-4.5	12150	25.5	5850	6.2	2.0	4.0
Тр.35, скв.1	2.7-3.0	68000	180.0	76700	33.0	0.8	5.3
Тр.35, скв.4	2.9-3.2	58500	18.5	90000	7.2	0.5	2.4

Таблица 3

Формы нахождения  $^{90}\text{Sr}$  в секторе 2.1 ПВЛРО

Место отбора проб	Глубина, м	Доля форм нахождения, %		
		Обмен-ные	Необмен-ные	Твердый остаток
Тр. 22, скв. 7	2.0	97.1	2.9	нпо
Тр. 22, скв. 10	3.5	96.7	3.2	нпо

Обсуждение результатов исследований

Вертикальное распределение  $^{90}\text{Sr}$  в грунтовых водах по глубине водоносного горизонта под захоронениями исследовано на участке траншеи 22. При заглублении на 1 м от зеркала грунтовых вод активности  $^{90}\text{Sr}$  в растворе уменьшаются приблизительно вдвое: от 77000 до 37000 Бк · л<sup>-1</sup>. На периферии траншеи 22 с углублением на 2.2 м в толщу водоносного горизонта загрязнение грунтовых вод  $^{90}\text{Sr}$  падает более чем в три раза — от 770 до 210 Бк · л<sup>-1</sup>.

Наличие двух типов источников миграции радионуклидов (собственно траншеи, наполненные остатками древесины, и захороненная в приповерхностном слое загрязненная почва) приводит к тому, что отследить и идентифицировать их становится возможным только лишь на основе весьма детального опробования как по горизонтали (в направлении потока грунтовых вод), так и по вертикали (по глубине зоны аэрации и водоносного горизонта). Это обстоятельство очень затрудняет исследования.

Распределения  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в траншеях и за их пределами различаются весьма существенно. Характерным примером является район траншеи 22. Вертикальная миграция мобильных (водорастворимых, обменных) форм радионуклидов из тела этой траншеи (рис. 2) привела к загрязнению пород зоны аэрации и водоносного горизонта под траншеей до уровней порядка  $n \cdot 10000$  Бк · кг<sup>-1</sup> по  $^{90}\text{Sr}$ ,  $n \cdot 100$  —  $n \cdot 1000$  Бк · кг<sup>-1</sup> по  $^{137}\text{Cs}$ . (В теле захоронения концентрации  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  составляют порядка  $n \cdot 10^5$  Бк · кг<sup>-1</sup>).

За пределами траншеи загрязнение водоносного горизонта обусловлено двумя фак-

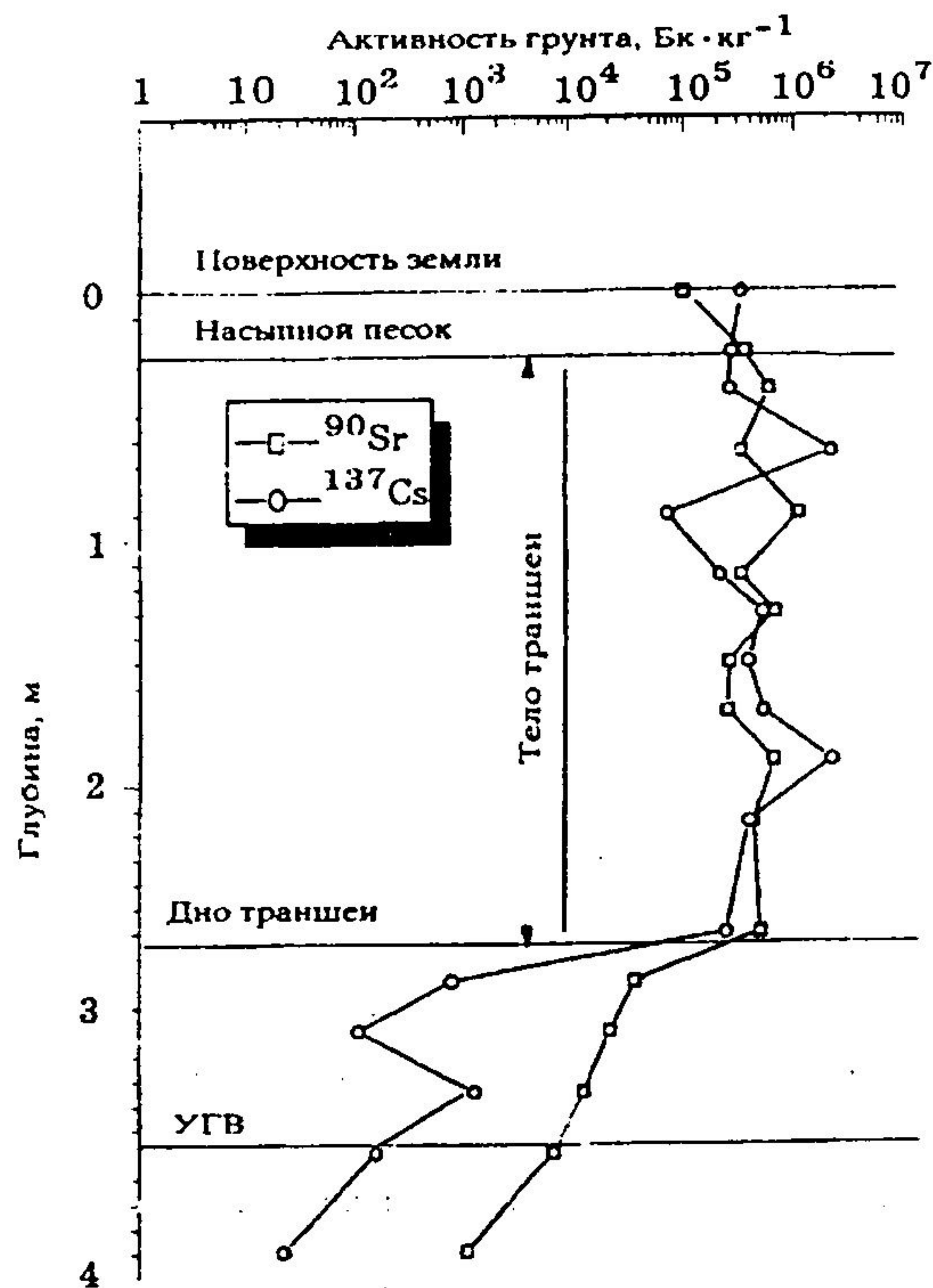


Рис. 2. Распределение радионуклидов в грунте на участке захоронения 22-Т, скв. 1.

торами: вертикальной миграцией через зону аэрации и латеральной миграцией радионуклидов, поступающих в грунтовые воды через относительно маломощный слой ненасыщенных пород между дном траншеи и зеркалом грунтовых вод. Именно вертикальная миграция привела к повсеместному загрязнению грунтовых вод на периферии траншеи 22 до уровней порядка  $n \cdot 100$  Бк · л<sup>-1</sup> (глубина до УГВ составляет здесь 3—3.5 м). О превалировании вертикального переноса свидетельствуют достаточно высокие концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в воде скважин, расположенных выше по потоку относительно к траншее (см. табл. 1), а также распределение этого нуклида в зоне аэрации (рис. 3). На указанный "фон" накладывается ореол загрязнения, сформированный латеральной миграцией от траншеи, прослеживающийся по загрязнению водоносного горизонта  $^{90}\text{Sr}$  порядка  $n \cdot 100$  Бк · кг<sup>-1</sup>.

На участке траншеи 35 также "работают" оба механизма загрязнения водоносного горизонта. Более интенсивному загрязнению грунтовых вод здесь способствуют как периодические подтопления, так и меньшая мощность (2—2.5 м) зоны аэрации, по

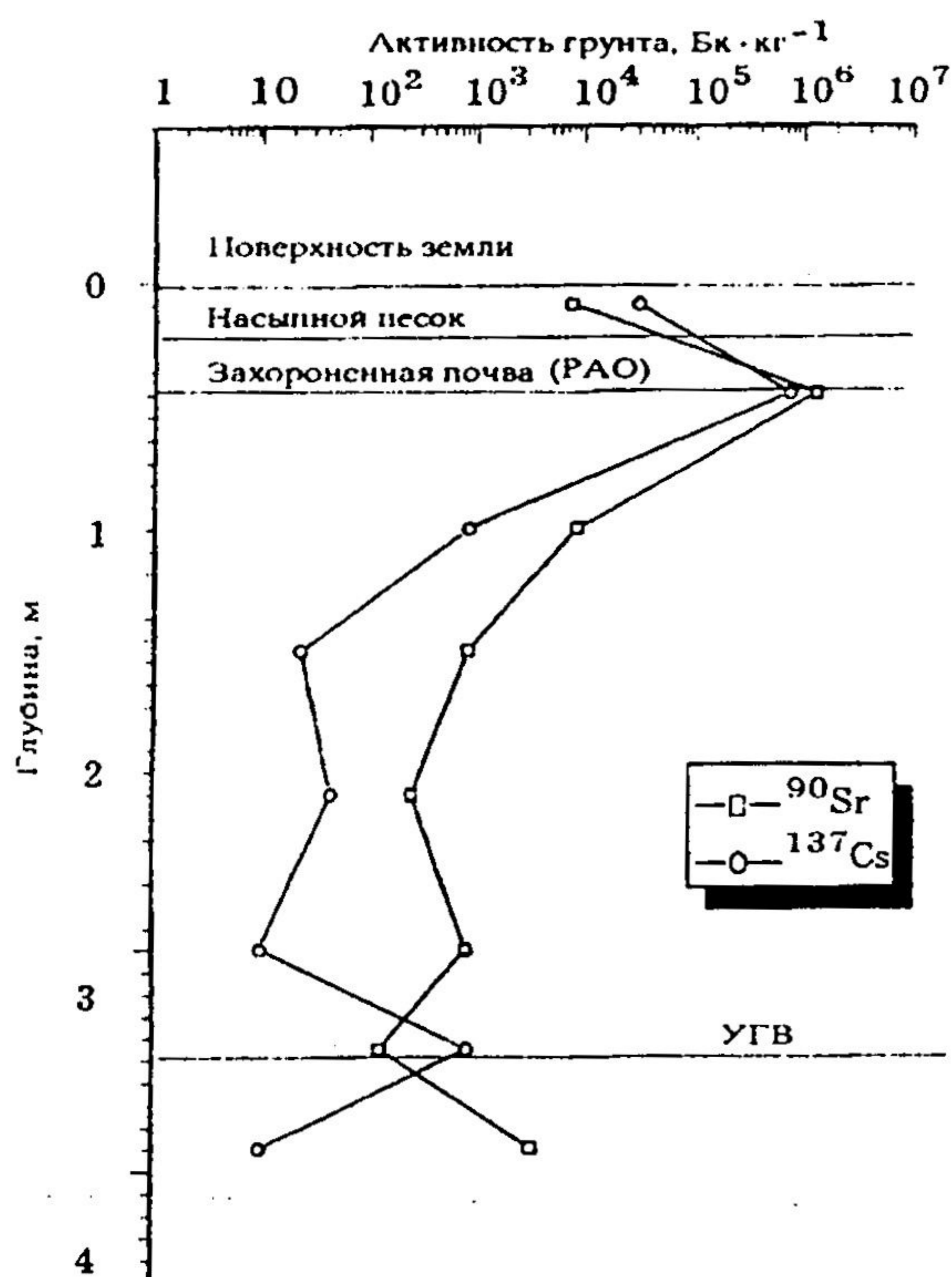


Рис. 3. Распределение радионуклидов в грунте периферии захоронения 22-Т, скв. 17.

сравнению с участком траншеи 22. "Фоновые" (т.е. обусловленные вертикальной миграцией через зону аэрации на периферии траншеи) уровни загрязнения пород водоносного горизонта  $^{90}\text{Sr}$  составляют здесь порядка  $n \cdot 1000 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ . Доминирующим механизмом загрязнения грунтовых вод здесь, вероятно, является латеральная миграция, обуславливающая загрязнение пород водоносного горизонта  $^{90}\text{Sr}$  до значений на порядок больших, чем вертикальная миграция (на периферии траншеи 22).

Характерным примером постоянно затопленного захоронения является траншея 14, в которой, по результатам исследований ИГМР НАН Украины (Бондаренко Г.Н., 1993 г.) обменный стронций практически полностью растворен и вынесен латеральным потоком за пределы захоронения. В пробах грунтовой воды по потоку от траншеи 14 наблюдается нарастание концентрации  $^{90}\text{Sr}$  до более чем  $n \cdot 1000 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$  на удалении 1.5–2 м. Структура ореола загрязнения не исследована из-за отсутствия наблюдательных скважин.

Относительно большие скорости латеральной миграции  $^{90}\text{Sr}$  (2–3 м·год<sup>-1</sup>) обусловлены низкими сорбционными свойст-

вами песчаных отложений надпойменной террасы, в пределах которой располагается ПВЛРО "Рыжий лес". В песчаных отложениях преобладают фракции размером 0.5–0.05 мм (фракция 0.25–0.1 составляет около 50%), содержание кварца колеблется от 84 до 90%, остальное — полевой шпат. Среди акцессорных минералов встречаются турмалин, ильменит и корунд. Глинистые минералы в отложениях практически отсутствуют.

Результаты исследований показывают, что  $^{90}\text{Sr}$  сорбирован преимущественно по ионообменному механизму, что в сочетании с низкими коэффициентами распределения создает предпосылки для интенсивной миграции этого радионуклида в грунтовых водах. Наличие органических кислот и своеобразные гидрохимические условия в районе захоронений также способствует интенсивной миграции радионуклидов.

### Вывод

1. В районе захоронения "Рыжий лес" происходит интенсивная миграция радионуклидов в грунтовые воды. На участках затопленных траншей существенное развитие получили процессы латеральной миграции  $^{90}\text{Sr}$  в водоносном горизонте. Учитывая небольшие расстояния между траншеями (20–50 м), можно предположить в ближайшем будущем смыкание ореолов загрязнения грунтовых вод в районе ПВЛРО.

2. Радионуклиды поступают в грунтовые воды из РАО, захороненных в траншеях (древесина, лесная подстилка, почва) и слоя загрязненной почвы, не затронутого дезактивационными работами и перекрытого впоследствии слоем насыпного песка. Это затрудняет отслеживание ореолов миграции радионуклидов в геологической среде и вынуждает к разработке методов идентификации источников загрязнений.

3. Вследствие контакта грунтовых вод с захороненными материалами на участке исследований сложилась специфическая геохимическая обстановка, характеризующаяся относительно низкими значениями рН (4.4–5.4) и высоким содержанием органических веществ (до 92 мг·л<sup>-1</sup>) в грунтовой воде.

4. Максимальные концентрации радионуклидов в грунтовых водах по данным

исследований составили:  $^{90}\text{Sr}$  — до 120000 Бк·л<sup>-1</sup>;  $^{137}\text{Cs}$  — до 69 Бк·л<sup>-1</sup>;  $^{239+240}\text{Pu}$  — до 0.6 Бк·л<sup>-1</sup>.

5. По данным натуральных определений нами установлены крайне низкие коэффициенты распределения радионуклидов при сорбции породами водоносного горизонта, составляющие для  $^{90}\text{Sr}$  0.5—2 мл·г<sup>-1</sup>, для  $^{137}\text{Cs}$  — 2.4—5 мл·г<sup>-1</sup>.

6. Чрезвычайно высокие плотности загрязнений в районе захоронения облегчают исследования закономерностей поведения радионуклидов в геологической среде, позволяя проследить тонкие механизмы миграции, перехода из топливной матрицы в растворимые соединения, формирования органо-минеральных комплексов и т.п.

### Литература

1. Кривошацкий А.С., Смирнова Е.А., Савоненков В.Г. и др. (1992) Выщелачивание радионуклидов из частиц ядерного топлива и реакторного графита, выделенных из проб 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС. II. Результаты по выщелачиванию радионуклидов на 1989—1991 г. *Радиохимия*. № 5, 92—101.
2. Джепо С.П., Скальский А.С., Бугай Д.А. и др. (1994) Воздействие на гидрогеологическую среду основных захоронений радиоактивных отходов в ближней зоне Чернобыльской АЭС. *Геол. журн.* № 4—6, 100—108.
3. Джепо С.П., Бугай Д.А., Гудзенко В.В., Скальский А.С. и др. (1994). К вопросу о методике радиологического опробования подземных вод в зоне отчуждения ЧАЭС. В сб: *Проблемы Чернобыльской Зоны Отчуждения*. Киев: Наукова Думка, с. 87—92.
4. Бобовникова Д.И., Вирченко Е.П., Коноплев А.В. и др. (1990). Химические формы нахождения долгоживущих радионуклидов и их трансформация в почвах зоны аварии на ЧАЭС. *Почвоведение*. 1990, № 10, 20—25.