

УДК 502.05; 502.2

## ОСОБЕННОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВАХ БЫВШЕГО СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Паницкий А.В., Лукашенко С.Н., Магашева Р.Ю.

*Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии»*

*РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, e-mail: Panitskiy@nnc.kz*

Рассмотрены особенности вертикального распределения радионуклидов в почвах бывшего Семипалатинского испытательного полигона на участках с различным характером радионуклидного загрязнения, а именно – в местах проведения наземных испытаний, на следах радиоактивных выпадений, в местах испытания боевых радиоактивных веществ, в луговых почвах экосистем, сопряженных с радиоактивно-загрязненными водотоками из испытательных штолен. В целом, отмечены различия в характере распределения радионуклидов в вертикальном почвенном профиле почв этих участков, связанные как с особенностями испытаний, так и наличием дополнительных факторов (антропогенная деятельность, режим увлажнения, почвенные характеристики и др.). В частности, в условиях аридной зоны, без дополнительного увлажнения почв, максимальное содержание техногенных радионуклидов сосредоточено только в поверхностных горизонтах 0–5, 5–10 см. В почвенных профилях в местах испытания боевых радиоактивных веществ выделено две зоны с различными механизмами вертикального распределения радионуклидов. Первая зона – глубина первичного распространения радионуклидов во время одномоментного выливания радиоактивной жидкости в локальные точки в момент проведения испытаний и дальнейшее промывание атмосферными осадками «свежего» выпадения вглубь почвы до определенного почвенного горизонта. Вторая зона – зона классического распространения радионуклидов. Техногенные нарушения почвенного покрова, которые сопровождали ядерные испытания и подготовительные к ним работы, могут нарушить общую закономерность распределения радионуклидов в почвенном профиле. В условиях дополнительного увлажнения почв за счет склонового стока или грунтовых вод отмечается интенсивная миграция техногенных радионуклидов, в первую очередь,  $^{90}\text{Sr}$ , как наиболее растворимого и подвижного радионуклида.

**Ключевые слова:** Семипалатинский испытательный полигон (СИП), радионуклиды, цезий – 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ), стронций – 90 ( $^{90}\text{Sr}$ ), плутоний – 239+240 ( $^{239+240}\text{Pu}$ ), америций-241 ( $^{241}\text{Am}$ )

## PARTICULARITIES OF RADIONUCLIDES' VERTICAL DISTRIBUTION IN SOILS OF FORMER SEMIPALATINSK TEST SITE

Panitskiy A.V., Lukashenko S.N., Magasheva R.Y.

*Institute of Radiation Safety and Ecology, Branch of «National Nuclear Center» of Kazakhstan,  
Kurchatov, e-mail: Panitskiy@nnc.kz*

Particularities of radionuclides' vertical distribution in soils of former Semipalatinsk test site have been considered at areas with different character of radionuclide contamination, especially – in places where surface tests have been conducted, at nuclear fallout plumes, in warfare radioactive agents' testing, in meadow soils of ecosystems, connected to radioactively contaminated water flows from testing tunnels. In common there have been noticed differences in character of radionuclides' distribution in vertical soil section of this area, related both to peculiarities of tests and presence of additional factors (anthropogenous activity, moisture regime, characteristics of soil and ect.). Especially, in arid zone, without additional soil moistening, the maximal concentration of artificial radionuclides is concentrated in surface water bearing layers of 0–5, 5–10 cm. In soil sections in places warfare radioactive agents, two zones have been marked with different mechanisms of vertical distribution of radionuclides. The first zone – is the depth of primary radionuclides during single-step outpouring of radioactive liquid at local points at the moment of testing and further washing out of the «fresh» fallout with atmospheric fallout to some definite soil horizon. The second zone – is the zone of classical distribution of radionuclides. Artificial land disturbances, those did not follow nuclear tests and preliminary work, can disturb general regularity of radionuclides' distribution the soil section. In context of additional soil moistening due to prechannel flow of ground water, intensive migration of artificial radionuclides is noticed, and first of all- of  $^{90}\text{Sr}$ , as the most soluble and mobile radionuclide.

**Keywords:** Semipalatinsk test site (STS), radionuclides, cesium – 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ), strontium – 90 ( $^{90}\text{Sr}$ ), tritium – 3 ( $^3\text{H}$ ), plutonium – 239+240 ( $^{239+240}\text{Pu}$ ), americium – 241 ( $^{241}\text{Am}$ )

Известно, что почва является основным компонентом природной среды, подвергающимся загрязнению при ядерных испытаниях. В почве накапливаются и сохраняются все вещества, загрязняющие экосистему, в том числе и техногенные радионуклиды. Поэтому изучение содержания и распределения радионуклидов в почвах бывшего Семипалатинского испытательного полигона (СИП) есть крайне необходимый аспект исследований, позволяющий иметь прогноз-

ные разработки их миграции в пространстве для реабилитации земель.

В период с 1949 по 1989 год на СИП было осуществлено 456 ядерных испытаний. Из числа проведенных испытаний 116 были атмосферными, которые проводились на площадке «Опытное поле» (рис. 1, а), из которых 86 испытаний являлись воздушными, а 30 наземными [6]. Данные испытания повлекли за собой радиоактивное загрязнение почвенного покрова в местах

непосредственного проведения ядерных испытаний на технических площадках «Опытного поля» и на территориях пролегания радиоактивных следов, которые выходили далеко за пределы СИП. Также был сформирован фон выпадений для территории СИП, отличающийся от фона глобальных выпадений земного шара. Следующий тип испытаний, проводимых на СИП, это подземные ядерные испытания. Данные испытания проводились двумя способами. В вертикальных

скважинах на площадках «Балапан» и «Сары-Узень» и в горизонтальных горных выработках – штольнях на площадке «Дегелен». Если в первом случае радионуклидного загрязнения почвенного покрова в месте проведения испытаний не происходило, за исключением отдельных аварийных ситуаций, то во втором случае загрязнение почвы радионуклидами продолжается и в настоящее время, за счет выноса радионуклидов из полостей штольни с подземными водами.

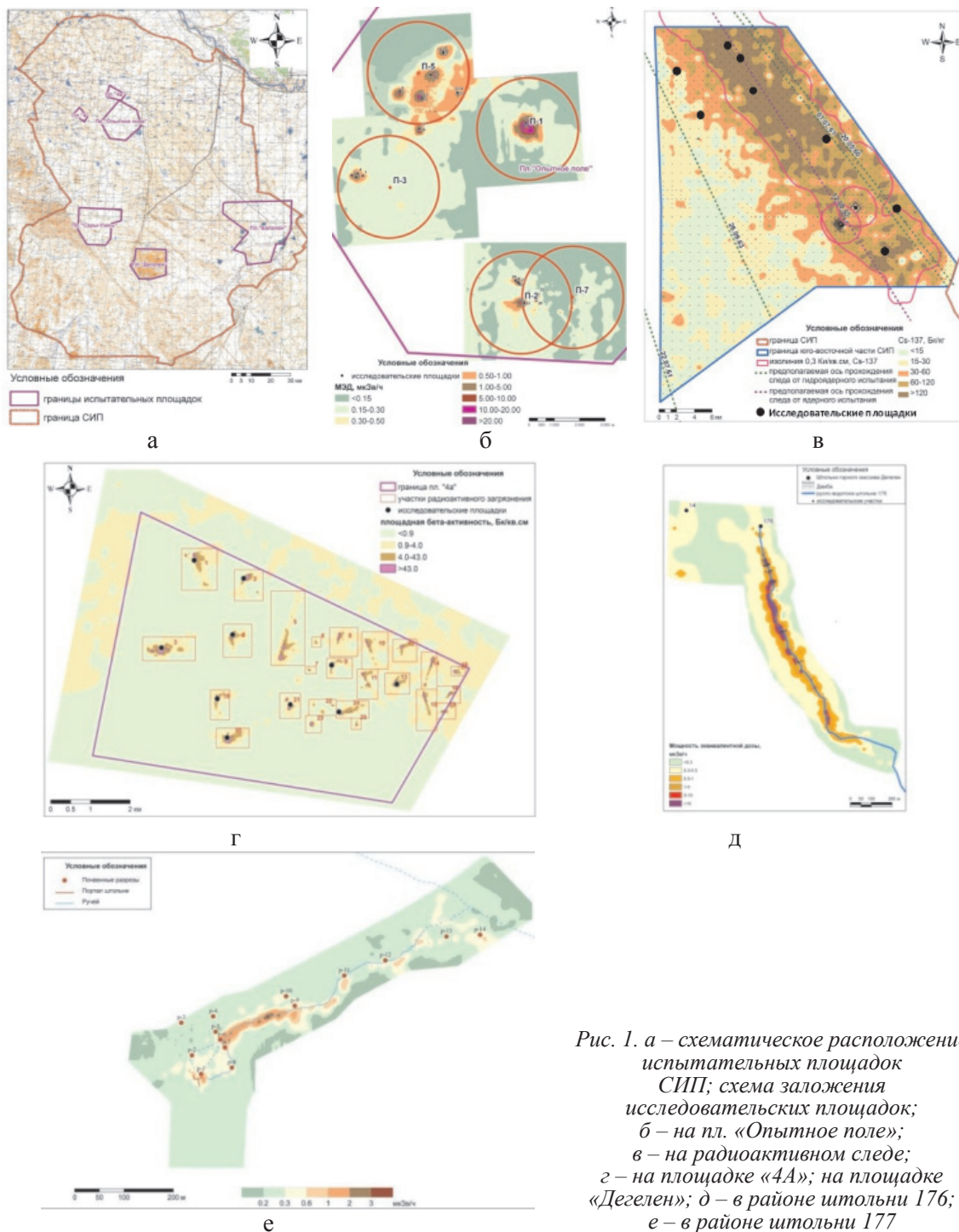


Рис. 1. а – схематическое расположение испытательных площадок СИП; схема заложения исследовательских площадок; б – на пл. «Опытное поле»; в – на радиоактивном поле; г – на площадке «4А»; на площадке «Дегелен»; д – в районе штольни 176; е – в районе штольни 177

Следующим видом испытаний, повлекшими загрязнение радионуклидами почвенного покрова, были испытания боевых радиоактивных веществ (БРВ) на площадках «4» и «4А». Площади участков радиоактивного загрязнения в местах испытаний колеблются от сотен до сотен тысяч квадратных метров, а в отдельных случаях протяженность некоторых участков достигает несколько километров.

Радиоактивное загрязнение почвенного покрова произошло и при экскавационных ядерных взрывах с выбросом грунта, направленных на создание каналов и водохранилищ, для удовлетворения нужд народного хозяйства (объекты «Атомное» озеро, Телькем-1 и Телькем-2). Основная часть радионуклидов, образовавшаяся во время таких взрывов, выпала непосредственно в местах проведения испытаний. Однако в этой работе данные объекты не рассматриваются, так как техногенное перемешивание почвенных горизонтов при проведении экскавационных ядерных взрывов не позволяет рассмотреть характер распределения радионуклидов в вертикальном почвенном профиле.

Таким образом, для исследования особенностей вертикальной миграции радионуклидов в почвенном покрове наиболее интересным являются почвы степных ландшафтов таких объектов СИП, как площадка «Опытное поле», площадки испытаний БРВ и следы радиоактивных выпадений, так как основная доля радиоактивного загрязнения при таких испытаниях приходится на не нарушенный почвенный покров. Отдельный интерес представляют радиоактивно-загрязненные луговые почвы испытательной площадки «Дегелен», так как вокруг нее сосредоточено множество хозяйств, занимающихся выпасом сельскохозяйственных животных и заготовкой растительного корма вокруг площадки «Дегелен» и в ее пределах.

### Материалы и методы исследований

*Полевые работы.* Для исследования характера вертикального распределения радионуклидов в почвенном покрове степных экосистем в местах проведения наземных и воздушных ядерных испытаний на испытательных участках П-1, П-2, П-3, П-4 П-5 и П-7, площадки «Опытное поле» заложено 8 исследовательских площадок с заложением почвенных разрезов с послойным отбором проб почвы на радионуклидные анализы с интервалом в 3 см (рис. 1, б). Площадки закладывались рядом с эпицентрами взрывов при максимальных значениях показателей  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучения, на участках без видимого техногенного нарушения почвенного покрова.

Для исследования особенностей вертикальной миграции радионуклидов в почвенном покрове на радиоактивных следах заложено 8 почвенных разрезов. Разрезы заложены в юго-восточной части СИП на радиоактивных следах, сформировавшихся в ре-

зультате прохождения радиоактивных облаков от взрывов, проведенных в 12.08.1953 г., 20.05.1960 г. и 01.07.1961 г (рис. 1, в).

Для исследования особенностей вертикальной миграции радионуклидов в почвенном покрове в местах испытания БРВ на площадке «4А» заложено 10 исследовательских площадок (рис. 1, г). После радиометрического обследования на 5-и площадках заложены почвенные разрезы с послойным отбором проб почвы с интервалом в 3 см.

Для исследования характера распределения радионуклидов в почвенном покрове луговых экосистем, в экосистемах площадки «Дегелен», сопряженных с радиоактивно-загрязненными водотоками из штолен № 176 и 177, заложены исследовательские площадки с заложением почвенных разрезов с послойным отбором проб почвы на радионуклидные анализы (рис. 1, д, е).

Для характеристики почвенного покрова были использованы почвенные полевые методы заложения и описания разрезов, отбор проб по генетическим горизонтам и выбранным интервалам. Выполнены некоторые почвенно-химические анализы. Проведены лабораторные радионуклидные анализы.

*Лабораторные работы.* Анализы по измерению удельной активности радионуклидов в пробах почвы проводились в соответствии со стандартизованными методическими указаниями [1, 2, 3] на поверенном оборудовании. Определение удельной активности радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$  проводилось на  $\gamma$ -спектрометре CanberraGX-2020,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  – радиохимическим выделением с последующим измерением на  $\beta$ -спектрометре TRI-CARB 2900 TR и  $\alpha$ -спектрометре Canberra (мод. 7401) соответственно. Удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  – определялась радиохимическим методом [4, 6]. Предел обнаружения по  $^{137}\text{Cs}$  составлял и 4 Бк/кг,  $^{241}\text{Am}$  – и 1 Бк/кг,  $^{239+240}\text{Pu}$  – 1 Бк/кг,  $^{90}\text{Sr}$  – 5 Бк/кг. Погрешность измерений для  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$  не превышала 10–20%,  $^{90}\text{Sr}$  – 15–25%,  $^{239+240}\text{Pu}$  – 30%.

### Результаты исследований и их обсуждение

*Характер распределения радионуклидов в почве в местах проведения наземных испытаний.* В местах проведения наземных испытаний на площадке «Опытное поле», в среднем, максимальные значения радионуклидов отмечаются до глубины 10 см, далее содержание радионуклидов резко падает (рис. 2, а). Однако из рисунка видно, что наблюдаются скачки в горизонтах расположенных ниже 15 см. Так, в разрезе с участка П-2, П-7 максимум содержания всех радионуклидов находится на отметке 18–21 см, что связано, видимо, с антропогенным нарушением (рис. 2, б). Это подтверждают физико-химические свойства почв отдельных горизонтов. Так, содержание гумуса во втором горизонте несколько больше, чем в первом от поверхности; совершенно не меняется по глубине содержание карбонатов; плотность почвы при отборе оказалась совершенно одинаковой. Эти особенности говорят об антропогенном вмешательстве в естественное

строение профиля, что, по-видимому, привело к перемешиванию почво-грунта, что возможно как при ядерных испытаниях, так и при рекультивационных работах.

В целом, при отсутствии признаков антропогенного нарушения наблюдается классический характер распределения радионуклидов в почве с глубиной (рис. 2, в).

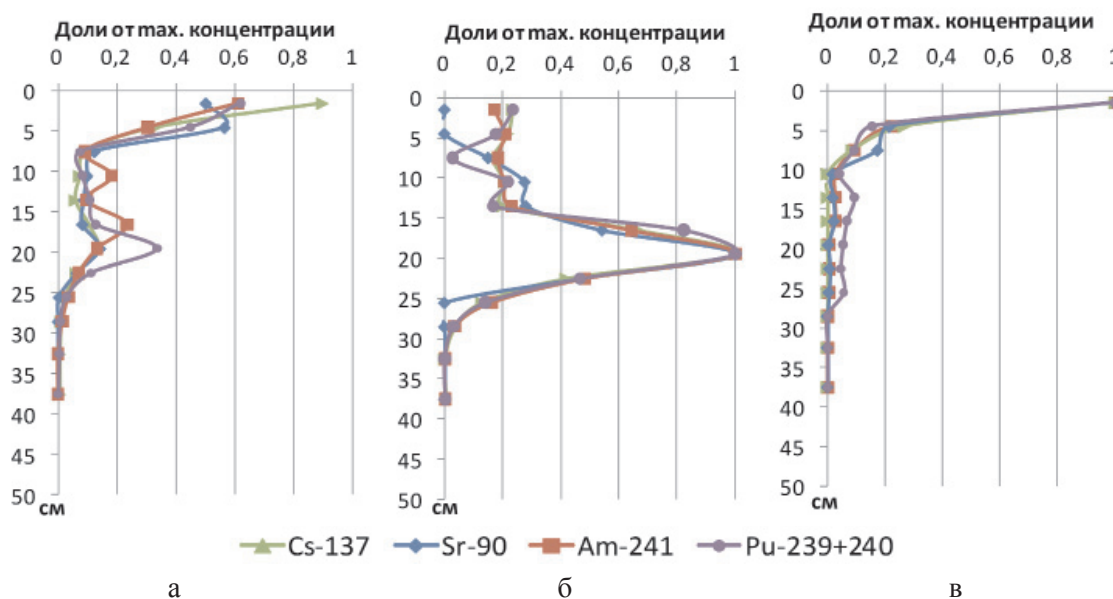


Рис. 2. Вертикальное распределение радионуклидов в почве в местах наземных ядерных испытаний:  
а – среднее на основании данных с 8-и разрезов; б – антропогенно-нарушенный участок;  
в – распределение характерное для большинства разрезов

Характер распределения радионуклидов в почве на следах радиоактивных выпадений. В среднем, максимальные значения радионуклидов, как и в случае с предыдущим видом загрязнения, отмечаются до глубины 10 см (рис. 3, а). Однако

для большинства светло-каштановых щепнистых почв склонов сопок, через которые проходит радиоактивный след, максимальные значения удельной активности радионуклидов отмечаются до глубины 5 см (рис. 3, б).

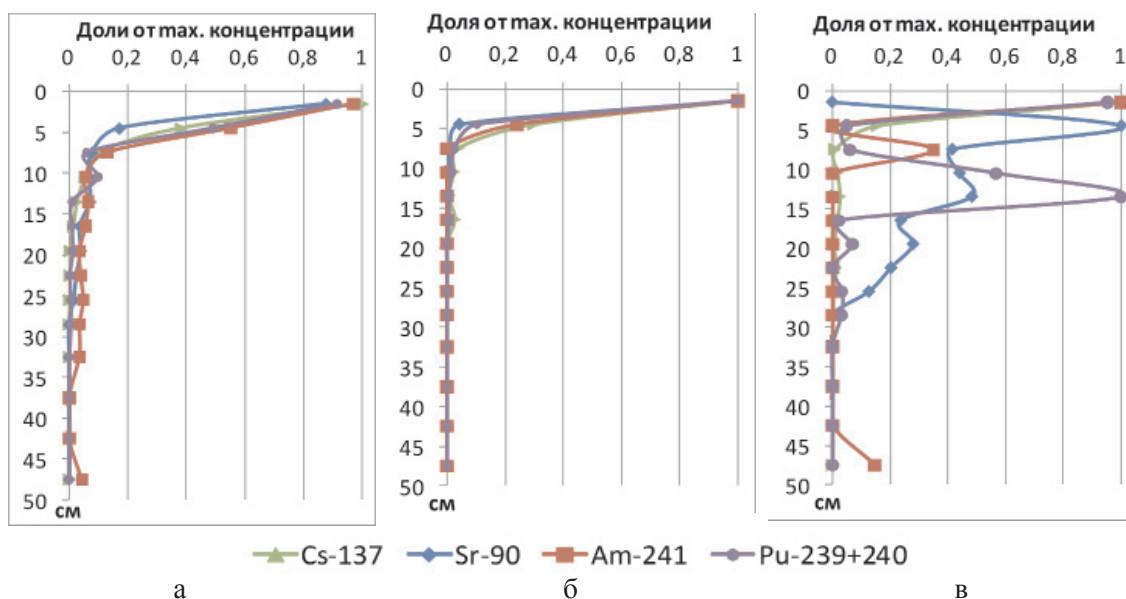


Рис. 3. Вертикальное распределение радионуклидов в почве на радиоактивных следах:  
а – среднее на основании данных с 8-и разрезов; б – распределение, характерное для светло-каштановых щепнистых почв склонов сопок;  
в – распределение в солонцевато-солончаковых почвах

Рыхлое сложение поверхностных горизонтов солонцевато-солончаковых почв межзопочных понижений способствует большему проникновению радионуклидов в нижележащие горизонты (рис. 3, в). Таким образом, вертикальное распределение радионуклидов в почве может отличаться из-за морфологических особенностей различных типов почв.

*Характер распределения радионуклидов в почве в местах испытания БРВ.* Необходимо отметить более глубокое проникновение радионуклида  $^{90}\text{Sr}$  в почвенный профиль, чем при других видах загрязнения. Высокие значения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  сохраняются до материнских пород. Причиной глубокого проникновения радионуклида можно считать легкий механический состав почвогрунтов, характер проведения испытаний на данной площадке и подвижность, и растворимость этого радионуклида. Поведение  $^{241}\text{Am}$  и  $^{137}\text{Cs}$  почвенных профилях

площадки 4 «А» сильно отличается от классического поведения этих радионуклидов, когда максимумы значений их содержания отмечаются в верхнем слое почвы 5–10 см. Так, в разрезе участка 2 максимальные значения, как  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{241}\text{Am}$ , наблюдаются в слое 20–25 см, а в разрезе 24 – в слое 15–20 см. Таким образом, в вертикальных почвенных профилях площадки 4 «А» можно выделить две зоны с различными механизмами вертикального распределения радионуклидов. Первая зона – глубина первичного распространения радионуклидов во время одномоментного выливания жидкости, содержащей радионуклиды в локальные точки в момент проведения испытаний и дальнейшее промывание атмосферными осадками «свежего» выпадения вглубь почвы до определенного почвенного горизонта. Наличие такого механизма хорошо просматривается в вертикальном почвенном профиле на участках 2 и 24 (рис. 4, б, в).

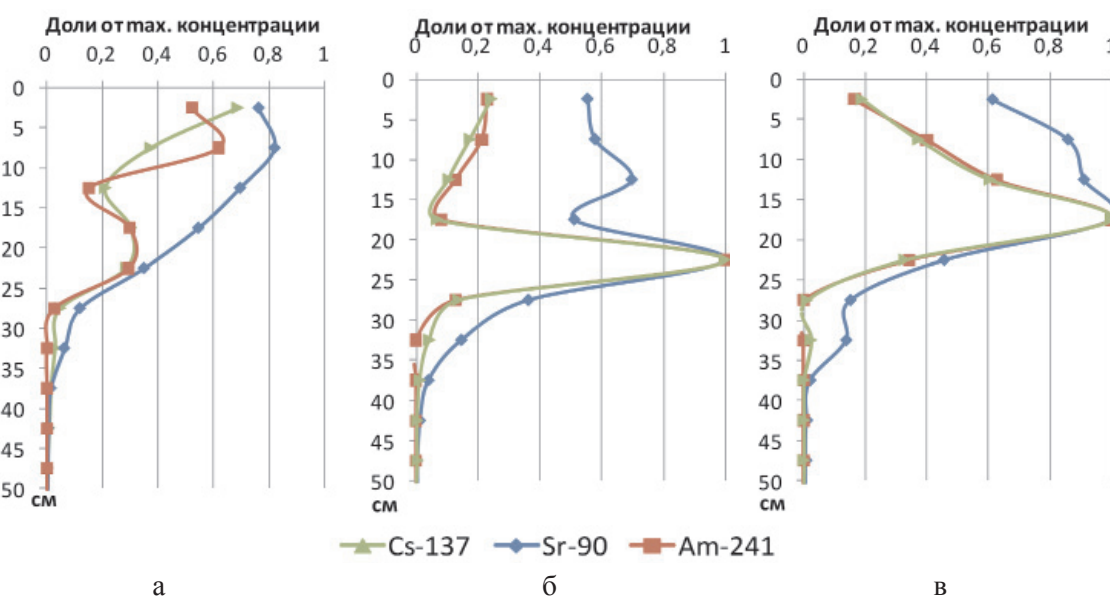


Рис. 4. Вертикальное распределение радионуклидов в почве после испытаний БРВ: а – среднее на основании данных с 5-и разрезов; б – распределение на участке 2; в – распределение на участке 24

Вторая зона – зона классического распространения радионуклидов. Если за ее начальную точку (верхнюю границу) взять слой почвы, являющийся последним в первой зоне (глубине первичного распространения радионуклидов), то можно наблюдать классическое распределение радионуклидов в почвенном профиле (рис. 4, б, в).

Характер распределения радионуклидов в луговых почвах. В целом, вертикальное распределение радионуклидов в луговых почвах подчиняется общепринятым закономерностям. Однако вертикальное распре-

деление основных техногенных радионуклидов в водонасыщенной почвенно-грунтовой толще центральной части экосистемы, сопряженной с водотоком из штольни, показывает высокую подвижность радионуклидов в почве (рис. 5).

**Выводы**

- В условиях аридной зоны, без дополнительного увлажнения почв, максимальное содержание техногенных радионуклидов сосредоточено только в поверхностных горизонтах 0–5, 5–10 см.

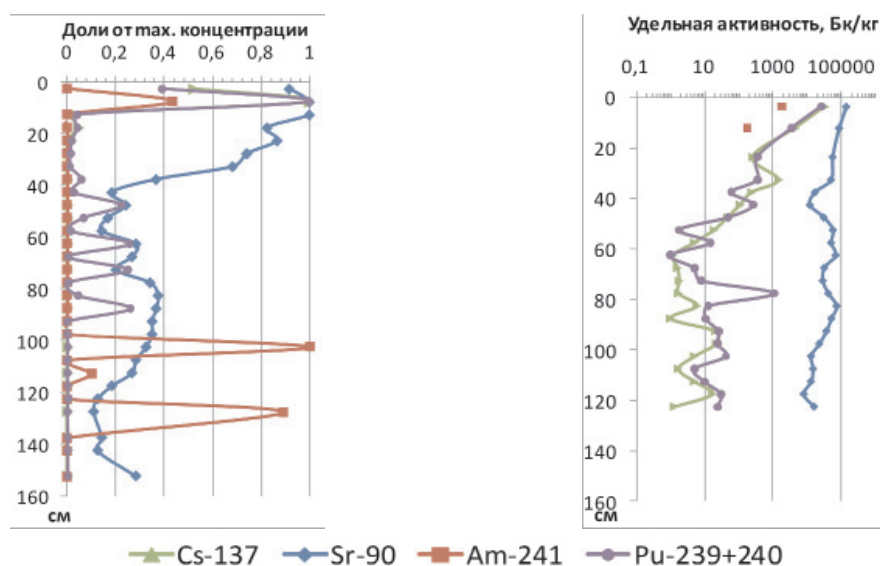


Рис. 5. Вертикальное распределение радионуклидов в водонасыщенных луговых почвах

• В почвенных профилях площадки «4А» выделено две зоны с различными механизмами вертикального распределения радионуклидов. Первая зона – глубина первичного распространения радионуклидов во время одномоментного выливания радиоактивной жидкости в локальные точки в момент проведения испытаний и дальнейшее промывание атмосферными осадками «свежего» выпадения вглубь почвы до определенного почвенного горизонта. Вторая зона – зона классического распространения радионуклидов.

• Техногенные нарушения почвенного покрова, которые сопровождали ядерные испытания и подготовительные к ним работы, могут нарушить общую закономерность распределения радионуклидов в почвенном профиле.

• В условиях дополнительного увлажнения почв за счет склонового стока или грунтовых вод отмечается интенсивная миграция техногенных радионуклидов, в первую очередь  $^{90}\text{Sr}$ , как наиболее растворимого и подвижного радионуклида.

#### Список литературы

1. Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на  $\gamma$ -спектрометре: МИ 2143-91. – Введ. 1998-06-02. – Рег. № 5.06.001.98. – М.: НПО ВНИИФТРИ, 1991. – 17 с.
2. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного  $\beta$ -спектрометра с программным обеспечением «Прогресс». – Менделеево, 2004. – 20 с.
3. Методика определения содержания искусственных радионуклидов плутония-(239 + 240), стронция-90 в объектах окружающей среды (почвах, грунтах, донных отложениях и растениях). – Алматы, 2010. – 25 с.
4. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды. – Введ. 1999. – Рег. № 5.05.008.99.
5. Семипалатинский испытательный полигон. Создание, деятельность, конверсия / кол. авторов под рук. В.С. Школьника. – Алматы, 2003. – 344 с.,ил. – Библиогр.: С. 292–304. – ISBN 9965-00-614-8.

6. СТП 17.66-92. Плутоний-238,239,240. Радиохимическая методика выделения из проб почвы и приготовления препаратов для  $\alpha$ -спектрометрических измерений. Стандарт предприятия. Комплексная система управления качеством разработок. – Введ. 1993-01-02. – СПб.: НПО «Радиовый институт им. В.Г. Хлопина», 1993. – 10 с.

#### References

1. Activity of radionuclides in bulk samples. Methods of measuring using  $\gamma$ -spectrometer: MI 2143-91. Introduction 1998-06-02. Reg. no. 5.06.001.98. Moscow, SPA VNIIFTRI, 1991, pp. 17.
2. Methods of radionuclides' activity measurement using scintillation  $\beta$ -spectrometer with «Progress» software. Mendeleev, 2004, pp. 20
3. Methods of determination of plutonium-(239 + 240), strontium-90 artificial radionuclides concentration in environmental objects (soil, ground, bottom sediments and plants). Almaty, 2010, pp. 25.
4. Methodological recommendations for sanitary control of concentration of radioactive substances in environmental objects. Introduction, 1999. Reg. no. 5.05.008.99.
5. Semipalatinsk test site. Creation, activity, conversion / group of authors under guidance of V.S. Shkolnik. Almaty, 2003, pp. 344, ill. Bibliogr.: pp. 292–304. ISBN 9965-00-614-8.
6. STP 17.66-92. Plutonium-238,239,240. Radiochemical method of extraction from soil samples and specimen preparation for  $\alpha$ -spectrometric measurements. Standard of the enterprise. Complex system of development quality management.-Introduction. 1993-01-02. St. Petersburg, SPA «Radium institute called after. V.G. Hlopin», 1993, pp. 10.

#### Рецензенты:

Спирин Е.В., д.б.н., зав. физико-химическим отделом, ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии Российской академии сельскохозяйственных наук» (ГНУ ВНИИСХРАЭ Россельхозакадемии), г. Обнинск;

Спиридонов С.И., д.б.н., профессор, заведующий лабораторией математического моделирования и программно-информационного обеспечения, ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ВНИИСХРАЭ Россельхозакадемии)», г. Обнинск.

Работа поступила в редакцию 04.12.2013.