

УДК 631.4

© Е.В. Мингареева и соавт.; ФНО «XXI век»

РАДИОНУКЛИДЫ ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs В ПОЧВАХ НА ЗВОНЦОВЫХ И ЛЕНТОЧНЫХ ГЛИНАХ

Е.В. Мингареева^{1, 2}, Б.Ф. Апарин^{3, 1}, Е.Ю. Сухачева^{1, 3}

¹ Центральный музей почвоведения им. В.В. Докучаева, СПб., Россия;

² Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия;

³ Санкт-Петербургский государственный университет, СПб., Россия

Эл. почта: soilmuseum@bk.ru

Статья поступила в редакцию 05.05.2018; принята к печати 07.08.2018

Представлены и проанализированы данные о содержании естественных радионуклидов (ЕРН) ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K и техногенного ^{137}Cs в почвах Северо-Запада России. Почвенные образцы были отобраны в различные временные периоды: до первых ядерных испытаний (1926 и 1932 гг.), в период интенсивных ядерных испытаний (1964 г.) и после их запрета (1996, 2000 и 2009 гг.). Использование коллекции Центрального музея почвоведения им. В.В. Докучаева позволило впервые определить удельную активность (R_A) ЕРН до первых ядерных испытаний в естественных почвах, сформированных в относительно одинаковых природно-климатических условиях лесной зоны на озерно-ледниковых отложениях – звонцовых и ленточных глинах. Выявлено, что R_A ЕРН в почвах на звонцовых глинах варьирует в более широком диапазоне, чем в почвах на ленточных глинах. Почвы на звонцовых глинах по средним значениям R_A в сравнении с почвами на ленточных глинах содержат больше ^{226}Ra и меньше ^{232}Th и ^{40}K , что, возможно, связано с особенностями поведения радия-226 в почвах. Отмечено, что содержание ЕРН в почвообразующих породах варьирует в более узких диапазонах по сравнению с верхней частью профиля. Выявлена взаимосвязь удельной активности радионуклидов с величиной pH и гранулометрическим составом почв. Техногенный ^{137}Cs обнаружен только в современных образцах почв. Его содержание варьирует в пределах 6,7–48,6 Бк/кг ($M = 17,5 \pm 17,0$ Бк/кг). Наиболее высокая R_A цезия-137 отмечена в почве на ленточных глинах Ленинградской области. В образцах почв на звонцовых глинах Новгородской и Псковской областей его содержание низкое (<10 Бк/кг). Существенная разница в R_A ^{137}Cs в почвах исследуемых регионов, вероятно, вызвана особенностями распространения радиационного загрязнения после аварии на ЧАЭС. Коллекция почвенных монолитов и материалы исследования физико-химических свойств и удельной активности радионуклидов в почвах, отобранных в период с 1926 по 2009 г., может стать основой для организации почвенно-экологического мониторинга в Северо-Западном регионе Европейской территории России.

Ключевые слова: естественные радионуклиды, техногенный цезий-137, почвенные монолиты.

THE RADIONUCLIDES ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K AND ^{137}Cs IN SOILS FORMED ON CLAYS ORIGINATING FROM INTRAGLACIER AND PARAGLACIER AREAS (“ZVONTSOVYE” CLAYS AND “STRIPED” CLAYS)

Ye.V. Mingareeva^{1, 2}, B.F. Aparin^{1, 3}, Ye.Yu. Sukhacheva^{1, 3}

¹ V.V. Dokuchayev Central Museum of Soil Science, Saint Petersburg, Russia;

² Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia;

³ Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

E-mail: soilmuseum@bk.ru

Data on the contents of the natural radionuclides (NRN) ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K and the anthropogenic radionuclide ^{137}Cs in soils of the Northwest of Russia are presented and analyzed. Study samples obtained in different times related to periods before nuclear weapon trials (1926 and 1932), during trials (1964) and after trials had been banned (1996, 2000 and 2009) were stored at V.V. Dokuchayev Central Museum of Soil Science (Saint Petersburg, Russia). This is the first time that the specific radioactivity (R_A) of NRN before nuclear trials was determined in natural soils that formed under relatively similar climatic conditions of the forest zone on glacial sediments (clays) that emerged in intraglacial lakes (“zvontsovye” clays) and paraglacial lakes (“striped” clays). NRN R_A values were found to vary more in soils formed on the former clays than in soils formed on the latter clays. The former feature higher mean R_A of ^{226}Ra and lower mean R_A of ^{232}Th and ^{40}K compared with the latter. This may relate to the specificities of ^{226}Ra behavior in soils. NRN R_A in soil-forming rocks vary less than in the upper soil layers. R_A values were found to depend on soil pH and soil texture. Anthropogenic ^{137}Cs was found only in the present-time samples. Its content varies within 6.7–48.6 Bq/kg (17.5 ± 17.0). The highest levels were found in soils formed on the striped clay in Leningrad Region. Its content is low (<10Bq/kg) in soils formed on the “zvontsovye” clays in Novgorod and Pskov Regions. The differences are likely to reflect the pathways of radioactivity spread after Chernobyl accident. The collection of soils sampled in 1926 to 2009 may provide reference standards for ecological soil monitoring in the Northwest of Russia

Keywords: natural radionuclides, anthropogenic ^{137}Cs , soil monoliths.

Введение

Во второй половине XX в. проведение ядерных испытаний, развитие ядерной энергетики, применение радиоактивных источников в промышленности и медицине привели к изменению радиационной ситуации и появлению территорий с повышенным содержанием естественных и искусственных радионуклидов. Аварийные ситуации и инциденты обусловили формирование радиоактивных следов с высокими уровнями загрязнения (аварии на НПО «Маяк», Чернобыльской АЭС и др.) [1, 8, 20]. В результате аварии на Чернобыльской атомной электростанции (1986 г.) около 60,0 тыс. км² площади Европейской территории России подверглось загрязнению (более 37 кБк/м² или 1 Ки/км²) техногенными радионуклидами¹. Больше всего от аварии на АЭС пострадали Брянская, Калужская области. Ленинградская область загрязнена существенно меньше, а Новгородская и Псковская области не пострадали.

В настоящее время накоплен значительный фактический материал по радиоактивному загрязнению почв России и Мира [1, 6, 7, 8, 20, 24]. Однако данные либо сильно усреднены и не учитывают территориальных особенностей (форма рельефа, автоморфность/гидроморфность ландшафта, форма склонов и их экспозиция, тип угодий и др.), либо касаются конкретных почв и районов без учета литологических типов почвообразующих пород-носителей радионуклидов [6, 7, 9, 11, 17]. Так, по данным Sources and Effects of Ionizing Radiation (2008)² и Переволоцкого А.Н. и Переволоцкой Т.В. [17], типичные диапазоны содержания естественных радионуклидов (ЕРН) в почвах Мира и их средние значения (M) составляют: ²²⁶Ra, 17–60 Бк/кг, $M = 35 \pm 4$ Бк/кг; ²³²Th, 11–64 Бк/кг, $M = 33 \pm 3$ Бк/кг; ⁴⁰K, 140–850 Бк/кг, $M = 400 \pm 24$ Бк/кг. Кроме того, можно найти данные по содержанию некоторых естественных радионуклидов в разных типах почв и геологических породах³, но они не позволяют в полной мере привязать их к конкретному району и условиям почвообразования. Использовать эти данные в целях почвенно-экологического мониторинга невозможно, поскольку не указываются методика отбора почвенных образцов, время и место взятия образцов.

¹ Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия-Беларусь). Москва, Россия. Минск, Беларусь: Фонд «Инфосфера» – НИА «Природа», 2009:140.

² Sources and effects of ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2008 Report to the General Assembly, with annexes. V.1. Sources. N.Y.: United Nations, 2008. 463 p. http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753_Report_2008_Annex_A.pdf

³ Природный радиационный фон: происхождение и эволюция: учебно-методическое пособие к курсу «Радиология» для студентов физического факультета. Южный Федеральный Ун-т, Ростов-на-Дону. 2007.

Известно, что содержание радионуклидов в почвах наследуется в первую очередь от почвообразующих пород, а их поведение и распределение в почве зависят от, главным образом, генетических особенностей почв, режимов (водный, окислительно-восстановительный), кислотно-основных свойств, содержания органического вещества, гранулометрического, химического и минералогического составов [9, 19, 20, 22, 24, 25].

Уникальную возможность для исследования содержания ЕРН и искусственных радионуклидов в разных типах почв и почвообразующих породах дают коллекции почвенных образцов и монолитов в фондах Центрального музея почвоведения им. В.В. Докучаева (ЦМП), имеющие точную временную и географическую привязку. Эти коллекции дают возможность определить содержание ЕРН в почвах до первых ядерных испытаний (до 1945 г.), в период интенсивных испытаний (1945–1996 гг.) и после их запрета (1996 г.). Коллекция позволяет исследовать содержание ЕРН (и техногенного ¹³⁷Cs) в разных типах почв с учетом почвообразующих пород и определить связь удельной активности радионуклидов с химическим и минералогическим составом почв, а также с учетом антропогенной нагрузки и режимом увлажнения и др. [5, 16, 26].

С этой целью мы провели сравнительный анализ содержания естественных радионуклидов (²²⁶Ra, ²³²Th и ⁴⁰K) и техногенного ¹³⁷Cs в образцах из почвенных монолитов и разрезов, заложенных в 3 временных периода: до 1945, с 1945 по 1996 и после 1996 г.

Объекты и методы

Объектами исследования явились 5 почвенных монолитов из разрезов, заложенных в Псковской и Ленинградской областях в 1926, 1934, 1964, 1996 и 2000 гг., а также образцы, отобранные из разреза 2009 г. (ЭНВМ-10), заложенного в Новгородской области. Исследуемые почвы сформировались на озерно-ледниковых отложениях внутриледниковых (звонцовые глины) и приледниковых (ленточные глины) озер. Первый тип почвообразующих пород представлен хорошо сортированным материалом, а для второго характерна тонкая слоистость, обусловленная сезонностью формирования отложений. По типу рельефа звонцовые глины приурочены к наиболее высоким холмам с плоскими вершинами (звонцы), а ленточные глины – к озерно-ледниковым равнинам. Это является определяющим фактором в степени дренированности и водно-воздушного режима почв [13]. Почвы на звонцовых глинах (поддубицы⁴) хорошо дренированы и

⁴ Поддубицы – это особое название для почв, формирующихся на звонцовых глинах и под своеобразным растительным покровом – изреженные дубовые или елово-дубовые леса [12, 13]. Такое название было принято еще в Классификации почв СССР (1977 г.). В современной Классификации и Диагностике почв России (КиДПР, 2004) поддубицы отнесены к дерново-подзолистым почвам [15].

развиваются в окислительных условиях, а процессы оподзоливания и оглеения практически не выражены. В отличие от поддубиц, почвы на ленточных глинах формируются в условиях временного или постоянно-го переувлажнения. Признаки оподзоливания и оглеения в этих почвах хорошо выражены [12].

Исследуемые почвы на звонцовых и ленточных глинах отбирались в разное время в районах с наименьшим антропогенным влиянием. В 1926 г. на территории Новооскольнического района Псковской области под дубовой порослью был заложен разрез почвы поддубицы на звонцовых глинах и отобран почвенный монолит (№ у287 – здесь и далее указаны номера почвенных монолитов по базе данных ЦМП). В 2000 г. практически на том же самом месте, что и в 1926 г., был заложен разрез и взят почвенный монолит (№ у2138). В 2009 г. сотрудниками ЦМП в целях исследования долгосрочной динамики морфологического строения и свойств дерново-подзолистых почв на основе датированных почвенных коллекций музея в Валдайском районе Новгородской области был заложен современный разрез поддубицы (ЭНВМ-10). Он располагался на плоской вершине звонцового холма под ельником дубравно-травным с примесью дуба практически на том же месте, что и разрез 1996 г., подготовленный для экскурсии по маршруту № 7 II Съезда почвоведов России «Волхов-Ильменская низина, Валдайская возвышенность (Лисино-Новгород-Валдай)»⁵. Для этой почвы (разрез № 4 по Путеводителю) был выполнен широкий спектр физико-химических и химических анализов.

Разрезы почв на ленточных глинах были заложены и монолиты отобраны на территории Лисинского лесничества Ленинградской области по маршруту полевой экскурсии II Международного конгресса [3] в 1934, 1964 и 1996 гг. Здесь расположен крупный лесной массив, относительно слабо затронутый антропогенными воздействиями. В 1996 г. по постановлению Правительства РФ он приобрел статус особо охраняемой природной территории (ООПТ) и стал региональным комплексным заказником, организованным с целью сохранения старейшей базы научных исследований и учебного лесопарка [3]. Почвенный монолит 1934 г. был отобран в парковом квартале лесничества под лесом. В 1964 г. был заложен разрез под луговой растительностью и отобран монолит. В 1996 г. под осиновым лесом с примесью ели и березы был заложен современный разрез (№ 1) для II Съезда почвоведов России. Почва 1996 г. отбора включена в Красную книгу почв Ленинградской области и относится к категории «Почвенные эталоны», то есть почвы, «имеющие значение в поддержании тех природных экосистем, для которых эти почвы являются индикаторами» [4]. По КиДПР (2004) исследуемые почвы были отне-

⁵ Путеводитель экскурсий II Съезда почвоведов России / под ред. Б.Ф. Апарина, Н.Н. Матигян, О.Г. Растворовой. СПб.: СПбГУ, 1996.

сены к 2 типам [22]: глееземы перегнойные (монолит № у2116, 1934 г.) и дерново-элювиально-метаморфические почвы (монолиты № у1560, 1964 г. отбора и № у711, 1996 г. отбора).

Монолиты и образцы исследуемых почв, доведенные до воздушно-сухого состояния, хранились при комнатной температуре в фондах ЦМП. Образцы из монолитов отбирались послойно – каждые 5 (10) см. Пробоподготовка и последующий анализ образцов проводились однотипно и по общепринятым методикам, описанным в руководстве «Теория и практика химического анализа почв» под редакцией Л.А. Воробьевой [10]. В образцах исследовались свойства почв, которые в наибольшей степени влияют на поведение радионуклидов в почвах. Содержание органического углерода определяли методом мокрого сжигания серно-хромовой смесью по Тюрину [21] (коэффициент пересчета на гумус, $K_r = 1,724$), pH водной суспензии ($pH_{\text{водн}}$). Водную суспензию готовили в соотношении почва/дистиллированная вода 1/2,5. Также определяли гранулометрический состав.

Удельную активность (R_A , Бк/кг, воздушно-сухой навески почвы) радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs) определяли методом гамма-спектрометрии⁶ во Всероссийском научно-исследовательском институте радиологии и агроэкологии в образцах с глубин: 0–5, 5–10, 10–20 и 90–100 см. Почвы 1926, 1934 гг. отбора условно отнесены к фоновым, так как они отобраны до взрыва первой ядерной бомбы и не содержат техногенный ^{137}Cs . Для статистического анализа полученных данных были рассчитаны: среднее арифметическое (M), стандартное отклонение (σ), критерий Манна-Уитни (U-критерий, используемый для оценки различий между двумя независимыми выборками), коэффициент вариаций (V_σ , мера относительного разброса случайной величины, по которой можно судить о неоднородности рассматриваемой совокупности) и корреляционные взаимосвязи [14, 18]. Коэффициент вариаций (V_σ) рассчитывался нами для каждой глубины в отдельности по трем совокупностям: 1) вся совокупность данных без разделения по типу почвообразующей породы, 2) образцы почв на звонцовых глинах и 3) образцы почв на ленточных глинах. На основании литературных данных и статистической обработки полученного материала V_σ , превышающий 30%, был принят как показатель высокой неоднородности R_A ЕРН [5, 14, 18].

Результаты и обсуждение Сравнительная характеристика почв

Содержание физической глины (<0,01 мм) в исследуемых почвах в среднем составляет $56 \pm 18,3\%$, а фрак-

⁶ Активность радионуклидов в счетных образцах. Методика измерений на гамма-спектрометрах с использованием программного обеспечения «SpectraLine». Менделеево, 2014. 27 с.

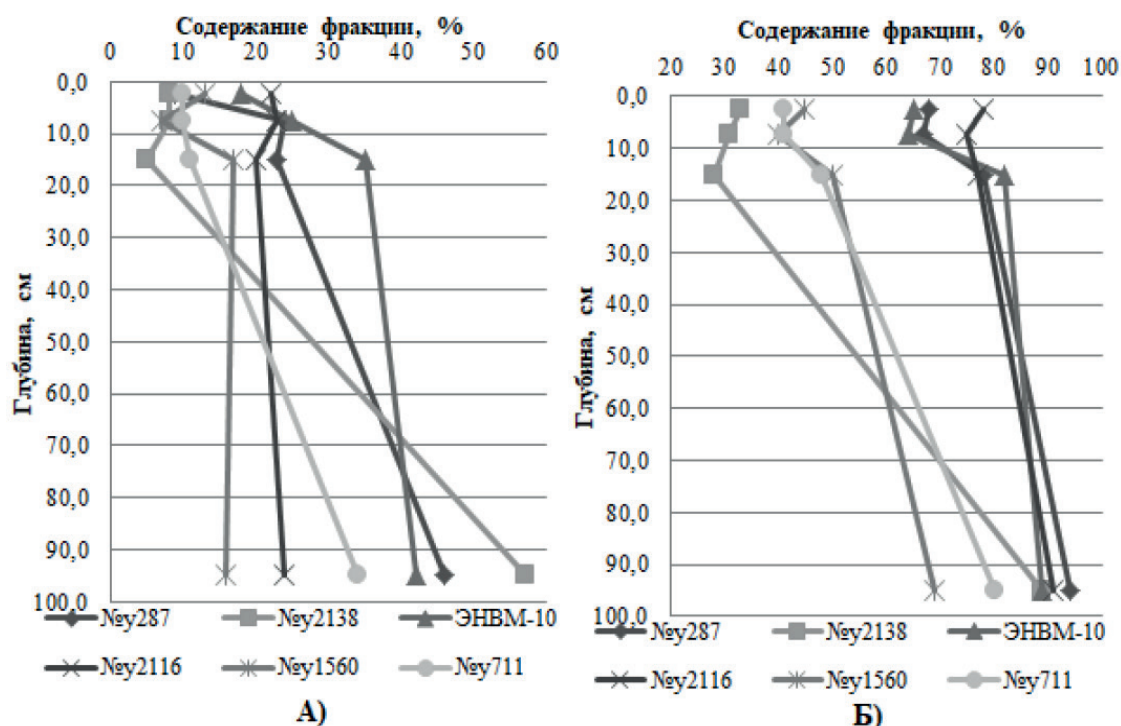


Рис. 1. Содержание фракций гранулометрического состава по профилям почв.

А) ил; **Б)** физическая глина.

№ у287 – почва поддубица на звонцовых глинах, 1926 г. отбора, Псковская область;

№ у2138 – почва поддубица на звонцовых глинах, 2000 г. отбора, Псковская область;

ЭНВМ-10 – почва поддубица на звонцовых глинах, 2009 г. отбора, Новгородская область;

№ у2116 – глеезем перегнойный на ленточных глинах, 1934 г. отбора, Ленинградская область;

№ у1560 – дерново-элювиально-метаморфическая почва на ленточных глинах, 1964 г. отбора, Ленинградская область;

№ у711 – дерново-элювиально-метаморфическая почва на ленточных глинах, 1996 г. отбора, Ленинградская область

ции ила ($<0,001\text{ мм}$) – $16 \pm 8,2\%$ (рис. 1). Фракция физической глины в образцах звонцовых и ленточных глин (90–100 см) составляет 89–94 и 69–91% соответственно. Фракции ила в звонцовых глинах содержится вдвое больше, чем в ленточных глинах.

Характерно, что во всех почвах в верхней части профиля (0–5, 5–10 и 10–20 см) содержание фракций $<0,01$ и $<0,001\text{ мм}$ меньше, чем в почвообразующих породах (90–100 см), за исключением почвы 1934 г. отбора. Особенно большая разница (почти в 2,5 раза) отмечается в почвах 2000 г. отбора (Псковская область, монолит № у2138) и 1996 г. отбора (Ленинградская область, монолит № у711). При этом в них возрастает количество фракций песка (1,00–0,25 и 0,25–0,05 мм). Облегченный гранулометрический состав верхней части профиля этих почв может быть обусловлен разными причинами. В почве на звонцовых глинах это может быть связано с отбором монолита в краевой части вершины звонцового холма. В почве на ленточных глинах, вероятнее всего, это обусловлено литологической неоднородностью, вызванной абразией породы в процессе ее образования [13]. Различия в содержании тонкодисперсных фракций отражаются на удельной активности радионуклидов [2,

19]. Это дает основание предположить, что содержание радионуклидов в исследуемых почвах будет коррелировать с гранулометрическим составом.

На распределение радионуклидов по профилю существенное влияние может оказывать содержание гумуса [19]. Содержание гумуса в верхних 0–5 см всех исследуемых почв варьирует в широком диапазоне – от 3,6 до 10,0%, с наибольшим количеством в образцах почв № у287 (Псковская область) и ЭНВМ-10 (Новгородская область) на звонцовых глинах и в № у1560 (Ленинградская область) на ленточных глинах. В образце почвы на ленточных глинах Ленинградской области, отобранном в 1934 г., содержание гумуса почти вдвое меньше (4,7%), чем в почве на звонцовых глинах 1926 г. Ниже, на глубине 5–10 см количество гумуса существенно уменьшается: до 1,3–3,4% – в почвах на звонцах и до 1,9–4,6% – в почвах на ленточных глинах. Содержание гумуса в почвообразующих породах не превышает 0,36. Таким образом, исследуемые почвы отличаются как по величине содержания гумуса, так и по его профильному распределению. Можно ожидать, что это найдет отражение в содержании ЕРН в образцах.

Установлено, что поведение радионуклидов связано с почвенной кислотностью. Так, по литературным данным, наиболее сильная сорбция тория-232 наблюдается в почвах с нейтральной и слабощелочной реакцией среды, а наименьшая – с кислой [19]. Исследуемые почвы в верхней части профиля (0–20 см) характеризуются кислой реакцией среды (рН 4,1–5,3), за исключением одного образца современной почвы на ленточных глинах, в котором реакция близка к нейтральной (рН 6,1). Звонцовые глины (90–100 см) имеют нейтральную и даже слабо щелочную (рН 7,1–7,9) реакцию среды, а ленточные глины – слабо кислую (рН 6,1–6,4). Вероятно, при таком широком диапазоне значений рН будут наблюдаться заметные различия в содержании ЕРН.

Содержание радионуклидов

Радий-226 присутствует в природе в рассеянном состоянии и практически не входит в состав отдельных минералов. Часто вместе с ^{232}Th он присутствует в фосфорных удобрениях. Радий-226 в почвах обладает наибольшей миграционной способностью. Его максимальная сорбция отмечена в почвах с высоким содержанием илистой фракции. До 40% всех соединений с ^{226}Ra в почвах находятся в водорастворимой, обменной и кислоторастворимой формах, а прочно-связанные и связанные с полуторными оксидами⁷ – 50–60% [2, 22].

Удельная активность (R_A) ^{226}Ra во всех почвах изменяется в диапазоне 12,0–39,4 Бк/кг (рис. 2). Наиболее широкий диапазон R_A характерен для почв на звонцовых глинах. Разница между значениями R_A радия-226 в почвах на звонцовых и ленточных глинах по критерию Манна-Уитни недостоверна, а их средние значения (M) очень близки: $24,7 \pm 11,0$ и $21,7 \pm 6,9$ Бк/кг, соответственно.

Удельная активность ^{226}Ra в почвообразующей породе (90–100 см) во всех образцах варьирует в диапазоне от 22,0 до 35,6 Бк/кг и определяется содержанием в звонцовых глинах. Средние значения R_A радия-226 в звонцовых и ленточных глинах составляют $M = 29,7 \pm 7,6$ и $M = 24,1 \pm 5,3$ Бк/кг, соответственно. Различия в содержании радионуклида в почвообразующих породах по критерию Манна-Уитни недостоверны. По абсолютным значениям в образце звонцовых глин 1926 г. R_A радия-226 более высокая, чем в современных образцах, а в ленточных глинах 1934 г. – более низкая. Расчет коэффициента вариаций ($V\sigma$), по рассматриваемым совокупностям данных, показал отсутствие неоднородности для всех трех случаев ($V\sigma < 25,9\%$).

⁷ Полуторные оксиды (или R_2O_3) – оксиды, в которых на один атом Al или Fe приходится полтора атома кислорода. Распределение полуторных оксидов в почвенном профиле выявляет характер почвообразования, а соотношение $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Fe}_2\text{O}_3$ косвенно характеризует минералогический состав почв [10].

В слоях 0–5, 5–10 и 10–20 см (далее – верхняя часть профиля) исследуемых почв диапазон R_A радия-226 составляет 12,0–39,4 Бк/кг и определяется R_A в образцах почв на звонцовых глинах (рис. 2). Разница в M содержания радия-226 в образцах почв на звонцовых и ленточных глинах отсутствует: $22,9 \pm 11,1$ и $22,3 \pm 6,8$ Бк/кг, соответственно. Наиболее широкие диапазоны содержания ^{226}Ra в почвах на звонцовых и ленточных глинах приурочены к глубине 0–5 см, а наиболее узкие – к глубине 5–10 см. Максимальные R_A для почв, сформированных на обоих типах почвообразующих пород, наблюдаются на глубине 0–5 см, а минимальные – 10–20 см. Стоит отметить, что почвы на звонцовых глинах, в целом, имеют более широкие диапазоны R_A радионуклида на каждой из рассматриваемых глубин.

Образцы почвы 1926 г. отбора на глубине 0–5 и 5–10 см имеют наиболее высокую R_A по сравнению с современными образцами, а на глубине 10–20 см активность радия-226 близка к максимальной. В образцах почвы на ленточных глинах 1934 г. отбора R_A в целом ниже, чем в образцах 1926 г. и занимает промежуточное положение относительно более современных почв на ленточных глинах. Современная почва на звонцовых глинах (№ у2138, 2000 г.), выделявшаяся наиболее низким содержанием фракций $<0,01$ и $<0,001$ мм в верхней части профиля, имеет практически самое низкое содержание ^{226}Ra на этих глубинах по сравнению со всеми исследуемыми образцами почв. Сравнение содержания ^{226}Ra в почвах на глубине 0–5 см и почвообразующей породе показало существенную разницу между этими образцами только в современной почве на звонцовых глинах № у2138. Расчет $V\sigma$ выявил общую тенденцию: наиболее высокую неоднородность R_A на глубине 0–5 и 10–20 см ($V\sigma > 42\%$) и низкую – в слое 5–10 см ($V\sigma < 34,5\%$), в особенности для почв на ленточных глинах ($V\sigma = 15,0\%$).

Рассчитаны корреляции между R_A ^{226}Ra и содержанием фракций гранулометрического состава (крупный, средний и мелкий песок, ил и физическая глина), содержанием гумуса и $\text{pH}_{\text{водн}}$. В почвах на звонцовых глинах существенные взаимосвязи были выявлены с фракцией физической глины (0,68) и мелкого песка (–0,67), а в почвах на ленточных глинах – с фракцией ила (0,68). В генеральной выборке (без разделения по типу почвообразующей породы) существенная взаимосвязь выявлена с содержанием всех рассматриваемых фракций гранулометрического состава, а также с $\text{pH}_{\text{водн}}$ (0,44). Взаимосвязь с содержанием гумуса не была найдена, что не соответствует литературным данным.

Отсутствие корреляции активности ^{226}Ra с содержанием гумуса в исследуемых почвах может быть связано, главным образом, не с его количеством, а с групповым составом. По данным Рачковой Н.Г. [19],

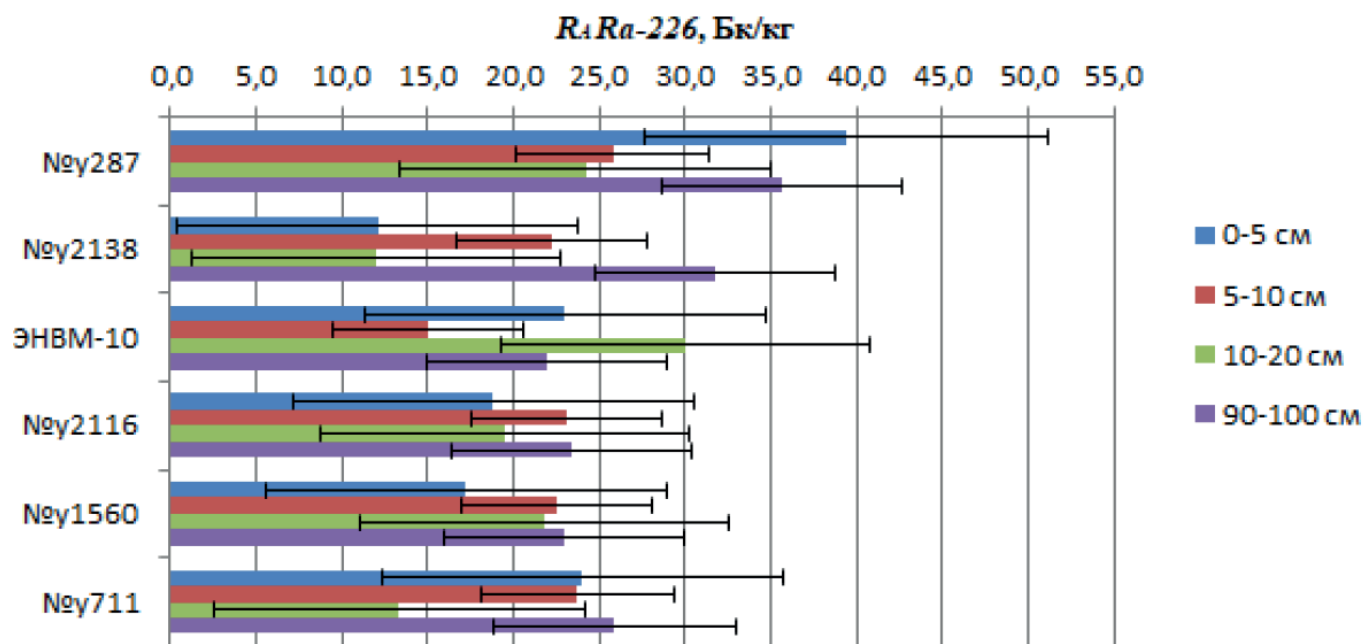


Рис. 2. Удельная радиоактивность ^{226}Ra (R_A , Бк/кг $^{-1}$) в почвах на глубинах 0–5, 5–10, 10–20 и 90–100 см «Усами» обозначены стандартные отклонения, рассчитанные по всем данным для конкретной глубины

органическое вещество почв действует двояко по отношению к радио-226. С одной стороны, радионуклид сорбируется органическим веществом, а с другой – образует подвижные формы. По данным, представленным Гагариной Э.И. [13] и в Путеводителе экскурсий II Съезда почвоведов России, почвы на звонцовых и ленточных глинах характеризуются гуматно-фульватным типом гумуса. Таким образом, можно предположить, что радионуклид одновременно удерживается в верхней части профиля гуминовыми кислотами и перемещается в профиле в форме фульватов радия.

Полученные данные свидетельствуют о том, что поглощение и удержание естественных радионуклидов в почвах связано в большей степени с содержанием физической глины и фракции ила, чем с рН и содержанием гумуса.

Торий-232 является родоначальником радиоактивного семейства [2]. Его среднее содержание в почвах СССР составляло 31,1 Бк/кг (0,24 до 400 Бк/кг). Источником загрязнения торием-232 сельскохозяйственных угодий являются фосфорные удобрения. До 10% всех соединений с ^{232}Th в почвах находится в водорастворимой, обменной и кислоторастворимой формах, тогда как количество прочносвязанных и связанных с полукоторными оксидами соединений достигает 80% [2].

Удельная активность тория-232 во всех проанализированных образцах варьирует в диапазоне 12,2–60,8 Бк/кг (рис. 3). Различия по критерию Манна-Уитни недостоверны, а средние значения R_A ^{232}Th в почвах

на звонцовых и ленточных глинах близки: $38,2 \pm 14,4$ и $34,5 \pm 12,4$ Бк/кг, соответственно.

Существенной разницы в содержании радионуклида в обеих почвообразующих породах (по критерию Манна-Уитни) не обнаружено, хотя в звонцовых глинах (90–100 см) диапазон шире ($37,0$ – $57,8$ Бк/кг, $M = 49,1 \pm 10,1$ Бк/кг), чем в ленточных глинах ($45,6$ – $60,8$ Бк/кг, $M = 54,3 \pm 8,2$ Бк/кг). По абсолютным значениям в образце звонцовых глин 1926 г. R_A тория-232 занимает промежуточное положение по сравнению с современными образцами, в отличие от образца ленточных глин 1934 г., где удельная активность самая высокая. Следует отметить, что R_A тория-232 образца 1926 г. близка к содержанию радионуклида в современном образце того же района. Коэффициент вариаций ($V\sigma$), рассчитанный для всех рассматриваемых выборок, не превысил 30%, что в целом свидетельствует об однородности исследуемых почвообразующих пород.

R_A ^{232}Th в верхней части профиля почв варьирует в диапазоне от 12,2 до 49,2 Бк/кг и определяется содержанием ^{232}Th в образцах почв на звонцовых глинах (рис. 3). При этом $M R_A$ тория-232 в образцах почв на звонцовых глинах ниже ($M = 26,0 \pm 13,9$ Бк/кг), чем в образцах почв на ленточных глинах ($M = 34,5 \pm 12,4$ Бк/кг). Наиболее широк диапазон содержания ^{232}Th в образцах почв на звонцовых глинах на глубине 5–10 см, а в ленточных глинах – на глубинах 0–5 и 10–20 см. Образцы 1926 г. отбора в верхней части профиля содержат ^{232}Th больше, чем образцы 1934 г. (на ленточных глинах). В верхней части профиля современной почвы на звонцовых гли-

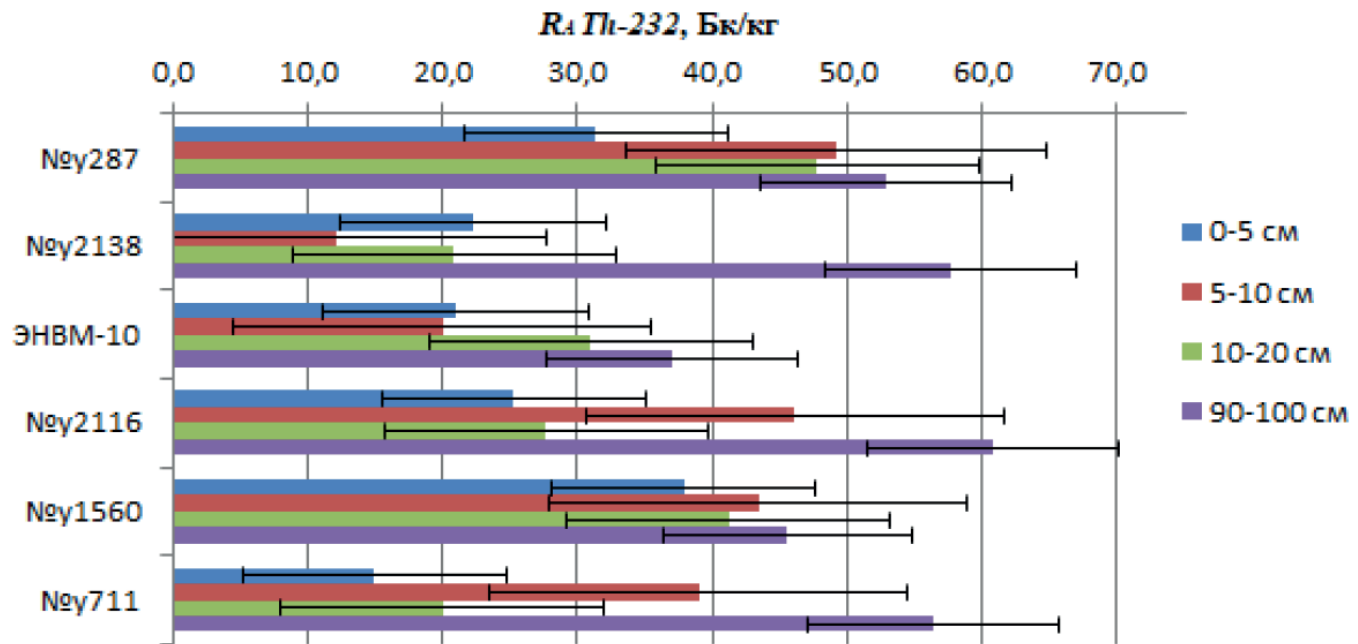


Рис. 3. Удельная активность ²³²Th в почвах на глубине 0–5, 5–10, 10–20 и 90–100 см. Обозначения см. рис. 2

нах (№ у2138) наблюдается самое низкое содержание ²³²Th по сравнению с другими исследуемыми почвами. Во всех исследуемых почвах обнаружена существенная разница в содержании ²³²Th на глубине 0–5 см и в почвообразующей породе. При этом наименьшие значения $R_A^{232}\text{Th}$ отмечены в слое 0–5 см. $V\sigma$, рассчитанный для глубин 0–5, 5–10 и 10–20 см, превысил 30%-й порог во всех случаях, за исключением образцов почв на ленточных глинах с глубины 5–10 см ($V\sigma = 11\%$). В отличие от почв на ленточных глинах, в почвах на звонцовых глинах на этой же глубине (5–10 см) наблюдается очень высокая неоднородность (68,9%).

Существенные корреляционные связи в почвах на звонцовых глинах были выявлены с содержанием фракций песка (–0,61), ила (0,75), физической глины (0,76) и $\text{pH}_{\text{водн}}$ (0,69). В почвах на ленточных глинах выявлены связи только с гранулометрическим составом (содержанием фракций крупного и среднего песка (–0,58), мелкого песка (–0,72) и ила (0,58)). Для общей выборки существенная взаимосвязь выявлена со всеми рассматриваемыми свойствами почв.

Калий-40 – один из основных (по активности) естественных радионуклидов в почвах и растениях. В почве удельная активность калия-40 может составлять 300–1000 Бк/кг. При распаде калий-40 превращается в стабильный ⁴⁰Са. Основными калийсодержащими минералами являются биотит, мусковит, ортоклаз и иллит [2, 22].

$R_A^{40}\text{K}$ в образцах варьирует в очень широком диапазоне – от 302 до 1043 Бк/кг (рис. 4). При этом диапа-

зоны содержания калия-40 в поддубицах и почвах на ленточных глинах в целом близки, а разница между ними по критерию Манна-Уитни недостоверна: 302–940 Бк/кг, $M = 606 \pm 274,4$ Бк/кг и 416–1043 Бк/кг, $M = 737,5 \pm 232,3$ Бк/кг, соответственно.

Удельная активность ⁴⁰К в ленточных глинах (90–100 см) в целом выше (785–1043 Бк/кг, $M = 933,6 \pm 180,0$ Бк/кг), чем в звонцовых (470–998 Бк/кг, $M = 802,7 \pm 275,3$ Бк/кг), хотя разница между значениями по критерию Манна-Уитни не существенная. Содержание ⁴⁰К в образцах почвообразующей породы 1926 и 1934 гг. сроков отбора практически самое высокое по сравнению с современными образцами. Коэффициент вариаций для всей совокупности данных и отдельно для ленточных глин составил 27,1 и 19,3%, соответственно, тогда как в звонцовых глинах $V\sigma = 34,3\%$.

$R_A^{40}\text{K}$ в верхней части профиля почв варьирует в диапазоне от 302 до 903 Бк/кг и, как и для других ЕРН, определяется диапазоном $R_A^{40}\text{K}$ в почвах на звонцовых глинах (рис. 4). Значение средней $R_A^{40}\text{K}$ в почвах на звонцовых глинах ниже ($M = 539,3 \pm 257,0$ Бк/кг), чем в почвах на ленточных глинах ($M = 733,8 \pm 205,5$ Бк/кг), но с учетом σ разница не существенная. Как и для ²³²Th, наиболее широкие диапазоны R_A калия-40 в образцах почв на звонцовых глинах приурочены к глубине 5–10 и 10–20 см, а в почвах на ленточных глинах – к 0–5 и 10–20 см. Аналогично ²²⁶Ra и ²³²Th, в образцах почвы 1926 г. (№ у287) R_A калия-40 выше не только по сравнению с почвой 1934 г. отбора (№ у2116), но и со всеми остальными почвами. Сов-

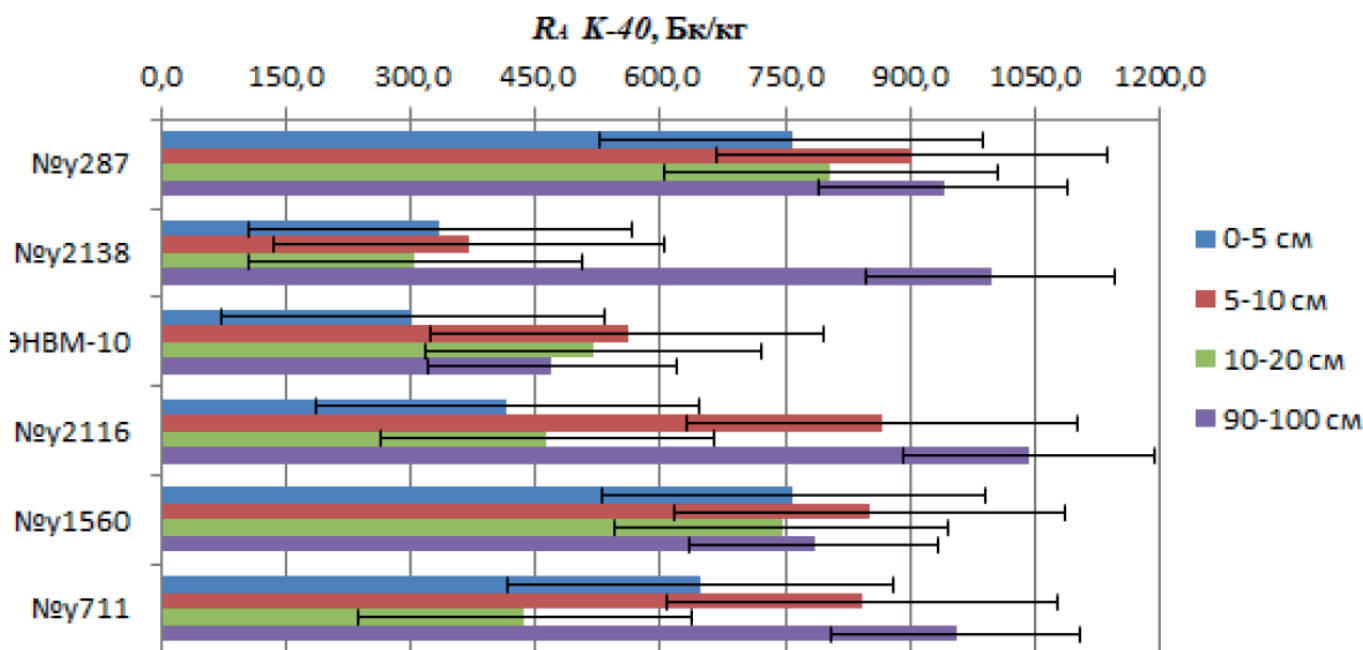


Рис. 4. Удельная активность ⁴⁰K в почвах на глубине 0–5, 5–10, 10–20 и 90–100 см. Обозначения см. в подписи к рис. 2

ременная почва на звонцовых глинах (№ у2138) имеет практически самое низкое содержание ⁴⁰K как по сравнению с другими почвами, сформированными на звонцовых глинах, так и по сравнению с почвами на ленточных глинах. Существенная разница в содержании ⁴⁰K на глубине 0–5 см и в почвообразующей породе обнаружена в трех почвах: современной почве на звонцовых глинах (№ у2138) и почвах 1934 г. (№ у2116) и 1996 г. (№ у711) на ленточных глинах. В этих почвах наиболее низкая R_A ⁴⁰K приурочена к слою 0–5 см. $V\sigma$, рассчитанный для глубин 0–5, 5–10 и 10–20 см, превысил 30%. Исключение составили образцы почв на ленточных глинах с глубины 5–10 см ($V\sigma = 15\%$). Такая тенденция ранее уже была отмечена для радия-226 и тория-232. В целом, коэффициент вариаций для почв на звонцовых глинах более высокий (42,4–53,0%), чем в почвах на ленточных глинах (15,3–32,7%).

Существенные корреляционные взаимосвязи удельной активности калия-40 в почвах на звонцовых глинах были выявлены с содержанием фракций песка (–0,62), ила (0,62) и физической глины (0,68). В почвах на ленточных глинах корреляционные связи не были выявлены. Для всей совокупности данных была выявлена связь с фракциями гранулометрического состава, а именно песка (–0,57), ила (0,39) и физической глины (0,43), а также для $pH_{водн}$ (0,42).

Расчет корреляционных взаимосвязей R_A ²²⁶Ra, ²³²Th и ⁴⁰K по всей совокупности данных выявил существенные корреляции содержания всех рассматриваемых

фракций гранулометрического состава и $pH_{водн}$. Взаимосвязь с содержанием гумуса была выявлена только для тория-232. В почвах на звонцовых глинах найдена корреляция с содержанием фракций гранулометрического состава для всех ЕРН, а с $pH_{водн}$ – только в случае с торием-232. В почвах на ленточных глинах для радия-226 корреляционная взаимосвязь отмечена только с содержанием фракции ила, для тория-226 – с фракцией ила и крупного и среднего песка, а для калия-40 существенные взаимосвязи не выявлены ни с одним из рассматриваемых свойств почв. Взаимосвязь содержания ЕРН с гранулометрическим составом может быть обусловлена их сорбцией высокодисперсными вторичными минералами (илистой фракцией). Это подтверждается данными двух почв (№ у2138 и № у711) с более высоким содержанием крупных фракций (1,00–0,25 и 0,25–0,05 мм) и более низкой удельной активностью ЕРН в верхней части профиля по сравнению как с образцами почвообразующей породы, так и в целом с другими почвами. Взаимосвязь содержания ЕРН с $pH_{водн}$ может быть обусловлена их более сильной сорбцией в нейтральной и слабощелочной среде по сравнению со слабокислой и кислой средами, а также со-осаждением с карбонатами кальция и гидратированными оксидами железа. Отсутствие взаимосвязи с содержанием гумуса в исследуемых почвах, скорее всего, обусловлено способностью гумусовых веществ одновременно сорбировать ЕРН и образовывать с ними подвижные соединения [19].

Цезий-137 является одним из основных долгоживущих техногенных радионуклидов (период полураспада = 30,17 лет), распространившихся на поверхности Земли в результате ядерных испытаний, развития ядерной энергетики, применения радиоактивных источников в промышленности, медицине и сельском хозяйстве [1, 2]. Цезий-137 является химическим аналогом биогенно важного элемента калия [2].

Техногенный ^{137}Cs обнаружен только в современных образцах почв (1996–2009 гг. – № у2138, ЭНВМ-10 и № у711) на глубинах 0–5 и 5–10 см. Его содержание варьирует в пределах 6,7–48,6 Бк/кг ($M = 17,5 \pm 17,0$ Бк/кг). R_A ^{137}Cs в почвах Псковской (2000 г.) и Новгородской (2009 г.) областей в слое 0–5 см в 6–7 раз ниже (6,7–7,5 Бк/кг), чем в образцах почвы Ленинградской области (1996 г.; 48,6 Бк/кг). Эта разница по R_A ^{137}Cs в почвах исследуемых регионов, вероятно, вызвана спецификой распространения радиоактивного следа после аварии на ЧАЭС. Ниже, на глубине 5–10 см, R_A ^{137}Cs в почвах уменьшается, и разница между образцами почв разных регионов становится практически не существенной.

Существенная разница между полученными данными об удельной активности ^{137}Cs в исследуемых почвах в сравнении с данными, приведенными в материалах Государственных докладов «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения»^{8, 9, 10}, выявлена только для почвы поддубицы Новгородской области (ЭНВМ-10). Это, возможно, обусловлено тем, что Валдайский район, в котором отбирались почвенные образцы, относится к районам с повышенным содержанием ^{137}Cs .

Заключение

Впервые определено содержание естественных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в почвах, сформированных на звонцовых и ленточных глинах до первых ядерных испытаний:

^{226}Ra : $26,6 \pm 9,2$ (18,8–39,0) Бк/кг;

^{232}Th : $42,6 \pm 13,1$ (25,3–60,8) Бк/кг;

^{40}K : $774,4 \pm 247,9$ (416–1043) Бк/кг.

Показано, что почва 1964 г. отбора существенно не отличается по R_A ЕРН от образцов почв, отобранных в

⁸ Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия в Ленинградской области в 2016 году». Управление Роспотребнадзора по Ленинградской области. СПб., 2017. С. 43.

⁹ Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия в Псковской области в 2016 году». Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Псков, 2017. 91 с.

¹⁰ Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия в Новгородской области в 2016 году». Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Великий Новгород, 2017. 364 с.

1926 и 1934 гг., и не содержит ^{137}Cs , а значит, не были подвержена техногенному загрязнению. Это позволяет рассматривать их в одном ряду с почвами ранних сроков отбора.

R_A ЕРН в почвах на звонцовых глинах, как в целом для всех образцов, так и для каждой глубины в отдельности, варьируют в более широком диапазоне, чем в почвах на ленточных глинах. При этом средняя R_A у ^{226}Ra выше в почвах на звонцовых глинах, а у ^{232}Th и ^{40}K – в почвах на ленточных глинах, но с учетом разброса эти различия недостоверны.

В показателях ЕРН в зависимости от исследованных глубин (0–5, 5–10, 10–20 и 90–100 см) в почвах на ленточных глинах были выявлены следующие закономерности: R_A всех ЕРН варьирует в наиболее широких диапазонах на глубинах 0–5 и 10–20 см, а в узких – на глубинах 5–10 и 90–100 см. Вероятно, это связано с условиями переувлажнения, в которых формируются почвы, развитием в них процессов оподзоливания (то есть выноса глинистых частиц и оксидов Fe и Al из верхних горизонтов почв в нижележащие), а также преобладанием в составе гумуса подвижных фульвокислот, образующих комплексные соединения с радионуклидами.

В почвах-поддубицах на звонцовых глинах наблюдается иная картина. R_A ^{226}Ra и ^{232}Th (и в меньшей степени ^{40}K) варьируют в узких диапазонах на глубине 90–100 см. В верхней части профиля R_A варьируют в более широких диапазонах, за исключением R_A ^{226}Ra на глубине 5–10 см и ^{232}Th на глубине 0–5 см. Скорее всего, особенности распределения радионуклидов в почвах-поддубицах обусловлены в большей степени их гранулометрическим составом, рН, а также качественным составом гумуса, где кроме фульвокислот появляются и гуминовые кислоты, которые, накапливаясь в верхних слоях почвы, удерживают ЕРН [2, 19].

Техногенный ^{137}Cs обнаружен только в современных образцах почв (сроки отбора 1996–2009 гг.). R_A у него варьирует в пределах 6,7–48,6 Бк/кг ($M = 17,5$ Бк/кг, $\sigma = 17,0$ Бк/кг). Наиболее высокая R_A цезия-137 отмечена в почве на ленточных глинах Ленинградской области. В образцах почв на звонцовых глинах Новгородской и Псковской областей его содержание низкое (<10,0 Бк/кг). Существенные различия по R_A ^{137}Cs в почвах исследуемых регионов, вероятно, вызваны особенностями распространения радиационного загрязнения после аварии на ЧАЭС.

Коллекцию почвенных монолитов Центрального музея почвоведения им. В.В. Докучаева и материалы исследования физико-химических свойств и удельной активности радионуклидов в почвах, отобранных в период с 1926 по 2009 г., можно рассматривать как основу для организации почвенно-экологического мониторинга в Северо-Западном регионе Европейской территории России.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Алексахин РМ, Санжарова НИ, Спиридонов СИ, Фесенко СВ. Чернобыль и окружающая среда. Радиационная биология. Радиоэкология. 2007;47(2):196-203.
2. Алексахин РМ, Васильев АВ, Дикарев ВГ, Егорова ВА, Жигарева ТЛ, Иванов ЮА, Козьмин ГВ, Кругликов БП, Круглов СВ, Моргунова ЕА, Пантелеев ЛИ, Поваляев АП, Попова ГИ, Расин ИМ, Ратников АН, Санжарова НИ, Сарапульцев ИА, Соколов ВА, Спиринов ЕВ, Фесенко СВ, Филипас АС, Хвостунов ИК, Шевченко АС, Шуховцев БИ. Сельскохозяйственная радиология. М.: Экология; 1992.
3. Апарин БФ, Бабилов БВ, Касаткина ГА, Сухачева ЕЮ. Лисинское лесничество как уникальный полигон почвенно-экологического мониторинга. Бюлл почв ин-та. 2016;(83):140-57.
4. Апарин БФ, Касаткина ГА, Матинян НН, Сухачева ЕЮ. Красная книга почв Ленинградской области. СПб.: Аэроплан; 2007.
5. Апарин БФ, Мингареева ЕВ, Санжарова НИ, Сухачева ЕЮ. Содержание радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs) в черноземах Волгоградской области разных сроков отбора образцов. Почвоведение. 2017;(12):1457-67.
6. Барсуков АО, Языкеев ДВ. Горизонтальная и вертикальная миграция ^{40}K , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{241}Am на обрабатываемых склоновых агроландшафтах Пензенской области различной степени крутизны. Изв ПГПУ им Белинского. 2012;(29):369-74.
7. Богатова МК, Щеглов АИ, Цветнова ОБ. Пространственная неоднородность радиоактивного загрязнения почв лесных фитоценозов Тульской области. Актуальные проблемы лесного комплекса. 2005;(10):78-81.
8. Булгаков АА, Коноплев АВ, Попов ВЕ, Бобовникова ЦИ, Сиверина АА, Шкуратова ИГ. Механизмы вертикальной миграции долгоживущих радионуклидов в почвах 30-километровой зоны ЧАЭС. Почвоведение. 1990;(10):14-9.
9. Бураева ЕА, Малышевский ВС, Вардуни ТВ, Шиманский ЕИ, Триболина АН, Гончаренко АА, Гончарова ЛЮ, Тоцкая ВС, Нефедов ВС. Содержание и распределение естественных радионуклидов в различных типах почв Ростовской области. Современные проблемы науки и образования. 2013;(4):1-9.
10. Воробьева ЛА. Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС; 2006.
11. Воскресенский ВС. Изучение содержания радионуклидов в почвах городских и природных территорий. Вест РУДН, Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2001(1):69-73.
12. Гагарина ЭИ, Абакумов ЕВ. Почвообразующие породы с элементами четвертичной геологии. СПб.: Изд-во СПбГУ; 2012.
13. Гагарина ЭИ, Матинян НН, Счастливая ЛС, Касаткина ГА. Почвы и почвенный покров Северо-Запада России. СПб.: Изд-во СПбГУ; 1995.
14. Дмитриев ЕА. Математическая статистика в почвоведении: учебник. М.: Изд-во МГУ; 1995.
15. Матинян НН, Дергачева МИ. Гумусовый профиль полугидроморфных почв на ленточных глинах. Вест ЛГУ. 1988;3(2):90-5.
16. Мингареева ЕВ. Изменение содержания радионуклидов (Ra-226 , Th-232 , K-40 , Cs-137) в почвах государственного природного заказника «Каменная степь» с 1929 по 2011 г. В кн.: Взгляд молодых ученых на современные проблемы развития радиобиологии, радиоэкологии и радиационных технологий. Обнинск; 2016. с. 177-82.
17. Переволоцкий АН, Переволоцкая ТВ. О содержании ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в лесных почвах республики Беларусь. Радиационная биология. Радиоэкология. 2014;54(2):193-200.
18. Попов АИ, Игамбердиев ВМ, Алексеев ЮВ. Статистическая обработка экспериментальных данных. СПб.: Изд-во СПбГУ; 2009.
19. Рачкова НГ, Шуктомова ИИ, Таскаев АИ. Состояние в почвах естественных радионуклидов урана, радия и тория (обзор). Почвоведение. 2010;(6):698-705.
20. Силантьев АН, Шкуратова ИГ, Бобовникова ЦИ. Вертикальная миграция в почвах радионуклидов, выпавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Атомная энергия. 1989;66(3):194-7.
21. Тюрин ИВ. Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании и плодородии. Учение о почвенном гумусе. М.-Л.: Сельхозгиз; 1937.
22. Фокин АД, Лурье АА, Торшин СП. Сельскохозяйственная радиология. СПб.: Лань; 2011.
23. Шишов ЛЛ, Тонконогов ВД, Лебедева ИИ, Герасимова МИ, Добровольский ГВ. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена; 2004.

Общий список литературы/Reference List

1. Aleksakhin RM, Sanzharova NI, Spiridonov SI, Fesenko SV. [Chernobyl and the environment]. Radiatsionnaya Biologiya Radioekologiya. 2007;47(2):196-203. (In Russ.)
2. Aleksakhin RM, Vasilyev AV, Dikarev VG, Yegorova VA, Zhigareva TL, Ivanov YuA, Koz'min GV, Kruglikov BP, Kruglov SV, Morgunova EA, Pantel'eyev LI, Povalyayev AP, Popova GI, Rasin IM, Ratnikov AN, Sanzharova NI, Sarapultsev IA,

- Sokolov VA, Spirin YeV, Fesenko SV, Filipas AS, Khvostunov IK, Shevchenko AS, Shukhovtsev BI. *Selskokhoziaystvennaya Radiologiya*. [Agricultural Radiology]. Moscow; *Ecologiya*; 1992. (In Russ.)
3. Aparin BF, Babikov BV, Kasatkina GA, Sukhacheva YeYu. [Lisinsky Forestry as a unique site for ecological soil monitoring]. *Biulleten Pochvennogo Instituta*. 2016;(83):140-57. (In Russ.)
 4. Aparin BF, Kasatkina GA, Matinyan NN, Sukhacheva YeYu. *Krasnaya Kniga Pochv Leningradskoy Oblasti*. [Red Book of Soils of Leningrad Region]. Saint Petersburg: Aeroplan; 2007. (In Russ.)
 5. Aparin BF, Mingareeva YeV, Sanzharova NI, Sukhacheva YeYu. [Concentrations of radionuclides (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , and ^{137}Cs) in chernozems of Volgograd Oblast sampled in Different Years]. *Pochvovedenie*. 2017;(12):1457-67. (In Russ.)
 6. Barsukov AO, Yazykeev DV. [Horizontal and vertical migration of ^{40}K , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{241}Am on processed sloped landscapes of various degree of steepness in Penza Region]. *Izvestiya Penzenskogo Gosudarstvennogo Pedagogicheskogo Universiteta Imeni Belinskogo*. 2012;(29):369-74. (In Russ.)
 7. Bogatova MK, Shcheglova AI, Tsvetnova OB. [Spatial heterogeneity of radioactive contamination of soils in the forest phytocenoses of Tula Region]. *Aktualnye Problem Lesnogo Kompleksa*. 2005;(10):78-81. (In Russ.)
 8. Bulgakov AA, Konoplyev AV, Popov VYe, Bobovnikova TsI, Siverina AA, Shkuratova IG. [Mechanisms of vertical migration of long-lived radionuclides in soils of the 30-kilometer zone of Chernobyl nuclear power plant]. *Pochvovedeniye*. 1990;(10):14-9. (In Russ.)
 9. Burayeva YeA, Malyshevskiy VS, Varduni TV, Shimanskiy YeI, Tribolina AN, Goncharenko AA, Goncharova LYu, Totskaya VS, Nefedov VS. [Distribution of natural radionuclides in soil of Rostov Region]. *Sovremennye Problem Nauki i Obrazovaniya*. 2013;(4):1-9. (In Russ.)
 10. Vorobyeva LA. *Teoriya i Praktika Khimicheskogo Analiza Pochv*. [Theory and Practice of Chemical Analysis of Soils]. Moscow: GEOS; 2006. (In Russ.)
 11. Voskresenskiy VS. [Study of radionuclides contents in soils of urban and natural areas]. *Vestnik RUDN, Seriya Ecologiya i Bezopasnost Zhiznedeyatelnosti*. 2001(1):69-73. (In Russ.)
 12. Gagarina EI, Abakumov YeV. *Pochvoobrazuyushchiye Porody s Elementami Chetvertichnoy Geologii*. [Soil-forming Rocks with Elements of Quaternary Geology]. Saint Petersburg: SPbGU; 2012. (In Russ.)
 13. Gagarina EI, Matinyan NN, Schastnaya LS, Kasatkina GA. *Pochvy i Pochvennyi Pokrov Severo-Zapada Rossii*. [Soils and Soil Cover of the North-West of Russia]. Saint Petersburg: SPbGU, 1995. (In Russ.)
 14. Dmitriyev EyA. *Matematicheskaya Statistika v Pochvovedenii: Uchebnik*. [Mathematical Statistics in Pedology: A Textbook]. Moscow: MGU; 1995. (In Russ.)
 15. Matinyan NN, Dergachyeva MI. [Humus profile of semihydromorphic soils on belt clays]. *Vestnik LGU*. 1988;3(2):90-5. (In Russ.)
 16. Mingareeva YeV. [Changes in the content of radionuclides (Ra-226, Th-232, K-40, Cs-137) in soils of the State Nature Reserve "Kamennaya Step" in 1929-2011]. In: *Vzgliad Molodykh Uchenykh na Sovremennye Problemy Razvitiya Radiobiologii, Radioekologii i Radiatsyonnykh Tekhnologiy*. Obninsk; 2016. p. 177-82. (In Russ.)
 17. Perevolotskiy AN, Perevolotskaya TV. [The content of ^{40}K , ^{226}Ra and ^{232}Th in forest soils of the Republic of Belarus]. *Radiatsionnaya Biologiya Radioekologiya*. 2014;54(2):193-200. (In Russ.)
 18. Popov AI, Igamberdiyev VM, Alekseyev YuV. *Statisticheskaya Obrabotka Eksperimentalnykh Dannykh*. Saint Petersburg: SPbGU; 2009. (In Russ.)
 19. Rachkova NG, Shuktomovs II, Taskaev AI. [The state of natural radionuclides of uranium, radium, and thorium in soils]. *Pochvovedeniye*. 2010;(6):698-705. (In Russ.)
 20. Silantsev AN, Shkuratova IG, Bobovnikova TsI. [Vertical migration of radionuclides in soils that precipitated because the Chernobyl nuclear power plant accident]. *Atomnaya Energiya*. 1989;66(3):194-7. (In Russ.)
 21. Tyurin IV. *Organicheskoye Veschestvo Pochv i Yego Rol' v Pochvoobrazovanii i Plodorodii*. *Ucheniye o Pochvennom Gumuse*. [Organic Matter of Soils and its Role in Soil Formation and Fertility. The Doctrine of Soil Humus]. Moscow-Leningrad: Selkhozgiz; 1937. (In Russ.)
 22. Fokin AD, Lurye AA, Torshin SP. *Selskokhoziaystvennaya Radiologiya*. [Agricultural radiology]. Saint Petersburg: Lan'; 2011. (In Russ.)
 23. Shishov LL, Tonkonogov VD, Lebedeva II, Gerasimova MI, Dobrovolskiy GV. *Klassifikatsiya i Diagnostika Pochv v Rossii*. [Classification and diagnostics of soils in Russia]. Smolensk: Oykumena; 2004. (In Russ.)
 24. Forsberg S, Rosen A, Fernandez V, Juhan H. Migration of ^{137}Cs and ^{90}Sr in undisturbed soil profiles under controlled and close-to-real conditions. *J Environ Radioact*. 2000;50:235-52.
 25. Gomes MEP, Martins LMO, Neves LJPF, Pereira AJCS. Natural radiation and geochemical data for rocks and soils, in the North International Duoro Cliffs (NE Portugal). *J Geochem Explor*. 2013;130:60-4.
 26. Mingareeva Ye, Lasareva M. Using a collection of soil monoliths for the study of natural radiation of soils in Russia. *Proc. 20th World Congr Soil Sci*. Jeju (Korea); 2014. p. 1-12.