

УДК 539.163:631.4

ЕСТЕСТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) В ПОЧВООБРАЗУЮЩИХ ПОРОДАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

© 2022 г. Е. В. Мингареева^{1,2,*}, Б. Ф. Апарин¹, С. В. Корвин²,
Н. И. Санжарова², Е. Ю. Сухачева¹

¹Центральный Музей почвоведения им. В.В. Докучаева – филиал Федерального исследовательского центра
Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Санкт-Петербург, Россия

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

*E-mail: elena.mingareeva@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.07.2020 г.

После доработки 25.10.2021 г.

Принята к публикации 09.11.2021 г.

Установлены диапазоны и средние значения удельной активности естественных радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K) в основных литологических типах почвообразующих пород (красно-бурые глины, лессовидные, покровные, моренные, озерно-ледниковые, водно-ледниковые, аллювиальные отложения и элюво-делювий коренных карбонатных отложений). Наиболее низкое содержание радионуклидов характерно для аллювиальных и водно-ледниковых отложений, а наиболее высокое – в озерно-ледниковых, элюво-делювии коренных карбонатных отложений и моренах. Выявлено на следование естественных радионуклидов почвообразующими породами от кор выветривания, наиболее явно проявляющееся для пород ледникового генезиса и элюво-делювия карбонатных отложений. Установлена взаимосвязь содержания радионуклидов с фракциями гранулометрического состава.

Ключевые слова: естественные радионуклиды, почвообразующие породы, коры выветривания

DOI: 10.31857/S086980312201009X

В почвах всегда содержатся естественные радионуклиды (ЕРН), основным источником которых являются почвообразующие породы (ПП). ПП можно рассматривать как начальное состояние почвенной системы – почва в нулевой момент времени [1]. Сравнение данных по удельной активности ЕРН в генетических горизонтах почв и ПП дает возможность решать ряд важных задач: оценить роль почвообразующих процессов в распределении ЕРН в профиле разных типов почв; выявить связь содержания радионуклидов (РН) в почвах и ПП; провести типизацию, а также районирование ПП по содержанию ЕРН. Такие исследования приобретают все большую актуальность в связи с прогрессирующим загрязнением почв техногенными РН в результате развития ядерной энергетики, применения радиоактивных источников в промышленности, медицине и наложением их на содержание ЕРН в почвах.

В настоящее время накоплен значительный фактический материал по содержанию РН в почвах России и мира [2–8]. Однако эти данные чаще всего усреднены и не учитывают литологический тип ПП – носителя ЕРН. Разнообразие типов ПП

Европейской территории России (ЕТР) является одним из основных факторов почвообразования, от которого зависят минералогический, химический и гранулометрический составы почв, степень дренированности, наличие геохимических барьеров, а также это фактор, определяющий концентрацию U и Th и их дочерних РН [2, 9, 10].

Целенаправленных исследований содержания ЕРН в разных типах ПП мало. Они касаются либо почв в отдельных регионах, либо геохимии ЕРН в почвах [4, 11–21].

Целью настоящей работы является изучение содержания естественных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в основных литологических типах почвообразующих пород Европейской территории России.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В качестве объектов исследования были отобраны 89 образцов основных типов ПП на территории Волгоградской, Ростовской, Оренбургской, Воронежской, Белгородской, Курской, Тульской, Новгородской, Псковской, Ленинградской

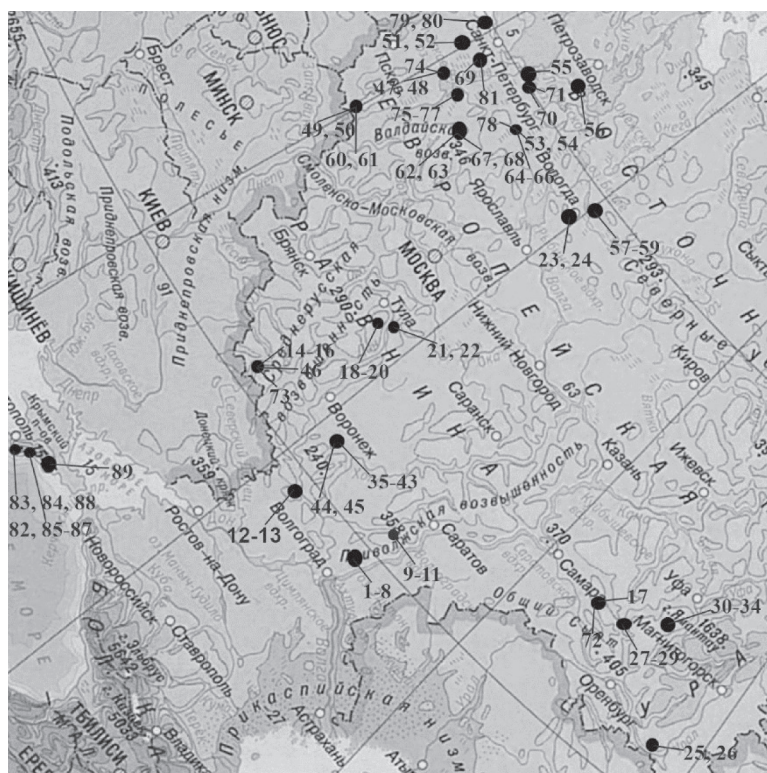


Рис. 1. Карта-схема расположения точек отбора образцов исследуемых почвообразующих пород. Генетические типы ПП: 1–16 – лессы и лессовидные отложения; 17–24 – покровные отложения; 25–46 – красно-бурые глины; 47–59 – моренные отложения; 60–66 – озерно-ледниковые отложения; 67–71 – водно-ледниковые отложения; 72–78 – аллювиальные отложения; 79–87 – элюво-делювий карбонатных отложений; 88, 89 – глинистые сланцы. Географическое расположение мест отбора образцов: 1–11 – Волгоградская обл.; 12–13 – Ростовская обл.; 14–16, 46, 73 – Белгородская обл.; 17, 25–29, 72 – Оренбургская обл.; 18–22 – Тульская обл.; 23, 24, 57–59 – Вологодская обл.; 30–34 – Республика Башкортостан; 35–45 – Воронежская обл.; 47, 48, 62, 63, 67, 68, 74–77 – Новгородская обл.; 49, 50, 60, 61 – Псковская обл.; 51–56, 64–66, 69–71, 78–81 – Ленинградская обл.; 82–89 – Республика Крым.

Fig. 1. Schematic map of the location of sampling points of the studied soil-forming rocks. Genetic types of Sfr: 1–16 – loess and loessial sediments; 17–24 – mantle rocks; 25–46 – red-brown clays; 47–59 – morainic sediments; 60–66 – lake-glacial sediments; 67–71 – fluvioglacial sediments; 72–78 – alluvial sediments; 79–87 – eluvo-diluvium of carbonate sediments; 88, 89 – argillaceous shale. Geographic location of sampling sites: 1–11 – Volgograd region (reg.); 12–13 – Rostov reg.; 14–16, 46, 73 – Belgorod reg.; 17, 25–29, 72 – Orenburg reg.; 18–22 – Tula reg.; 23, 24, 57–59 – Vologda reg.; 30–34 – Republic of Bashkortostan; 35–45 – Voronezh reg.; 47, 48, 62, 63, 67, 68, 74–77 – Novgorod reg.; 49, 50, 60, 61 – Pskov reg.; 51–56, 64–66, 69–71, 78–81 – Leningrad reg.; 82–89 – Republic of Crimea.

и Вологодской областей (обл.), а также республик (респ.) Башкортостан и Крым (рис. 1) [1, 22–24].

Исследуемые ПП представлены восемью литологическими типами, которые для удобства описания и обработки данных были объединены в зависимости от генезиса в четыре группы.

В первую группу вошли породы так называемого “проблематичного генезиса”, механизм формирования которых до конца не ясен. В ней выделены две подгруппы. Первая подгруппа – лессы, лессовидные (далее – лессовидные или лессовые) и покровные отложения (номер 1–24 на рис. 1). Вторая подгруппа – это желто- и красно-бурые глины (25–46) (далее – красно-бурые глины), образовавшиеся в процессе морского или континентального осадконакопления [1, 22, 23, 25].

Общепринятой теории формирования ПП первой подгруппы нет. Для лессовых отложений в основном выделяются две концепции: седиментационная (эоловый перенос и отложение мелкозема, главным образом, криоэлювиального происхождения) и гипергенная (облессовывание мелкозема) [1, 23, 24]. Механизм гипергенного облессовывания связывают либо с педогенезом, либо с физико-химическими и физическими (непочвенными) процессами, в том числе криогенными. К покровным относятся отложения, залегающие на поверхности морен (иногда флювиогляциальных и древнеаллювиальных наносах).

Типичной фракцией гранулометрического состава первой подгруппы является крупная пыль (частицы 0.01–0.05 мм) в количестве 30–55% для лессовых и до 35% – для покровных отложений.

Причем в покровных отложениях появляются песчаные фракции (более 0.25 мм) в количестве до 20%. Суммарное количество пылеватых и глинистых фракций в покровных отложениях составляет не менее 75–77%, а ила – от 10 до 35% [1, 23, 24].

В пылеватых фракциях лессовидных отложений содержатся кварц, калиевые полевые шпаты, карбонаты кальция и магния, а в илистой – гидрослюда, смешанослойные слюда-сметкитовые образования и хлориты. Содержание тяжелых минералов достигает 10% (циркон, ильменит, гранат и др.). Покровные отложения близки по составу к лессовым, но в отличие от них практически не содержат карбонатов и легкорастворимых солей, а тяжелых минералов, представленных гидроксидами железа, всего 1–2% [1].

В подгруппу красно-бурых глин вошли отложения различного генезиса – от переотложенного глинистого материала, образующегося при разрушении различных осадочных пород, делювиальных и остаточных глин, до сыртовых и каолиновых глин [1, 23, 24].

Вторая группа ПП представлена породами ледникового генезиса: морены (собственно ледниковые), озерно-ледниковые (звонцовые и ленточные глины) и водно-ледниковые отложения (47–71). Формирование этих ПП связано с Валдайским оледенением [1, 23, 24]. Морены залегают на коренных породах или более древних отложениях и представляют собой несортированные разнозернистые скопления обломочного материала горных пород, перенесенного ледниками часто на значительные расстояния от места формирования, и оставленные на месте таяния.

Моренам свойственно непостоянство минерало-петрографического и гранулометрического составов. Морены Валдайского возраста всегда опесчанены, со значительным количеством частиц почвенного скелета (более 1 мм) и невысоким содержанием фракции крупной пыли (0.05–0.01 мм). В пределах Северо-Западного федерального округа России они характеризуются преимущественно гидрослюдисто-каолиновым составом глинистого материала. Широко распространена карбонатная морена, связанная с выходом известняков Ордовика и Девона. Минеральный состав валунов, гальки и гравия представлен обломками пород; песчано-алевролитовая фракция состоит в основном из кварца, полевого шпата и слюды. Среди минералов тяжелой фракции (до 10%) преобладают рудные (40% от веса фракции) с примесью амфибол (роговая обманка), эпидота, граната и циркона [1, 24].

Озерно-ледниковые отложения, обычно залегающие на морене, образуются внутри ледника (во внутрiledниковых озерах с ледяными берегами) и внеледниковой области (возникают, когда сток талых вод затруднен) [1, 24]. Они имеют бо-

лее однородный тяжелый гранулометрический состав. Глинистые минералы представлены в основном гидрослюдами с примесью каолинита и монтмориллонита [1, 23].

Водно-ледниковые отложения формируются в результате деятельности ледниковых вод и откладываются во всех зонах ледника [1, 24]. Их гранулометрический состав варьирует от песчано-гравийного до суглинистого. В минеральном составе, как правило, преобладают обломки Балтийского кристаллического щита с большей или меньшей примесью местных пород, захваченных ледником [1].

Третья группа представлена породами водного (аллювиального) генезиса, формирующимися текучими водами (реки и ручьи) – древние и современные аллювиальные отложения (72–78). Материал этот хорошо перебит, окатан, сортирован и имеет слоистое сложение [1, 23, 24]. Гранулометрический состав может быть как валунными и галечниковыми, так и глинистыми. Для древнеаллювиальных отложений характерно наличие грубого материала, приуроченного к районам древних прирусловых валов, и тонкого песка с прослойками суглинка на равнинных и пониженных участках пойм. Минеральный состав аллювия зависит от состава пород, давших ему начало, условий их разрушения и переноса, но, главным образом, это кварц с примесью полевых шпатов, глауконита, слюды, хлорита, кальцита, магнетита и др. [1].

Четвертая группа – элюво-делювий коренных карбонатных отложений и глинистых сланцев [26]. Группа представлена образцами из двух регионов России. В Ленинградской обл. отбирались элюво-делювий ордовикских известняков (Ломоносовский и Гатчинский р-ны) и слоистый известковый ключевой туф (Ломоносовский р-н) (79–81). На территории Крыма (Южный берег) в его горной части – это элюво-делювий средне- и верхнеюрских известняков (82–87) и глинистые сланцы (88, 89) [25, 27].

Эта группа пород отличается от ранее рассмотренных ПП не только своим происхождением, но и повышенным содержанием карбонатов в минеральном составе. Элюво-делювий – продукт выветривания геологических отложений, формирующихся либо на месте их первоначального образования (элювий), либо перенесенный тальми водами с верхних частей склона (делювий). Главный компонент известняков – кальцит (CaCO_3) с примесью доломита, оксидов кремния, сульфидов и гидроксидов железа, тяжелых металлов, песчаного и глинистого материалов. Известковые туфы, встречающиеся на небольших площадях, формируются из углекислых вод минеральных источников. Глинистые сланцы образуются в результате преобразования под давлением глин различных групп: гидрослюда с примесью кварца, полевого шпата и слюды, а также местами с серицитом и хлоритом [1].

Образцы ПП отбирались из горизонтов “С” (ПП) из почвенных монолитов, входящих в состав Биоресурсной коллекции почвенных монолитов и образцов Центрального музея почвоведения им. В.В. Докучаева. Пробоподготовку и последующий анализ образцов проводили однотипно и по общепринятым методикам, описанным в руководстве “Теория и практика химического анализа почв” под редакцией Л.А. Воробьевой [28].

В образцах анализировали гранулометрический состав и рН водной суспензии, позволяющие определить литологический тип ПП. В образцах элюво-делювия карбонатных отложений гранулометрический состав определялся в мелкозем (менее 1 мм).

Удельную активность (R_A , Бк/кг) ЕРН (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) определяли в воздушно-сухой навеске ПП методом гамма-спектрометрии во Всероссийском научно-исследовательском институте радиологии и агроэкологии. Измерения проводили на спектрометре ГАММА-1П на два измерительных тракта с полупроводниковыми детекторами из особо чистого германия производства фирмы EG&G ORTEC (США) [37].

Для статистического анализа полученных данных были рассчитаны: среднее арифметическое (M), стандартное отклонение (σ), коэффициент вариаций ($V\sigma$) и коэффициент корреляции Пирсона (r) [30, 31]. Исследуемые выборки удовлетворяли нормальному распределению, рассчитанному с помощью критерия Шапиро–Уилка. Корреляционные взаимосвязи считались существенными (уровень значимости $\alpha = 0.05$) для выборки в: 89 образцов (генеральная совокупность данных) при $r \geq 0.21$ (коэффициент Стьюдента фактический, $t_\gamma = 2.00$); 46 образцов (первая группа ПП) – $r \geq 0.29$ (коэффициент Стьюдента фактический, $t_\gamma = 2.02$); 23 образца (вторая группа ПП) – $r \geq 0.40$ (коэффициент Стьюдента фактический, $t_\gamma = 2.07$) [30, 31]. $V\sigma$ рассчитывался по следующим выборкам: а) группа в целом; б) каждый тип ПП в группе в отдельности; в) по значениям рН ($\text{pH} \leq 6.9$; $7.0\text{--}8.1$ и ≥ 8.2); г) по содержанию физической глины ($\leq 60\%$ и $> 61\%$, т.е. отдельно для образцов суглинистого и глинистого гранулометрического состава). На основании литературных данных и статистической обработки полученного материала $V\sigma$, превышающий 30%, был принят как показатель высокой неоднородности R_A ЕРН [30, 32].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Содержание ЕРН в породах “проблематичного генезиса” (первая группа ПП)

Исследуемые образцы пород характеризуются тяжелым гранулометрическим составом с высоким содержанием фракций 0.05–0.01 и 0.005–

0.001 мм и низким песка (табл. 1). Содержание фракции ила варьирует от 17 до 55%. Образцы характеризуются широким диапазоном рН (от кислого – 4.5 до щелочного – 9.3), обусловленным содержанием карбонатов и легкорастворимых солей.

R_A ^{226}Ra во всех образцах ПП первой группы находится в диапазоне 7.5–51.7 Бк/кг ($M = 21.5$ Бк/кг, $\sigma = 9.0$ Бк/кг) (табл. 1). По абсолютным значениям наиболее высокая R_A ^{226}Ra отмечается в образцах Тульской обл. (красно-бурые глины), а наиболее низкая – Оренбургской и Воронежской областей и Республики Башкортостан (R_A менее 11.1 Бк/кг). R_A ^{232}Th во всех образцах варьирует от 24.3 до 63.9 Бк/кг ($M = 38.8 \pm 9.7$ Бк/кг) и диапазон определяется его содержанием в красно-бурых глинах. Разница между лессовидными и покровными отложениями (их минимальными и максимальными значениями) всего 0.3 Бк/кг. Наибольшие значения R_A ^{232}Th отмечаются в образцах Республики Башкортостан, а наименьшие – в Воронежской обл. Содержание ^{40}K варьирует в широком диапазоне 275–780 Бк/кг ($M = 526 \pm 128$ Бк/кг) и практически, как и в случае с ^{232}Th , определяется содержанием радионуклида в красно-бурых глинах. Наиболее высокая R_A ^{40}K отмечается в образцах из Республики Башкортостан, Воронежской обл., а наиболее низкая – Оренбургской и Воронежской областей.

Наиболее широкие диапазоны R_A по всем ЕРН, но при этом с наименьшими средними значениями, отмечаются в красно-бурых глинах. Исключением являются покровные отложения, диапазон ^{226}Ra в которых шире, чем в красно-бурых глинах. Значения средней R_A всех ЕРН в группе возрастает в последовательности: красно-бурые глины – лессовидные отложения – покровные отложения.

Расчет $V\sigma$ выявил наибольшую пространственную неоднородность в образцах красно-бурых глин (по ^{226}Ra и ^{232}Th), а наименьшую – в лессовидных отложениях. $V\sigma$ по ^{40}K не превысил 30%-ного порога. Расчет $V\sigma$ по группам рН (реакция среды кислая, нейтральная или щелочная) показал, что неоднородность значений активности ^{232}Th и ^{40}K возрастает с уменьшением кислотности почв, а у ^{226}Ra – наименьший разброс значений приходится на нейтральную реакцию среды. В выборке по содержанию физической глины неоднородность отмечается только для ^{226}Ra .

Содержание ЕРН в породах ледникового генезиса (вторая группа ПП)

Преобладающими фракциями в образцах морен и водно-ледниковых отложений являются мелкий песок (0.25–0.05 мм) и крупная пыль (0.05–0.01 мм), а в озерно-ледниковых отложениях

Таблица 1. Результаты статистической обработки данных удельной активности ЕРН, рН и фракций гранулометрического состава в группах ПП
Table 1. Results of statistical processing of the data on the specific activity of NRR, pH and particle size distribution fractions in the soil-forming rocks (SFR) groups

Литологические типы ПП	Радионуклид	Число образцов (n)	Среднее значение (M) и стандартное отклонение (σ)	Диапазон удельной активности (R _A)	Коэффициент вариаций (Vσ)	Диапазон значений рН водн.	Диапазон содержания фракций	
							<0.001 мм	<0.01 мм
			Бк/кг	%		%		
Лессовидные отложения	²²⁶ Ra	16	21.8 ± 6.2	14.5–30.7	28.5	5.7–8.8	20–42	49–88
	²³² Th		38.7 ± 7.1	29.7–49.9	18.3			
	⁴⁰ K		575 ± 131	416–780	22.8			
Покровные отложения	²²⁶ Ra	8	27.9 ± 13.1	15.0–51.7	46.8	4.5–8.0	26–39	48–77
	²³² Th		41.2 ± 7.3	30.0–50.2	17.7			
	⁴⁰ K		576 ± 86	431–656	14.9			
Красно-бурые глины	²²⁶ Ra	22	19.0 ± 7.9	7.5–34.4	41.5	5.3–9.3	17–55	46–90
	²³² Th		37.9 ± 11.9	25.5–63.9	31.4			
	⁴⁰ K		472 ± 118	275–740	25.1			
Моренные отложения	²²⁶ Ra	13	21.5 ± 7.7	13.4–36.0	35.7	5.5–8.3	7–34	27.5–73
	²³² Th		33.7 ± 9.4	18.9–49.0	27.8			
	⁴⁰ K		711 ± 148	417–890	20.8			
Озерно-ледниковые отложения	²²⁶ Ra	7	30.2 ± 10.7	22.0–50.0	35.3	5.1–7.9	16–57	61–94
	²³² Th		51.2 ± 8.8	37.0–60.8	17.1			
	⁴⁰ K		857 ± 219	470–1043	25.5			
Водно-ледниковые отложения	²²⁶ Ra	5	13.1 ± 6.7	5.1–22.4	51.6	5.3–6.6	1–15	6.5–24
	²³² Th		21.8 ± 12.9	11.3–41.0	59.1			
	⁴⁰ K		507 ± 152	384–770	30.1			
Аллювиальные отложения	²²⁶ Ra	7	14.5 ± 8.8	4.3–26.9	61.0	4.8–7.8	1–6	3.5–20
	²³² Th		16.7 ± 8.1	4.9–31.6	48.3			
	⁴⁰ K		400 ± 162	88.1–570	40.4			
Элюво-делювий Орловских известняков и ключевой туф	²²⁶ Ra	3	52.5 ± 43.2	14.0–91.0	82.3	6.2–7.5	8–21	24–43
	²³² Th		30.4 ± 16.3	20.0–40.8	53.6			
	⁴⁰ K		649 ± 379	320–978	58.4			
Элюво-делювий Верхнеюрских известняков и глинистые сланцы	²²⁶ Ra	8	27.4 ± 7.8	13.2–35.0	28.4	5.1–8.1	6–33	29–70
	²³² Th		46.3 ± 10.2	24.7–56.9	22.1			
	⁴⁰ K		651 ± 279	27.0–964	42.9			

ях, представленных ленточными и звонцовыми глинами, — мелкая пыль и ил (табл. 1). Содержание фракции ила изменяется в широком диапазоне от 1 до 57%. Реакция среды варьирует от кислой (4.9) до щелочной (8.3). Наиболее высокие значения рН отмечены в моренах и звонцовых глинах.

Диапазон R_A ^{226}Ra в образцах этой группы составляет 5.1–50.0 Бк/кг ($M = 22.3 \pm 10.2$ Бк/кг) (табл. 1). Максимальное содержание ^{226}Ra отмечается в озерно-ледниковых ПП Новгородской обл., а минимальное — в водно-ледниковых ПП Ленинградской обл. (R_A менее 7.0 Бк/кг). Содержание ^{232}Th варьирует в широком диапазоне: от 11.6 до 60.8 Бк/кг ($M = 36.3 \pm 14.4$ Бк/кг). Наиболее высокая R_A ^{232}Th отмечается в озерно-ледниковых отложениях Псковской и Ленинградской областей, а наиболее низкая — в водно-ледниковых отложениях Новгородской и Ленинградской областей (R_A менее 13.5 Бк/кг). R_A ^{40}K варьирует в пределах 384–1043 Бк/кг ($M = 711 \pm 208$ Бк/кг). Наиболее высокая и низкая удельная активность ^{40}K отмечается в тех же регионах, что и для ^{232}Th .

Наиболее высоким средним значением R_A исследуемых ЕРН и наиболее широким диапазоном характеризуются озерно-ледниковые отложения. Возрастание средней R_A и увеличение диапазона происходит в порядке: водно-ледниковые отложения — морены — озерно-ледниковые отложения. Исключением является диапазон содержания ^{232}Th , где озерно-ледниковые отложения имеют наиболее узкий разброс данных, а морены и водно-ледниковые отложения наоборот — более широкие.

Озерно-ледниковые отложения, в целом, выделяются в данной группе как по своим физико-химическим характеристикам, так и значениям R_A ЕРН.

Наибольшая пространственная неоднородность отмечается в водно-ледниковых отложениях (за исключением ^{40}K) (табл. 1). Для морен и озерно-ледниковых отложений неоднородность в содержании ЕРН отмечена только для ^{226}Ra , а для ^{232}Th и ^{40}K $V\sigma \leq 30\%$. Для образцов с кислой и нейтральной реакцией среды ($\text{pH}_{\text{водн.}} < 6.9$) неоднородность отмечена для ^{226}Ra и ^{232}Th , а щелочной ($\text{pH}_{\text{водн.}} > 7.0$) — только для ^{226}Ra . Особенности гранулометрического состава повлияли на разброс значений R_A ЕРН. В песчаных, супесчаных и суглинистых образцах неоднородность проявилась для ^{226}Ra и ^{232}Th , тогда как для образцов с содержанием физической глины больше 61% неоднородность в R_A ЕРН не выявлена.

Содержание ЕРН в породах аллювиального генезиса (третья группа ПП)

Исследуемые образцы характеризуются легким гранулометрическим составом (от песков до

легких суглинков). Разрезы, из которых они отбирались, были заложены вблизи поймы рек на повышенном элементе рельефа. Количество частиц более 0.01 мм достигает 93% (табл. 1). Содержание фракции ила во всех образцах не превышает 6%. Реакция среды варьирует от кислой до слабощелочной.

Диапазон содержания ^{226}Ra в аллювиальных отложениях варьирует от 4.3 до 26.9 Бк/кг ($M = 14.5 \pm 8.8$ Бк/кг) (табл. 1). Наиболее высокие значения R_A ^{226}Ra отмечены только в двух образцах Новгородской обл. (26.8 и 26.9 Бк/кг), тогда как в остальных образцах активность меньше 14 Бк/кг. Содержание ^{232}Th изменяется в диапазоне 4.9–31.6 Бк/кг ($M = 16.7 \pm 8.1$ Бк/кг). Максимальная активность радионуклида отмечается в Новгородской обл., а минимальная — в Белгородской. R_A ^{40}K варьирует от 88 до 570 Бк/кг ($M = 400 \pm 162$ Бк/кг). Высокие значения R_A (>350 Бк/кг) отмечаются в образцах всех регионов, кроме Белгородской обл. (88.1 Бк/кг).

Аллювиальные отложения, в отличие от других исследуемых типов ПП, характеризуются наиболее низкими средними значениями и узкими диапазонами R_A ЕРН, а также, в целом, самыми низкими минимальными значениями содержания ^{226}Ra (4.3 Бк/кг), ^{232}Th (4.9 Бк/кг) и ^{40}K (88 Бк/кг), отмеченными в древнеаллювиальных отложениях Белгородской обл. (73: заповедник “Белогорье” участок “Лес на Ворскле”, р. Ворскла).

Расчет коэффициента вариаций по всем рассматриваемым выборкам выявил (очень) высокую неоднородность содержания ЕРН (табл. 1). Скорее всего, это связано с минералогическим составом пород водосборной территории. Исключение отмечено только для R_A ^{40}K в образцах с нейтральной реакцией среды. Из-за малого количества образцов (семь единиц) аллювиальных отложений говорить о значимости данных статистической обработки нецелесообразно.

Содержание ЕРН в элюво-делювии коренных карбонатных отложений (четвертая группа ПП)

Гранулометрический состав мелкозема (частицы менее 1 мм) этого типа ПП представлен суглинками и глинами. Реакция среды в образцах нейтральная и щелочная.

R_A ^{226}Ra во всех образцах элюво-делювия карбонатных отложений варьирует в наиболее широком диапазоне по сравнению со всеми исследуемыми группами ПП: 13.2–91 Бк/кг ($M = 32.4 \pm 21.8$ Бк/кг) и определяется диапазоном образцов из Ленинградской обл. (табл. 1). R_A ^{232}Th изменяется в пределах от 20 до 56.9 Бк/кг ($M = 43.1 \pm 13.1$ Бк/кг), с наименьшим значением в образцах элюво-делювия известняка Ленинградской обл. и

наибольшим — Крыма. Активность ^{40}K варьирует в наиболее широком диапазоне (27–978 Бк/кг, $M = 650 \pm 294$ Бк/кг) по сравнению со всеми исследуемыми группами ПП и, в целом, определяется содержанием радионуклида в образцах Крыма (27–964 Бк/кг).

ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование связи R_A ЕРН с различными литологическими типами ПП является многофакторной задачей вследствие сложной геологической истории преобразования горных пород на территории России — носителей ЕРН.

ЕРН относятся к элементам первичного происхождения, существующим на Земле с момента ее возникновения [10, 34, 35]. Удельная активность земной коры связана с наличием в ней таких радионуклидов, как ^{40}K (6.62×10^5 Бк/т), ^{232}Th (4.9×10^4 Бк/т) и ^{238}U (3.35×10^4 Бк/т) [36]. Наибольшее содержание U, Th и K характерно для магматических изверженных пород и уменьшается в последовательности: кислые — средние — основные — ультраосновные. Так, коренные кристаллические породы (граниты) характеризуются наиболее высокой активностью ЕРН. По данным [11], их среднее содержание составляет: ^{40}K — 1000 Бк/кг; ^{238}U — 60 Бк/кг; ^{232}Th — 80 Бк/кг. В исследованиях S. Pavlidou и др. [36] показаны не только средние значения R_A (довольно близкие к [11]), но и диапазоны: ^{40}K — 1104 ± 407 Бк/кг (диапазон 49–1592 Бк/кг); ^{238}U — 61 ± 56 Бк/кг (0) 19–174 Бк/кг); ^{232}Th — 81 ± 79 Бк/кг (0) 30–254 Бк/кг); ^{226}Ra — 64 ± 53 Бк/кг (2–170 Бк/кг). Повышенное содержание ЕРН отмечается в некоторых осадочных породах — глинистых сланцах и глинах, а минимальное — в песках, песчаниках, гипсе и карбонатных породах (известняки и доломиты). Активность ЕРН отражает региональные особенности строения и состава горных пород [12, 14–16, 18, 24, 34]. Например, по данным А.С. Абдулаевой [18], R_A ^{238}U и ^{232}Th в породах Дагестана составляет: в глинах — 31.5–49.4 и 45.0–60.3 Бк/кг; карбонатах — 27.0–40.3 и 11.6–21.0 Бк/кг; известняках — 31.4–44.2 и 30.4–44.0 Бк/кг; и сланцах — 36.7–43.7 и 51.0–64.0 Бк/кг соответственно.

Первичные носители ЕРН магматические, метаморфические и плотные осадочные породы под воздействием процессов выветривания и почвообразования разрушались. В результате выветривания горных пород в течение нескольких миллиардов лет образовались коры выветривания (КВ), представляющие собой систему слоев рыхлых горных пород, начиная от исходных коренных пород до дневной поверхности. Под воздействием разнообразных геологических процессов КВ разрушались, переносились и переоткладыва-

лись. По характеру соотношения выноса химических элементов и их накопления в пространстве Б.Б. Польшов различал генетически взаимосвязанные элювиальные и аккумулятивные КВ. Аккумулятивные КВ (или переотложенная КВ по И.И. Гинзбургу, 1963), подразделяются на хлоридно-сульфатную, карбонатную и сиаллитную. Они формируются за счет размыва, смыва и переотложения КВ на расстоянии от области выноса и приурочены к склонам водоразделов, долинам и водным бассейнам. Дальность переноса зависит от растворимости мигрирующих веществ [1].

А.И. Перельман (1977) предложил группировку КВ по окислительно-восстановительной и кислотнo-щелочной обстановке. Так, в районах исследования во влажном климате при сквозном промачивании формируются кислые КВ, а при слабой дренированности — коры с глеевой обстановкой. К районам с сухим климатом (степи и полупустыни) приурочен кальциевый класс окислительного ряда КВ (карбонатная и бескарбонатная). Вследствие зависимости процессов выветривания от физико-географических условий и состава коренных пород КВ меняются с севера на юг, подчиняясь закону зональности. Кроме зональных типов КВ в районах умеренного и холодного климата может встречаться элювий карбонатных пород молодых кор, а в аридных — глубоко переработанные древние каолиновые коры и КВ, формирующиеся в условиях засоления-рассоления (карбонатные, гипсовые, хлоридно-сульфатные, солонцовые в сочетании с глеевыми) [1, 37]. В горных частях тектонически активных областей развитых КВ либо нет вообще, либо они незрелые (слаборазвитые), хотя химическое выветривание здесь идет [38].

Исследуемые ПП ледникового генезиса сформировались на кислой (преимущественно гидрослюдистой), а также кислой и нейтральной глеевой КВ. ПП “проблематичного генезиса”, а также элюво-делювий карбонатных отложений сформировались на кальциевой КВ. Также стоит отметить, что красно-бурые глины из Оренбургской обл. и Республики Башкирия отчасти сформировались на КВ засоления-рассоления. Основной для аллювиальных отложений, благодаря их географическому разнообразию, послужили все выше перечисленные КВ [37].

Последним “аккордом” в формировании современных КВ, вещественного состава ПП и содержания в них ЕРН на большей части ЕТР стало последнее (Валдайское) материковое оледенение [1, 24, 25]. С ним связаны процессы дробления и эскарации (ледниковое выпаживание) коренных пород, перемешивание верхних слоев КВ и перемещения обломочного и мелкодисперсного материала на значительные расстояния. Преобладание тех или иных процессов, а также их сочетание

Таблица 2. Существенные корреляционные взаимосвязи (*r*) между содержанием ЕРН в некоторых типах ПП с гранулометрическим составом и рН
Table 2. Significant correlations (*r*) between the NRN content in some types of SfR with particle size distribution and pH

Радионуклид	Число образцов (<i>n</i>), ед.	рН	Фракции гранулометрического состава, мм							
			1.00–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	<0.01	
Все почвообразующие породы										
²²⁶ Ra	89*									
²³² Th			–0.47	–0.55	0.21	0.46	0.48	0.50	0.60	
⁴⁰ K						0.24	0.25			
Породы “проблематичного генезиса”										
²²⁶ Ra	46*	–0.32			0.49		–0.37			
²³² Th										
⁴⁰ K		–0.37	–0.37	–0.32	0.39					
Породы ледникового генезиса										
²²⁶ Ra	23*							0.56	0.41	
²³² Th			–0.49	–0.61		0.56	0.63	0.64	0.77	
⁴⁰ K			–0.48	–0.46		0.40	0.59	0.51	0.63	

* Коэффициент Стьюдента (фактический) при выборке 89 образцов составляет 2.00 (существенные значения $r \geq 0.21$); 46 образцов – 2.02 ($r \geq 0.29$); 23 образцов – 2.07 ($r \geq 0.40$).
 Пустые ячейки означают отсутствие существенных взаимосвязей.

в осадкообразовании и особенности факторов, их определяющих, обусловили литологический тип ПП и их разнообразие. Таким образом, содержание ЕРН в ПП разных литологических типов связано с генезисом КВ.

ЕРН в ПП в результате сложных комбинаций разнородных процессов многоэтапного преобразования вещественного состава КВ оказываются в разных формах: прочно связанные в составе кристаллической решетки минералов, в форме оксидов элементов, в комплексе с полуторными оксидами (R₂O₃) и гумусовыми кислотами, в обменном состоянии с глинистыми минералами. На содержание ЕРН в разных типах ПП оказывают влияние биохимические условия (кислотно-основные и окислительно-восстановительные) формирования современных КВ [2].

Как показано выше, в гранулометрическом составе и реакции среды проявляются существенные отличия типов ПП. Содержание гумусовых веществ, влияющих на активность ЕРН путем образования органо-минеральных комплексов, в ПП низкое. Поэтому их влияние незначительно [9, 32, 40].

Реакция среды в ПП разных типов варьирует в широком диапазоне. Она связана с наследованием карбонатов коренных пород и с геохимическими процессами, происходящими в КВ и обуславливающими миграционные способности ЕРН. Расчеты корреляционных связей между содер-

жанием ЕРН и рН неоднозначны. Существенная обратная взаимосвязь выявлена только для ²²⁶Ra (–0.32) и ⁴⁰K (–0.37) второй группы ПП (табл. 2). Для ²³²Th существенной взаимосвязи отдельно по группам ПП не выявлено. Возможно, это связано с тем, что все исследуемые образцы имеют рН выше 3.5 [10].

Диагностическим признаком типов ПП является соотношение различных фракций гранулометрического состава. Связь между содержанием ЕРН и фракциями гранулометрического состава проявляется в двух аспектах: во-первых, с гранулометрическим составом связан минералогический состав – потенциальный носитель ЕРН; во-вторых, с гранулометрическим составом связана способность к сорбированию ЕРН. Крупные фракции (физический песок) представлены первичными минералами, а илстые фракции – вторичными глинистыми минералами – основным сорбентом ЕРН. Хорошей иллюстрацией связей является совмещение данных гранулометрического состава и ЕРН разных типов на одном графике (рис. 2, 3, 4).

По средней активности ЕРН в ряду рассмотренных типов ПП наиболее низкими значениями выделяются водно-ледниковые и аллювиальные отложения. В их гранулометрическом составе абсолютно преобладают фракции физического песка. Максимальной активностью ЕРН характеризуются озерно-ледниковые породы (для ²³²Th и

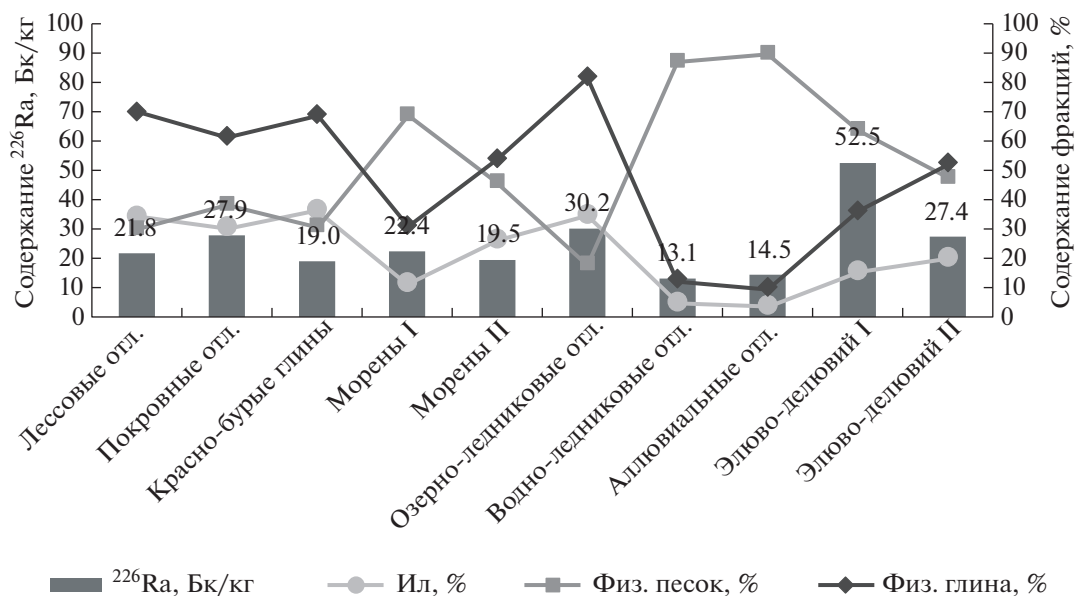


Рис. 2. Средние значения содержания ^{226}Ra и основных фракций гранулометрического состава в генетических типах ПП. *Морена I – содержание фракции ила в образцах менее 20%; Морена II – содержание фракции ила в образцах более 20%; Элюво-делювий I – элюво-делювий коренных карбонатных отложений в образцах из Ленинградской области; Элюво-делювий II – элюво-делювий коренных карбонатных отложений из Крыма. Физ. песок – суммарное среднее содержание фракций более 0.01 мм; Физ. глина – суммарное среднее содержание фракций менее 0.01 мм.

Fig. 2. Average values of the ^{226}Ra content and the main fractions of the particle size distribution in the genetic types of SFR. *Moraine I – the content of the silt fraction in the samples is less than 20%; Moraine II – the content of the silt fraction in the samples is more than 20%; Eluvo-diluvium I – eluvo-diluvium of carbonate sediments in samples from the Leningrad region; Eluvo-diluvium II – eluvo-diluvium of carbonate sediments in samples from the Republic of Crimea. Physical sand – the total average content of fractions >0.01 mm; Physical clay – total average content of fractions <0.01 mm.

^{40}K) и элюво-делювий I для ^{226}Ra . Вторую позицию по ^{226}Ra занимают озерно-ледниковые отложения, а по ^{232}Th – элюво-делювий II. По содержанию ^{40}K вторую позицию занимают морены I и II, а третью – элюво-делювий I и II. Характерно, что по содержанию ^{226}Ra и ^{232}Th морены заметно не выделяются по сравнению с породами первой группы.

Эта тенденция подтверждается данными корреляционного анализа, который показал (табл. 2): прямую существенную взаимосвязь R_A ^{226}Ra с содержанием фракций более 0.01 мм для ПП первой и с содержанием ила и физической глины в ПП второй группы, а также обратную взаимосвязь с фракциями менее 0.01 мм и 0.005–0.001 мм в образцах первой группы.

Между активностью ЕРН и содержанием фракций физической глины и в особенности илистой в большинстве типов ПП прослеживается отчетливо выраженная тенденция к увеличению в ПП содержания радионуклидов с ростом количества мелкодисперсной фракции. Особенно четко это проявляется для ^{232}Th (рис. 3). Исключением является морена I, в которой активность всех ЕРН связана с высоким содержанием песчаной фракции, состоящей из первичных ми-

нералов. Эта взаимосвязь подтверждается данными корреляционного анализа, в особенности для второй группы ПП (табл. 2).

Несмотря на практически одинаковое содержание илистой фракции в красно-бурых и озерно-ледниковых глинах, сформированных на разных КВ, активность ЕРН у них существенно различается. То же относится и к элюво-делювию I и II. При этом элюво-делювий I сформирован на слабо развитой карбонатной КВ ордовикского времени, а элюво-делювий II – юрского времени. Данная тенденция для всех типов ПП, кроме первой группы, подтверждается данными корреляционного анализа. В образцах первой группы корреляционный анализ показал обратную взаимосвязь активности ^{40}K с фракциями 1–0.25 и 0.25–0.05 мм и прямую с основной фракцией данной группы – 0.05–0.01 мм (табл. 2).

В целом при сравнении представленных выше диаграмм (рис. 2–4) можно выявить общие тенденции для ЕРН и корреляционные взаимосвязи содержания ЕРН с фракциями гранулометрического состава. На рис. 5 в качестве примера графически представлены существенные корреляционные взаимосвязи между содержанием ЕРН и фракцией физической глины (<0.01 мм) для всех

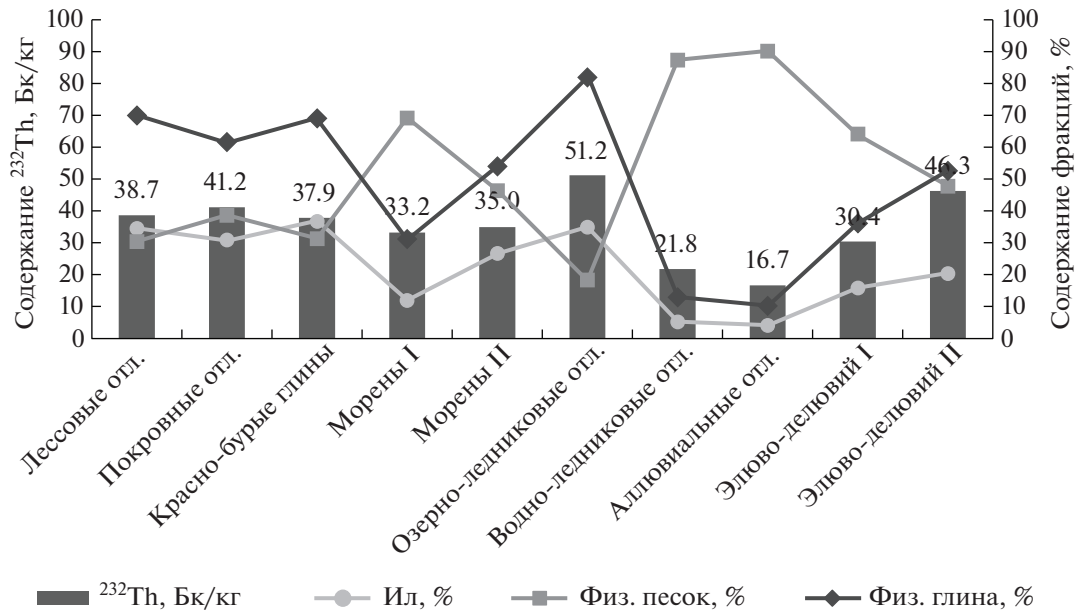


Рис. 3. Средние значения содержания ²³²Th и основных фракций гранулометрического состава в генетических типах ПП.
 Fig. 3. Average values of ²³²Th content and the main fractions of the particle size distribution in the genetic types of SfR.

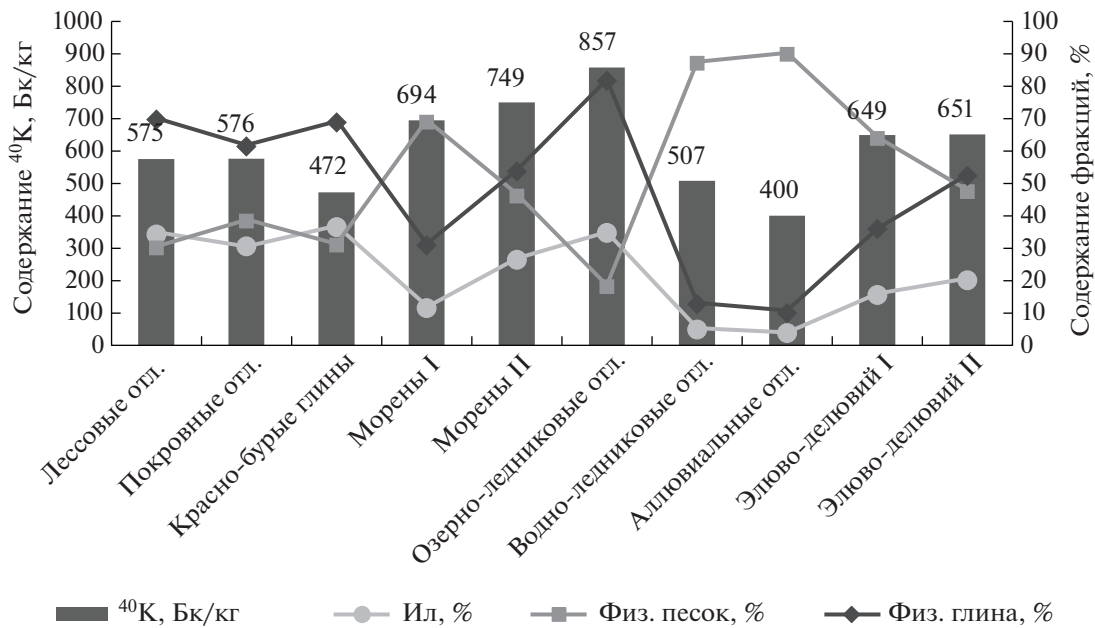


Рис. 4. Средние значения содержания ⁴⁰K и основных фракций гранулометрического состава в генетических типах ПП.
 Fig. 4. Average values of ⁴⁰K content and the main fractions of the particle size distribution in the genetic types of SfR.

образцов и для первой и второй групп ПП в отдельности. Также даны уравнение регрессии с величиной достоверности аппроксимации (R^2) и линия тренда. В первой группе ПП отмечалась обратная взаимосвязь содержания ²²⁶Ra с содержанием мелкой пыли, а для ⁴⁰K с фракциями песка. Прямая взаимосвязь в этой группе отмечалась

для ²²⁶Ra и ⁴⁰K только с лессовой фракцией (0.05–0.01 мм). Во второй группе для ²³²Th и ⁴⁰K отмечена обратная взаимосвязь с фракциями песка и прямая со всеми фракциями гранулометрического состава менее 0.01 мм (включая фракцию физической глины). В четвертой группе отмечается обратная взаимосвязь ²³²Th и ⁴⁰K с фракцией

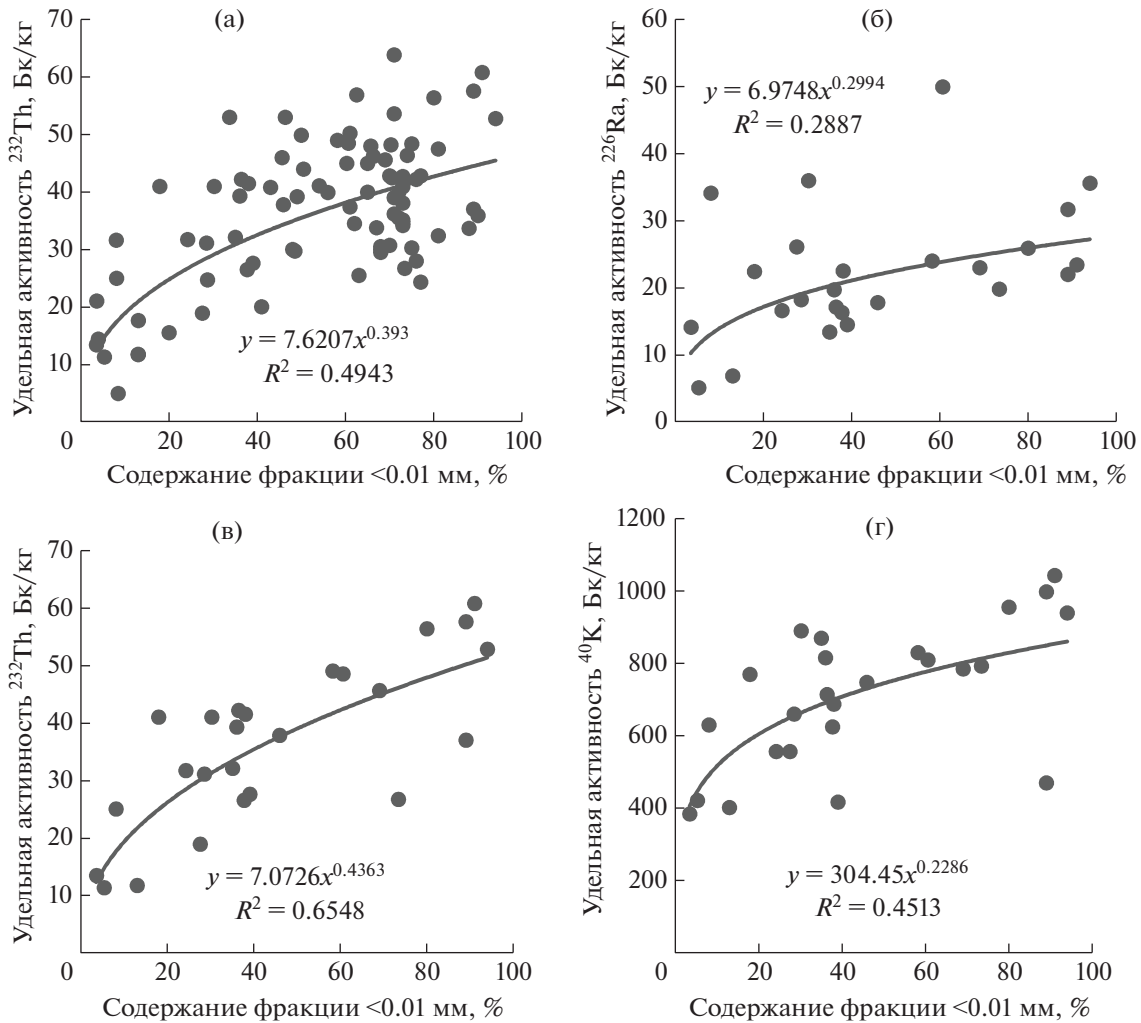


Рис. 5. Существенные корреляционные взаимосвязи содержания ЕРН (Бк/кг) и фракции физической глины (<0.01 мм (%)). *На диаграммах отмечены линия тренда (линейная или степенная), уравнение регрессии с величиной достоверности аппроксимации (R^2).

- (а) – взаимосвязь (степенная) содержания удельной активности ^{232}Th (Бк/кг) и фракции <0.01 мм для всех образцов почвообразующих пород;
 (б) – взаимосвязь (степенная) содержания удельной активности ^{226}Ra (Бк/кг) и фракции <0.01 мм для второй группы почвообразующих пород;
 (в) – взаимосвязь (степенная) содержания удельной активности ^{232}Th (Бк/кг) и фракции <0.01 мм для второй группы почвообразующих пород;
 (г) – взаимосвязь (степенная) содержания удельной активности ^{40}K (Бк/кг) и фракции <0.01 мм для второй группы почвообразующих пород.

Fig. 5. Significant correlations between the content of NRN (Bq/kg) and the fraction of physical clay (<0.01 mm (%)).

* The diagrams show a trend line (linear or power-law), the regression equation with the value of the approximation confidence (R^2).

- (a) – relationship (power-law) of the content of the specific activity of ^{232}Th (Bq/kg) and the fraction <0.01 mm for all samples of soil-forming rocks;
 (б) – relationship (power-law) of the content of the specific activity of ^{226}Ra (Bq/kg) and the fraction <0.01 mm for the second group of soil-forming rocks;
 (в) – relationship (power-law) of the content of the specific activity of ^{232}Th (Bq/kg) and the fraction <0.01 mm for the second group of soil-forming rocks;
 (г) – relationship (power-law) of the content of the specific activity of ^{40}K (Bq/kg) and the fraction <0.01 mm for the second group of soil-forming rocks.

крупного и среднего песка (1–0.25 мм) при выборке образцов ПП только из Крыма, но эти данные из-за малой выборки (шесть образцов) не существенны.

Исследование разных литологических типов ПП показало, что по величине R_A ЕРН наиболее высокие значения по всем РН отмечены в озерно-ледниковых отложениях и группе элюво-делювия

коренных карбонатных отложений. Также высокое содержание ^{40}K наблюдается в моренах и ^{232}Th в покровных отложениях. Наименьшее содержание всех ЕРН отмечено в аллювиальных и водно-ледниковых отложениях.

Такое распределение ЕРН можно объяснить несколькими причинами. Одной из них является преемственность между содержанием радионуклидов в КВ и ПП. Повышенное содержание ЕРН в ледниковых отложениях связано с материалом, который ледник захватывал и перерабатывал во время своего движения. В частности, материал представлен древними гранитами архея и протерозоя, ассимилированный ледником с окраин Балтийского щита [24].

Содержание исследуемых ЕРН в образцах Ленинградской обл. и Крыма отличается. Так, в образце ключевого туфа (79) Ленинградской обл. (Ломоносовский р-н) R_A всех ЕРН ниже минимальной детектируемой. Возможно, это связано с тем, что ключевой туф откладывается в минеральных источниках, содержащих большое количество углекислоты [1], а также заболоченностью участка, на котором закладывался разрез [26]. Образцы элюво-делювия Ордовикских известняков отличаются между собой: образец из Ломоносовского р-на содержит максимальное количество ^{226}Ra даже по сравнению с другими исследуемыми породами, а ^{40}K – наравне с моренными и озерно-ледниковыми отложениями. Такие высокие значения R_A ЕРН связаны с территориальными (геологическими) особенностями участка. Так, по данным Красной книги почв Ленинградской обл., территория, на которой был заложен разрез и отбирался образец, сложена нижнеордовикскими известняками, подстилаемыми кембрийскими синими глинами [25, 26]. По своему минералогическому составу кембрийские глины состоят, в частности, из полевых шпатов, слюд (биотита) и глауконита, содержащих калий в существенных количествах: от 4.5–9.4% в биотитах и глауконитах и до 16.9% в ортоклазах (полевой шпат). По данным С.В. Лебедева радиоактивность синих глин на 50% обусловлена содержанием ^{40}K и еще на 36% – ^{232}Th [39]. Показательно, что в другом образце ПП (80) Ордовикского известняка Гатчинского района [26], для которого отсутствует близкое залегание кембрийской глины, удельная активность ЕРН очень низкая.

Горный Крым можно отнести к территории, где влияние подстилающих пород выражено наиболее сильно. На четырех участках из пяти (Никитский ботанический сад: мыс Мартыан, гора Ай-Петри, Крымский природный заповедник и с. Веселое) подстилающими породами являются верхнеюрские отложения, представленные известняками, глинами, песчаниками, алевролитами и конгломератами. По литературным данным,

известняки характеризуются низким содержанием урана и, в особенности, ^{232}Th , а среднее содержание ^{40}K , ^{238}U и ^{232}Th в них составляет: 90, 30 и 7 Бк/кг соответственно [18, 35, 39, 40]. Повышенное содержание ЕРН в элюво-делювии II, с одной стороны, будет связано с глинистыми сланцами (88, 89) (^{40}K – 700 Бк/кг; ^{238}U – 44 Бк/кг; ^{232}Th – 45 Бк/кг), распространенными на территории горного Крыма и играющими роль ПП [18, 27, 36], с другой стороны – малой мощностью КВ и близким залеганием более древних коренных пород. Геологические породы пятого участка (гора Аю-Даг, образец 82) представлены среднеюрскими интрузиями – габбро-диабазами (габбродолерит) [33]. Такая разница в подстилающих породах, а следовательно, в их минеральном составе сказывается на меньшей активности ЕРН, в особенности ^{40}K , в образце из пятого участка. Это, вероятно, связано с особенностями минералогического состава подстилающей породы (преобладанием плагиоклаза и авгита в габбро-диабазе) [27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано восемь основных литологических типов ПП ЕТР. Установлены диапазоны и средние значения R_A ЕРН, полученные по единой методике (табл. 1) с использованием Биоресурсной коллекции почвенных монолитов и образцов Центрального музея почвоведения им. В.В. Докучаева.

Установлено, что на уровне литологических типов ПП последовательность увеличения R_A ЕРН отличается от групповой, при сохранении общей тенденции. Так, наиболее низкие значения R_A ^{226}Ra и ^{232}Th отмечаются в водно-ледниковых и аллювиальных отложениях, а для ^{40}K – в аллювиальных и красно-бурых глинах. Наиболее высокое содержание ^{226}Ra и ^{232}Th отмечено в озерно-ледниковых и элюво-делювии коренных карбонатных отложениях, а ^{40}K – в озерно-ледниковых отложениях и моренах. При этом внутри первой ПП отмечено возрастание содержания всех ЕРН в последовательности: красно-бурые глины – лесовидные – покровные отложения, а во второй: водно-ледниковые – морены – озерно-ледниковые отложения.

Полученные результаты соответствуют диапазонам и средним значениям, приведенным в литературе: морены и озерно-ледниковые отложения в сравнении с кристаллическими гранитными породами (только по ^{40}K) и элюво-делювий коренных карбонатных отложений Крыма и Ленинградской обл. по ^{232}Th и ^{40}K в сравнении с глинистыми сланцами и известняками.

За основные диагностические признаки литологических типов ПП приняты гранулометриче-

ский состав и реакция среды (рН). Установлена прямая взаимосвязь между содержанием ^{226}Ra и ^{40}K с основной фракцией гранулометрического состава ПП первой группы – крупной пылью, а также обратная взаимосвязь: ^{226}Ra с мелкой пылью (0.005–0.001 мм) и физической глиной; ^{40}K – с песчаными фракциями. Существенная (обратная) взаимосвязь для ^{232}Th отмечена только для фракции физической глины. Существенные корреляционные взаимосвязи для ПП второй группы более выражены: так для ^{232}Th и ^{40}K обратные взаимосвязи отмечены с содержанием песчаных фракций, а прямые со всеми фракциями менее 0.01 мм. Для ^{226}Ra взаимосвязь отмечена только с илистой фракцией и физической глиной. Существенная корреляционная взаимосвязь содержания ЕРН с кислотностью почв отмечена только для образцов первой группы ПП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Самойлова Е.М.* Почвообразующие породы. М.: Изд-во МГУ, 1991. 176 с., ил. [*Samoilova E.M.* Pochvoobrazuyushchie porody. M.: Izdatel'stvo MGU, 1991. 176 p. (In Russ.)]
2. *Барсуков А.О., Языкеев Д.В.* 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. Пензенского гос. пед. ун-та им. В.Г. Белинского. 2012. № 29. С. 369–374. [*Barsukov A.O., Yazykeev D.V.* Gorizontalnaya i vertikal'naya migratsiya ^{40}K , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{241}Am na obrabatyvaemykh sklonovykh agrolandshaftakh Penzenskoi oblasti razlichnoi stepeni krutizny // *Izvestiya Penzenskogo pedagogicheskogo universiteta im. V.G. Belinskogo.* 2012. № 29. P. 369–374 (In Russ.)]
3. *Manigandan P.K., Manikandan N.M.* Migration of radionuclide in soil and plants in the Western Ghats environment // *Iran. J. Radiat. Res.* 2008. V. 6. № 1. P. 7–12.
4. *Gomes M.E.P., Martins L.M.O., Neves L.J.P.F. et al.* Natural radiation and geochemical data for rocks and soils, in the North International Duoro Cliffs (NE Portugal) // *J. Geochem. Explorat.* 2013. V. 130. P. 60–64. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.03.001>
5. Sources, effects and risks of ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2017 Report.) New York: United Nations (UN), 2018. 191 p. <https://doi.org/10.18356/7e4f1c5a-en>
6. *Щеглов А.И., Цветнова О.Б.* Биологический круговорот ^{137}Cs и ^{40}K в дубравах и агрофитоценозах на темно-серых лесных почвах Тульской области России // Радиационная биология. Радиоэкология. 2017. Т. 57. № 2. С. 201–209. [*Shcheglov A.I., Tsvetnova O.B.* Biologicheskii krugovorot ^{137}Cs i ^{40}K v dubravakh i agrofytotsenozakh na temno-serykh lesnykh pochvakh Tul'skoi oblasti Rossii // *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya.* 2017. V. 57. № 2. P. 201–209 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0869803117020138>
7. *Паницкий А.В., Лукашенко С.Н., Магашева Р.Ю.* Особенности вертикального распределения радионуклидов в почвах условно-чистой территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56. № 6. С. 623–638. [*Panitskii A.V., Lukashenko S.N., Magasheva R.Yu.* Osobennosti vertikal'nogo raspredeleniya radionuklidov v pochvakh uslovno-chistoi territorii byvshego Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona // *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya.* 2016. V. 56. № 6. P. 623–638 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0869803116050131>
8. *Гончаров Е.А., Пигалин Д.И.* Распределение естественных и техногенных радионуклидов в лесных экосистемах заповедника “Большая Кокшага” // Вестн. ПГТУ. 2013. Т. 20. № 4. С. 76–87. [*Goncharov E.A., Pigalin D.I.* Raspredelenie estestvennykh i tekhnogennykh radionuklidov v lesnykh ekosistemakh zapovednika “Bol'shaya Kokshaga” // *Vestnik PGTU.* 2013. V. 20. № 4. P. 76–87 (In Russ.)]
9. *Буряева Е.А., Малышевский В.С., Вардуни Т.В. и др.* Содержание и распределение естественных радионуклидов в различных типах почвы Ростовской области // Совр. проблемы науки и образования. 2013. № 4. С. 1–9. [*Buraeva E.A., Malyshevsky V.S., Varduny T.V. et al.* Distribution of natural radionuclides in the soil of the Rostov region // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya.* 2013. № 4. P. 1–9 (In Russ.)]
10. *Титаева Н.А.* Ядерная геохимия. 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 2000. 336 с. [*Titaeva N.A.* Yadernaya geokhimiya. 2-e izd. M.: Izdatel'stvo MGU, 2000. 336 p. (In Russ.)]
11. *Pavlidou S., Koroneos A., Papastefanou C. et al.* Natural radioactivity of granites used as building materials // *J. Environ. Radioact.* 2006. № 89. P. 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.03.005>
12. *Шуктомова И.И., Титаева Н.А., Таскаев А.И. и др.* Поведение ^{238}U , ^{232}Th и ^{226}Ra в почвах горной тундры // Почвоведение. 1983. № 8. С. 49–53. [*Shuktomova I.I., Titaeva N.A., Taskaev A.I. et al.* Povedeniye ^{238}U , ^{232}Th i ^{226}Ra v pochvakh gornoj tundry // *Pochvovedenie.* 1983. № 8. P. 49–53 (In Russ.)]
13. *Баранов В.И., Морозова Н.Г., Кунашева К.Г. и др.* Геохимия некоторых естественных радиоактивных элементов в почвах // Почвоведение. 1963. № 8. С. 11–20. [*Baranov V.I., Morozova N.G., Kunasheva K.G. et al.* Geokhimiya nekotorykh estestvennykh radioaktivnykh elementov v pochvakh // *Pochvovedenie.* 1963. № 8. P. 11–20 (In Russ.)]
14. *Балыкин Д.Н., Ельчиногова О.А.* Естественные радионуклиды в почвах Уймонской котловины (Центральный Алтай) // Ползунковский Вестник. 2006. № 2. С. 309–312. [*Balykin D.N., El'chininova O.A.* Estestvennyye radionuklidy v pochvakh Uimonskoi kotloviny (Tsentral'nyi Altai) // *Polzunovskii Vestnik.* 2006. № 2. P. 309–312 (In Russ.)]
15. *Егорова И.А., Пузанов А.В., Балыкин С.Н. и др.* Естественные радионуклиды (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) в высокогорных почвах Северо-Западного Алтая // Мир науки, культуры и образования. 2007. Т. 4. № 7. С. 16–19. [*Egorova I.A., Puzanov A.V., Balykin S.N. et al.* Estestvennyye radionuklidy (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) v vysokogornykh pochvakh Severo-Zapadogo Altaya // *Mir nauki, kul'tury i obrazovaniya.* 2007. T. 4. № 7. S. 16–19.]

- nauki, kul'tury i obrazovaniya. 2007. V. 4. № 7. P. 16–19 (In Russ.)]
16. *Дубенок Н.Н., Тобратов С.А., Мажайский Ю.А., Кононова Г.А.* Природные и техногенные факторы естественной радиоактивности почв центра России. Доступно по: https://www.rsu.edu.ru/wp-content/uploads/2015/03/17-Statia_RASH-N_160210.pdf. Ссылка активна на 27.07.2020
 17. *Peng-Chu Zhang, Patrick V.B.* Geochemistry of Soil Radionuclides. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America Inc., 2002. 263 p. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub59>
 18. *Абдулаева А.С.* Радиоактивность горных пород, почв, природных вод Дагестана и обусловленные ими эффективные дозы // Юг России: экология, развитие. 2012. № 3. С. 89–106. [*Abdulaeva A.S.* Radioaktivnost' gornyykh porod, pochv, prirodnykh vod Dagestana i obuslovlennyye imi effektivnyye dozy // Yug Rossii: ekologiya, razvitie. 2012. № 3. P. 89–106 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2012-3-89-106>
 19. *Шарипов С.М., Соловьев В.И., Байджанов Д.О. и др.* Исследование естественной радиоактивности горных пород Кокшетауского региона // Наука и техника Казахстана. 2004. № 2. С. 134–143. [*Sharipov S.M., Solov'ev V.I., Baidzhanov D.O. et al.* Issledovanie estestvennoy radioaktivnosti gornyykh porod Kokshetauskogo regiona // Nauka i tekhnika Kazakhstana. 2004. № 2. P. 134–143 (In Russ.)]
 20. *Смыслов А.А.* Уран и торий в земной коре. Л.: Недра, 1974. 231 с. [*Smyslov A.A.* Uran i torii v zemnoi kore. L.: Nedra, 1974–231. (In Russ.)]
 21. *Манахов Д.В., Егорова З.Н.* Формы нахождения радия-226 в подзолах Северо-Востока острова Сахалин в зоне влияния нефтедобывающего предприятия // Почвоведение. 2014. № 6. С. 744–749. [*Manakhov D.V., Egorova Z.N.* Speciation of radium-226 in podzols of northeastern Sakhalin in the impact zone of the oil field // Eurasian Soil Sci. 2014. № 6. P. 744–749 (In Russ. and Engl.)]
 22. Национальный атлас почв Российской Федерации / Под ред. чл.-корр. РАН С.А. Шоба. М.: Астель: АСТ, 2011. 632 с. [Natsional'nyi atlas pochv Rossiiskoi Federatsii / Pod red. S.A. Shoba. M.: Astel': AST, 2011. 632 (In Russ.)]
 23. *Гагарина Э.И., Абакумов Е.В.* Почвообразующие породы с элементами четвертичной геологии: Уч. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. 131 с. [*Gagarina E.I., Abakumov E.V.* Pochvoobrazuyushchie porody s elementami chetvertichnoy geologii: Uch. posobie. SPb.: Izdatel'stvo SPbGU, 2012. 131 p. (In Russ.)]
 24. *Гагарина Э.И.* Литологический фактор почвообразования (на примере Северо-Запада Русской равнины). СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 260 с. [*Gagarina E.I.* Litologicheskii faktor pochvoobrazovaniya (na primere Severo-Zapada Russkoi ravniny). SPb.: Izdatel'stvo SPbGU, 2004. 260 p. (In Russ.)]
 25. Почвы природных зон Русской равнины: Уч. пособие / Под ред. Б.Ф. Апарина, Г.А. Касаткиной. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2008. 226 с. [Pochvy prirodnykh zon Russkoi ravniny: Uch. Posobie / Pod red. B.F. Aparina, G.A. Kasatkinoi. SPb.: Izdatel'stvo SPbGU, 2008. 226 p. (In Russ.)]
 26. *Апарин Б.Ф., Касаткина Г.А., Матинян Н.Н. и др.* Красная книга почв Ленинградской области. СПб.: Аэроплан, 200. 320 с. [*Aparin B.F., Kasatkina G.A., Matinyan N.N.* Red data soils book of the Leningrad region. SPb.: Aeroplan, 2007. 320 p. (In Russ. and Engl.)]
 27. Геология СССР / Под ред. М.В. Муратова. М.: Изд-во Недра. Т. 8. Крым: Полезные ископаемые, 1969. 576 с. [Geologiya SSSR / Pod red. M.V. Muratova. M.: Izd-vo Nedra. V. 8. Krym: Poleznye iskopayemye, 1969. 576 p. (In Russ.)]
 28. *Воробьева Л.А.* (ред.) Теория и практика химического анализа почв. Монография. М.: ГЕОС, 2006. 400 с., ил. [*Vorob'eva L.A.* (red.). Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv. Monografiya. M.: GEOS, 2006. 400, il. (In Russ.)]
 29. Активность радионуклидов в счетных образцах. Методика измерений на гамма-спектрометрах с использованием программного обеспечения “SpectraLine”. Менделеев, 2014. 27 с. [Aktivnost' radionuklidov v schetnykh obraztsakh. Metodika izmerenii na gamma-spektrometrakh s ispol'zovaniem programmnoy obespecheniya “SpectraLine”. Mendeleev, 2014. 27 p. (In Russ.)]
 30. *Дмитриев Е.А.* Математическая статистика в почвоведении: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 1995. 320 с. [*Dmitriev E.A.* Matematicheskaya statistika v pochvovedenii: Uchebnik. M.: Izdatel'stvo MGU, 1995. 320 p. (In Russ.)]
 31. *Попов А.И., Игамбердиев В.М., Алексеев Ю.В.* Статистическая обработка экспериментальных данных. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2009. 50 с. [*Popov A.I., Igamberdiev V.M., Alekseev Yu.V.* Statisticheskaya obrabotka eksperimental'nykh dannykh. SPb.: Izdatel'stvo SPbGU, 2009. 50 p. (In Russ.)]
 32. *Апарин Б.Ф., Мингареева Е.В., Санжарова Н.И. и др.* Содержание радионуклидов (²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K, ¹³⁷Cs) // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1457–1467. [*Aparin B.F., Mingareeva E.V., Sanzharova N.I. et al.* Concentrations of radionuclides (²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K, ¹³⁷Cs) in chernozems of Volgograd oblast sampled in different years // Eurasian Soil Sci. 2017. V. 50. № 12. P. 1395–1405. (In Russ. and Engl.)]. <https://doi.org/10.1134/S106422931712002X>
 33. Геологическая карта горного Крыма (М 1:200 000), 1984. Доступно по: <http://www.geokniga.org/maps/9305>. Ссылка активна на 09.06.2020
 34. *Арбузов С.И., Рихванов Л.П.* Геохимия радиоактивных элементов: Уч. пособие. 2-е изд. Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2010. 300 с. [*Arbuzov S.I., Rikhvanov L.P.* Geokhimiya radioaktivnykh elementov: Uch. posobie. 2 izd. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo instituta, 2010. 300 p. (In Russ.)]
 35. Геохимия редких, редкоземельных и радиоактивных элементов в пороодо- и рудообразующих процессах. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1989. 213 с. [Geokhimiya redkikh, redkozemel'nykh i radioaktivnykh elementov v porodo- i rudoobrazuyushchikh protsessakh. Novosibirsk: Nauka. Sib. otdelenie, 1989. 213 p. (In Russ.)]
 36. Новый справочник химика и технолога. Радиоактивные вещества. Вредные вещества. Гигиенические нормативы. СПб.: АНО НПО “Профессио-

- нал”, 2004. 1142 с. [Novyi spravochnik khimika i tekhnologa. Radioaktivnye veshchestva. Vrednye veshchestva. Gigienicheskie normativy. SPb.: ANO NPO “Professional”, 2004. 1142 p. (In Russ.)]
37. *Перельман А.И.* Биокосные системы Земли. М.: Наука, 1977. 160 с. [*Perel'man A.I.* Biokosnye sistemy Zemli. M.: Nauka, 1977. 160 p. (In Russ.)]
38. *Страхов Н.М.* Основы теории литогенеза. Т. 1. М.: АН СССР, 1962. 212 с. [*Strakhov N.M.* Osnovy teorii litogeneza. V. 1. M.: AN SSSR, 1962. 212 p. (In Russ.)]
39. *Лебедев С.В.* Радиоактивность осадочных пород и экологическая обстановка на территории Саблинского памятника природы // Вестн. СПбГУ. 2012. Сер. 7. Вып. 2. С. 22–32. [*Lebedev S.V.* Radioaktivnost' osadochnykh porod i ekologicheskaya obstanovka na territorii Sablinskogo pamyatnika prirody // Vestnik SPbGU. 2012. V. 7. № 2. P. 22–32 (In Russ.)]
40. *Рачкова Н.Г., Шуктомова И.И., Таскаев А.И.* Состояние в почвах естественных радионуклидов урана, радия и тория (обзор) // Почвоведение. 2010. № 6. С. 698–705. [*Rachkova N.G., Shuktomova I.I., Taskaev A.I.* The state of natural radionuclides of uranium, radium, and thorium in soils // Eurasian Soil Sci. 2010. V. 43. № 6. P. 651–658 (In Russ. and Engl.)]

Natural Radionuclides (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) in the Soil-Forming Rocks of the European Territory of Russia

E. V. Mingareeva^{a,b,#}, B. F. Aparin^a, S. V. Korovin^b, N. I. Sanzharova^b, and E. Yu. Sukhacheva^a

^a*Central Soil Museum by V.V. Dokuchaev – Branch of the Federal Research Centre V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, St. Petersburg, Russia*

^b*Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia*

[#]*E-mail: elena.mingareeva@yandex.ru*

Ranges and average values of the specific activity of natural radionuclides (^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K) in the main lithological types of parent rocks (red-brown clays, loess, cover, glacial, lake-glacial, fluvioglacial, alluvial deposits and eluvo – deluvial carbonate sediments) have been established. The lowest content of radionuclides is characteristic of alluvial and fluvioglacial deposits, and the highest is in lake-glacial, eluvo-deluvial carbonate sediments and moraines. The inheritance of natural radionuclides by soil-forming rocks from weathering crusts was revealed, which is most clearly manifested for rocks of glacial genesis and eluvo-deluvial of carbonate deposits. The relationship between the content of radionuclides and fractions of particle size distribution has been established.

Keywords: natural radionuclides, soil-forming rocks, weathering crust