

DOI 10.17516/1997-1389-0315

УДК 631.438.1

The Contents and Distributions of Natural Radionuclides ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K in Permafrost Soils of Central Yakutia

Alexander P. Chevychelov* and **Peter I. Sobakin**
Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS
Yakutsk, Russian Federation

Received 17.02.2018, received in revised form 16.06.2018, accepted 14.03.2020

Abstract. The present study addresses the contents and distributions of natural radionuclides ^{238}U , ^{232}Th , and ^{40}K in six main types (subtypes) of soils that have developed in friable alluvial sandy deposits within various layers of the topography of the Central Yakutian Plain. The minimum concentrations of these radionuclides are registered in forest soils of the eluvial type that have developed on weathered sandy deposits of the high level, whereas the maximum concentrations are detected in forest pale-yellow and meadow-steppe soils that have developed on loess-like carbonate loams of the middle level and in polymictic sands of the lower level of the plain, respectively. In addition to the structure of soil forming rocks, the soil formation processes in these soils, such as humus accumulation, podsolization, bleaching, and intra-soil clay deposition have a significant effect on the contents and distributions of ^{238}U , ^{232}Th , and ^{40}K . In the soils examined in this study, ^{40}K distribution followed the eluvial and uniform patterns, whereas the intra-profile distribution of ^{238}U and ^{232}Th was more variable, following the accumulative, eluvial, accumulative eluvial, accumulative eluvial-illuvial, and accumulative illuvial patterns. We have revealed statistically significant correlations between ^{238}U and ^{232}Th contents and soil contents of humus, clay, and silt.

Keywords: natural radionuclides, soil properties, content, distribution.

Citation: Chevychelov A.P., Sobakin P.I. The contents and distributions of natural radionuclides ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K in permafrost soils of Central Yakutia. J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2020, 13(1), 109-123. DOI: 10.17516/1997-1389-0315

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: chev.soil@list.ru

Содержание и распределение естественных радионуклидов ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K в мерзлотных почвах Центральной Якутии

А.П. Чевычелов, П.И. Собакин

*Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН
Российская Федерация, Якутск*

Аннотация. Изучено содержание и распределение естественных радионуклидов ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K в шести основных типах (подтипах) почв, формирующихся в основном на рыхлых элювиальных песчаных отложениях среди различных ярусов рельефа Центрально-Якутской равнины. Минимальные концентрации данных радионуклидов отмечены в лесных почвах элювиального ряда, развитых на сильновыветрелых песчаных отложениях высокого уровня, а максимальные – в лесных палевых и лугово-степных почвах, сформированных соответственно на лессовидных карбонатных суглинках среднего и полимиктовых песках нижнего уровня равнины. Помимо состава почвообразующих пород на содержание и распределение ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K существенно влияют почвообразовательные процессы, протекающие в данных почвах, такие как гумусонакопление, оподзоливание, осолодение, внутрисочвенное огливание и др. В исследованных почвах ^{40}K распределяется по элювиальному и равномерному типу, а внутрипрофильное распределение ^{238}U и ^{232}Th более разнообразно и носит аккумулятивный, элювиальный, аккумулятивно-элювиальный, аккумулятивно-элювиально-иллювиальный и аккумулятивно-иллювиальный характер. Выявлены статистически достоверные корреляционные связи между содержанием ^{238}U и ^{232}Th и количеством гумуса, а также глины и ила в изучаемых почвах.

Ключевые слова: естественные радионуклиды, свойства почв, содержание, распределение.

Цитирование: Чевычелов, А.П. Содержание и распределение естественных радионуклидов ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K в мерзлотных почвах Центральной Якутии / А.П. Чевычелов, П.И. Собакин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2020. 13(1). С. 109-123. DOI: 10.17516/1997-1389-0315

Введение

Изучению содержания и распределения естественных радионуклидов в почвах различных природных зон, а также отдельных регионов посвящено значительное количество публикаций отечественных и зарубежных авторов (Балыкин, Черных, 2008; Унканжинов и др., 2012; Переволоцкий, Переволоцкая, 2014; Asvarova et al., 2012; Egorova et al., 2012; Beznosikov et al., 2017; Malanca et

al., 1996; Navas et al., 2002; Akyil, Yusof, 2007; Baykara, Doğru, 2009; Belivermis, 2012). Но в них, как правило, основной акцент сделан на анализ характера и степени радиоактивного загрязнения данных почв и их опасности для биоты и проживающего на этих территориях населения. При этом в основном слабо проанализированы географо-генетические особенности исследуемых почв естественных и техногенных ландшафтов в связи с миграци-

ей радиоактивных элементов. Между тем, согласно (Баранов и др., 1963; Алексахин, 1982), подобные исследования имеют важное значение. Во-первых, они позволяют выявить радиоактивные элементы – индикаторы почвообразовательных процессов, протекающих в почвах в различных литолого-геохимических и ландшафтно-климатических условиях почвообразования. Во-вторых, посредством оценки особенностей миграции изучаемых радионуклидов представляется возможным определить судьбу вероятных техногенных загрязнений почвенно-растительного покрова в данных районах. Это особенно актуально для мерзлотных регионов с контрастными условиями миграции естественных радионуклидов в почвах, к которым мы целиком относим огромную и малоисследованную территорию Якутии. Известно, что площадь Якутии составляет 3,1 млн кв. км, что занимает почти 1/5 (18 %) часть территории всей Российской Федерации. В последнее время здесь проведены работы, направленные на изучение особенностей миграции радиоактивных элементов в мерзлотных почвах (Сухоруков и др., 2001; Собакин и др., 2004; Собакин, Перк, 2013; Chevychelov, Sobakin, 2017). На расширение и углубление подобных исследований применительно к условиям почвообразования в Центральной Якутии и направлено содержание данной статьи.

Материалы и методы

Исследования проводились в Центральной Якутии в окрестностях г. Якутска. Климат данной территории резко континентальный и криоаридный, характеризуемый длительной крайне морозной и малоснежной зимой, а также коротким относительно жарким и засушливым летом. При этом температура июля составляет 18,7 °С, января минус 43,2 °С, среднегодовая температура минус

10,3 °С, среднегодовое количество осадков 234 мм, количество осадков за вегетационный период 158 мм, испаряемость 502 мм, коэффициент увлажнения по Н.Н. Иванову 0,3, коэффициент континентальности 302.

Большая часть исследуемых почвенных разрезов была заложена на участках 30-километровой почвенно-растительной катены в пределах различных ярусов рельефа Центрально-Якутской равнины в интервале абсолютных высот 90-260 м над ур. м. В данной почвенно-растительной катене снизу-вверх выделяют три составляющих элемента с лугово-степной (90-140 м), лесостепной (140-220 м) и таежной (220-270 м) растительностью, произрастающей на мерзлотных луговых, степных и лесных почвах, описанных нами ранее (Chevychelov et al., 2009). Почвенные образцы для определения концентрации ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K отбирали в 2003-2005 гг. Приведем географические характеристики и морфологическое строение исследуемых почв (табл. 1).

Исследуемые почвы формируются в условиях сплошной криолитозоны. Однако в связи, главным образом, с легким гранулометрическим составом их почвообразующих пород, представленных рыхлыми аллювиальными песчаными отложениями, криоморфные признаки здесь выражены слабо. Глубина протаивания большей части данных почв в среднем составляет 1,5-2,0 м, в то время как палевой осолоделой почвы разр. 6Т-05, сформированной на карбонатных лессовидных суглинках, – около 1 м. Ниже располагается многолетняя мерзлота, как правило «сухая», а иногда и льдистая.

При проведении работ использовали общепринятые почвенные методы: сравнительно-географический, профилно-генетический, сравнительно-аналитический (Роде, 1971; Розанов, 1983). При этом хими-

Таблица 1. Географические характеристики и морфологическое строение почв Центральной Якутии

Table 1. Geographical characteristics and morphological structure of soils in Central Yakutia

№ разреза	Географические координаты	Тип растительности	Тип почв	Морфологическое строение профиля
Разр. 3ЧТ-03	62°05'17,9"N, 129°12'58,3"E, абсолютная высота (h) – 253,9 м над ур. м.	Смешанный сосново-лиственничный лес лишайниково-кустарничковый	Палево-бурая оподзоленная	A0A1(0-4) – A1A2(4-9) – A2B(9-21) – B(21-53) – BC(53-86) – C(86-144 см)
Разр. 6Т-05	61°48'46,9"N, 129°32'31,9"E, h – 234,1 м над ур. м.	Смешанный березово-лиственничный разнотравно-брусничный лес	Палевая осолоделая	A0(0-2) – A1A2(2-10) – A2(10-22) – B1(22-43) – B2ca(43-56) – BCca(56-102) – Cca(102-133 см)
Разр. 1ЧТ-03	61°59'29,8"N, 129°22'55,3"E, h – 206,7 м над ур. м.	Лиственничник с березой бруснично- толокнянковый	Солодь	A0(0-2) – A1A2(2-12) – A2(12-38) – B(38-52) – BC(52- 91) – C(91-130 см)
Разр. 6ЧТ-04	61°55'26,0"N, 129°34'42,3"E, h – 99,4 м над ур. м.	Куртина разреженного соснового леса с остепненным разнотравно-злаковым напочвенным покровом	Палевая переходная	A0(0-1) – A(1-4) – AB(4-12) – B(12-40) – BC(40-76) – C(76-128 см)
Разр. 2ЧТ-03	61°54'22,3"N, 129°33'29,2"E, h – 102,7 м над ур. м.	Типчаково-осочковая степь	Чернозем	Ad(0-1) – A(1-24) – AB(24-35) – Bca(35-57) – BCca(57- 75) – C(75-150 см)
Разр. 5ЧТ-04	61°52'57,1"N, 129°37'6,1"E, h – 93,0 м над ур. м.	Нормальный разнотравно-злаковый луг	Аллювиальная темногумусовая	Ad(0-2) – A(2-5) – ABca(5-17) – Bca(17-52) – C1(52- 102) – C2(102-138 см)

ческий состав, а также свойства почв определяли по стандартным методикам, принятым в почвоведении, а именно рН – потенциометрически, гумус – по Тюрину, обменные катионы в карбонатных почвах – по Шмуку, в бескарбонатных почвах – по Гедройцу, гранулометрический состав – по Качинскому (Аринушкина, 1970). Диагностику исследуемых типов почв проводили в соответствии с классификацией мерзлотных почв Якутии (Еловская, 1987). Привязку почвенных разрезов на местности выполняли с помощью спутникового приемника-навигатора GPS-eTrex Vista (Garmin). При этом погрешность определения географических координат (долготы и широты) при работе в режиме DGPS (USGC) составляла 3-5 м с вероятностью $p=95\%$. Статистическую обработку полученных данных проводили посредством вариационно-статистического и корреляционного анализов (Дмитриев, 2009).

Содержание ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K в изучаемых почвах определяли γ -спектрометрическим методом на многоканальном анализаторе «Прогресс-Гамма» (НПП «Доза», Россия) со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) размером 63x63 мм, с 7,3%-ным разрешением по γ -линии ^{137}Cs (666 Кэв). Проведены γ -спектрометрические измерения проб в сосудах Маринели объемом 1 л. Обработку γ -спектров осуществляли матричным методом с помощью программного обеспечения «Прогресс» (Методика..., 2003), максимальная погрешность измерения составила $\pm 30\%$. Гамма-спектрометрический метод предполагает определение содержания урана по радио только в случае радиоактивного равновесия. При этом, согласно А.И. Перельману (1989, с. 425), отношение концентраций $\text{Ra}/\text{U}=3,36 \cdot 10^{-7}$. Установлено, что состояние радиоактивного равновесия между ураном и радием в аллювиальных почвообразующих

породах четвертичного возраста (пески, суглинки) р. Лены хорошо сохраняется (Баранов, Титаева, 1961).

Результаты и обсуждение

Согласно (Rachkova et al., 2010), закрепление в почвах естественных радионуклидов зависит от химических свойств данных элементов, а также физико-химического состояния, гранулометрического и минералогического состава почв, содержания в них органического вещества. В этом отношении состав и свойства исследуемых почв Центральной Якутии значительно различаются. Остановимся кратко на их характеристике (табл. 2).

Таежно-лесные почвы элювиального ряда (разр. 1ЧТ-03, разр. 3ЧТ-03 и разр. 6Т-05) характеризуются, как правило, слабокислой и кислой реакцией среды элювиальных, нейтральной и слабощелочной нижних горизонтов, насыщенностью почвенно-поглощающего комплекса (ППК) обменными катионами Ca^{+2} и Mg^{+2} , главным образом, супесчано-легкосуглинистым гранулометрическим составом и элювиально-иллювиальным распределением фракций физической глины и ила. При этом наиболее дифференцированным по гранулометрическому составу оказался профиль солоды (разр. 1ЧТ-03). В поверхностных органогенных и органоминеральных горизонтах данных почв содержится значительное количество грубоперегнойного органического вещества (ОВ), количество которого резко падает в нижней минеральной части почвенного профиля.

Состав и свойства палевой переходной почвы разр. 6ЧТ-04, развитой под разреженным остепненным сосняком, несколько отличаются от отмеченных выше. Данная почва имеет слабокислую, ближе к нейтральной, реакцию среды, незначительный по мощности гумусово-аккумулятивный горизонт гори-

Таблица 2. Физико-химические свойства почв Центральной Якутии

Table 2. Physical and chemical properties of soils in Central Yakutia

Горизонт	Глубина, см	рН _{NH₂O}	Гумус, %	Обменные катионы, смоль (экв)/кг почвы			Фракции, %	
				Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	< 0,001 мм	< 0,01 мм
Палево-бурая оподзоленная, разрез 3ЧТ-03								
A0A1	0-4	5,7	40,6*	36,2	14,3	2,5	-	-
A1A2	4-9	4,8	6,4	5,1	3,0	0,9	10,7	18,5
A2B	10-20	4,8	1,4	1,9	1,7	0,4	8,7	24,2
B	30-40	4,1	0,7	5,7	3,0	0,6	18,5	36,0
BC	60-70	5,0	0,1	2,1	1,5	0,3	4,6	17,6
C	120-130	6,4	-	-	-	-	3,3	5,0
Солодь, разрез 1ЧТ-03								
A0	0-2	5,6	75,6*	-	-	-	-	-
A1A2	2-12	5,4	5,2	7,3	1,8	1,1	6,6	9,5
A2	20-30	5,6	0,4	2,8	1,1	0,7	4,2	9,1
Bt	40-50	6,0	0,5	8,2	3,0	0,8	16,0	25,4
BC	70-80	6,2	0,2	5,6	2,1	0,5	6,2	11,1
C	110-120	6,6	-	2,8	1,2	0,4	2,1	5,0
Палевая переходная, разрез 6ЧТ-04								
A	1-4	5,9	20,5	23,8	5,2	3,0	3,8	9,1
AB	4-12	5,5	1,2	2,7	1,6	0,7	1,1	4,6
B	20-30	5,7	0,3	2,6	1,4	0,6	1,9	5,6
BC	50-60	6,4	0,2	2,0	1,3	0,5	3,7	4,9
Палевая осолодевшая, разрез 6Т-05								
A1A2	2-10	5,9	6,2	14,2	5,0	1,5	7,7	15,7
A2	10-22	6,0	0,6	6,3	1,6	1,3	7,5	14,8
B	30-40	6,1	0,6	11,4	7,0	1,3	22,6	30,8
Bca	45-55	7,8	0,6	9,5	5,7	1,3	18,5	26,2
BCca	70-80	7,6	0,5	-	-	-	17,8	25,6
C	110-120	7,4	0,3	-	-	-	15,4	23,2
Чернозем, разрез 2ЧТ-03								
A	1-11	6,3	5,4	15,4	2,4	1,8	6,6	14,4
A	12-22	6,9	4,4	20,0	2,9	1,6	10,7	21,7
AB	25-35	7,5	2,9	18,0	5,3	3,0	10,3	29,5
Bca	40-50	7,8	1,4	18,7	11,1	2,3	11,5	28,2
BCca	60-70	8,2	0,6	8,3	6,3	0,7	6,6	14,4
C	90-100	7,5	0,1	3,3	2,6	0,3	3,3	4,5
Аллювиальная темногумусовая, разрез 5ЧТ-04								
A	2-5	8,3	6,7	29,7	14,3	3,8	6,6	16,4
ABca	5-15	8,9	1,7	25,2	10,5	4,6	8,7	19,7
Bca	30-40	8,2	1,5	35,2	9,6	2,8	9,9	22,9
BC	70-80	8,0	1,4	14,3	3,3	1,7	6,2	16,4
C1	120-130	7,9	-	7,5	1,9	1,1	3,8	6,6

Примечание: *Приведено значение потери при прокаливании. Прочерк – значение не определено.

зонт высокое содержание в нем ОВ, количество которого резко убывает в нижележащей минеральной толще. Изучаемая почва также характеризуется легким песчаным гранулометрическим составом и аккумулятивным типом внутрипрофильного распределения глины и ила.

Исследуемые лугово-степные почвы (разр. 2ЧТ-03 и 5ЧТ-04) отличаются, как правило, нейтрально-слабощелочной реакцией среды, более мощным гумусовым профилем и более высоким содержанием гумуса, аккумулятивным типом распределения фракций глины и ила и преимущественно супесчано-легкосуглинистым гранулометрическим составом, а также аккумуляцией свободных карбонатов в средней части почвенного профиля. Помимо этого необходимо также отметить еще одну особенность данных почв, а именно то, что все исследуемые педоны содержат в ППК обменный Na^+ . Очевидно, что это нужно рассматривать как фаціальную особенность криоаридного почвообразования в условиях сплошного распространения многолетней мерзлоты (Chevychelov et al., 2009).

Касаясь минералогического состава данных почв, необходимо отметить, что, как уже указывалось, палево-бурая почва и солодь (разр. 3ЧТ-03 и разр. 1ЧТ-03) формируются на обедненных полевошпатово-кварцевых песках преимущественно каолинитового состава. Содержание других групп глинистых минералов в них незначительно. Чернозем и аллювиальная темногомусовая почва (разр. 2ЧТ-03 и разр. 5ЧТ-04) развиваются на менее выветрелых современных аллювиальных отложениях в основном кварц-палевошпатового состава. Но в них наряду с каолинитом также отмечается довольно высокое содержание глинистых минералов типа иллит-монтмориллонит. При этом в средней части профиля чернозема, в горизонтах АВ и Вс

довольно ясно наблюдается процесс внутрипочвенного оглинивания, фиксируемый как по минералогическому (Васильева, Чевычелов, 2010), так и по гранулометрическому составу данной почвы (табл. 2).

Известно, что одним из главных факторов, определяющих количества естественных радионуклидов в почвах, являются их уровни содержания, отмечаемые в почвообразующих породах (Баранов и др., 1963; Балыкин, Черных, 2008; Rachkova et al., 2010; Vodyanitskii, 2011; Asvarova et al., 2012 и др.). В этом плане наименее контрастно в почвообразующих породах исследуемых почв (табл. 3) изменяется содержание ^{40}K (2,3–3,0 %), а более вариабельно – концентрации ^{232}Th ($2,0 \cdot 10^{-4}$ – $10,1 \cdot 10^{-4}$ %) и особенно ^{238}U ($0,3 \cdot 10^{-4}$ – $2,5 \cdot 10^{-4}$ %).

При этом наименее низкие концентрации данных радионуклидов обнаружены в сильновыветрелых древних плейстоценовых аллювиальных песчаных полевошпатово-кварцевых отложениях верхнего уровня Центрально-Якутской равнины (разр. 1ЧТ-03 и разр. 3ЧТ-03), средние – в аллювиальных песчаных кварцево-полевошпатовых отложениях русловой фации (разр. 6ЧТ-04), а наиболее высокие – в голоценовых аллювиальных отложениях пойменной и русловой фаций р. Лены, сложенных полимиктовыми песками (разр. 2ЧТ-03 и разр. 5ЧТ-04). Концентрации исследуемых радионуклидов, обнаруженные в горизонте С палевой осолоделой почвы (разр. 6Т-05), сформированной на аллювиальных карбонатных суглинках, также соответствуют наиболее высоким значениям (табл. 3).

Распределение ^{40}K в солоди (разр. 1ЧТ-03) и палево-бурой оподзоленной почве (разр. 3ЧТ-03) носит элювиальный характер, в то время как в остальных почвах, в том числе и в палевой осолоделой (разр. 6Т-05), преимущественно равномерный. Следовательно, процесс оподзоливания способству-

Таблица 3. Содержание естественных радионуклидов в почвах Центральной Якутии

Table 3. The contents of natural radionuclides in soils of central Yakutia

Горизонт	Глубина, см	^{40}K , %	$n \cdot 10^{-4}$ %		Th/U
			^{238}U	^{232}Th	
Палево-бурая оподзоленная, разрез 3ЧТ-03					
A0A1	0-4	0,7	1,6	1,2	0,7
A1A2	4-9	1,4	0,9	1,9	2,1
A2B	10-20	2,4	1,5	6,3	4,2
B	30-40	2,2	0,7	4,7	6,7
BC	60-70	2,2	0,4	2,2	5,5
C	120-130	2,3	0,3	2,0	6,7
Солодь, разрез 1ЧТ-03					
A1A2	2-12	1,7	2,7	3,6	1,3
A2	20-30	1,2	0,4	2,3	5,7
Bt	40-50	1,3	0,9	5,9	6,5
BC	70-80	2,3	0,7	4,5	6,4
C	110-120	2,3	0,6	2,7	4,5
Палевая переходная, разрез 6ЧТ-04					
Ad	0-1	1,5	2,9	5,0	1,7
A	1-4	2,2	2,5	8,4	3,4
AB	4-12	2,5	1,7	6,2	3,6
B	20-30	2,3	1,5	6,8	4,5
BC	50-60	2,6	1,5	8,4	5,6
C	100-110	2,3	1,3	5,1	3,9
Палевая осолодевшая, разрез 6Т-05					
A1A2	2-10	3,1	2,5	5,3	2,1
A2	10-22	3,4	1,9	7,3	3,8
B	30-40	3,0	1,6	12,1	7,6
Bca	45-55	3,1	1,7	12,3	6,1
BCca	70-80	2,7	1,8	10,3	6,8
C	110-120	3,0	2,5	10,1	4,0
Чернозем, разрез 2ЧТ-03					
Ad	0-1	1,5	1,1	7,5	6,8
A	1-11	2,2	1,8	9,6	5,3
A	12-22	2,6	2,4	11,3	4,7
AB	25-35	3,1	2,7	15,4	5,7
Bca	40-50	2,3	2,4	11,2	4,7
BCca	60-70	2,9	2,5	12,4	5,0
C1	90-100	2,6	1,7	7,0	4,1
C2	140-150	3,0	1,3	6,3	4,8
Аллювиальная темногумусовая, разрез 5ЧТ-04					
Ad	0-2	2,2	2,4	10,2	4,2
A	2-5	3,0	2,8	12,8	4,6
ABca	5-15	2,8	2,6	12,4	4,8
Bca	30-40	2,2	2,7	11,4	4,2
BC	70-80	2,6	2,6	11,6	4,5
C1	120-130	2,9	1,9	9,6	5,0
C2	140-150	2,5	1,7	6,4	3,8

ет выносу ^{40}K из данных почв элювиального ряда, а процесс осолодения – нет. Среднее содержание ^{40}K в изучаемых почвах изменяется от 1,8 до 3,0 %, т. е. максимально почти в 1,7 раза. Минимальные средние содержания ^{40}K (1,8–1,9 %) отмечаются в солоди и палево-бурой оподзоленной, а максимальные (2,5–3,0 %) – в черноземе, аллювиальной темногумусовой и палевой осолоделой почвах (табл. 4). Минимальная вариабельность внутрипрофильных концентраций ^{40}K наблюдалась ($V=7\%$) в палевой осолоделой почве, тогда как максимальная ($V=37\%$) – в палево-бурой оподзоленной почве. Данные корреляционного анализа между содержанием ^{40}K и свойствами исследованных типов почв не обнаружили значимых связей. Во всех случаях рассчитанные значения коэффициентов корреляции (r) оказались статистически не

значимыми, т. е. меньше критических (r_{st}) для данного объема выборки (n) и уровня доверительной вероятности ($p=0,95$). При этом для связей ^{40}K – физический песок значения r оказались существенными ($r=0,525-0,802$), что позволяет утверждать, что в исследованных почвах ^{40}K закрепляется главным образом в кристаллических структурах первичных минералов.

Содержание и внутрипрофильное распределение ^{238}U в изучаемых почвах более контрастное, чем таковое ^{40}K . При этом нельзя не согласиться с мнением ряда ученых (Баранов и др., 1963; Переволоцкий, Переволоцкая, 2014; Rachkova et al., 2010; Beznosikov et al., 2017; Navas et al., 2002; Baykara, Doğru, 2009 и др.), которые считают, что почвы наследуют уровни содержаний естественных радионуклидов от состава почвообразующих пород,

Таблица 4. Статистические показатели распределения содержаний естественных радионуклидов в почвах Центральной Якутии

Table 4. Statistics on distribution of contents of natural radionuclides in soils of central Yakutia

Почва, № разреза	Радионуклиды	lim	$\bar{X} + S_{\bar{X}}$	V
Палево-бурая оподзоленная, разрез 3ЧТ-03 n=6	^{40}K	0,7–2,4	$1,9 \pm 0,3$	37
	^{238}U	0,3–1,6	$0,9 \pm 0,2$	55
	^{232}Th	1,2–6,3	$3,0 \pm 0,8$	67
Солодь, разрез 1ЧТ-03 n=5	^{40}K	1,2–2,3	$1,8 \pm 0,2$	30
	^{238}U	0,4–2,7	$1,1 \pm 0,4$	88
	^{232}Th	2,3–5,9	$3,8 \pm 0,6$	38
Палевая переходная, разрез 6ЧТ-04 n=6	^{40}K	1,5–2,6	$2,2 \pm 0,2$	18
	^{238}U	1,3–2,9	$1,9 \pm 0,2$	32
	^{232}Th	5,0–8,4	$6,6 \pm 0,6$	23
Палевая осолоделая, разрез 6Т-05 n=6	^{40}K	2,7–3,4	$3,0 \pm 0,1$	7
	^{238}U	1,6–2,5	$2,0 \pm 0,2$	20
	^{232}Th	5,3–12,3	$9,6 \pm 1,1$	29
Чернозем, разрез 2ЧТ-03 n=8	^{40}K	1,5–3,1	$2,5 \pm 0,2$	21
	^{238}U	1,1–2,7	$2,0 \pm 0,2$	30
	^{232}Th	6,3–15,4	$10,1 \pm 1,1$	31
Аллювиальная темногумусовая, разрез 5ЧТ-04 n=7	^{40}K	2,2–3,0	$2,6 \pm 0,1$	11
	^{238}U	1,7–2,8	$2,4 \pm 0,1$	17
	^{232}Th	6,4–12,8	$10,6 \pm 0,7$	19

Примечание. Статистические показатели: lim – пределы изменения содержаний; $\bar{X} + S_{\bar{X}}$ – среднее и его ошибка; V – коэффициент вариации; n – объем выборки.

но их концентрации и распределение в почвах существенно изменяются под влиянием почвообразовательных процессов. Действительно, распределение ^{238}U в изучаемых почвах в зависимости от их почвенно-генетических особенностей носит различный характер. Так, в лесных почвах элювиального ряда исследуемого региона внутрипрофильное распределение ^{238}U может носить элювиальный (разр. 6Т-05), аккумулятивно-элювиальный (разр. 1ЧТ-03) и аккумулятивно-элювиально-иллювиальный характер (разр. 3ЧТ-03), тогда как в остальных изучаемых почвах, в луговых и степных – преимущественно аккумулятивный. Следовательно, в процессе как оподзоливания, так и осолодения ^{238}U активно выносятся из изучаемых почв, но при этом даже в данных почвах элювиального ряда в условиях слабокислой среды их поверхностных горизонтов отмечается биогенное накопление данного радионуклида. На сродство ^{238}U к ОВ почв и его способность к комплексообразованию с гумусовыми кислотами, что с одной стороны, обуславливает его депонирование в составе поверхностных и погребенных гумусовых горизонтов, а с другой – активную водную миграцию в почвах гумидной зоны, неоднократно указывали ранее (Перельман, 1989; Rachkova et al., 2010; Vodyanitskii, 2011; Собакин, Перк, 2013; Beznosikov et al., 2017; Chevychelov, Sobakin, 2017). Процесс биогенного накопления ^{238}U в исследованных почвах также подтверждается результатами корреляционного анализа. Так, статистически значимые ($r=0,95$) коэффициенты корреляции получены для связей ^{238}U – гумус в солоди ($r=0,982$) и палевой переходной почве ($r=0,988$). Также для данных почв оказались статистически значимыми ($r=0,95$) величины коэффициентов корреляции, рассчитанные для связей ^{238}U – глина в солоди ($r=0,885$), палевой переходной ($r=0,931$), черноземе

($r=0,800$) и аллювиальной темногумусовой почве ($r=0,958$).

Корреляционные связи между содержанием ^{238}U и гумуса, установленные для почв Центральной Якутии, также подтверждаются в аналогичных исследованиях для почв других регионов России. Так, статистически значимые коэффициенты корреляции для связей ^{238}U – гумус были обнаружены для серых лесных почв Краснодарского края ($r=0,75$) (Панюшкина, Нагалеvский, 2007), для солончака бугристого ($r=0,76$), солончака типичного ($r=0,88$) и светлокаштановой солонцеватой почвы ($r=0,77$) Терско-Кумской низменности (Asvarova et al., 2013).

Контрастность содержания ^{238}U в исследуемых почвах подтверждается его средними концентрациями, которые составляют $(0,9–2,4) \cdot 10^{-4} \%$ и максимально изменяются почти в 3 раза. При этом наибольшая вариабельность его внутрипрофильного содержания отмечается в лесных почвах элювиального ряда, т. е. в солоди ($V=88 \%$) и палево-бурой оподзоленной почве ($V=55 \%$). В остальных изучаемых почвах полученные значения коэффициентов вариации, как правило, не превышают 30 % (табл. 4).

Внутрипрофильное распределение ^{232}Th в исследуемых почвах, как и ^{238}U , носит более разнообразный характер. Так, в лесных почвах, т. е. в солоди, палево-бурой оподзоленной и палевой осолоделой почвах (разр. 1ЧТ-03, разр. 3ЧТ-03 и разр. 6Т-05) ^{232}Th распределяется по элювиально-иллювиальному, в аллювиальной темногумусовой (разр. 5ЧТ-04) – по аккумулятивному, а в черноземе и палевой переходной почве (разр. 2ЧТ-03 и разр. 6ЧТ-04) – по аккумулятивно-иллювиальному типу. Аккумулятивно-иллювиальный тип распределения отличается от аккумулятивного тем, что наряду с общим накоплением ^{232}Th в почвенном профиле по сравнению

с почвообразующей породой максимальные его концентрации главным образом отмечаются в иллювиальной толще (табл. 3). При этом, как правило, в изучаемых почвах ^{232}Th закрепляется в основном в составе первичных и вторичных глинистых минералов мелкодисперсных фракций почвенного мелкозема. Это положение подтверждается результатами корреляционного анализа. Так, статистически значимые ($p=0,95$) коэффициенты корреляции для связей ^{232}Th – глина и ^{232}Th – ил были получены для солоды ($r=0,885$ и $r=0,906$), палевой осолоделой ($r=0,911$ и $r=0,921$) и иллювиальной темногумусовой почвы ($r=0,958$ и $r=0,999$). В связи с этим необходимо отметить, что подобные связи ^{232}Th с глинистыми минералами фиксировались для подзолистых пропитанно-гумусовых почв Республики Коми (Shuktomova, Noskova, 2008) и составляли во фракции физической глины для ^{232}Th – монтморрилонит ($r=0,69$), а для Th – каолинит+хлорит ($r=0,72$).

Среднее содержание ^{232}Th в исследованных почвах равно $(3,0-10,6) \cdot 10^{-4} \%$ и изменяется максимально почти в 3 раза, при этом наибольшая вариабельность внутрипрофильного содержания данного радионуклида ($V=67 \%$) отмечается в палево-бурой оподзоленной (разр. ЗЧТ-03), а минимальная ($V=19 \%$) – в иллювиальной темногумусовой почве (разр. 5ЧТ-04).

Среднее содержание ^{238}U и ^{232}Th в изученных типах почв Центральной Якутии находится на уровне таковых, характерных для дерново-таежных, серых лесных и иллювиальных почв Иркутской области; дерново-подзолистых, луговых почв и черноземов юго-запада Алтайского края; серых лесных, горно-луговых черноземовидных, черноземов и иллювиально-луговых почв Краснодарского края; бурых горно-лесных и горно-луговых почв Центрального Кавказа (табл. 5). Вместе

с тем среднее количество ^{238}U и ^{232}Th в почвах Центральной Якутии несколько меньше средних концентраций данных радионуклидов, отмечаемых в горно-тундровых, горно-луговых и лугово-болотных почвах Юго-Восточного Алтая, а также меньше среднего содержания ^{238}U , фиксируемого в светло-каштановых почвах и солончаках Терско-Кумской низменности (табл. 5).

Найденные значения $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ для средних содержаний данных радионуклидов в исследуемых почвах изменялись в пределах 3,3–5,0 и были близки к таковым (3,8–5,9), обнаруженным для бурых горно-лесных и горно-луговых почв Центрального Кавказа. При этом в данных почвах Кавказа среднее содержание ^{238}U ($1,32 \cdot 10^{-4} \%$ – $1,84 \cdot 10^{-4} \%$) и ^{232}Th ($6,38 \cdot 10^{-4} \%$ – $7,87 \cdot 10^{-4} \%$) изменялось (Asvarova et al., 2012) в более узких пределах концентраций, чем в почвах Центральной Якутии. Также необходимо отметить, что для почв отдельных регионов России диапазон величин отношения $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ может расширяться (Кузнецов, Гребенщикова, 2009; Панюшкина, Нагалецкий, 2007) либо, наоборот, сужаться (Asvarova et al., 2013) по сравнению с почвами Центральной Якутии (табл. 5).

Более того, рассчитанные величины $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ для отдельных горизонтов конкретных типов изучаемых почв изменялись еще в более широком интервале значений от 0,7 до 7,6, т. е. максимально более чем на порядок. В то время как для почвообразующих пород исследуемых почв данное отношение было значительно уже и составляло 3,8–6,7 (см. табл. 3). Расширение диапазона значений данного отношения, по нашему мнению, обусловлено влиянием различных почвообразовательных процессов (гумусонакопления, оподзоливания, осолодения, внутрипочвенного оглинивания и др.), протекающих в данных почвах. При этом очевидно, что ^{238}U является

Таблица 5. Среднее содержание ^{238}U и ^{232}Th в почвах отдельных регионов РоссииTable 5. ^{238}U and ^{232}Th mean contents in soils of different regions in Russia

Регион	n·10 ⁻⁴ %		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	Источник
	^{238}U	^{232}Th		
Центральная Якутия	0,9-2,4	3,8-10,6	3,3-5,0	Наши данные
Иркутская область	2,16	8,32	2,6-8,0	Кузнецов, Гребенщикова, 2009
Юго-запад Алтайского края	0,6-2,1	2,4-8,1	-	Пузанов и др., 2016б
Юго-Восточный Алтай	1,7-4,3	7,3-14,8	-	Пузанов и др., 2016а
Краснодарский край	0,84-1,62	4,35-7,30	3,4-8,5	Панюшкина, Нагалеvский, 2007
Центральный Кавказ	1,32-1,84	6,38-7,87	3,8-5,9	Asvarova et al., 2012
Терско-Кумская низменность (Дагестан)	1,88-3,10	6,67-9,54	2,7-4,1	Asvarova et al., 2013

более активным мигрантом в почвах по сравнению с ^{232}Th , как это отмечалось ранее рядом исследователей (Баранов и др., 1963; Rachkova et al., 2010; Vodyanitskii, 2011).

Заключение

Содержание и распределение естественных радионуклидов ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в почвах Центральной Якутии определяется их уровнями концентраций в почвообразующих породах, а также влиянием почвообразовательных процессов, протекающих в данных почвах.

Минимальные концентрации ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K ($0,3 \cdot 10^{-4}$ – $0,6 \cdot 10^{-4}$ %, $2,0 \cdot 10^{-4}$ – $2,7 \cdot 10^{-4}$ и 2,3 %) отмечаются в сильновыветрелых песчаных отложениях верхнего уровня, а максимальные ($1,9 \cdot 10^{-4}$ – $2,5 \cdot 10^{-4}$ %, $9,6 \cdot 10^{-4}$ – $10,1 \cdot 10^{-4}$ и 3,0 %) – в современных аллювиальных песчаных отложениях пойменной фации нижнего уровня и лессовидных карбонатных суглинках среднего уровня Центрально-Якутской равнины.

Внутрипрофильное распределение ^{40}K в лесных почвах носит элювиальный характер, а в остальных почвах исследуемого региона – преимущественно равномерный. При этом среднее содержание ^{40}K в данных почвах изменяется от 1,8 до 3,0 при минимальной вариабельности концентраций ($V=7$ – 37 %).

Распределение ^{238}U и ^{232}Th в изучаемых почвах более разнообразное, чем таковое ^{40}K . При этом в лесных почвах элювиального ряда внутрипрофильное распределение ^{238}U может носить элювиальный, аккумулятивно-элювиальный и аккумулятивно-элювиально-иллювиальный характер, тогда как в остальных почвах данной территории – в большей степени аккумулятивный. Среднее содержание ^{238}U в почвах составляет $0,9 \cdot 10^{-4}$ – $2,4 \cdot 10^{-4}$ %, при значительной вариабельности концентраций ($V=17$ – 88 %). В исследованных почвах выявлены статистически достоверные корреляционные связи между содержанием ^{238}U , количеством гумуса и физической глины.

Внутрипрофильное распределение ^{232}Th в лесных почвах определяется по элювиальному, а в луговых и степных почвах – в основном по аккумулятивному или аккумулятивно-иллювиальному типу. Среднее содержание ^{232}Th в почвах Центральной Якутии изменяется значительно от $3,0 \cdot 10^{-4}$ до $10,6 \cdot 10^{-4}$ % при относительно высокой вариабельности концентраций ($V=19$ – 67 %). В отличие от урана торий закрепляется главным образом в составе мелкодисперсных фракций почвенного мелкозема, т. е. в составе глины и ила.

Список литературы / References

Алексахин Р.М. (1982) Некоторые достижения и задачи в исследовании поведения естественных и искусственных радионуклидов в почвах и растительности. *Почвоведение*, 6: 45-52 [Alexakhin R.M. (1982) Achievements and aims of the research on behavior of natural and artificial radionuclides in soils and plants. *Eurasian Soil Science* [Pochvovedenie], 6: 45-52 (in Russian)]

Аринушкина Е.В. (1970) *Руководство по химическому анализу почв*. М., Изд-во Моск. унта, 487 с. [Arinushkina E.V. (1970) *The manual on soil chemical analysis*. Moscow, Moscow State University, 487 p. (in Russian)]

Балыкин С.Н., Черных Д.В. (2008) Радионуклиды в почвах геохимических ландшафтов Северо-Восточного Алтая. *Мир науки, культуры, образования*, 4: 16-18 [Balykin S.N., Chernykh D.V. (2008) Radioactive nuclides in soils of geochemical landscapes of north-east Altai. *World of Science, Culture and Education* [Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya], 4: 16-18 (in Russian)]

Баранов В.И., Титаева Н.А. (1961) Содержание урана, тория, радия и иония в четвертичных отложениях р. Лены. *Геохимия*, 2: 110-114 [Baranov V.I., Titaeva N.A. (1961) Uranium, thorium, radium and ionium contents in Quaternary deposits of the Lena River. *Geochemistry* [Geokhimiya], 2: 110-114 (in Russian)]

Баранов В.И., Морозова Н.Г., Кунашева К.Г., Григорьев Г.И. (1963) Геохимия некоторых радиоактивных элементов в почвах. *Почвоведение*, 8: 11-20 [Baranov V.I., Morozova N.G., Kunasheva K.G., Grigoriev G.I. (1963) Geochemistry of certain radioactive elements in soils. *Eurasian Soil Science* [Pochvovedenie], 8: 11-20 (in Russian)]

Васильева Т.И., Чевычелов А.П. (2010) Минералогический состав основных типов почв Центральной Якутии. *Вестник Томского государственного университета*, 330: 176-178 [Vasilyeva T.I., Chevychelov A.P. (2010) Mineralogical composition of the main soil types of Central Yakutia. *Tomsk State University Journal* [Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta], 330: 176-178 (in Russian)]

Дмитриев Е.А. (2009) *Математическая статистика в почвоведении*. М., Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 328 с. [Dmitriev E.A. (2009) *Mathematical statistics in soil science*. Moscow, Librokom, 328 p. (in Russian)]

Еловская Л.Г. (1987) *Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии*. Якутск, ЯФ СО АН СССР, 172 с. [Elovskaya L.G. (1987) *The classification and diagnostics of permafrost soils in Yakutia*. Yakutsk, Ya.B. SD AS USSR, 172 p. (in Russian)]

Кузнецов П.В., Гребенщикова В.А. (2009) Распределение урана и тория в некоторых почвах Иркутской области. *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека*. Томск, с. 302-306 [Kuznetsov P.V., Grebenshchikova V.A. (2009) Uranium and thorium distribution in some soils types of Irkutsk Oblast. *Radioactivity and radioactive elements in the human environment*. Tomsk, p. 302-306 (in Russian)]

Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс» (2003) М., Центр метрологии, 16 с. [The method of radionuclide activity measurement using a scintillation gamma spectrometer and software "Progress" (2003) Moscow, Metrology Center, 16 p. (in Russian)]

Панюшкина Г.И., Нагалецкий В.Я. (2007) Распределение и миграция радионуклидов в почвенно-растительном покрове Краснодарского края. *Вестник Южного научного цен-*

mpa PАН, 3(2): 52-56 [Panyushkina G.I., Nagalevsky V.Y. (2007) Distribution and migration of radioactive nuclides in edaphic-vegetal covering of Krasnodar region. *Bulletin of the Southern Scientific Center RAS* [Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN], 3(2): 52-56 (in Russian)]

Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В. (2014) О содержании ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в лесных почвах Республики Беларусь. *Радиационная биология. Радиоэкология*, 54(2): 193-200 [Perevolotsky A.N., Perevolotskaya T.V. (2014) About the contents of ^{40}K , ^{226}Ra and ^{232}Th in forest soils of the Republic of Belarus. *Radioactive Biology. Radioecology* [Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya], 54(2): 193-200 (in Russian)]

Перельман А.И. (1989) *Геохимия*. Москва, Высшая школа, 528 с. [Perelman A.I. (1989) *Geochemistry*. Moscow, High school, 528 p. (in Russian)]

Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Рождественская Т.А., Балыкин Д.Н., Балыкин С.Н., Салтыков А.В., Горбачев И.В., Трошкова И.А. (2016а) Радионуклиды в почвах плато Укок (Юго-Восточный Алтай). *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека*. Томск, с. 531-534 [Puzanov A.V., Baboshkina S.V., Rozhdestvenskaya T.A., Balykin D.N., Balykin S.N., Saltykov A.V., Gorbachyov I.V., Troshkova I.A. (2016a) Radionuclides in soils of the Ukok Plateau (Southeastern Altai). *Radioactivity and radioactive elements in the human environment*. Tomsk, p. 531-534 (in Russian)]

Пузанов А.В., Рождественская Т.А., Бабошкина С.В., Ельчиногова О.А., Балыкин Д.Н., Балыкин С.Н., Салтыков А.В., Горбачев И.В., Трошкова И.А. (2016б) Содержание и распределение тяжелых естественных радионуклидов (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) в почвах бассейна р. Верхний Алей (юго-запад Алтайского края). *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека*. Томск, с. 534-537 [Puzanov A.V., Rozhdestvenskaya T.A., Baboshkina S.V., Elchininova O.A., Balykin D.N., Balykin S.N., Saltykov A.V., Gorbachyov I.V., Troshkova I.A. (2016б) Content and distribution of heavy natural radionuclides (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) in soils of the Upper Aley River basin (the South West of Altai Krai). *Radioactivity and radioactive elements in the human environment*. Tomsk, p. 534-537 (in Russian)]

Роде А.А. (1971) *Система методов исследования в почвоведении*. Новосибирск, Наука, 92 с. [Rode A.A. (1971) *The system of research methods in soil science*. Novosibirsk, Nauka, 92 p. (in Russian)]

Розанов Б.Г. (1983) *Морфология почв*. М., Изд-во Моск. ун-та, 320 с. [Rozaov B.G. (1983) *Soil morphology*. Moscow, Moscow State University, 320 p. (in Russian)]

Собакин П.И., Чевычелов А.П., Ушницкий В.Е. (2004) Радиоэкологическая обстановка на территории Якутии. *Радиационная биология. Радиоэкология*, 44(3): 283-288 [Sobakin P.I., Chevychelov A.P., Ushnitsky V.E. (2004) Radioecological environment in Yakutia. *Radioactive Biology. Radioecology* [Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya], 44(3): 283-288 (in Russian)]

Собакин П.И., Перк А.А. (2013) Радиоактивные элементы в почвах Якутии. *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*, 5: 77-86 [Sobakin P.I., Perk A.A. (2013) Radioactive elements in soils of Yakutia. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences* [Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk], 5: 77-86 (in Russian)]

Сухоруков Ф.Б., Щербов Б.П., Страховенко В.Д., Смоляков Б.С., Кириллина В.И., Проккопьев Ю.Н. (2001) *Экологическая обстановка (радионуклиды, тяжелые металлы) территорий Нюрбинского и Усть-Алданского улусов Республики Саха (Якутия)*. Якутск, 155 с.

[Sukhorukov F.B., Shcherbov B.P., Strakhovenko V.D., Smolyakov B.S., Kirillina V.I., Prokopyev Yu.N. (2001) *Environmental situation (radionuclides, heavy metals) of the territories of Nyurbinsky and Ust-Aldansky uluses of the Republic of Sakha (Yakuita)*. Yakutsk, 155 p. (in Russian)]

Унканжинов Г.Д., Ускова Б.Ц., Болдырева Л.А., Тертышная А.Г. (2012) Естественные радионуклиды в почвах реперных участков Республики Калмыкия. *Плодородие*, 6: 43-45 [Unkanzhinov G.D., Uskova B.Ts., Boldyreva L.A., Ternyshnaya A.G. (2012) Natural radionuclides in soils of the reference plots in the Republic of Kalmykia. *Fertility [Plodorodie]*, 6: 43-45 (in Russian)]

Akyil S., Yusof A.M. (2007) The distribution of uranium and thorium in samples taken from different polluted marine environment. *Journal of Hazardous Materials*, 144(1-2): 564-569

Asvarova T.A., Abdulaeva A.S., Magomedov M.A. (2012) Natural radionuclides in rocks and soils of the high-mountain regions of the Great Caucasus. *Eurasian Soil Science*, 45(6): 625-637

Asvarova T.A., Zalibekov Z.G., Abdullaeva A.S. (2013) Effect of desertification processes on migration intensity of radionuclides in soils of Terek-Kuma Lowland. *Arid Ecosystems*, 3(1): 16-21

Baykara O., Doğru M. (2009) Determination of terrestrial gamma ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K in soil along fracture zones. *Radiation Measurements*, 44(1): 116-121

Belivermis M. (2012) Vertical Distributions of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{232}Th and ^{226}Ra in soil samples from Istanbul and its environs, Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*, 151(3): 511-521

Beznosikov V.A., Lodygin E.D., Shuktomova I.I. (2017) Artificial and natural radionuclides in soils of the southern and middle taiga zones of Komi Republic. *Eurasian Soil Science*, 50(7): 814-819

Chevychelov A.P., Skrybykina V.P., Vasil'eva T.I. (2009) Geographic and genetic specificity of permafrost-affected soils in central Yakutia. *Eurasian Soil Science*, 42(6): 600-608

Chevychelov A.P., Sobakin P.I. (2017) Radioactive contamination of alluvial soils in the taiga landscapes of Yakutia with ^{137}Cs , ^{226}Ra , and ^{238}U . *Eurasian Soil Science*, 50(12): 1535-1544

Egorova I.A., Kislitsina Yu.V., Puzanov A.V. (2012) Radionuclides in soils of Northwestern altai. *Geography and Natural Resources*, 33(3): 208-211

Malanca A., Gaidolfi L., Pessina V., Dallara G. (1996) Distribution of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in soils of Rio Grande Do Norte (Brazil). *Journal of Environmental Radioactivity*, 30(1): 55-67

Navas A., Soto J., Machn J. (2002) ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{232}Th and ^{40}K activities in soil profiles of the Flysch Sector (Central Spanish Pyrenees). *Applied Radiation and Isotopes*, 57(4): 579-589

Rachkova N.G., Shuktomova I.I., Taskaev A.I. (2010) The state of natural radionuclides of uranium, radium, and thorium in soils. *Eurasian Soil Science*, 43(6): 651-658

Shuktomova I.I., Noskova L.M. (2008) Modes of ^{232}Th occurrence in fine fractions in mountain soils. *Geochemistry International*, 46(8): 840-844

Vodyanitskii Yu.N. (2011) Chemical aspects of uranium behavior in soils: A review. *Eurasian Soil Science*, 44(8): 862