

4.1.5. МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА (СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 631.41 (470.32)

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_3_128

EDN: TIXEPV

Возможные способы мелиорации почв при загрязнении радиоактивными изотопами

Надежда Сергеевна Горбунова^{1✉}, Елена Владимировна Куликова², Юрий Алексеевич Куликов³

¹Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

²Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия

³ООО «ИнфоБиС», Саратов, Россия

¹vilian@list.ru✉

Аннотация. Рассмотрены особенности сорбции органическим веществом и илистой фракцией черноземов естественных радиоактивных изотопов ^{40}K , ^{228}Th и ^{226}Ra с целью дальнейшего использования данных сорбционных способностей для мелиорации и восстановления радиоактивно загрязненных территорий. Для получения данных по сорбционным способностям органического вещества и илистой фракции к радиоактивным изотопам были проведены лабораторные исследования, в том числе модельные эксперименты, в которых определяли зависимости содержания гумуса, ^{40}K , ^{228}Th и ^{226}Ra и илистой фракции почв. Установлено, что наиболее интенсивное комплексобразование отмечается между органическим веществом и радиоактивными изотопами. Сорбционная способность илистой фракции черноземов к ^{40}K , ^{228}Th и ^{226}Ra значительно слабее. В черноземах под лесными насаждениями отмечается достоверно большее содержание радионуклидов. Явление обусловлено тем, что лесополосы являются биологическим барьером на пути пространственного перераспределения радиоизотопов, в том числе и естественного происхождения. Кроме того, интенсивное гумусонакопление под лесной растительностью способствует и более активной сорбционной способности органического вещества к радионуклидам. Биогенный фактор играет огромную роль в миграции ^{40}K , ^{228}Th и ^{226}Ra , а также создает пространственную неоднородность в распределении естественных радионуклидов. Исходя из полученных данных можно рекомендовать агролесомелиоративные мероприятия на почвах, подвергшихся радиоактивному загрязнению, для их частичного восстановления и предотвращения дальнейшей миграции радиоизотопов. Кроме того, исследования проводились в Каменно-степном опытном стационаре, который имеет статус заповедной территории, поэтому полученные данные можно использовать при мониторинговых исследованиях при оценке степени радиоактивного загрязнения территории.

Ключевые слова: сорбционная способность, естественные радионуклиды, удельная радиоактивность, органическое вещество черноземов, радиоактивные изотопы, калий, торий, радий

Для цитирования: Горбунова Н.С., Куликова Е.В., Куликов Ю.А. Возможные способы мелиорации почв при загрязнении радиоактивными изотопами // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2023. Т. 16, № 3(78). С. 128–135. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_3_128-135.

4.1.5. LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGRICULTURAL PHYSICS (AGRICULTURAL SCIENCES)

Original article

Possible methods of soil reclamation contaminated with radioactive isotopes

Nadezhda S. Gorbunova^{1✉}, Elena V. Kulikova², Yuriy A. Kulikov³

¹Voronezh State University, Voronezh, Russia

²Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

³InfoBiS LLC, Saratov, Russia

¹vilian@list.ru✉

Abstract. The authors consider the peculiarities of sorption of ^{40}K , ^{228}Th and ^{226}Ra natural radioactive isotopes by organic matter and clay fraction of chernozems with the aim of further use of these peculiarities for reclamation and restoration of radioactively contaminated areas. In order to obtain the data on the sorption capacity of organic matter and clay fraction for radioactive isotopes, laboratory studies were conducted, including simulation experiments, in which the dependences were determined between the content of humus, ^{40}K , ^{228}Th and ^{226}Ra and clay fraction of soils. It has been established that the most intensive complexation is observed between organic matter and radioactive isotopes. The sorption capacity of clay fraction of chernozems for ^{40}K , ^{228}Th , and ^{226}Ra is much weaker. Chernozems under forest plantations show a significantly higher content of radionuclides. This phenomenon is due to the fact that forest belts are a biological barrier to the spatial redistribution of radioisotopes, including those of natural origin. In addition, intense humus accumulation under forest vegetation also contributes to a higher sorption capacity of organic matter for radionuclides. The biogenic factor plays a huge role in the migration of ^{40}K , ^{228}Th and ^{226}Ra , and also creates spatial heterogeneity in the distribution of natural radionuclides. Based on the obtained data, it is possible to recommend agroforestry-enhancing measures on soils exposed to radioactive contamination for their partial restoration and

prevention of further migration of radioisotopes. In addition, studies were carried out in the Stone-Steppe Forest Experimental Station, which has the status of a conservation area, so the obtained data can be used in monitoring studies to assess the degree of radioactive contamination of the territory.

Key words: sorption capacity, natural radionuclides, specific radioactivity, organic matter of chernozems, radioactive isotopes, potassium, thorium, radium

For citation: Gorbunova N.S., Kulikova E.V., Kulikov Yu.A. Possible methods of reclamation of soils contaminated with radioactive isotopes. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2023;16(3):128-135. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_3_128-135.

Современное состояние биосферы в целом и аграрных ландшафтов в частности тесным образом связано с интенсивным развитием ядерной энергетики и вовлечением данной отрасли во все сферы жизнедеятельности, включая не только промышленность, но и медицину, сельское хозяйство [8, 16, 17]. Такое активное вовлечение, несомненно, сказывается на окружающей среде и приводит к увеличению содержания как искусственных, так и естественных радионуклидов [3, 4, 5, 8, 16, 17]. Безусловно, вследствие проведения регулярных ядерных испытаний, наиболее актуальным является вопрос о радиоактивном загрязнении окружающей среды и почв искусственными радионуклидами. Исследования по данному вопросу активно проводятся как в России, так и в зарубежных странах [1, 7, 9, 10, 11, 13].

В настоящее время все большую актуальность приобретает проблема рекультивации загрязненной территории путем различных мелиоративных приемов, в том числе лесомелиорации. В данном вопросе важной особенностью почв является то, что их органическое вещество и илистая фракция способны сорбировать радионуклиды и выступать в качестве биогеохимических барьеров на пути как радиальной, так и латеральной их миграции [1, 2, 12, 17]. Для восстановления окружающей среды необходимо иметь сведения о естественном, изначальном состоянии почв [6]. Следует отметить, что для радионуклидов нет единой системы нормирования, как, например, для тяжелых металлов и других загрязнителей. Кроме того, естественная радиоактивность присуща всем почвам, данное свойство они наследуют от почвообразующей породы [14].

По мнению ряда авторов, лесные экосистемы выступают биологическим барьером на пути латеральной миграции радионуклидов. Важной особенностью является то, что в лесных экосистемах главная роль принадлежит именно биогенной миграции радионуклидов, при этом водная миграция занимает подчиненное положение [15].

Для получения данных о естественной радиоактивности, которая не является следствием современного интенсивного развития ядерной энергетики, исследования проводились на заповедной территории, расположенной на достаточном удалении от всех возможных источников загрязнения. Таким участком послужило Каменно-степное опытное хозяйство, расположенное в Таловском районе Воронежской области. Отбор почвенного материала осуществлялся в черноземах под лесополосой № 40 и на залежи, расположенной в непосредственной близости от лесополосы. Залежь некосимая, была заложена в 1882 г. и официально имеет заповедный статус.

Цель исследования – установить естественную радиоактивность черноземов в почвах, имеющих заповедный статус; с помощью процессов моделирования изучить сорбционную способность органического вещества и илистой фракции к естественным радионуклидам; оценить возможность использования при мелиорации, в том числе агролесомелиорации, лесополос как естественного биохимического барьера на пути латеральной миграции радионуклидов.

Характер растительности этого участка – разнотравно-злаковый. В лесополосе растительность представлена различными древесными породами, при этом основной лесобразующей породой является дуб черешчатый (*Quercus robur*), его доля составляет 50%. Далее в порядке убывания представлены клен татарский (*Acer tataricum*), береза бородавчатая (*Betula pendula*) и вяз обыкновенный (*Ulmus laevis*).

С целью изучения основных физических и химических показателей черноземов, а также их естественной удельной радиоактивности проводился отбор почвенных образцов

сплошной колонкой каждые 5 см до глубины 50 см в 5-кратной повторности. В камеральных условиях, в лабораториях кафедры экологии и земельных ресурсов Воронежского государственного университета определяли гранулометрический состав методом пипетки по Н.А. Качинскому с обработкой почвы пирофосфатом натрия; углерод органических соединений почвы ($C_{орг.}$) – методом И.В. Тюрина в модификации В.Н. Симакова.

Для получения данных о естественной радиоактивности черноземов проведены радиометрические исследования с гамма-спектрометрическим анализом почвенных проб в лаборатории кафедры ядерной физики ВГУ на лабораторном низкофоновом гамма-спектрометрическом комплексе с германий-литиевым детектором, чувствительный объем которого составляет 85 см^3 . Калибровочная энергетическая характеристика спектрометра аппроксимирована в линейном приближении с учетом зависимости энергетического разрешения от энергии, что позволило идентифицировать исследуемые радионуклиды по пику полного поглощения гамма-излучения. Калибровка спектрометра по энергии гамма-квантов проводилась по многоэталонному изотопу ^{152}Eu с периодом полураспада 13,54 года. Эффективность регистрации устанавливалась методом калибровки с использованием специального программного обеспечения.

С целью получения модельных схем по интенсивности сорбции радионуклидов органическим веществом и илистой фракцией черноземов определяли зависимости между различным содержанием гумуса и удельной радиоактивностью черноземов. Результаты аналитических исследований обрабатывались статистически с использованием программ Statistika 6,0 и Microsoft Excel 2010.

Черноземы Каменно-степного опытного хозяйства сформировались на карбонатных покровных суглинках и глинах, свой тяжелый гранулометрический состав они унаследовали от них. В верхней части профиля доля частиц менее 0,01 мм в среднем составляет 52%, с глубиной их количество постепенно возрастает до 67%. Результаты гранулометрического исследования черноземов свидетельствуют о преобладании в них фракции размером 0,05–0,01 мм – крупнопылеватая, ее доля составляет 35%. Но с точки зрения сорбционной способности интерес представляет илистая фракция, с частицами размером менее 0,001 мм, на долю которой приходится 26,1%. По профилю исследуемых почв илистая фракция распределена довольно равномерно.

Наибольшее количество органического вещества отмечается в верхних слоях почв, расположенных под лесной полосой и некосимой залежью. Среднее содержание гумуса составляет соответственно $8,11 \pm 0,15\%$ и $7,68 \pm 0,21\%$. Черноземы диагностируются как среднегумусные. Интенсивному гумусонакоплению способствует обилие древесно-кустарниковой растительности под лесополосой, а также лугово-злаковое разнотравье залежи. Растительность активно вовлекается в биологический круговорот, ежегодно давая как растительный опад, так и огромную биомассу отмерших корневых систем растений. Вниз по почвенному профилю содержание органического вещества постепенно убывает, а в почвообразующей породе исчезает практически совсем, поскольку в ней большинство биологических процессов либо замедляется, либо исчезает полностью. Содержание естественных радиоизотопов в исследуемых почвах уменьшается в следующем ряду: $^{40}\text{K} > ^{228}\text{Th} > ^{226}\text{Ra}$ (табл. 1).

Калий ^{40}K имеет большой период полураспада – 1,248109 лет, поэтому его формирование в наземном почвенном покрове происходило достаточно давно. За миллионы лет произошло его профильное перераспределение с фиксацией преимущественно в верхних гумусовых горизонтах почв. Согласно данным Е. Мингареева с соавт., удельная радиоактивность ^{40}K имеет очень широкий диапазон [12]. Собственные данные (табл. 1) свидетельствуют о колебаниях удельной радиоактивности ^{40}K от 461,3 до 522,4 Бк/кг при среднем содержании 522 Бк/кг в слое 0–20 см. Максимальное значение удельной радиоактивности зафиксировано в черноземах под лесополосой. Вниз по профилю отмечается довольно постепенное снижение активности до 351,3 Бк/кг (рис. 1).

Таблица 1. Статистические показатели удельной активности естественных радионуклидов (Бк/кг) в верхнем слое исследуемых почв (0–20 см), n = 7

Радионуклид	$\bar{x} \pm s_x$	min – max	Коэффициент вариации, %
^{40}K	$495,1 \pm 33,6$	461,3–522,4	15
^{228}Th	$31,5 \pm 3,5$	29,0–34,0	13
^{226}Ra	$22,9 \pm 3,1$	19,8–26,0	14

Примечание: n – количество образцов; \bar{x} – среднее арифметическое; s_x – ошибка среднего арифметического.

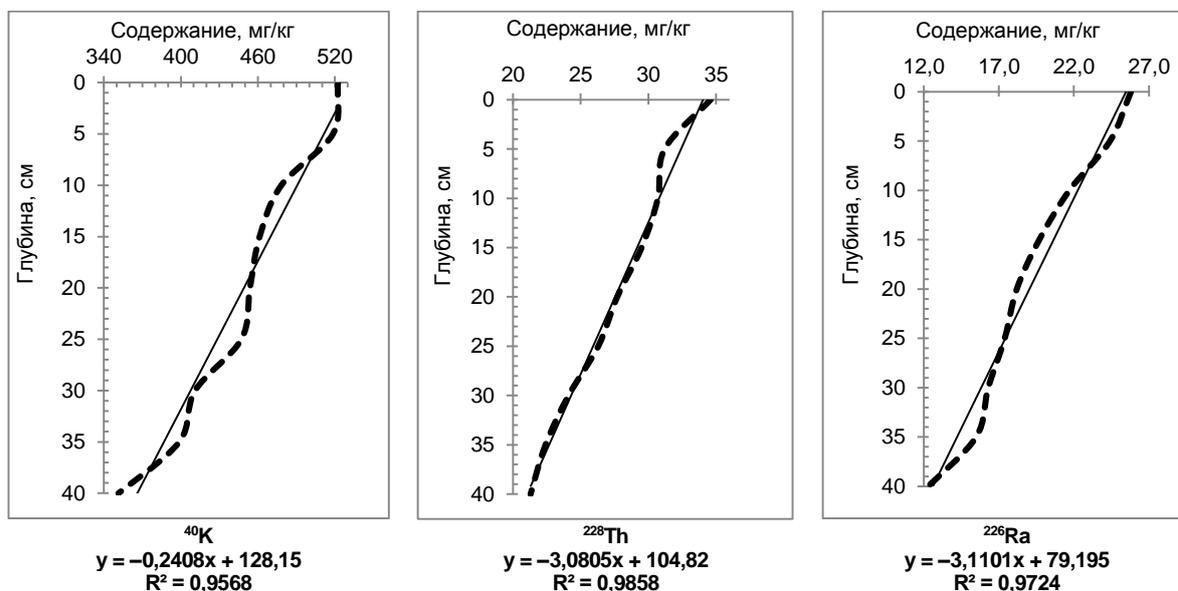


Рис. 1. Графическое отображение, уравнения и линии регрессии поведения естественных радионуклидов при уменьшении содержания органического вещества (гумуса) в почвах

Коэффициент пространственной вариации, равный 15%, указывает на среднюю степень распределения изотопа ^{40}K в пространстве. С одной стороны, за многие годы произошло его перераспределение в почвенном покрове, а с другой стороны, малый биологический круговорот продолжает вовлекать элемент в свой цикл, делая достаточно разнообразным его распределение в пространстве.

Путем постановки серии модельных экспериментов было подтверждено высокое сорбционное сродство между органическим веществом исследуемых черноземов и радиоактивным изотопом ^{40}K . Фактическая линия регрессии практически совпадает с теоретической (рис. 2, а).

Данная закономерность, а также высокий коэффициент корреляции ($R^2 = 0,96$) подтверждают явление сорбционной способности органического вещества к радиоизотопу. Что касается илистой фракции (рис. 2, б), то фактическая линия регрессии имеет лишь незначительное приближение к теоретическому распределению. Низкий коэффициент корреляции ($R^2 = 0,34$) указывает на незначительное влияние данного показателя. Даже если сорбционные процессы и осуществляются на поверхности частиц размером меньше 0,001 мм, то их интенсивность невысокая. Ведущая роль принадлежит гумусу.

Торий ^{228}Th . В отношении тория нет единого мнения о его подвижности в биосфере, которая определяется главным образом с миграцией в почвах в виде органических комплексов. Согласно исследованиям Н.Г. Рачковой, И.И. Шуктовой и А.И. Таскаева, изотоп образует комплексные соединения с лигандами органического вещества [2]. Полученные нами данные подтверждают данное положение, поскольку максимальное содержание ^{228}Th отмечается в слое 0–20 см под лесополосой – 34,0 Бк/кг. Аналогично радиоизотопу ^{40}K , удельная радиоактивность ^{228}Th также постепенно снижается до 21,3 Бк/кг (рис. 1).

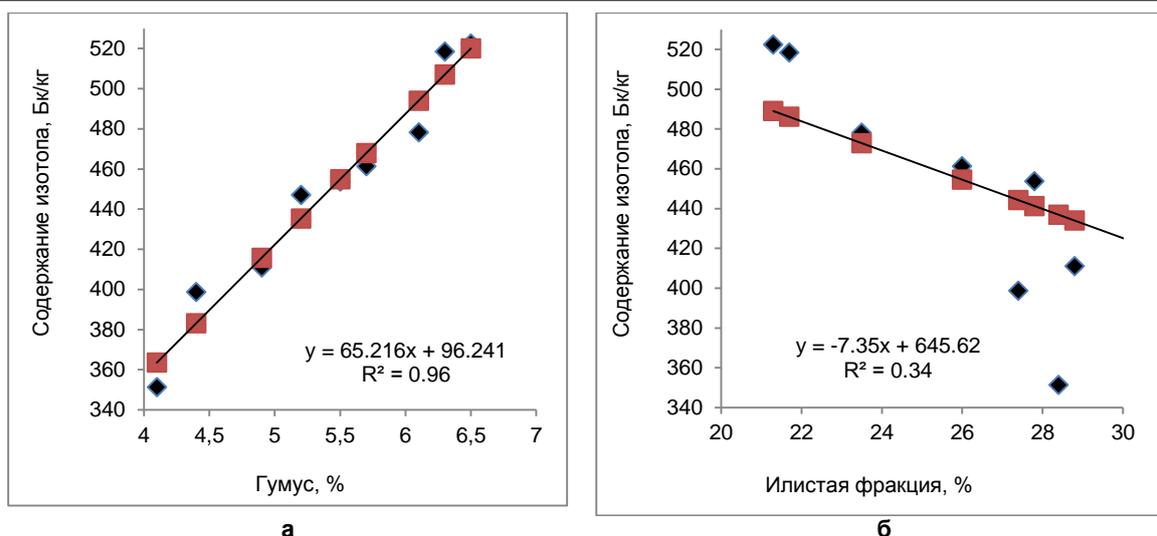


Рис. 2. Зависимость сорбции изотопа ^{40}K от содержания органического вещества (гумуса) и илистой фракции черноземов, не испытывающих техногенного загрязнения

В пространстве поведение тория тоже достаточно неоднородное, коэффициент пространственного варьирования составляет 13% (средняя степень). На пространственное распределение тория большое влияние оказывает живое вещество, что подтверждается и модельными экспериментами. Полученная фактическая линия регрессии (рис. 3, а) близка к теоретическому распределению, что подтверждает высокое сродство радиоактивного изотопа ^{228}Th к органическому веществу. Высокую зависимость подтверждает и коэффициент корреляции, равный 0,97.

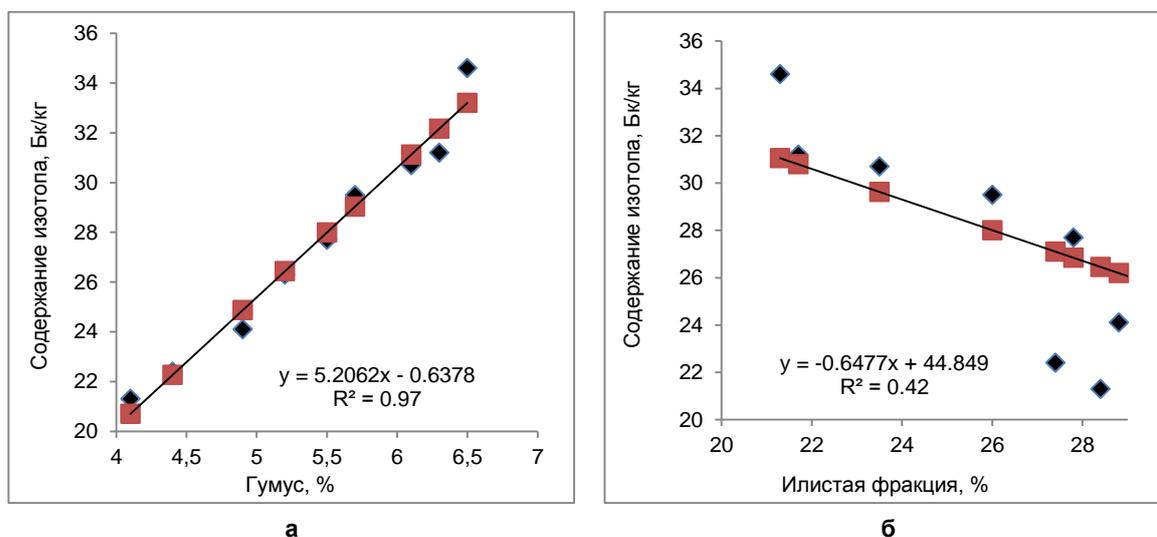


Рис. 3. Зависимость сорбции изотопа ^{228}Th от содержания органического вещества (гумуса) и илистой фракции черноземов, не испытывающих техногенного загрязнения

Моделирование процессов сорбции тория илистой фракции показало некоторое удаление фактического распределения от теоретически возможного (рис. 3, б), но при этом коэффициент корреляции несколько выше ($R^2 = 0,42$), чем в случае распределения изотопа калия и илистой фракции. Поэтому доля участия илистой фракции в процессе фиксации изотопа ^{228}Th значительнее, чем ^{40}K .

Радий ^{226}Ra . Считается, что радий постоянно синтезируется в результате радиоактивного распада урана и тория, после чего изотоп аккумулируется в верхней части земной коры. Согласно полученным данным, удельная радиоактивность радия в исследуемых черноземах составляет 22,9 Бк/кг, при колебании от 19,8 до 26,0 Бк/кг (табл. 1). Максимальное значение отмечается в почвах под лесополосой и обусловлено интенсивным гуму-

сообразованием и гумусонакоплением. Кроме того, как отмечают О. Цветнова, А. Щеглов и А. Кляшторин, лесополосы служат латеральным биологическим барьером на пути миграции многих радионуклидов, в том числе и естественного происхождения [15].

Распределение изотопа ^{226}Ra в пространстве имеет среднюю степень варьирования, $V = 14\%$. Период полураспада радия 1590 лет, но поскольку, как было отмечено выше, он постоянно синтезируется, то и процессы перераспределения идут непрерывно, давая тем самым пространственную неоднородность. Методом моделирования получены графики фактического и теоретического распределения при сорбции изотопа ^{226}Ra органическим веществом черноземов (рис. 4, а).

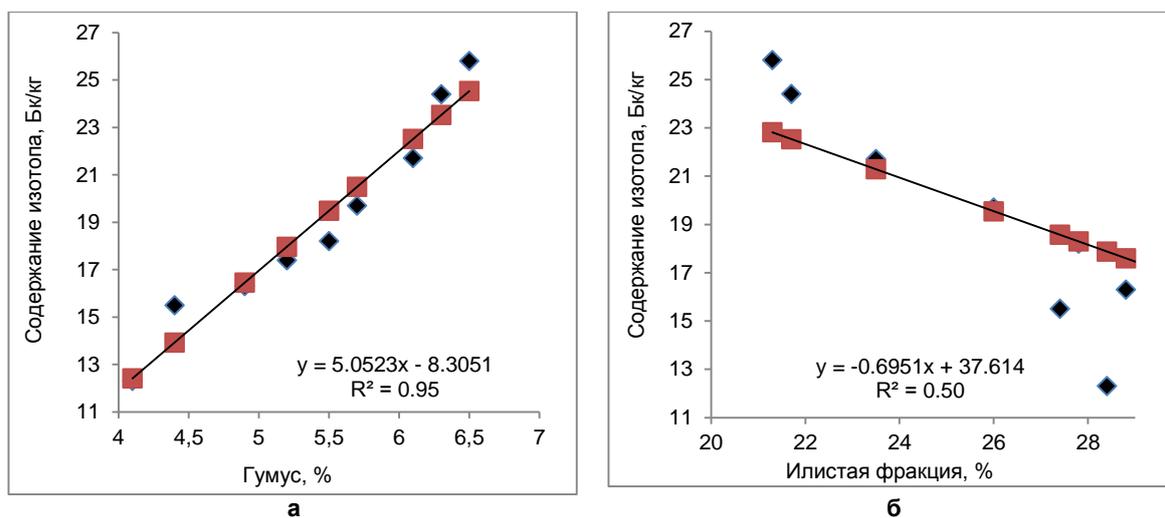


Рис. 4. Зависимость сорбции изотопа ^{226}Ra от содержания органического вещества (гумуса) и илистой фракции черноземов, не испытывающих техногенного загрязнения

Линии практически совпадают, что свидетельствует о высокой сорбционной способности. Данная зависимость подтверждается и корреляционным анализом, $R^2 = 0,95$. Изотоп ^{226}Ra способен сорбироваться и илистой фракцией, не так активно, как гумусом, но, по сравнению с другими исследуемыми радиоизотопами, между распределением фракции менее 0,001 мм и ^{226}Ra коэффициент корреляции равен 0,50 (рис. 4, б).

Выводы

Исследуемые черноземы заповедной территории не испытывают какого-либо техногенного воздействия и не вовлекаются в том числе в сельскохозяйственное производство. Благодаря этому почвы богаты органическим веществом и по содержанию гумуса относятся к среднегумусным. Для изучаемых почв характерно также высокое процентное содержание илистой фракции, которая обладает высокими сорбционными свойствами.

Установлено, что поглощение радиоактивных изотопов осуществляется преимущественно за счет комплексобразования с органическим веществом черноземов. Как следствие, накопление радионуклидов отмечается также в верхних горизонтах почв, обогащенных гумусом. Поскольку наибольшее содержание органического вещества отмечается в черноземах под лесополосой, там же и активнее всего происходит осаждение ^{40}K , ^{228}Th , ^{226}Ra . Древесные насаждения выступают естественным биологическим барьером на пути латеральной миграции радиоактивных изотопов. Поэтому агролесомелиоративные мероприятия являются весьма действенным способом при рекультивации территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению.

Модельными экспериментами доказана высокая сорбционная способность органического вещества черноземов к исследуемым радиоизотопам. Фактическая линия регрессии близка к теоретическому распределению для всех исследуемых радиоизотопов. Полученные коэффициенты корреляции также подтверждают высокую сорбционную способность гумуса. Этим же методом выявлено, что илистая фракция не обладает столь силь-

ными сорбционными свойствами к радионуклидам, фактическое распределение линий регрессии не совпадает с теоретическим. Между исследуемыми изотопами и илистой фракцией получены низкие корреляционные зависимости. Для ^{40}K , ^{228}Th , ^{226}Ra характерна средняя степень пространственного варьирования, которая связана с активным участием биологического фактора в перераспределение радионуклидов в пространстве.

Исследуемая территория имеет заповедный статус, поэтому полученные данные по естественной удельной радиоактивности черноземов предлагается использовать в качестве эталонных при оценке радиационного загрязнения территории, а также при проектировании мелиоративных мероприятий, направленных на восстановление загрязненных территорий.

Список источников

1. Апарин Б.Ф., Мингареева Е.В., Санжарова Н.И. и др. Содержание радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs) в черноземах Волгоградской области разных сроков отбора образцов // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1457–1467. DOI: 10.7868/S0032180X17120036.
2. 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.
3. Angjeleska A., Dimitrieska-Stojković E., Hajrulai-Musliu Z. et al. Natural radioactivity levels and estimation of radiation exposure in agricultural soils from Skopje city region // Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering. 2020. Vol. 39(1). Pp. 77–87. DOI: 10.20450/mjccce.2020.1904.
4. Azeez H.H., Mansour H.H., Ahmad S.T. Effect of using chemical fertilizers on natural radioactivity levels in agricultural soil in the Iraqi Kurdistan region // Polish Journal of Environmental Studies. 2020. Vol. 29(2). Pp. 1059–1068. DOI: 10.15244/pjoes/106032.
5. Belyaeva O., Movsisyan N., Pyuskyulyan K. et al. Yerevan soil radioactivity: Radiological and geochemical assessment // Chemosphere. 2021. Vol. 265. Article no. 129173. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129173.
6. Boente C., Albuquerque M.T.D., Gallego J.R. et al. Compositional baseline assessments to address soil pollution: An application in Langreo, Spain // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 812. Article no. 106614. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152383.
7. Chevychelov A., Sobakin P., Gorokhov A. et al. Migration of ^{238}U and ^{226}Ra radionuclides in technogenic permafrost taiga landscapes of Southern Yakutia, Russia // Water (Switzerland). 2021. Vol. 13(7). Article no. 966. DOI: 10.3390/w13070966.
8. Ekong G.B., Akpa T.C., Umaru I. et al. Baseline radioactivity and associated radiological hazards in soils around a proposed nuclear power plant facility, South-South Nigeria // Journal of African Earth Sciences. 2021. Vol. 182. Article no. 104289. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2021.104289.
9. Hromyk O., Ilyin L., Grygus I. et al. Radiation monitoring of agricultural soils of the Volyn region in Ukraine // Roczniki Państwowego Zakładu Higieny. 2020. Vol. 71(4). Pp. 377–382. DOI: 10.32394/rpzh.2020.0139.
10. Liu Y., Zhou W., Liu H. et al. Spatial variability and radiation assessment of the radionuclides in soils and sediments around a uranium tailings reservoir, south of China // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2020. Vol. 324(1). Pp. 33–42. DOI: 10.1007/s10967-020-07077-w.
11. Luiz do Carmo Leal A., Lauria D.C., Riberio F.C.A. et al. Spatial distributions of natural radionuclides in soils of the state of Pernambuco, Brazil: Influence of bedrocks, soils types and climates // Journal of Environmental Radioactivity. 2020. Vol. 211. Pp. 106046. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2019.106046.
12. Mingareeva E., Aparin B., Sukhacheva E. et al. Content of radionuclides in soils of the Voronezh region // Technological Advancements in Construction. "Lecture Notes in Civil Engineering". Cham: Springer Verlag, 2022. Vol. 180. Pp. 1–12. DOI: 10.1007/978-3-030-83917-8_1.
13. Movsisyan N., Demirtchyan G., Pyuskyulyan K. et al. Identification of radionuclides' altitudinal distribution in soil and mosses in highlands of Armenia // Journal of Environmental Radioactivity. 2021. Vol. 231. Article no. 106550. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106550.
14. Sarap N.B., Krneta Nikolić J.D., Trifković J. et al. Assessment of radioactivity contribution and transfer characteristics of natural radionuclides in agroecosystem // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2020. Vol. 323(2). Pp. 805–815. DOI: 10.1007/s10967-019-06986-9.
15. Tsvetnova O., Shcheglov A., Klyashtorin A. ^{137}Cs and K annual fluxes in a cropland and forest ecosystems twenty-four years after the Chernobyl accident // Journal of Environmental Radioactivity. 2018. Vol. 195. Pp. 79–89. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.09.019.
16. Tuo F., Peng X., Zeng Z. et al. Natural radionuclides distribution, depth profiles of caesium-137 and risk assessment for soil samples in west regions of China // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2021. Vol. 327. Pp. 831–838. DOI: 10.1007/s10967-020-07551-5.
17. Vodyanitskii Y., Minkina T.M., Bauer T.V. Sources of lanthanides in soils and estimation of their hazards // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. 2021. Vol. 21(3). Article no. 024. DOI: 10.1144/geochem2021-024.

References

1. Aparin B.F., Mingareeva E.V., Sanzharova N.I. et al. Soderzhanie radionuklidov (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs) v chernozemakh Volgogradskoj oblasti raznykh srokov otbora obraztsov [The content of radionuclides (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs) in the chernozems of Volgograd region of different periods of sampling]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2017;12:1457-1467. DOI: 10.7868/S0032180X17120036. (In Russ.).

2. Rachkova N.G., Shuktomova I.I., Taskaev A.I. Sostojanie v pochvakh estestvennykh radionuklidov urana, radiya i toriya (obzor) [Status of natural radionuclides of uranium, radium and thorium in soils (Review)]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2010;6:698-705. (In Russ.).
3. Angjeleska A., Dimitrieska-Stojković E., Hajrulaj-Musliu Z. et al. Natural radioactivity levels and estimation of radiation exposure in agricultural soils from Skopje city region. *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*. 2020;39(1):77-87. DOI: 10.20450/mjccce.2020.1904.
4. Azeez H.H., Mansour H.H., Ahmad S.T. Effect of using chemical fertilizers on natural radioactivity levels in agricultural soil in the Iraqi Kurdistan region. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2020;29(2):1059-1068. DOI: 10.15244/pjoes/106032.
5. Belyaeva O., Movsisyan N., Pyuskyulyan K. et al. Yerevan soil radioactivity: Radiological and geochemical assessment. *Chemosphere*. 2021;265:129173. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129173.
6. Boente C., Albuquerque M.T.D., Gallego J.R. et al. Compositional baseline assessments to address soil pollution: An application in Langreo, Spain. *Science of the Total Environment*. 2022;812:106614. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152383.
7. Chevychelov A., Sobakin P., Gorokhov A. et al. Migration of ²³⁸U and ²²⁶Ra radionuclides in technogenic permafrost taiga landscapes of Southern Yakutia, Russia. *Water (Switzerland)*. 2021;13(7):966. DOI: 10.3390/w13070966.
8. Ekong G.B., Akpa T.C., Umaru I. et al. Baseline radioactivity and associated radiological hazards in soils around a proposed nuclear power plant facility, South-South Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*. 2021;182:104289. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2021.104289.
9. Hromyk O., Ilyin L., Grygus I. et al. Radiation monitoring of agricultural soils of the Volyn region in Ukraine. *Roczniki Państwowego Zakładu Higieny*. 2020;71(4):377-382. DOI: 10.32394/rpzh.2020.0139.
10. Liu Y., Zhou W., Liu H. et al. Spatial variability and radiation assessment of the radionuclides in soils and sediments around a uranium tailings reservoir, south of China. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2020;324(1):33-42. DOI: 10.1007/s10967-020-07077-w.
11. Luiz do Carmo Leal A., Lauria D.C., Riberio F.C.A. et al. Spatial distributions of natural radionuclides in soils of the state of Pernambuco, Brazil: Influence of bedrocks, soils types and climates. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;211:106046. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2019.106046.
12. Mingareeva E., Aparin B., Sukhacheva E. et al. Content of radionuclides in soils of the Voronezh region. *Technological Advancements in Construction. "Lecture Notes in Civil Engineering"*. Cham: Springer Verlag; 2022;180:1-12. DOI: 10.1007/978-3-030-83917-8_1.
13. Movsisyan N., Demirtchyan G., Pyuskyulyan K. et al. Identification of radionuclides' altitudinal distribution in soil and mosses in highlands of Armenia. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;231: 106550. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106550.
14. Sarap N.B., Krneta Nikolić J.D., Trifković J. et al. Assessment of radioactivity contribution and transfer characteristics of natural radionuclides in agroecosystem. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2020;323(2):805-815. DOI: 10.1007/s10967-019-06986-9.
15. Tsvetnova O., Shcheglov A., Klyashtorin A. ¹³⁷Cs and K annual fluxes in a cropland and forest ecosystems twenty-four years after the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;195:79-89. DOI:10.1016/j.jenvrad.2018.09.019.
16. Tuo F., Peng X., Zeng Z. et al. Natural radionuclides distribution, depth profiles of caesium-137 and risk assessment for soil samples in west regions of China. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021;327:831-838. DOI: 10.1007/s10967-020-07551-5.
17. Vodyanitskii Y., Minkina T.M., Bauer T.V. Sources of lanthanides in soils and estimation of their hazards. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 2021;21(3):024. DOI: 10.1144/geochem2021-024.

Информация об авторах

Н.С. Горбунова – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и земельных ресурсов ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», vilian@list.ru.

Е.В. Куликова – кандидат биологических наук, доцент кафедры мелиорации, водоснабжения и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», melior-agronomy@inbox.ru.

Ю.А. Куликов – консультант, ООО «ИнфоБиС», juriy.kulikov@yandex.ru.

Information about the authors

N.S. Gorbunova, Candidate of Biological Sciences, Docent, the Dept. of Ecology and Land Resources, Voronezh State University, vilian@list.ru.

E.V. Kulikova, Candidate of Biological Sciences, Docent, the Dept. of Land Reclamation, Water Supply and Geodesy, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, melior-agronomy@inbox.ru.

Yu.A. Kulikov, Consultant, InfoBiS LLC, juriy.kulikov@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 18.05.2023; одобрена после рецензирования 20.06.2023; принята к публикации 03.07.2023.

The article was submitted 18.05.2023; approved after reviewing 20.06.2023; accepted for publication 03.07.2023.

© Горбунова Н.С., Куликова Е.В., Куликов Ю.А., 2023