



Научная статья

УДК 546.296:631.4(571.1)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.39.56>

Плотность потока радона-222 в почвах Тобольского района Тюменской области

А. П. Колобов*

Тобольская комплексная научная станция УрО РАН, г. Тобольск, Россия

Аннотация. С целью выявления потенциально радоноопасных для местного населения участков с помощью комплекса мониторинга радона «КАМЕРА-01» исследована территория Кондинской низменности в границах Тобольского района Тюменской области. Установлена плотность потока радона-222 на глубине почв от 0 до 100 см на 10 участках, расположенных на низкой надпойменной террасе, в прирусловой и центральной поймах р. Иртыш и притока р. Тобол – р. Суклёмки. Наибольшее среднеарифметическое значение эксхалляции радона-222 с поверхности почвы было выявлено в окрестности д. Македонова – 39 мБк/(м²·с), на остальных исследуемых участках почв – не превышало 18 мБк/(м²·с). Полученные данные по плотности потока радона-222 с поверхности почв исследуемых участков позволяют говорить о том, что они не относятся к потенциально радоноопасным. В окрестностях с. Ушарово, д. Македонова и пос. Савинский Затон (надпойменные террасы р. Иртыш) на глубинах почв от 40 до 100 см зафиксированы средние значения плотности потока естественного радионуклида, превышающие 200 мБк/(м²·с). Только в почвах надпойменной террасы р. Суклёмки по всей исследуемой глубине зафиксирована плотность потока радона-222 ниже 80 мБк/(м²·с) – первый класс радоноопасности. Наибольший средний показатель плотности потока радона-222 (1200 мБк/(м²·с)) на глубине 100 см был обнаружен в окрестностях пос. Савинский Затон, возможно, связанный с переносом радона-222 из подземных вод ликвидированной скважины, рядом с которой проводился отбор проб радона-222.

Ключевые слова: радон-222, плотность потока радона-222, Тобольский район, Кондинская низменность, Тюменская область.

Для цитирования: Колобов А. П. Плотность потока радона-222 в почвах Тобольского района Тюменской области // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2022. Т. 39. С. 56–68. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.39.56>

Original article

The Radon Flux Density is 222 in the Soils of the Tobolsk District of the Tyumen Region

A. P. Kolobov*

Tobolsk Complex Scientific Station UB RAS, Tobolsk, Russian Federation

Abstract. The aim of the work is to determine potentially radon dangerous areas for the local population on the territory of Kondinskaya lowland within the boundaries of Tobolsk district of Tyumen region with the help of radon monitoring complex “CAMERA-01”. The density of the radon-222 flux was defined at the soil depth from 0 to 100 cm in 10 plots. The plots are located on the low above

floodplain terrace, in the levee and central floodplains of the Irtysh River and a tributary of the Tobol River – the Suklyomka River. The highest average value of radon-222 exhalation from the soil surface was found in the vicinity of Makedonova village – 39 mBq/(m²·s), in the rest of the tested soil plots it was not more than 18 mBq/(m²·s). The received data on density of radon-222 flux from the surface of soils of the investigated plots make it possible to say that they do not refer to potentially radon-hazardous. At the same time it is found that the territories around the village Usharovo, the village of Makedonova and settlement Savinsky Zaton (floodplain terraces of the Irtysh River) at a depth of 40 to 100 cm have average values of the flux density of natural radionuclide exceeding 200 mBq/(m²·s). Only in soils of the floodplain terrace of the river Suklyomka – a tributary of the Tobol river the radon-222 flux density below 80 mBq/(m²·s) – I class of radon-hazard was fixed at the whole investigated depth. The highest average density of the radon-222 flow (1200 mBq/(m²·s)) at the depth of 100 cm was found in the vicinity of the settlement Savinsky Zaton, probably associated with the transfer of radon-222 from groundwater of the liquidated well, near which the sampling of radon-222 was made.

Keywords: radon, radon flux density-222, Tobolsk district, Kondinskaya lowland, Tyumen region.

For citation: Kolobov A. P. The Radon Flux Density is 222 in the Soils of the Tobolsk District of the Tyumen Region. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2022, vol. 39, pp. 56-68. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.39.56> (in Russian)

Введение

Воздействие искусственных и естественных радиоактивных изотопов на человека изучается постоянно, их влияние на здоровье человека не вызывает сомнений [Low dose ionizing ... , 2021]. Главный вклад в облучение от естественных источников ионизирующего излучения вносит радон-222 [WHO Handbook ... , 2009]. Мощность дозы облучения зависит от вида излучения (α -, β -, γ -), энергии его частиц, плотности их потока и состава облучаемого вещества. α -Излучение в 20 раз опаснее, чем прочие виды излучения [Рекомендации международной ... , 2009], так как из-за своей массы α -частицы не способны проходить через материалы даже с низкой плотностью, в том числе через клетки кожи, но при вдыхании или проглатывании радионуклидов они получают доступ к уязвимым тканям органов, таких как легкие. Радон-222 является источником α -излучения и образует 50–60 % годовой дозы естественного облучения человека [Дорожко, 2010, с. 50–56; Indoor radon exposure ... , 2018].

Установлено, что чувствительность к излучению тем выше, чем выше уровень развития организма [Slade, Radman, 2011; К вопросу о ... , 2021]. По оценкам экспертов Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) и Международного комитета по радиационной защите (МКРЗ), облучение населения за счет природного радона-222 обуславливает до 20 % всех случаев заболевания раком легкого. У курящих людей риск заболевания существенно возрастает [Риск возникновения рака ... , 2013; An overview of ... , 2017].

Радон-222, входящий в состав естественного радиационного фона планеты, является конечным газообразным продуктом радиоактивного семейства урана-238 с периодом распада 3,82 суток [Indoor radon concentration ... , 2021]. Материнским радионуклидом радона-222 является радий-226, период его распада равен 1600 лет, а в результате цепочки преобразований образуется стабильный изотоп свинца – свинец-206 [Introduction to U-series ... , 2003]. Горные породы, такие как граниты, сиениты, глины и глинистые сланцы [Indoor radon concentration ... , 2021; Measurement of radon ... , 2021], и производимые из

них стройматериалы являются источниками урана-238 [Natural radioactivity ... , 2012]. От них и в зонах активных сейсмических процессов происходит постоянное излучение α -частиц, выделяемое радоном-222 [Long Short Term ... , 2021; Козлова, Юрков, 2005; Уткин, Юрков, 2010; Семинский, Семинский, 2020; Preseismic atmospheric radon ... , 2021; Radon degassing triggered ... , 2021].

Количество материнских радионуклидов в почве (радий-226) зависит от геологической природы окружающей среды, температуры, пористости, кислотности среды и содержания влаги [Vertical distribution ... , 2019]. При этом задействуются такие механизмы переноса, как эффект отдачи, молекулярная диффузия и адвекция.

Исследуемая территория является широтным отрезком левого берега р. Иртыш, зоны южной тайги, по геоморфологическому районированию расположена на Кондинской низменности. Низменность представлена современной поймой, низкой надпойменной террасой и пониженной равниной. Низменность сформирована верхнечетвертичными озерно-аллювиальными отложениями, обладает слабым региональным уклоном в сторону р. Иртыш и не имеет эрозионной сети, что спровоцировало интенсивное развитие торфяно-болотных почв. Почвообразующие породы Кондинской низменности являются в основном глинистыми, суглинистыми и редко супесчаными с преобладанием крупнопылевой фракции [Каретин, 1990], т. е. они могут быть обогащены радием-226 и, соответственно, радоном-222.

Целью данной работы является выявление потенциально радоноопасных для местного населения участков на территории Кондинской низменности Тобольского района Тюменской области. Почвообразующими породами на данной территории выступают поверхностные отложения четвертичных пород [Там же]. Известно, что они являются источниками естественных радионуклидов ряда радия-226 и его продукта распада – радона-222 [Дорожко, 2010, с. 50–56]. Исследуемые участки расположены рядом с населенными пунктами, которые могут разрастись при осуществлении, например, программы по улучшению качества жизни сельских поселений, действующей до 2025 г.¹ При этом возможный рост численности сельского населения может вызвать активное строительство жилых зданий и хозяйственных сооружений, что приведет к увеличению получаемой человеком дозы облучения, исходящего с поверхности земельного участка и от используемых стройматериалов, а следовательно, к возрастанию риска возникновения онкологического заболевания.

Материалы и методы исследования

Определение потенциально радоноопасных участков на исследуемой территории выполнено путем измерения плотности потока радона-222 (далее ППР) комплексом «КАМЕРА-01» (далее комплекс) с пределом погрешности $\approx 30\%$ (номер в Госреестре средств измерений Российской Федерации 26748-04). Территория исследования включает 10 участков (рис. 1), на которых были пробурены отверстия диаметром 20 см на глубинах 0; 20; 40; 60; 80; 100 см,

¹ Современный облик сельских территорий : приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 20 апр. 2020 г. № 214 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565220119>

расположенных в прирусловой и центральной поймах р. Иртыш и в низкой надпойменной террасе притока р. Тобол – р. Суклёмки в границах Кондинской низменности, территориально – в Тобольском районе Тюменской области (см. рис. 1).



Рис. 1. Участки исследования ППР на территории Кондинской низменности Тобольского района

При выборе участков учитывался факт их нахождения в окрестностях, прилегающих к территориям населенных пунктов, большая часть которых расположена вдоль левых берегов рек Тобол и Иртыш. Также учитывалась доступность территории, так как большая часть земель района является заболоченной. Процессы заболачивания как основное направление развития почв южнотаежной зоны Западной Сибири отмечена и другими исследователями [Константинова, 2016, с. 6–18].

Для бурения отверстий в почве был использован мотобур Champion AG 352 9. Классификация радоноопасности почв, а также мероприятия по противорадоновой защите представлены в табл. 1.

В Российской Федерации в настоящее время действует нормативный документ СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности» с изменениями на 16 сентября 2013 г. (ОСПОРБ 99/2010), в котором указаны допустимые значения плотности потока радона-222 с поверхности почв, грунтов, предназначенных для строительства жилых зданий, – не более $80 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и для зданий производственного назначения – не более $250 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Таблица 1

Классификация радоноопасности почв

Класс радоноопасности почв по ОСПОРБ 99/2010	ППР, мБк/(м ² ·с)	Необходимые мероприятия для защиты, приведенные в СП 321.1325800.2017 ²
I	< 80	Необходима вентиляционная система
II	80–200	Для снижения содержания радона в воздухе помещений необходимо применить установку барьера, мембраны, покрытия из малопроницаемого для радона материала (бетон, железобетон и т. п.); использовать пропитку, уплотнение швов, создать вентиляционную систему, депрессию подпольного пространства или произвести реконструкцию (замещение) грунтового основания
III	> 200	

В качестве пассивного пробоотборника в данном методе применялась накопительная камера (НК-32), содержащая внутри рабочий (сорбирующий) слой активированного угля [Tsapalov, Kovler, Miklyaev, 2016]. Сорбент пересыпался из сорбционной колонки (СК-13) перед установкой камеры на поверхность земли. Крепление СК-13 к НК-32 предохраняет сорбент от радона-222, который уже находится в атмосферном воздухе. Благодаря использованию данного метода за все время отбора проб отсутствовала погрешность, создаваемая при перепаде давления между атмосферой и камерой, в результате чего был получен результат естественного процесса выноса радона-222 с поверхности почвы. Измерение активности радона-222, сорбированного в угле, выполняется на измерительных каналах комплекса. Каждый измерительный канал состоит из блока детектирования β -излучения БДБ-13, подключенного через коммутатор МК-4. Управление работой измерительных каналов комплекса, обработка зарегистрированных импульсов, просмотр и оформление результатов измерений осуществляется программой «Радон 98». Для измерения активности сорбированного радона-222 уголь из СК-13 пересыпается в БДБ-13. Измерения активности радона-222 в угле выполняются по β -излучению короткоживущих дочерних продуктов распада радона – свинца-214 и висмута-214, находящихся в состоянии радиоактивного равновесия с радон-222, сорбированным в угле.

Согласно методике измерения плотности потока радона-222 с поверхности земли³ допустимо использование от одной до пяти накопительных камер, поэтому был произведен отбор проб угля с радоном-222 на каждом участке в двух повторностях (Проба-1 и Проба-2). Аппаратурное время измерения суммарной активности радона-222 в угле рабочего слоя НК-32 составило 2525 секунд (42 мин), за это время измерения было получено 42 значения ППР в каждой пробе, после чего вычислены средние значения для обеих повторностей.

² СП 321.1325800.2017. Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты.

³ Методика измерения плотности потока радона с поверхности земли и строительных конструкций. М.: НТЦ «НИТОН», 1993. 6 с.

Исследования выполнены в период с 29 июня по 21 июля 2021 г. Измерения плотности потока радона-222 проводились в соответствии с руководством пользователя и МУ 2.6.1.038-2015⁴ в химико-экологической лаборатории ТКНС УрО РАН. Поскольку на точность отбора проб радона-222 из почвы влияет множество факторов, то необходимо проводить исследования при благоприятных погодных условиях [Application of activated ... , 2005]. Данная работа выполнялась в следующих условиях: отсутствие осадков, температура воздуха – 22–30 °С, влажность воздуха – 40–60 %, атмосферное давление – 743,6–759,5 мм рт. ст., время экспозиции – 3 ч.

Обсуждение результатов

Результаты исследования плотности потока радона-222 в поверхностном слое почв на исследуемых участках, сопряженных с окрестностями территорий конкретных населенных пунктов Тобольского района Тюменской области, представлены в табл. 2, на рис. 2. Наибольший средний показатель ППР с поверхности почвы был выявлен на участке 5 в окрестностях дер. Македоннова – 42 мБк/(м²·с) (Проба-2), в целом не было зафиксировано значений ППР выше 80 мБк/(м²·с) на поверхности почвы.

Однако уже на глубине 20 см на 6 из 10 участков фиксируется второй класс опасности, а на глубине в 100 см показатели для третьего класса превышены в 6 раз, т. е. при строительстве домов на данных почвах необходимо проводить инженерно-строительные мероприятия (табл. 1) в ходе закладки подвальных помещений.

Территории участков 4, 5 и 10 практически на всех глубинах почв имеют повышенные значения плотности потока естественного радионуклида, в отличие от участка 7, где все средние значения плотности потока радона-222 ниже 80 мБк/(м²·с). По суммарной величине ППР участка 4 (3065 мБк/(м²·с)) можно предположить большее по сравнению с другими территориями содержание материнских радионуклидов радона-222 в почве.

На участке 10 (пос. Савинский Затон) высокая ППР (средние значения) на глубине от 40 до 100 см – от 450 до 1200 мБк/(м²·с), возможно, связана с переносом радона-222 из подземных вод скважины (№ 8РГ, дата ликвидации 22.06.2015), рядом с которой в почвах проводился отбор проб радона-222. При этом, как видно на рис. 2, значение ППР на данном участке от глубины в 100 см к поверхности почвы уменьшается с 1200 до 8 мБк/(м²·с). Такое различие в величине эксхалации радона-222 можно объяснить большой долей мелкодисперсной фракции в составе почвы на глубине, так как при тяжелом гранулометрическом составе они имеют высокую плотность и плохую способность к газообмену, что является преградой для выхода газа на поверхность [Escobar, Tome, Lozano, 1999].

⁴ МУ 2.6.1.038-2015. Оценка потенциальной радоноопасности земельных участков под строительство жилых, общественных и производственных зданий.

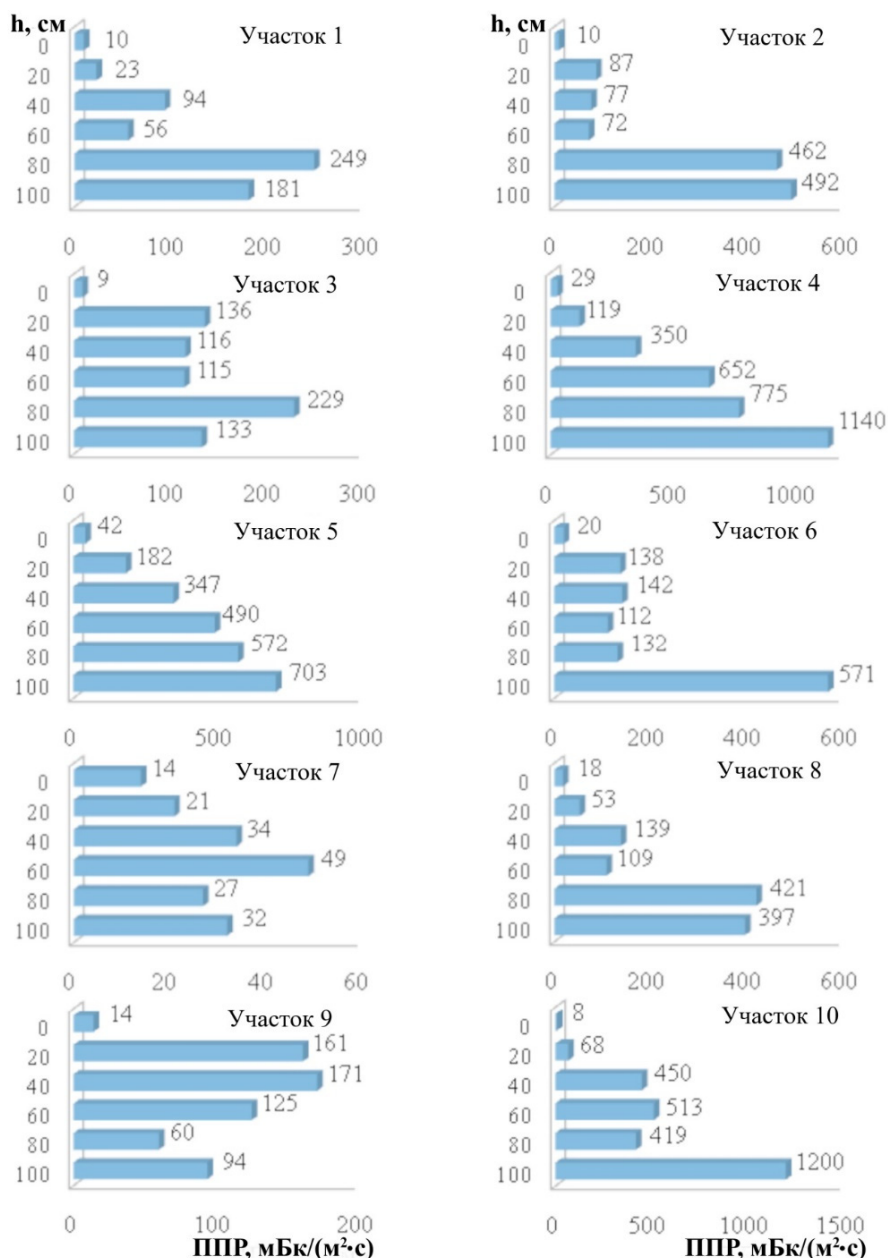


Рис. 2. Плотность потока радона-222 в почве по глубине 0–100 см (Проба-2)

В табл. 3 для сравнения приведены данные аналогичных исследований в нескольких регионах Российской Федерации. К территориям с потенциальной радиационной опасностью, связанной с активной эксхалляцией радона-222 с поверхности почвы, не относятся только Тобольский район Тюменской области, Воронежская и Волгоградская области, так как максимальные значения

ППР здесь не превышают 80 мБк/(м²·с). Остальные регионы Российской Федерации, указанные в табл. 3, можно отнести к радоноопасным. В радоноопасных регионах прослеживается рост уровня онкологической заболеваемости у всех групп населения, одной из причин которого могло быть залегание высоко-радиоактивных гранитов и глинистых минералов в почве [Радиоэкологическая опасность ... , 2019; Курамшина, Урманова, 2019].

Таблица 2

Плотность потока радона-222 с поверхности почв на территории
Тобольского района Тюменской области

№ участка	Район исследования, координаты	Дата	Значение плотности потока радона-222 с поверхности почвы, мБк/(м ² ·с)		
			Среднеарифметическое двух повторностей	Проба-1*	Проба-2*
1	58°19,544'N, 68°07,415' E Окрестности д. Тренина, левый берег р. Иртыш, приустьевая пойма	29.06.2021	8,5	7	10
2	58°34,267'N, 68°15,780' E Окрестности д. Черкашина, левый берег р. Иртыш, надпойменная терраса	30.06.2021	9	8	10
3	58°20,675'N, 68°14,064' E Окрестности д. Кугаева, левый берег р. Иртыш, надпойменная терраса	06.07.2021	7,5	6	9
4	58°28,988'N, 68°19,852' E Окрестности с. Ушарово, р. Шальца, надпойменная терраса	07.07.2021	18	7	29
5	58°28,244'N, 68°08,838' E Окрестности д. Македонова, луг, надпойменная терраса	08.07.2021	39	36	42
6	58°06,966'N, 68°07,721' E Окрестности д. Суклём, р. Суклёмка, надпойменная терраса	12.07.2021	17,5	15	20
7	58°05,851'N, 68°01,873' E Окрестности с. Ермаково, р. Суклёмка, надпойменная терраса	13.07.2021	10,5	7	14
8	57°59,314'N, 67°58,372' E Окрестности д. Эртигарка, луг, надпойменная терраса	14.07.2021	11	4	18
9	58°01,461'N, 67°48,085' E Окрестности пос. Сегово, луг, центральная пойма	20.07.2021	12	10	14
10	58°12,044'N, 68°10,709' E Окрестности пос. Савинский За- тон, луг, надпойменная терраса	21.07.2021	7,5	7	8

Примечание: * – среднее значение ППР.

Таблица 3

Значение плотности потока радона-222 с поверхности почвы в различных субъектах Российской Федерации

Регион	Район проведения исследования	Значение ППР, мБк/(м ² ·с)		
		Минимальное	Среднеарифметическое	Максимальное
Тюменская область	Тобольский район (данные автора)	4	14,05	42
Ленинградская область ¹	г. Санкт-Петербург	< 5	16,6	127
	Ленинградская область	< 5	20,6	337
Республика Башкортостан ²	Кугарчинский район	–	76,5	105
	Уфимский район	–	110,83	178
	Учалинский район	–	102,7	217
Волгоградская область ³	Волгоградская область	6	20,26	39,44
Воронежская область ⁴	Воронежская область	2	8,1	56
Алтайский край ⁵	г. Белокуриха	32	77	122
Новосибирская область ⁵	пгт. Колывань	101	125	276

Примечание: – – нет данных; ¹ – [Бердников, Горький, 2008]; ² [Курамшина, Урманова, 2019]; ³ [Сухоносенко, 2008]; ⁴ [Здоровье населения радоноопасных ... , 2019]; ⁵ [Радиоэкологическая опасность для... , 2019].

Информация о потенциальной радоноопасности необходима для более спланированного принятия решения по предотвращению или смягчению воздействия радиации на население. Во многих странах данная проблема решена путем выявления и картирования регионов, наиболее подверженных риску повышенного воздействия радона-222 [Assessment of radon ... , 2019].

Выводы

В результате проведенной работы обнаружено, что ППР с поверхности почвы на всех исследуемых участках почв не превышает 80 мБк/(м²·с), т. е. потенциально радоноопасные участки не выявлены. В то же время уже на глубине почв от 40 см зафиксированы значения плотности потока радона-222 выше 200 мБк/(м²·с) на участках 4, 5 и 10, расположенных на надпойменной террасе р. Иртыш.

Исследование потенциально радоноопасных участков на территории юга Тюменской области будет продолжено с целью создания карт для определения мест, наиболее подверженных риску воздействия радона-222. Знания о возможной радиоактивной опасности территории чрезвычайно необходимы для предотвращения или смягчения воздействия ионизирующего излучения на население. Созданные карты пригодятся для интерпретации пространственных изменений естественного радионуклида в данной местности, а также послужат инструментом прогнозирования при планировании застройки жилья, давая информацию об участках со значениями плотности потока радона-222 в почвах выше 80 мБк/(м²·с).

Список литературы

- Бердников П. В., Горький А. В.* Изучение радоноопасности территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области // АНРИ. 2008. № 2. С. 56–59.
- Дорошко А. Л.* Природный радон: проблемы и решения // Разведка и охрана недр. 2010. № 8. С. 50–56.
- Здоровье населения радоноопасных территорий / Д. В. Никифоров [и др.] // Экология человека. 2019. № 1. С. 40–50.
- К вопросу о формировании адаптивного ответа под действием природного и профессионального факторов хронического облучения. Обзор литературы / И. Н. Когарко [и др.] // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2021. Т. 30, № 3. С. 134–148. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2021-30-3-134-148>
- Каретин Л. Н.* Почвы Тюменской области. Новосибирск : Наука, 1990. 286 с.
- Козлова И. А., Юрков А. К.* Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях // Уральский геофизический вестник. 2005. № 1. С. 30–34.
- Константинова Е. Ю.* Почвы области сопряжения высоких террас реки Иртыш с краевой частью возвышенности Тобольский Материк // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2016. № 2 (34). С. 6–18. <https://doi.org/10.17223/19988591/34/1>
- Курамина Н. Г., Урманова А. Р.* Радиационно-гигиеническая оценка потенциальной радоноопасности территорий и здоровья населения Республики Башкортостан // Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2019) : материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. Уфа, 2019. С. 49–54.
- Радиоэкологическая опасность для населения в районах распространения высокорadioактивных гранитов / А. Н. Злобина [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 3. С. 111–125.
- Рекомендации Международной комиссии по радиационной защите от 2007 года. Публикация 103 МКРЗ “ пер. с англ. ФМБЦ ФМБА России. М., 2009. 343 с.
- Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявление по радону / под ред.: М. В. Жуковского, С. М. Киселева, А. Т. Губина ; пер. публикации № 115 МКРЗ. М. : ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России, 2013. 92 с.
- Семинский А. К., Семинский К. Ж.* Предварительные результаты исследования взаимосвязи сейсмической активности с концентрацией радона в подземных водах Южного Приангарья // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 33. С. 100–111. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.100>
- Сухоносенко Д. С.* Радиационные параметры ландшафтных районов и техногенных комплексов Волгоградской области // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2008. № 3. С. 84–88.
- Уткин В. И., Юрков А. К.* Радон как индикатор геодинамических процессов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 2. С. 277–286.
- An overview of radon concentration in Malaysia / N. Ahmad et al. // Journal of radiation research and applied sciences. 2017. Vol. 10, N 4. P. 327–330. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2017.08.001>
- Application of activated charcoal radon collectors in high humidity environments / T. Iimoto [et al.] // Journal of environmental radioactivity. 2005. Vol. 78, N 1. P. 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.03.037>
- Assessment of radon risk areas in the Eastern Canary Islands using soil radon gas concentration and gas permeability of soils / H. Alonso et al. // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 664. P. 449–460. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.411>
- Escobar V. G., Tome F. V., Lozano J. C.* Procedures for the determination of ²²²Rn exhalation and effective ²²⁶Ra activity in soil samples // Applied radiation and Isotopes. 1999. Vol. 50, N 6. P. 1039–1047. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(98\)00121-3](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(98)00121-3)
- Indoor radon concentration and a diffusion model in dwellings situated in a subalkaline granite area, Southern Brazil / G. Romero-Mujalli [et al.] // Environmental Earth Sciences. 2021. Vol. 80, N 17. P. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09849-3>
- Introduction to U-series geochemistry / B. Bourdon [et al.] // Reviews in mineralogy and geochemistry. 2003. Vol. 52, N 1. P. 1–21.

Long Short Term Memory networks (LSTM)-Monte-Carlo simulation of near surface ionization using radon / A. Muhammad [et al.] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105688>

Low dose ionizing radiation effects on the immune system / K. Lumniczky et al. // Environment international. 2021. Vol. 149, P. 106212. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106212>

Measurement of radon concentrations and their annual effective doses in soils and rocks of Jaintiapur and its adjacent areas, Sylhet, North-east Bangladesh / R. K. Majumder [et al.] // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2021. P. 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07771-3>

Natural radioactivity in building materials in the European Union: a database and an estimate of radiological significance / R. Trevisi [et al.] // Journal of environmental radioactivity. 2012. Vol. 105, P. 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.10.001>

Preseismic atmospheric radon anomaly associated with 2018 Northern Osaka earthquake / J. Muto [et al.] // Scientific reports. 2021. Vol. 11, N 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86777-z>

Radon degassing triggered by tidal loading before an earthquake / Y. Omori [et al.] // Scientific reports. 2021. Vol. 11, N 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83499-0>

Slade D., Radman M. Oxidative stress resistance in *Deinococcus radiodurans* // Microbiology and molecular biology reviews. 2011. Vol. 75, N 1. P. 133–191.

Tsapalov A., Kovler K., Miklyaev P. Open charcoal chamber method for mass measurements of radon exhalation rate from soil surface // Journal of environmental radioactivity. 2016. Vol. 160. P. 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.04.016>

Vertical distribution and radiological risk assessment of ¹³⁷Cs and natural radionuclides in soil samples / A. Y. Ahmad [et al.] // Scientific reports. 2019. Vol. 9, N 1. P. 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48500-x>

WHO Handbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective. Geneva : WHO Press, 2009.

References

Berdnikov P.V., Gor'kij A.V. Izuchenie radonoopasnosti territorii Sankt-Peterburga i Leningradskoj oblasti [Study of the radon-hazardous territory of the St. Petersburg and the Leningrad region]. ANRI [ANRI]. 2008, no. 2, pp. 56-59. (in Russian)

Dorozhko A.L. Prirodnyj radon: problemy i reshenija [The natural radon: problems and solutions]. *Razvedka i ohrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources]. 2010, no 8, pp. 50-56. (in Russian)

Nikiforov D.V. et al. Zdorov'e naselenija radonoopasnyh territorij [Public health in radon-affected territories]. *Jekologija cheloveka* [Human Ecology]. 2019, no. 1, pp. 40-50. (in Russian)

Kogarko I.N. et al. K voprosu o formirovanii adaptivnogo otveta pod dejstviem prirodno go professional'nogo faktorov hronicheskogo obluchenija. Obzor literatury [Induction of adaptive response to chronic environmental and occupational exposure to radiation]. *Radiacija i risk (Bjulleten' Nacional'nogo radiacionno-jepidemiologicheskogo registra)* [Radiation and Risk (Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Registry)]. 2021, vol. 30, no. 3, pp. 134-148. (in Russian)

Karetin L.N. Pochvy Tjumenskoj oblasti [Soils of the Tyumen region]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990, 286 p. (in Russian)

Kozlova I.A., Jurkov A.K. Metodicheskie voprosy izmerenija sodержanija radona-222 v pochvennom vozduhe pri monitoringovyh nabljudenijah [Methodological issues of measuring the content of radon-222 in soil air during monitoring observations]. *Yralskiy geofizicheskij vestnik* [Ural Geophysical Bulletin]. 2005, no. 1, pp. 30-34. (in Russian)

Konstantinova E.Yu. Pochvy oblasti sopryazheniya vysokikh terras reki Irtysh s kraevoi chast'yu vozvyshennosti Tobol'skii materik [Soils of high Irtysh River terraces and the marginal part of Tobolsk continent upland conjunction area] *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya* [Tomsk State University Journal of Biology], 2016, no. 2 (34), pp. 6-18. <https://doi.org/10.17223/19988591/34/1> (in Russian)

Kuramshina N.G., Urmanova A.R. Radiacionno-gigienicheskaja ocenka potencial'noj radonoopasnosti territorij i zdorov'ja naselenija Respubliki Bashkortostan [Radiation and hygienic assessment of potential radon danger of territories and health of the population of the republic of Bashkortostan]. *Materialy XV Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Nauka, obrazovanie,*

proizvodstvo v reshenii jekologicheskikh problem (Jekologija-2019)” [Proceedings of the 15th international scientific and technical conference “Science, education, production in solving environmental problems (Ecology-2019)”]. Ufa, 2019, pp. 49-54. (in Russian)

Zlobina A.N. et al. Radiojeksologicheskaja opasnost' dlja naselenija v rajonah rasprostraneniya vysokoradioaktivnyh granitov [Radioecological hazard for the population living in the regions with high radioactive granites] *Izvestija Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta. Inzhiniring geosursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2019, vol. 330, no. 3. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2021-30-3-134-148> (in Russian)

Rekomendacii Mezhdunarodnoj komissii po radiacionnoj zashhite ot 2007 goda. Publikacija 103 MKRZ [Recommendations of the International Commission on Radiological Protection 2007. ICRP Publication 103]. Translated into Russian by Gusev I.A. Moscow, Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Russia, 2009, pp. 343. (in Russian)

Risk vozniknovenija raka legkogo pri obluchenii radonom i produktami ego raspada. Zajavlenie po radonu [Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon]. Translated into Russian by Zhukovskogo M. V. Moscow, Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Russia, 2013, pp. 92. (in Russian)

Seminskij A.K., Seminskij K.Zh. Predvaritel'nye rezul'taty issledovaniya vzaimosvjazi sejsmicheskoy aktivnosti s koncentraciej radona v podzemnyh vodah Juzhnogo Priangar'ja [Preliminary results of the study of the relationship of seismic activity with the concentration of radon in groundwater in the Southern Angara region]. *Izvestija Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija Nauki o Zemle* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences]. 2020, vol. 33, pp. 100-111. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.100> (in Russian)

Suhonosenko D.S. Radiacionnye parametry landshaftnyh rajonov i tehnogennyh kompleksov Volgogradskoj oblasti [Radiation parameters of landscaped areas and technogenic complexes of the Volgograd region]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Estestvennyye nauki* [Bulletin of higher education institutes North Caucasus region. Natural sciences]. 2008, no. 3, pp. 84-88. (in Russian)

Utkin V.I., Jurkov A.K. Radon kak indikator geodinamicheskikh processov [Radon as a tracer of tectonic movements]. *Geologija i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2010, vol. 51, no. 2, pp. 277-286. (in Russian)

Ahmad N. et al. An overview of radon concentration in Malaysia. *Journal of radiation research and applied sciences*, 2017, vol. 10, no. 4, pp. 327-330. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2017.08.001>

Iimoto T. et al. Application of activated charcoal radon collectors in high humidity environments. *Journal of environmental radioactivity*, 2005, vol. 78, no. 1, pp. 69-76. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.03.037>

Alonso H. et al. Assessment of radon risk areas in the Eastern Canary Islands using soil radon gas concentration and gas permeability of soils. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 664, pp. 449-460. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.411>

Escobar V.G., Tome F.V., Lozano J.C. Procedures for the determination of ²²²Rn exhalation and effective ²²⁶Ra activity in soil samples. *Applied radiation and Isotopes*, 1999, vol. 50, no. 6, pp. 1039-1047. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(98\)00121-3](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(98)00121-3)

Romero-Mujalli G. et al. Indoor radon concentration and a diffusion model in dwellings situated in a subalkaline granitoid area, Southern Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 2021, vol. 80, no. 17, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09849-3>

Bourdon B. et al. Introduction to U-series geochemistry. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 2003, vol. 52, no. 1, pp. 1-21.

Muhammad A. et al. Long Short Term Memory networks (LSTM)-Monte-Carlo simulation of near surface ionization using radon. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105688>

Lumniczky K. et al. Low dose ionizing radiation effects on the immune system. *Environment international*, 2021, vol. 149, pp. 106212. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106212>

Majumder R.K. et al. Measurement of radon concentrations and their annual effective doses in soils and rocks of Jaintiapur and its adjacent areas, Sylhet, North-east Bangladesh. *Journal of Radio-analytical and Nuclear Chemistry*, 2021, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07771-3>

Trevisi R. et al. Natural radioactivity in building materials in the European Union: a database and an estimate of radiological significance. *Journal of environmental radioactivity*, 2012, vol. 105, pp. 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.10.001>

Muto J. et al. Preseismic atmospheric radon anomaly associated with 2018 Northern Osaka earthquake. *Scientific reports*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86777-z>

Omori Y. et al. Radon degassing triggered by tidal loading before an earthquake. *Scientific reports*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83499-0>

Slade D., Radman M. Oxidative stress resistance in *Deinococcus radiodurans*. *Microbiology and molecular biology reviews*, 2011, vol. 75, no. 1, pp. 133-191. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00015-10>

Tsapalov A., Kovler K., Miklyaev P. Open charcoal chamber method for mass measurements of radon exhalation rate from soil surface. *Journal of environmental radioactivity*, 2016, vol. 160, pp. 28-35. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.04.016>

Ahmad A. Y. et al. Vertical distribution and radiological risk assessment of 137 Cs and natural radionuclides in soil samples. *Scientific reports*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48500-x>

WHO Handbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective. Geneva, *WHO Press*, 2009.

Сведения об авторе

Колобов Анатолий Павлович

старший лаборант

Тобольская комплексная научная станция

УрО РАН

Россия, 626152, г. Тобольск,

ул. Академика Юрия Осипова, 15

e-mail: kolobovap@tobscience.ru

ORCID: 0000-0001-7239-959X

Information about the author

Kolobov Anatolii Pavlovich

Senior Laboratory Assistant

Tobolsk Complex Scientific Station UB RAS

15, Akademik Yuriy Osipov st., Tobolsk,

626152, Russian Federation

e-mail: kolobovap@tobscience.ru

ORCID: 0000-0001-7239-959X

Код научной специальности: 25.00.36

Статья поступила в редакцию **11.01.2022**; одобрена после рецензирования **01.02.2022**; принята к публикации **03.03.2022**

The article was submitted **January, 11, 2022**; approved after reviewing **February, 1, 2022**; accepted for publication **March, 3, 2022**