



Серия «Науки о Земле»

2026. Т. 55. С. 20–36

Онлайн-доступ к журналу:

<http://izvestiaye.isu.ru/ru>

ИЗВЕСТИЯ

Иркутского

государственного

университета

Научная статья

УДК 546.296:631.4:551.24(571.12)

<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.55.20>

## Плотность потока радона в почвах Ливановского и Тюменско-Чудиновского разломов юга Тюменской области

Н. Е. Гурьев, А. А. Рыбина, Е. О. Зонова\*

*Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия*

**Аннотация.** Впервые на территории юга Тюменской области, в границах Ливановского и Тюменско-Чудиновского разломов, выполнены измерения плотности потока радона-222 (ППР) с поверхности, а также в горизонтах зональных типов почв. Выделены и картографически отображены значения плотности потока радона-222 с поверхности почвы, рассмотрено вертикальное распределение в горизонтах почв и почвообразующих породах. Значения ППР с поверхности почвы в пределах всего исследуемого участка варьируются в диапазоне от  $11 \pm 3$  до  $1126 \pm 337$  мБк/м<sup>2</sup>·с, вертикальное распределение ППР в горизонтах почв неоднородно и зависит от профиля радоновой съемки, высокие значения характерны на периферийных участках. Установлены закономерности значений ППР в зависимости от микроклиматических и физических параметров почв территории исследования. Наибольшее влияние на значение ППР в почвах оказывает температура атмосферного воздуха, а также плотность почвы. Полученные данные могут быть использованы и учтены при проведении экологического мониторинга и инженерных-экологических изысканий территории исследования частными фирмами, а также уполномоченными государственными органами исполнительной власти.

**Ключевые слова:** радон-222, плотность потока, разломы, почвы, Тюменская область.

**Для цитирования:** Гурьев Н. Е., Рыбина А. А., Зонова Е. О. Плотность потока радона в почвах Ливановского и Тюменско-Чудиновского разломов юга Тюменской области // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2026. Т. 55. С. 20–36. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.55.20>

Original article

## Radon Flux Density in the Soils of the Livanovsky and Tyumen-Chudinovsky Faults in the South of the Tyumen Region

N. E. Guryev, A. A. Rybina, E. O. Zonova\*

*Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation*

**Abstract.** The article presents the result of the first integrated exploration of radon-222 flux density (RFD) in the southern part of Tyumen region, conducted within the Livanovsky and Tyumen-Chudinovsky fault zones, taking into the tectonic, soils and microclimatic characteristics of the region. The object of the study was surface layer of soils/subsoils, the pedogenic horizons of zonal soil types and subtypes, as well as in the parent rock material, which made it possible to assess to features

© Гурьев Н. Е., Рыбина А. А., Зонова Е. О., 2026

\* Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.  
For complete information about the authors, see the last page of the article.

of vertical radon distribution and migration in the near-surface zone. The study identified areas with anomalous high radon flux density values, and their spatial distribution was visualized using cartographic methods. The surface radon-222 flux density values within the entire study area range from  $11 \pm 3 \text{ mBq/m}^2 \cdot \text{s}$  to  $1126 \pm 337 \text{ mBq/m}^2 \cdot \text{s}$ . The vertical distribution of RFD within soil horizons is heterogeneous and depends of the survey profile, with higher values typically observed in peripheral sections of the study area. It was established that the formation of radon anomalies is associated with fault zones and controlled by the physical properties of soils and local microclimatic conditions, including soil physical parameters. Atmospheric air temperature and soil density were identified as a dominant factor influencing RFD values in soils. The revealed patterns of RFD variation within soil profiles confirm the significant role of soils and parent rock material in regular radon transport to the soil surface and ground air. The attained results can be applied in environmental monitoring, engineering and ecological surveys, and in assessment of radiation and environmental conditions of the territory.

**Keywords:** radon-222, flux density, fault zone, soils, Tyumen region.

---

**For citation:** Guryev N.E., Rybina A.A., Zonova E.O. Radon Flux Density in the Soils of the Livanovsky and Tyumen-Chudinovsky Faults in the South of the Tyumen Region. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2026, vol. 55, pp. 20-36. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.55.20> (in Russian)

---

## Введение

Радон – это газ, не имеющий вкуса, запаха и цвета. Он имеет четыре радиоактивных изотопа (радон-218, радон-219, радон-220, радон-222), среди которых наиболее долгоживущим является изотоп радона-222, с периодом полураспада в 3,82 сут., возникающий в результате естественного радиоактивного распада радия-226, образованного в радиоактивном ряду урана-238 [Rasha, 2025; Evaluation ... , 2025].

Радиоактивное облучение населения радоном-222 происходит за счет его поступления в атмосферный воздух из почв. Средняя годовая доза облучения населения от радона-222 составляет 0,85 мЗв/год при максимально допустимой – 10 мЗв/год (около 300 Бк/м<sup>3</sup>). Превышение допустимых уровней радона-222 (далее – радон) в почвах ведет к его высокому содержанию в воздухе общественных, жилых, производственных зданий и сооружений, что повышает риск онкологических заболеваний у человека. По данным эпидемиологических служб США, из-за облучения населения радоном умирает ориентировочно около 20 тыс. чел. в год. В Российской Федерации более 10 % населения проживает в жилых домах с концентрацией радона свыше 100 Бк/м<sup>3</sup> [Rasha, 2025; Evaluation ... , 2025; Duration ... , 2025; Spasić, Gulan, Vučković, 2024; A new ... , 2024; Gogoi, Phukan, Barooah, 2025; Radon fluxes ... , 2021; Indor ... , 2021; Low ... , 2021; Assessment ... , 2019; Ahmad, Khan, Nasir, 2017; Семинский, Бобров, Дэмбэрэл, 2019; Старков, Мигунов, 2007].

Важными с практической и научной точек зрения являются выявление и картографическое отображение границ аномальных значений радона в почвах, определение природно-антропогенных факторов, оказывающих влияние на его содержание, а также оценка рисков для населения, проживающего на исследуемой территории. Наиболее распространенным и обязательным методом в нормативно-правовой базе Российской Федерации, необходимым для оценки потенциальной радиационной опасности земельных участков до этапа строительства, является определение ППР с поверхностного слоя

почв/грунтов [Радиационно-экологическая ... , 2024; Гурьев, Клименко, 2023; Семинский, Бобров, Дэмбэрэл, 2019].

Научные работы по определению потенциальной радоноопасности территории юга Тюменской области рассмотрены в публикациях нескольких авторов [Радиационно-экологическая ... , 2024; Гурьев, Клименко, 2023; Распределение ... , 2022; Колобов, 2022; Токарева, Алимова, 2021], в которых отмечаются локальные значения ППР, превышающие допустимые установленные уровни, в интервале от 112 до 2686 мБк/м<sup>2</sup>·с в почвах поймы рек Тобол и Иртыш и от 2 до 289 мБк/м<sup>2</sup>·с – в границах г. Тюмени. Полученные результаты исследования авторы объясняют влиянием природных факторов, изменением метеорологических условий на период работ, а также физическими свойствами почв/грунтов, в которых проводились измерения ППР. Однако причины появления аномальных значений ППР остаются не раскрытыми.

На высокие, а в некоторых случаях аномальные значения ППР в почве оказывает влияние совокупность природных факторов, а именно особенности геологического строения территории, физические свойства горных пород и почв, микроклиматические условия территории. Наиболее значимыми факторами, определяющими количество поступающего радона в почву, считается содержание урановых и радиевых радионуклидов в горных породах фундамента и осадочного чехла, а также наличие геодинамически активных зон и разломов. Разломы – это нарушение целостности земной коры, возникшее в результате линейного разрушения горных пород, зачастую представленное прямыми или изогнутыми линиями различных размеров и глубин. Подобные нарушения в основном выражены имеющим повышенную проницаемость и характерную трещиноватость комплексом из нескольких разломов, называемым разломной зоной. Такие области являются естественными путями перемещения газов, содержащихся в глубоких слоях земли, на ее поверхность, в том числе и радона-222 [Long ... , 2021; Jędrzejek, Szarłowicz, Stobiński, 2022; Characterization ... , 2018; Gogoi, Phukan, Barooah, 2025; Кузьмин, Жуков, 2012; Демин, Никонов, Анциферова, 2020].

Целью данного исследования является оценка потенциальной радоноопасности почв в границах Ливановского и Тюменско-Чудиновского разломов юга Тюменской области.

Задачи:

1) определить степень радоноопасности поверхностного слоя почв в границах Ливановского и Тюменско-Чудиновского разломов юга Тюменской области;

2) рассмотреть закономерности вертикального распределения плотности потока радона-222 в горизонтах почв в границах Ливановского и Тюменско-Чудиновского разломов юга Тюменской области;

3) определить влияние природных условий территории (микроклиматических, а также физических свойств почв) на содержание радона-222 в почвах в границах Ливановского и Тюменско-Чудиновского разломов юга Тюменской области.

### Объекты и методы исследования

Участок работ расположен в северо-западной части Тюменского муниципального района Тюменской области. Исследование проведено в границах/окрестностях таких населенных пунктов, как с. Каменка, с. Кулаково, д. Нариманова, пос. Новотарманский, с. Салаирка, д. Решетникова, д. Коняшина, пос. Луговое, пос. Туринский. Общая площадь участка работ составляет 163 км<sup>2</sup>. По схеме физико-географического районирования Тюменской области территория исследования относится к Тавдинской провинции, Туринской подпровинции, лесной равнинной широтно-зональной области [Гвоздецкий, 1973]. Климат территории исследования близок к резко континентальному, для которого характерны продолжительные холодные зимы и умеренно жаркое лето, а также сезонные перепады температур [Гвоздецкий, 1973]. Климатические условия на период исследования: температура атмосферного воздуха – от 16,3 до 35 °С; атмосферное давление – от 746 до 768 мм рт. ст.; относительная влажность воздуха – от 50 до 90 %.

Район работ охватывает долину р. Туры, для которой характерны густая овражно-балочная сеть и грядовые формы рельефа эолового происхождения. В состав четвертичных отложений входят отложения бахтинского надгоризонта, аллювия надпойменных террас и поймы р. Туры, а также элювиальные и делювиальные образования [Старков, Тюлькова, 2012].

Гидрографическая сеть представлена р. Турой и ее притоками – реками Пановка, Тапгайчай, Антоновка, Кулига, Канырка, Ахманка, а также озерами старичного происхождения: Полушинское, Кривое, Залучье, Большое и Малое.

Почвенный покров представлен дерново-подзолистыми почвами (А<sub>0</sub>–А<sub>1</sub>А<sub>2</sub>–А<sub>2</sub>–А<sub>2</sub>В–В–С) и выщелоченными черноземами (А<sub>0</sub>–А<sub>1</sub>–АВ–В–ВСК). По схеме почвенно-географического районирования юга Тюменской области территория исследования относится к Нижнетавдинскому району серых лесных и дерново-подзолистых почв [Классификация ... , 1977; Каретин, 1990].

Полевые работы выполнены в несколько этапов – *подготовительный, полевой и камеральный*. На первом этапе (*подготовительный*) в программе SAS PLANETA, по данным государственной геологической карты доюрских образований Уральской серии (О-41, Екатеринбург) Российской Федерации, установлены границы геодинамических нарушений (Ливановский и Тюменско-Чудиновский разломы). Для определения потенциально радоноопасных мест в границах рассматриваемых нарушений по профилям Туринский – Салаирка и Луговое – р. Канырка (расстояние от д. Коняшина по федеральной трассе 71К-713 до р. Канырка составляет 6,75 км) в широтном и меридиональном направлении расставлены 50 контрольных точек измерения ППР с поверхности почвы (с шагом между точками не более 3 км) (рис. 1). Для ориентации на местности использовался GPS-навигатор Garmin.

На *полевом этапе* измерение ППР в поверхностном слое почвы проводилось с помощью радиометра радона и торона «Альфарад Плюс», погрешность измерений составляет не более 30 %. Комплекс предназначен для быстрого обнаружения и непрерывного мониторинга уровня радона-222 в

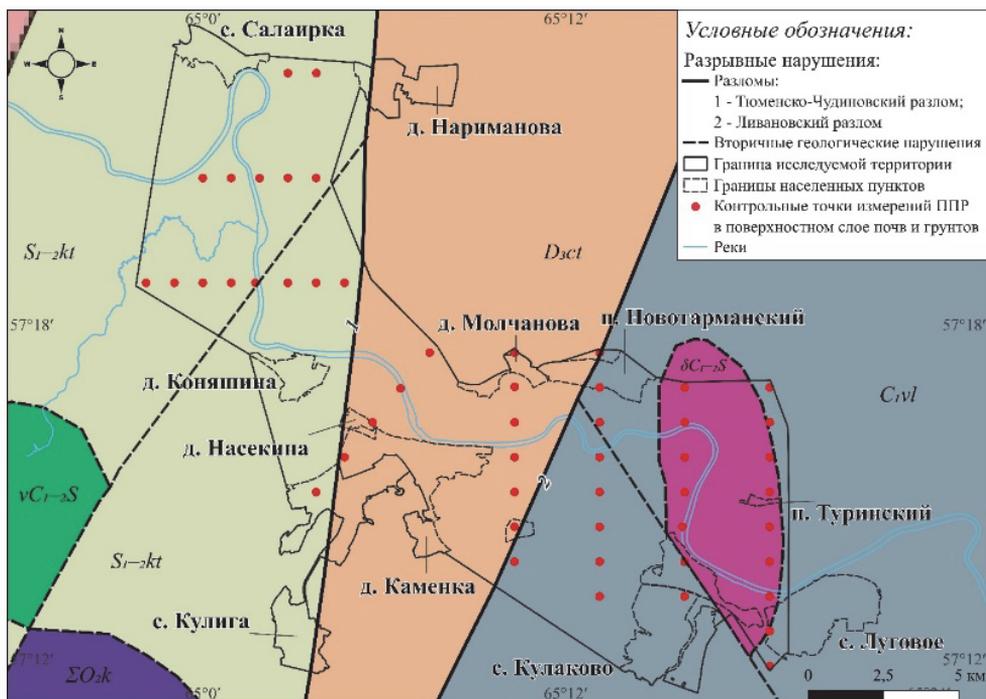


Рис. 1. Карта-схема участка работ

компонентах окружающей среды (поверхностная и подземная вода, атмосферный и почвенный воздух). Работы выполнялись в соответствии с нормативными документами<sup>1</sup> и утвержденной методикой измерений<sup>2</sup>. Поверхность участка контрольной точки измерения перед началом работ очищалась от веток, мусора, растительности, после чего выполнялось рыхление верхних слоев почвы на глубину 5–7 см. Измерения выполнялись не раньше 20 мин после рыхления. Определение величины ППР проводилось в следующем порядке: отбор проб атмосферного воздуха – измерение остаточной активности ( $Q_0$ ) в измерительной камере прибора – отбор проб почвенного воздуха в контрольной точке измерения для определения ППР с поверхности почвы (при условии, что  $Q_0 \leq 20$  Бк/м<sup>3</sup>) – измерение ППР в блоке объемной активности (ОА) прибора. Время измерения составляет 20 мин, по истечении времени на экран блока измерения выводится результат, рассчитанный по формуле:

$$\text{ППР} = Q \cdot \left( 1 + \frac{V_2}{V_1} \right) \cdot \frac{V_1 + V_3}{T \cdot S} \cdot \exp(\lambda_{Rn} \cdot t),$$

<sup>1</sup> Методические рекомендации 2.6.1.0361-24. Радиационный контроль земельных участков, предназначенных под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения, а также прилегающей к зданиям и сооружениям территории общего пользования. СПб.: Роспотребнадзор. 23 с.

<sup>2</sup> Руководство по эксплуатации. Комплекс измерительный для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс». М.: НТМ-Защита, 2021. С. 38–42. URL: [https://ntm.ru/UserFiles/File/document/ION/Alplus/Alpharad\\_manual.pdf](https://ntm.ru/UserFiles/File/document/ION/Alplus/Alpharad_manual.pdf) (дата обращения: 14.11.2025).

где  $Q$  – измеренное значение ОА, Бк·м<sup>-3</sup>;  $V_2$  – объем измерительной камеры,  $V_2 = 0,94$  л;  $V_1$  – объем пробы в пробоотборнике,  $V_1 = 1,05$  л;  $t$  – время, прошедшее от окончания отбора пробы до начала измерений, мин,  $t = t_2 - t_1$ ;  $\lambda_{Rn}$  – постоянная распада <sup>222</sup>Rn,  $\lambda = 1,26 \cdot 10^{-4}$  мин<sup>-1</sup>;  $V_3$  – свободный объем накопительной камеры и соединительных трубок,  $V_3 = 0,563$  л;  $T$  – время работы автономной воздухоудвки при отборе пробы из накопительной камеры в пробоотборник,  $T = 300$  с;  $S$  – площадь сбора радона с поверхности грунта накопительной камерой,  $S = 0,0163$  м<sup>2</sup>.

Параллельно в процессе определения ППР с поверхности почвы проводились измерения микроклиматических условий (температура, влажность и давление атмосферного воздуха) с помощью прибора «Метеоскоп-М+». Относительная погрешность измерений: температуры – 0,5 %, влажности – 3 %, атмосферного давления – 0,13 %. Прибор устанавливался на штатив над контрольной точкой измерения, где в течение 20 мин проводилось непрерывное измерение микроклиматических параметров. Определение температуры почвы осуществлялось при помощи электронного почвенного термометра «ТР101», относительная погрешность измерения составляет 5 %. Плотность влажной почвы изучалась методом режущего кольца, согласно регламентирующим документам<sup>3</sup>, с помощью стального пробоотборника ПГ-100 объемом 100 см<sup>3</sup>.

После выполненных работ по оценке ППР с поверхности почвы на участках осуществлены измерения ППР в горизонтах почв и почвообразующих породах по профилю Туринский – Салаирка и Луговое – р. Канырка. Выбор мест происходил с учетом превышений допустимых уровней в поверхностном слое почв, места измерений ППР представлены на рис. 2, почвенно-географическая характеристика в табл. 1.

Описание почв выполнено в соответствии с классическими почвенными методиками В. Д. Наумова [2023]. При описании признаков горизонтов определялись: окрас (по Munsell Soil), гранулометрический состав, плотность (методом режущего кольца), структура, характер перехода горизонта и степень его выраженности. Глубина почвенного разреза определялась с учетом появления почвообразующей породы, индекс которой принят по генетической классификации четвертичных отложений суши Е. В. Шанцера (1966 г.).

Глубинные измерения ППР выполнены отдельно в каждом почвенном горизонте и почвообразующей породе. Параллельно осуществлялись измерения микроклиматических параметров в почвенном разрезе.

*Заключительным этапом* являлась обработка полученных результатов исследования. Оценка осуществлялась в сравнении с предельно допустимыми уровнями, согласно МР 2.6.1.0361-24, где нормой считаются значения, не превышающие 80 мБк/(м<sup>2</sup>·с) и 250 мБк/(м<sup>2</sup>·с) для участков, предназначенных под строительство жилых, общественных и промышленных зданий и сооружений соответственно. Графические иллюстрации выполнены с помощью программы Google Colab на основе Python, для создания картографического материала использовалась геоинформационная система QGIS.

<sup>3</sup> ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М., 2015. 32 с.

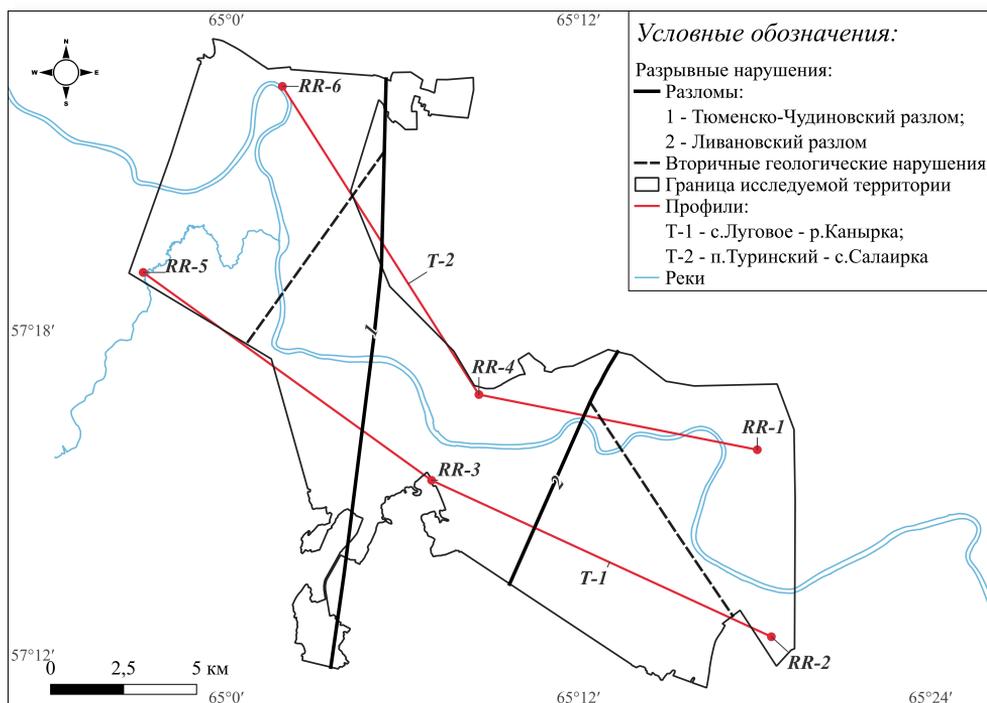


Рис. 2. Схема размещения контрольных пунктов измерения ППР в почвах и почвообразующих породах

Таблица 1

Почвенно-географическая характеристика пунктов измерения ППР в профиле почв

Шифр	Тип (подтип) почв, формула почвенного профиля	Плотность горизонтов, г/см <sup>3</sup>
RR-1	Дерново-подзолистая, A <sub>0</sub> -A <sub>1</sub> -A <sub>1</sub> A <sub>2</sub> -V*-C <sub>g</sub>	A <sub>1</sub> (0,82)-A <sub>1</sub> A <sub>2</sub> (1,19)-V(1,20)-C <sub>g</sub> (1,14)
RR-2	Выщелоченный чернозем, A <sub>0</sub> -A <sub>1</sub> -B-BC <sub>к</sub> -a*	A <sub>1</sub> (1,15)-B(1,63)-BC <sub>к</sub> (1,72)-a(1,17)
RR-3	Дерново-подзолистая грунтово-оглеенная, A <sub>0</sub> -A <sub>1</sub> -V*-Bg-C	A <sub>1</sub> (0,62)-V(0,83)-Bg(1,09)-C(1)
RR-4	Дерново-подзолистая, A <sub>0</sub> -A <sub>1</sub> -A <sub>2</sub> -B-C-V*	A <sub>1</sub> (0,61)-A <sub>2</sub> (1)-B(1,54)-C(1,70)-V(1,42)
RR-5	Дерново-подзолистая, A <sub>0</sub> -A <sub>1</sub> -A <sub>1</sub> A <sub>2</sub> -A <sub>2</sub> B-Bg-a <sub>1</sub> -a <sub>2</sub> **	A <sub>1</sub> (0,11)-A <sub>1</sub> A <sub>2</sub> (0,23)-A <sub>2</sub> B(0,21)-Bg(0,14)-a <sub>1</sub> (0,67)-a <sub>2</sub> (0,67)
RR-6	Сырые лесные оподзоленные, A <sub>0</sub> -A <sub>1</sub> -A <sub>1</sub> A <sub>2</sub> -A <sub>2</sub> -B-C-V*	A <sub>1</sub> (0,79)-A <sub>1</sub> A <sub>2</sub> (1,07)-A <sub>2</sub> (1,25)-B(1,32)-C(1,23)-V(0,97)

Примечание: V\* – горизонт перфляционных (перевезанных) геологических отложений по генетической классификации четвертичных отложений суши Е. В. Шанцера (1966 г.); a\* – пойменные аллювиальные отложения по генетической классификации четвертичных отложений суши Е. В. Шанцера (1966 г.).

## Результаты и их обсуждение

Измерение ППР с поверхности почвы на территориях, предназначенных или имеющих перспективу строительства жилых, общественных и промышленных зданий и сооружений, является обязательным видом работ, согласно МР 2.6.1.0361-24. Определение и последующая локализация аномальных значений имеют важное практическое и научное значение, которое требует всестороннего исследования для выявления причин, а также факторов, оказывающих влияние на значения ППР в почве, с последующей оценкой радоопасности территории [Tsaralov, Kovler, Miklyaev, 2016]. Результаты исследования ППР с поверхности почв представлены на рис. 3.

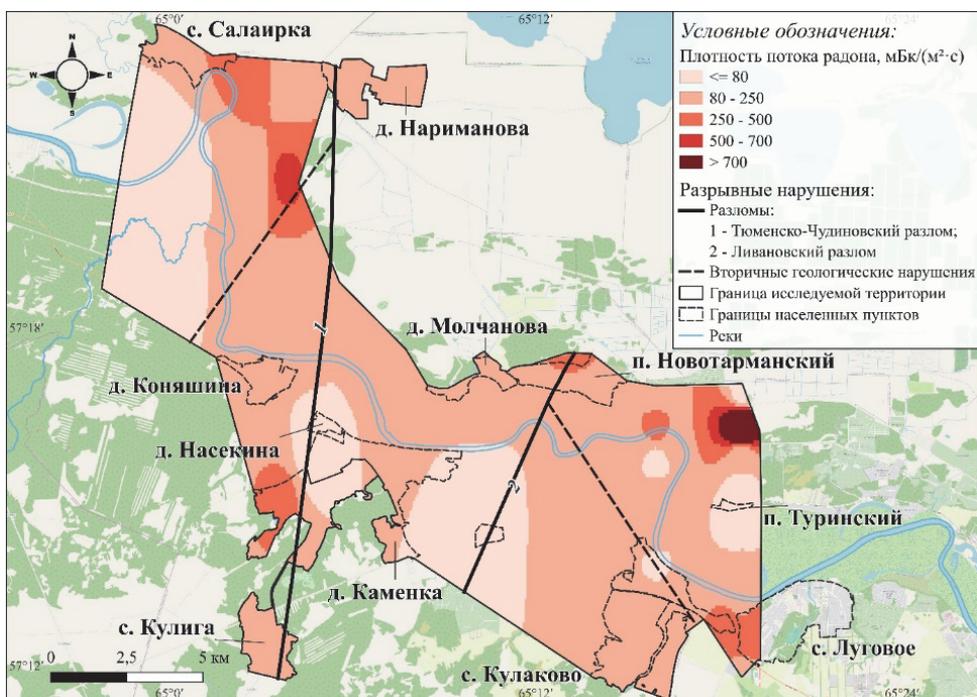


Рис. 3. Карта-схема ППР с поверхности почвы на территории исследования

Значения ППР в пределах всего исследуемого участка варьируются в диапазоне от  $11 \pm 3$  до  $1126 \pm 337$  мБк/м<sup>2</sup>·с, среднее значение составляет  $152 \pm 39$  мБк/м<sup>2</sup>·с. Содержание радиоактивного газа в почвенном воздухе по профилю с. Луговое – р. Канырка (далее – Т-1) находится в интервале от  $11 \pm 3$  до  $413 \pm 123$  мБк/м<sup>2</sup>·с, в то время как по профилю пос. Туринский – с. Салаирка (далее – Т-2) – от  $23 \pm 6$  до  $1126 \pm 337$  мБк/м<sup>2</sup>·с, со средним значением  $146 \pm 37$  и  $145 \pm 38$  для профилей соответственно. Процент значений ППР с поверхности почвы, превышающих установленные уровни в 80 и 250 мБк/м<sup>2</sup>·с, согласно МР, для территорий, предназначенных под строительство жилых домов, общественных, промышленных зданий и сооружений, для профиля Т-2 составляет 79 и 17 %, для профиля Т-1 – 48 и 14 % от общего числа измерений соответственно.

Широкий интервал значений ППР в профилях Т-1 и Т-2, вероятнее всего, связан с гипсометрическими особенностями рельефа, а также с геологическим строением территории исследования. Профиль Т-1 представлен террасовым комплексом р. Туры верхнего позднего плейстоцена с абсолютными отметками высот от 78 до 125 м. В составе слагающих территорию отложений преобладают разномерные пески, песчаные, алевритовые и слюдистые глины, которые являются естественным механическим барьером для выхода радона-222 на поверхность, в связи с чем значения ППР на данном участке ниже, чем в профиле Т-2. Профиль Т-2, располагающийся на левобережной части р. Туры, представлен комплексом аллювиальных и эоловых отложений (лессовидные суглинки) с абсолютными отметками рельефа от 55 до 66 м. В составе отложения преобладают преимущественно тонкозернистые, пылеватые пески и суглинки, в которых радон эмануирует сильнее.

По результатам исследования можно сделать вывод, что причиной появления аномальных значений ППР на участке работ являются располагающиеся на глубине разломные зоны (Ливановский и Тюменско-Чудиновский разломы). Характерная для таких зон трещиноватость горных пород и высокая проницаемость осадочного чехла являются причинами повышенной эксхалляции радона. Аналогичные закономерности, связанные с появлением аномальных зон в почвах разломных зон, отмечены в работах отечественных [Семинский, Бобров, Дэмбэрэл, 2019; Удоратин, Езимова, Магомтдова, 2021; Микляев, Петрова, 2021], а также зарубежных [Assessment ... , 2019; Measurement ... , 2021; Матвеев, Карабанов Автушко, 2017; Radon degassing ... , 2021; A new ... , 2024, Drolet, Martel, 2015] ученых, где значения ППР находились в интервале от 33 до 23 800 мБк/м<sup>2</sup>·с.

При проектировании и строительстве жилых, общественных и промышленных зданий/сооружений, имеющих цокольные и подвальные помещения, целесообразно проводить работы по оценке радоноопасности территории не только в поверхностном слое почв/грунтов, но и в случаях выявления локальных радоновых аномалий – выполнять работы по изучению его вертикального распределения с учетом глубины подвальных/цокольных помещений. В настоящее время в нормативно-правовой базе Российской Федерации не существует предельно допустимых уровней ППР для различных глубин и типов почв. Отсутствие превышений допустимых уровней ППР в поверхностном слое почв не гарантирует радиационную безопасность подвальных и цокольных помещений, в связи с чем изучение вертикального распределения ППР в почвах и почвообразующих породах является важным видом работ с практической точки зрения. На рис. 4 представлены результаты вертикального распределения ППР в почвах в границах Ливановского и Тюменско-Чудиновского разломов.

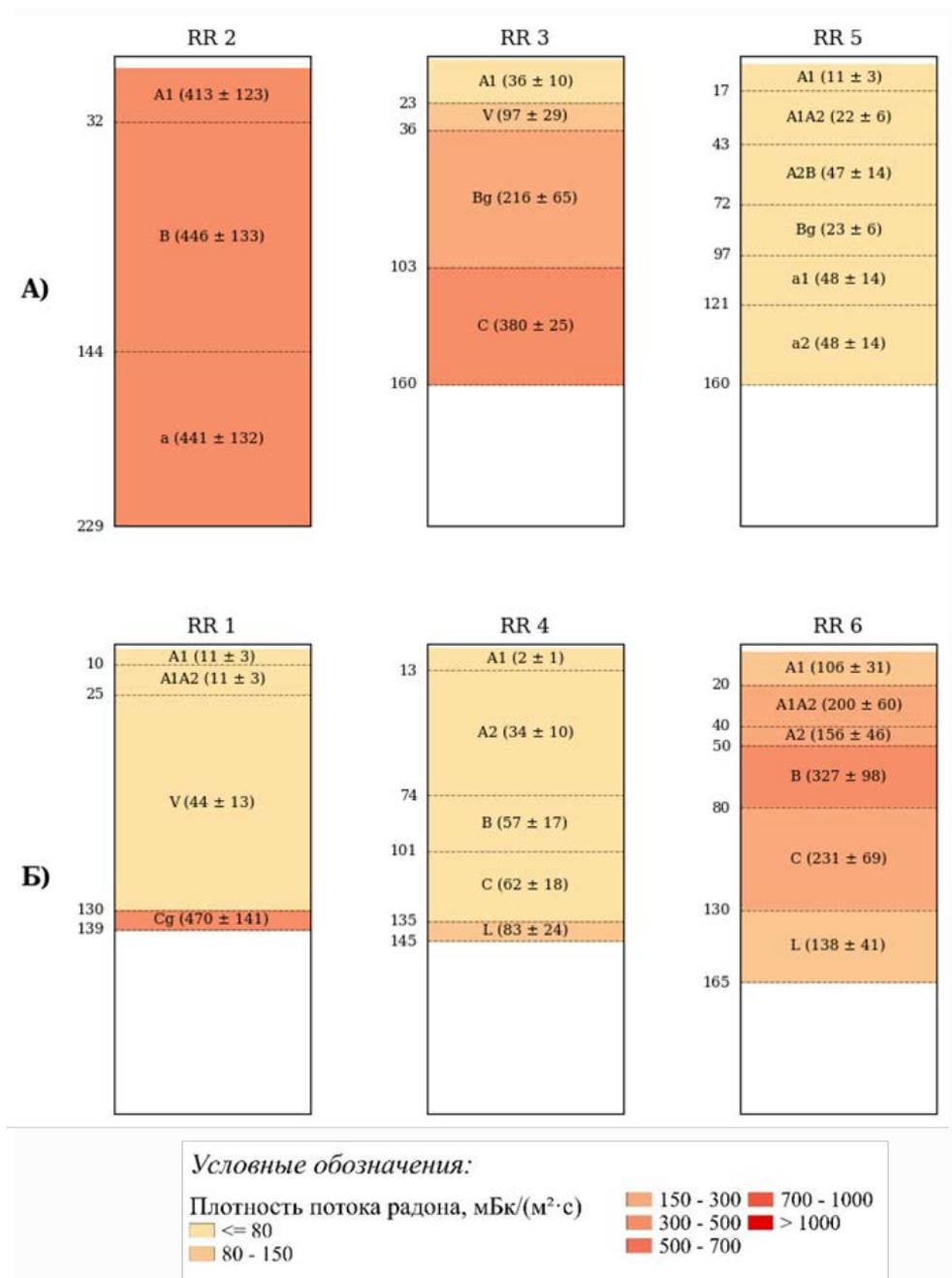


Рис. 4. Результаты вертикального распределения ППР в почвах профилей с. Луговое – р. Канырка – А (профиль Т-1) и пос. Туринский – с. Салаирка – Б (профиль Т-2) в границах Ливановского и Тюменско-Чудиновского разломов юга Тюменской области

Вертикальное распределение ППР в горизонтах почв неоднородно и зависит от профиля радоновой съемки исследуемой территории, однако имеет ряд общих закономерностей. Высокие значения ППР, вне зависимости от глубины и горизонтов почв/почвообразующих пород, обнаружены на периферийных участках профилей радоновой съемки – в разрезах RR-2 (профиль Т-1) и RR-6 (профиль Т-2). Аномальные значения ППР во всем профиле RR-2 и RR-6 исследуемых типов (подтипов) почв, судя по всему, связаны с близким расположением к разрывным нарушениям (трещинам), отходящим от Ливановского и Тюменско-Чудиновского разломов, а также с меньшей мощностью рыхлого осадочного чехла, в связи с чем эксхалация радона в данных местах усиливается, по сравнению с центральными территориями.

Во всех исследуемых типах почв выявлено постепенное, а в некоторых случаях резкое увеличение значений ППР с глубиной отбора проб почвенного воздуха. Изменения значений ППР в профиле почвы связаны с физическими свойствами изучаемых горизонтов, а именно – плотностью и гранулометрическим составом. В горизонтах почв и почвообразующих пород, имеющих меньшую плотность, а также с легким гранулометрическим составом выявлено уменьшение значений ППР по сравнению с более плотными и тяжелыми в гранулометрическом плане горизонтами. Данная особенность отчетливо прослеживается в почвенно-геологических разрезах RR-5 и RR-6, где в плотных средне- и тяжелосуглинистых горизонтах (A<sub>2</sub>B и B), являющихся естественными механическими барьерами, происходит накопление радона [Escobar, Tome, Lozano, 1999].

Причинами появления и накопления радона на глубине почв, по данным отечественных и зарубежных ученых, принято считать естественные процессы, связанные с содержанием материнских радионуклидов уран-радиевого ряда и физических свойств почвообразующих горных пород и почв, наличием тектонических нарушений фундамента территории в виде разломов и трещин, а также микроклиматических условий [Семинский, Бобров, Дэмбэрэл, 2019; Матвеев, Карабанов Автушко, 2017]. В табл. 2 представлены результаты расчета характера взаимодействия ППР в горизонте почв с микроклиматическими параметрами территории и физическими свойствами почвы, почвообразующей породы.

Таблица 2

Характер взаимодействия ППР с микроклиматическими условиями территории и физическими параметрами почвы

Параметр	Уравнение регрессии, коэффициент корреляции
Микроклиматические условия	
Температура воздуха	$y = 18,19x_1 + 261,41, r = 0,55$
Влажность	$y = -1,50x_2 + 241,66, r = 0,17$
Давление	$y = 15,32x_3 + 11486, r = 0,37$
Физические параметры почвы, почвообразующей породы	
Температура почвы	$y = 9,52x_4 + 14,69, r = 0,27$
Плотность почвы	$y = 166,78x_5 - 10,88, r = 0,47$

*Примечание:*  $x_1$  – температура воздуха;  $x_2$  – влажность воздуха;  $x_3$  – атмосферное давление;  $x_4$  – температура почвы;  $x_5$  – плотность почвы;  $y$  – плотность потока радона-222.

По результатам исследования установлено, что на вертикальное распределение ППР в почвах и почвообразующих породах влияет температура атмосферного воздуха ( $r = 0,55$ ), а также плотность почвы ( $r = 0,47$ ). Менее выраженная зависимость выявлена с атмосферным давлением ( $r = 0,37$ ) и температурой почвы ( $r = 0,27$ ). Взаимосвязи с влажностью воздуха установлено не было. Увеличение температуры атмосферного воздуха и, как следствие, температуры почвы уменьшает количество поровой влаги из-за ее постепенного испарения, что способствует образованию естественных микротрещин в почвенных горизонтах, увеличивающих эксхалляцию радона. Изменение плотности почвы с глубиной, связанное с ее постепенным переуплотнением, а также сменой гранулометрического состава, который образует естественные механические барьеры, препятствующие выходу радона на поверхность, формирует зоны его концентрации.

Аналогичные закономерности влияния микроклиматических параметров территории, а также физических свойств почв и почвообразующих пород отмечены в работах отечественных ученых [Удоратин, Езимова, Магомедова, 2021; Временные ... , 2011; Радоновые ... , 2023; Радоноопасность ... , 2020; Колобов, 2022] и др. Авторами отмечается, что на значение ППР оказывают влияние метеоусловия, наличие геодинамических активных зон, разломов, а также глубина, на которой выполнялось измерение.

### **Заключение**

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

1. Выявлены локальные аномалии плотности потока радона-222 с поверхности почвы, где полученные значения превышают предельно допустимые уровни в 80 и 250 мБк/м<sup>2</sup>·с для общественных, жилых, промышленных зданий и сооружений. Причинами высоких, а в некоторых случаях аномальных значений ППР с поверхности почвы территории исследования являются наличие глубинного залегания Ливановского и Тюменско-Чудиновского разломов, а также сопутствующих им нарушений (трещин), вытянутых в широтном и меридиональном направлениях.

2. В распределении радона по горизонтам почв выделяется общая ключевая закономерность, характерная для всех исследуемых типов (подтипов) почв, которая связана с увеличением значений ППР в зависимости от глубины. Высокое содержание радона, вне зависимости от глубины измерения, объясняется близостью расположения почвенного разреза к нарушениям (трещинам), отходящим от Ливановского и Тюменско-Чудиновского разломов в меридиональных и широтных направлениях.

3. К преимущественным природным факторам, оказывающим влияние на значения ППР в почвах исследуемой территории, относятся температура атмосферного воздуха, а также плотность почв. Влияние влажности воздуха, атмосферного давления и температуры почвы на значения ППР выявлено не было.

### Список литературы

Временные флуктуации плотности потока радона на территории Москвы / А. М. Маренный, П. С. Микляев, Т. Б. Петрова [и др.] // АНРИ. 2011. № 1. С. 23–36.

*Гвоздецкий Н. А.* Физико-географическое районирование Тюменской области. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1973. 246 с.

*Гурьев Н. Е., Клименко В. В.* Комплексное радиационно-экологическое исследование города Тюмени // Социально-экологические технологии. 2023. Т. 13, № 3. С. 278–291. <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2023-13-3-278-291>

*Демин В. Ф., Никонов И. В., Анциферова А. А.* Оценка риска воздействия радиоактивного радона на здоровье человека с учетом нанодисперсных продуктов его распада // Российские нанотехнологии. 2020. Т. 15, № 2. С. 252–258. <https://doi.org/10.1134/S1992722320020065>

*Каретин Л. Н.* Почвы Тюменской области. Новосибирск : Наука, 1990. 286 с.

Классификация и диагностика почв СССР / сост.: В. В. Егоров, В. М. Фридланд, Е. Н. Иванова [и др.] ; Почв. ин-т им. В. В. Докучаева. М. : Колос, 1977. 223 с.

*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>

*Кузьмин Ю. О., Жуков В. С.* Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. 2-е изд. М. : Горная книга, 2012. 264 с.

*Матвеев А. В., Карабанов А. К., Автушко М. И.* Радон в геологических комплексах Беларуси. Минск : Беларуская навука, 2017. 136 с.

*Микляев П. С., Петрова Т. Б.* Исследования аномальных сезонных вариаций плотности потока радона в зоне разлома // Геохимия. 2021. Т. 66, № 44. С. 364–378. <https://doi.org/10.31857/s001675252104004x>

*Наумов В. Д.* География почв. Общая часть : учебник. М. : РГ-Пресс, 2023. 304 с.

Радиационно-экологическая оценка оврага реки Тюменка в г. Тюмени / А. В. Синдирева, Н. Е. Гурьев, Ю. В. Венедиктова [и др.] // Социально-экологические технологии. 2024. Т. 14, № 4. С. 472–495. <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2024-14-4-472-495>

Радоновые аномалии в зонах активных разломов / П. С. Микляев, Т. Б. Петрова, А. В. Клишнин [и др.] // Сергиевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы инженерной геодинамики. 2023. Вып. 24. С. 51–56.

Радоноопасность геологической среды в угледобывающих районах: пространственное исследование с применением геоинформационных систем / Т. В. Лешуков, К. В. Легошин, А. В. Ларионов [и др.] // Успехи современного естествознания. 2020. № 7. С. 126–131. <https://doi.org/10.17513/use.37442>

Распределение радона-222 в почвах поймы и надпойменных террас рек Иртыша и Тобола / Г. С. Алимова, А. Ю. Токарева, И. А. Уткина [и др.] // Известия Томского политехнического университета. 2022. № 12. С. 168–177. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3818>

*Семинский К. Ж., Бобров А. А., Дэмбэрэл С.* Радоновая и тектоническая активность разломов земной коры (на примере Центральной Монголии) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60, № 2. С. 243–255. <https://doi.org/10.15372/GiG2019016>

*Старков В. Д., Мигунов В. И.* Радиационная экология. Тюмень : Тюмен. дом печати, 2007. 400 с

*Старков В. Д., Тюлькова Л. А.* Геология, рельеф, полезные ископаемые Тюменской области. Тюмень : Тюмен. дом печати, 2012. 352 с.

*Токарева А. Ю., Алимова Г. С.* Влияние глубины установки накопительных камер НК-32 на величину плотности потока радона // Проблемы региональной экологии. 2021. № 6. С. 92–102. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2021-6-98-102>

*Удортин В. В., Езимова Ю. Е., Магомедова А. Ш.* Радоновая съемка для картирования разломных зон Тимано-Североуральского региона. Сыктывкар : Ин-т геологии ФИЦ Коми НЦ УРО РАН, 2021. 153 с. <https://doi.org/10.19110/89606-020>

*Ahmad N., Khan I. U., Nasir T.* An overview of radon concentration in Malaysia // 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>

A new perspective in radon risk assessment: Mapping the geological hazard as a first step to define the collective radon risk exposure / E. Benà, G. Ciotoli, E. Petermann [et al.] // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 912. P. 169–569. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169569>

Assessment of radon risk areas in the Eastern Canary Islands using soil radon gas concentration and gas permeability of soils / H. Alonso, J. G. Rubiano, J. G. Guerra [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 664. P. 449–460. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.411>

Characterization of radon levels in soil and groundwater in the North Maladeta Fault area (Central Pyrenees) and their effects on indoor radon concentration in a thermal spa / V. Moreno, J. Bach, M. Zarroca [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. Vol. 189, P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.03.001>

*Drolet J.-P., Martel R.* Distance to fault as a proxy for radon gas concentration in dwellings // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015. Vol. 152. P. 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.10.023>

Duration versus intensity of exposure on the risk of lung cancer due to radon exposure in the general population / L. Martín-Gisbert, A. Ruano-Raviña, G. García [et al.] // *Science of The Total Environment*. 2025. Vol. 981. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179569>

*Escobar V. G., Tome F. V., Lozano J. C.* Procedures for the determination of  $^{222}\text{Rn}$  exhalation and effective  $^{226}\text{Ra}$  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)

Evaluation of Radon-222 concentrations in hair coloring products in Saudi Arabia / I. Al-Naggar Tayseer, J. Alsufyani Sultan, A. Saffah [et al.] // *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2025. Vol. 18, N 3. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2025.101683>

*Gogoi P. P., Phukan S., Barooah D.* Seasonal variations in indoor radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) and thoron ( $^{220}\text{Rn}$ ) levels, and radiation risks in the seismically active Kopili Fault Zone, India // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2025. Vol. 334. P. 3703–3728. <https://doi.org/10.1007/s10967-025-10094-2>

Indoor radon concentration and a diffusion model in dwellings situated in a subalkaline granitoid area, Southern Brazil / G. Romero-Mujalli, A. Roisenberg, A. Cordova-Gonzalez [et al.] // *Environmental Earth Sciences*. 2021. Vol. 80, N 17. P. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09849-3>

*Jędrzejek F., Szarłowicz K., Stobiński M.* A Geological Context in Radiation Risk Assessment to the Public // *International Journal Environmental Research Public Health*. 2022. N 19. Art. 11750. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811750>

Long Short Term Memory networks (LSTM)-Monte-Carlo simulation of soil ionization using radon / A. Muhammad, F. Kūlahcı, H. Salh [et al.] // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2021. Vol. 221. Art. 105688. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105688>

Low dose ionizing radiation effects on the immune system / K. Lumniczky, N. Impens, G. Armengol [et al.] // *Environment international*. 2021. Vol. 149. Art. 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, S. C. Das, M. G. Rasul [et al.] // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021. Vol. 329. P. 113. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07771-3>

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

Radon fluxes at four uranium mill tailings disposal sites after about 20 years of service / M. M. Mahfuz Siraz, M. S. Alam, A. M. Jubair [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 237. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106719>

*Rasha S. Ahmed* Estimating the effective dose to human organs due to soil radon in southern Iraq // *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2025. Vol. 18, N 3. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2025.101804>

*Spasić D., Gulan L., Vučković B.* Indoor radon testing, effective dose and mitigation measures in a residential house of a mining area // *Atmosphere*. 2024. Vol. 15. N 7. P. 745. <https://doi.org/10.3390/atmos15070745>

*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>

## References

Marenyyi A.M., Miklyaev P.S., Petrova T.B. et al. Vremennyye fluktuatsii plotnosti potoka radona na territorii Moskvy [Time Fluctuations of Radon Flux in Territory of Moscow]. *ANRI* [ANRI Journal], 2022, no. 1, pp. 23-26 (in Russian)

Gvozdetskii N.A. *Fiziko-geograficheskoe raionirovanie Tyumenskoi oblasti* [Physical and geographical zoning of the Tyumen region]. Moscow, Moscow University Press Publ., 1973, 246 p. (in Russian)

Gur'ev N.E., Klimenko V.V. Kompleksnoe radiatsionno-ekologicheskoe issledovanie goroda Tyumeni [Comprehensive radiation and ecological study of the city of Tyumen]. *Sotsialno-ekologicheskie tekhnologii* [Environment and Human: Ecological Studies], 2023, vol. 13, no. 3. pp. 278-291. <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2023-13-3-278-291> (in Russian)

Demin V.F., Nikonov I.V., Antsiferova A.A. Otsenka riska vozdeistviya radioaktivnogo radona na zdorov'e cheloveka s uchetom nanodispersnykh produktov ego raspada [Radon exposure risk assessment on human health taking into account nanodispersed degradation products]. *Rossiiskie nanotekhnologii* [Nanobiotechnology Reports], 2020, vol. 15, no. 2, pp. 252-258. <https://doi.org/10.1134/S1992722320020065> (in Russian)

Karetin L.N. *Pochvy Tyumenskoi oblasti* [Soils of the Tyumen region]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990, 286 p.

Egorov V.V., Friedland V.M., Ivanova E.N. et al. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* [Classification and diagnostics of soils of the USSR]. Moscow, Kolos Publ., 1977, 224 p.

Kolobov A.P. Plotnost' potoka Radona-222 v pochvakh Tobol'skogo raiona Tyumenskoi oblasti [The radon flux density in the Soils of the Tobolsk District of the Tyumen region]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle* [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)

Kuzmin Yu. O., Zhukov V.S. *Sovremennaya geodinamika i variatsii fizicheskikh svoystv gornyykh porod* [Modern geodynamics and variations in the physical properties of rocks]. Moscow, Gornaya kniga Publ, 2012, 264 p. (in Russian)

Matveev A.V., Karabanov A.K., Avtushko M.I. *Radon v geologicheskikh kompleksakh Belarusi* [Radon in geological complexes of Belarus]. Minsk, Republican Unitary Enterprise Publishing House Belarusian Science, 2017, 136 p. (in Russian)

Miklyaev P.S., Petrova T.B. Issledovaniya anomalnykh sezonnykh variatsii plotnosti potoka radona v zone razloma [Study of abnormal seasonal variations in the radon exhalation rate in a fault zone]. *Geokhimiya* [Geochemistry International], 2021, vol. 66, no. 44. pp. 364-378. <https://doi.org/10.31857/s001675252104004x> (in Russian)

Sindireva A.V. Gur'ev N.E., Venediktova Yu.V., Abdullin A.F. Radiatsionno-ekologicheskaya otsenka ovraga reki Tyumenka v g. Tyumeni [Radiation-ecological assessment of the ravine of the Tyumenka river, Tyumen]. *Sotsialno-ekologicheskie tekhnologii* [Environment and Human: Ecological Studies], 2024, vol. 14, no. 4, pp. 472-495. <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2024-14-4-472-495> (in Russian)

Naumov V.D. *Geographia pochv: obshchaya chast'* [Geography of soils: general part]. Moscow, RG-Press Publ., 2023, 304 p. (in Russian)

Miklyaev P.S., Petrova T.B., Klimshin A.V. et al. Radonovye anomalii v zonakh aktivnykh razlomov [Radon anomalies in active fault zones]. *Sergievskie chteniya. Fundamentalnye i prikladnyye voprosy inzhenernoi geodinamiki* [Sergeev readings fundamental and applied issues of modern ground study], 2023, no. 24, pp. 51-56. (in Russian)

Leshukov T.V., Legoshchin K.V., Larionov A.V., Lesin Yu.V. Radonopasnost geologicheskoi sredy v ugledobyvayushchikh raionakh: prostranstvennoe issledovanie s primeneniem geoinformatsionnykh sistem [Radon hazard of the geological environment in coal mining regions: a spatial study using geographic information systems]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in current natural sciences], 2020, vol. 7, pp. 126-131. <https://doi.org/10.17513/use.37442> (in Russian)

Alimova G.S. Tokareva A.Yu., Utkina I.A. Samkova M.V. Raspredelenie radona-222 v pochvakh poimy i nadpoimennykh terras rek Irtysha i Tobola [Radon-222 distribution in the soils of the floodplain and fluvial terraces above floodplain of the Irtysh and Tobol rivers]. *Izvestiya TPU* [Bulle-

tin of the Tomsk Polytechnic University], 2022. vol. 12, pp. 168-177. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3818> (in Russian)

Seminskii K. Zh., Bobrov A.A., Demberel S. Radonovaya i tektonicheskaya aktivnost' razlomov zemnoi kory (na primere Tsentralnoi Mongolii) [Radon and tectonic activities of crustal faults: the case of Central Mongolia]. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2019, no. 60, vol. 2, pp. 243-255. <https://doi.org/10.15372/GiG2019016> (in Russian)

Starkov V.D., Migunov V.I. *Radiatsionnaya ekologiya* [Radiation ecology]. Tyumen, Tyumen House of Printing Publ., 2007, 400 p. (in Russian)

Starkov V.D., Tyulkova L.A. *Geologiya, relief, poleznye iskopaemye Tyumenskoi oblasti* [Geology, topography and minerals of the Tyumen region]. Tyumen, Tyumen House of Printing Publ., 2012, 352 p. (in Russian)

Tokareva A.Yu. Alimova G.S. Vliyanie glubiny ustanovki nakopitel'nykh kamer NK-32 na velichinu plotnosti potoka radona [The impact of the deep of installation of NK-32 storage chambers on the radon flux density]. *Problemy regional'noi ekologii* [Problems of regional ecology], 2021, vol. 6, pp. 92-102. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2021-6-98-102> (in Russian)

Udoratin V.V., Ezimova Yu.E., Magomedova A.Sh. *Radonovaya s'emka dlya kartirovaniya razlomnykh zon Timano-Severouralskogo regiona* [Radon survey for mapping fault zones on the Timan-Seveuralsk region]. Syktyvkar, Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS Publ., 2021, 153 p. <https://doi.org/10.19110/89606-020> (in Russian)

Ahmad N., Khan I.U., Nasir T. 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>

Benà E, Ciotoli G., Petermann E. et al. A new perspective in radon risk assessment: Mapping the geological hazard as a first step to define the collective radon risk exposure. *Science of The Total Environment*, 2024. vol. 912, pp. 169-569. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169569>

Alonso H., Rubiano J.G., Guerra J.G. 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>

Moreno V., Bach J., Zarroca M. et al. Characterization of radon levels in soil and groundwater in the North Maladeta Fault area (Central Pyrenees) and their effects on indoor radon concentration in a thermal spa. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018. vol. 189, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.03.001>

Drolet J.-P., Martel R. Distance to fault as a proxy for radon gas concentration in dwellings. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2015. vol. 152, pp. 8-15. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.10.023>

Martín-Gisbert L., Ruano-Raviña A., García G. et al. Duration versus intensity of exposure on the risk of lung cancer due to radon exposure in the general population. *Science of The Total Environment*, 2025. vol. 981. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179569>

Escobar V.G., Tome F.V., Lozano J.C. Procedures for the determination of  $^{222}\text{Rn}$  exhalation and effective  $^{226}\text{Ra}$  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)

Al-Naggar Tayseer I., Alsufyani Sultan J., Saftah A. et al. Evaluation of Radon-222 concentrations in hair coloring products in Saudi Arabia. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2025, vol. 18, no. 3. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2025.101683>

Gogoi P.P., Phukan S., Barooah D. Seasonal variations in indoor radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) and thoron ( $^{220}\text{Rn}$ ) levels, and radiation risks in the seismically active Kopili Fault Zone, India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2025, vol. 334, pp. 3703-3728, <https://doi.org/10.1007/s10967-025-10094-2>

Romero-Mujalli G., Roisenberg A., Cordova-Gonzalez A. 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>

Jędrzejek F., Szarłowicz K., Stobiński M. A Geological Context in Radiation Risk Assessment to the Public. *International Journal Environmental Research Public Health*, 2022, no. 19, art. 11750. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811750>

Muhammad A., Kùlahcı F., Salh H. et al. Long Short Term Memory networks (LSTM)-Monte-Carlo simulation of soil ionization using radon. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2021, vol. 221, art. 105688. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105688>

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

Majumder R.K., Das S.C., Rasul M.G. 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 Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2021, vol. 329, pp. 113. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07771-3>

Omori Y., Nagahama H., Yasuoka 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>

Mahfuz Siraz M.M., Alam M.S., Jubair A.M. et al. Radon fluxes at four uranium mill tailings disposal sites after about 20 years of service. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2021, vol. 237. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106719>

Rasha S. Ahmed Estimating the effective dose to human organs due to soil radon in southern Iraq. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2025, vol. 18, no. 3. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2025.101804>

Spasić D., Gulan L., Vučković B. Indoor radon testing, effective dose and mitigation measures in a residential house of a mining area. *Atmosphere*, 2024, vol. 15, no. 7, pp. 745. <https://doi.org/10.3390/atmos15070745>

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>

#### Сведения об авторах

##### **Гурьев Никита Евгеньевич**

старший преподаватель, кафедра  
геоэкологии и природопользования  
Тюменский государственный университет  
Россия, 625003, г. Тюмень,  
ул. Володарского, 6  
e-mail: nikitka.gurev.1996@mail.ru

##### **Рыбина Арина Александровна**

студент  
Тюменский государственный университет  
Россия, 625003, г. Тюмень,  
ул. Володарского, 6  
e-mail: aydzya13@yanex.ru

##### **Зонова Екатерина Олеговна**

студент  
Тюменский государственный университет  
Россия, 625003, г. Тюмень,  
ул. Володарского, 6  
e-mail: quemurrr@gmail.com

#### Information about the authors

##### **Guryev Nikita Evgenievich**

Senior Lecturer, Department of Geoecology  
and Environmental Management  
Tyumen State University  
6, Volodarsky st., Tyumen, 625033,  
Russian Federation  
e-mail: nikitka.gurev.1996@mail.ru

##### **Rybina Arina Aleksandrovna**

Student  
Tyumen State University  
6, Volodarsky st., Tyumen, 625033,  
Russian Federation  
e-mail: aydzya13@yanex.ru

##### **Zonova Ekaterina Olegovna**

Student  
Tyumen State University  
6, Volodarsky st., Tyumen, 625033,  
Russian Federation  
e-mail: quemurrr@gmail.com

Код научной специальности: 1.6.21

Статья поступила в редакцию 14.11.2025; одобрена после рецензирования 02.03.2026; принята к публикации 13.03.2026

The article was submitted November, 14, 2025; approved after reviewing March, 02, 2026; accepted for publication March, 13, 2026