

## Экспериментальные наблюдения за эмиссией радона на Червонослободско-Малодушинском разломе в связи с наведенной сейсмичностью в Солигорском горнопромышленном районе

Г. А. Аронов, А. Г. Аронов, С. Г. Котов

Центр геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь; [info@cgm.by](mailto:info@cgm.by)

Солигорский горнопромышленный район (СГПР) включает в себя Старобинское месторождение калийных солей, которое разрабатывается с начала 60-х годов, и сопредельные территории с зоной жилой застройки. Район добычи калийных солей входит в Старобинскую центриклиналь северо-западной части Припятского прогиба, древнего палеорифта. За время разработки месторождения наблюдалось активное проявление сейсмических событий небольшой магнитуды, ряд землетрясений имели ощутимый характер. Актуальной задачей для СГПР является проведение непрерывных наблюдений за геодинамическими и геохимическими процессами в разломных зонах.

Экспериментальные исследования по измерению объемной активности радона проводились в осенне-летний период 2025 года в южной части Старобинского месторождения калийных солей на Червонослободско-Малодушинском региональном разломе. Для проведения экспериментальных наблюдений объемной активности радона использовался измерительный комплекс «Альфарад плюс», оснащенный системой передачи данных. Измерения проводились в соответствии со схемами и режимами, рекомендуемыми производителем комплекса (Руководство..., 2021).

Получены первые результаты эмиссии радона и выявлен ряд аномальных значений за некоторое время до проявления сейсмических событий.

**Ключевые слова:** горнопромышленные работы, сейсмичность, мониторинг, разлом, радон, эмиссия

## Experimental observations of radon emission at the Chervonaya Sloboda-Malodusha fault due to induced seismicity within the Soligorsk Mining Region

G. A. Aronov, A. G. Aronov, S. G. Kotov

Centre of Geophysical Monitoring of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

The Starobin deposit of potassium salts is the largest one in Europe, it was discovered in 1949 and has been developed since the early 1960s. Together with the town of Soligorsk and its adjacent territories it forms the Soligorsk mining region. This region is located in the Starobin centrocline within the Pripyat Trough northwestern part and is characterized by a high level of man-made impact on the subsoil due to the underground development of potash horizons. The problem of increased geodynamic activity monitoring within the territory of the Soligorsk mining region has become extremely urgent since the end of the 1970s, when the first significant earthquake occurred there on the 10<sup>th</sup> of May, 1978 (Aronov et al., 2010).

Experimental investigations, aimed at measuring the radon volume activity, were carried out on the outskirts of Minsk in the winter period 2024–2025 and in the southern part of the Starobin potassium salt deposit within the Chervonaya Sloboda-Malodusha fault in the autumn–summer period 2025. Measuring System “Alpharad plus” for radon volume activity monitoring equipped with data transmission capability was used for experimental observations. Measurements were carried out in accordance with the diagrams and modes recommended by the System manufacturer (Manual, 2021).

First results of the radon emission monitoring were obtained, and a series of anomalous radon emission values was observed prior to the occurrence of seismic events.

**Keywords:** mining activities, seismicity, monitoring, fault, radon, emission

### Введение

Проведение непрерывного сейсмологического мониторинга на эксплуатируемых крупных месторождениях калийных солей позволяет сформировать оценку и прогноз сейсмической опасности района. Сейсмические события в СГПР приурочены к актив-

ным зонам тектонических разломов и связаны с изменениями напряжений в горизонтах за счет природных тектонических сил. Пространственное распределение сейсмической активности охватывает не только зону шахтной выработки, но и большую часть сопредельных территорий. Пространственное развитие

**Для цитирования:** Аронов Г. А., Аронов А. Г., Котов С. Г. Экспериментальные наблюдения за эмиссией радона на Червонослободско-Малодушинском разломе в связи с наведенной сейсмичностью в Солигорском горнопромышленном районе // Вестник геонаук. 2026. 4(376). С. 20–24. DOI: 10.19110/geov.2026.4.3

**For citation:** Aronov G. A., Aronov A. G., Kotov S. G. Experimental observations of radon emission at the Chervonaya Sloboda-Malodusha fault due to induced seismicity within the Soligorsk Mining Region. Vestnik of Geosciences, 2026, 4(376), pp. 20–24. DOI: 10.19110/geov.2026.4.3



(МАН), Листопадовичи (LST) — для регистрации сейсмических событий.

Центр обработки и сбора данных функционирует на сейсмической станции «Старобин».

Разрешающая способность локальной сети наблюдений позволяет регистрировать сейсмические события на всей территории СГПР с уровня локальной магнитуды  $M \geq 1.0$ . На рис. 1 приведена схема расположения локальной сети сейсмических станций в СГПР.

Анализ информации о пространственно-временных закономерностях развития сейсмической активности позволяет получить сведения о деформационных процессах в регионе. Такая информация необходима в целях слежения за развитием сейсмической активности. Кроме того, важным фактором является заблаговременность установки сети мониторинга не только для проведения сейсмологических наблюдений, но и организации наблюдений за информативными геофизическими параметрами, сопутствующими или предшествующими сейсмическим событиям.

В связи с этим следует отметить, что объемная активность почвенного радона (далее — ОАР) достаточно часто используется как информативный параметр изменений напряженно-деформированного состояния верхней части геологической среды. Существует несколько моделей подготовки тектонического события, и практически все они описывают соотношение «напряжение — деформация» с некоторыми отличиями по стадиям трещинообразования. При этом за счет изменения напряженного состояния геологической среды в ней образуются зоны сжатия и растяжения.

ОАР напрямую зависит от изменения пористости и проницаемости среды и меняется в зависимости от зоны. Так, в зоне сжатия происходит вытеснение радона из порового пространства до максимальных значений с последующим уменьшением их до фоновых в связи с уплотнением массива и уменьшением пор и трещин. В зоне растяжения за счет образования новых пор и трещин появляется избыточный радон, и его активность растет до критических значений напряженности. Работы, связанные с изучением радона, охватывают широкие области исследования, начиная от экологических проблем и радиационной безопасности и заканчивая прогнозом природных катастрофических событий, таких как землетрясения и горные удары (Козлова и др., 2022; Рудаков, 2009; Baskaran, 2016).

## Методы исследования

Из литературных источников (Разломы..., 2007; Рудаков, 2009; Baskaran, 2016) хорошо известно, что повышенная объемная активность радона, как правило, наблюдается в местах разлома земной коры. На рис. 1 видно, что из 8 пунктов наблюдений с установленными сейсмическими станциями только два пункта — Махновичи и Волоты — находятся на разломах соответственно Червонослободско-Малодушинском и Северо-Припятском. Дооснащение пунктов наблюдений за пространственно-временными и энергетическими параметрами очагов сейсмических событий в СГПР приборами мониторинга объемной активности радона позволит соотносить результаты указанных наблюдений с результатами мониторинга объемной активности радона в той же точке. Наличие тех-

нических возможностей для удаленной передачи всего объема интересующих данных на пункте Махновичи послужило основанием для выбора в первую очередь данного пункта.

Циклические экспериментальные наблюдения за ОАР проводились в осенне-летний период 2025 года на пункте сейсмологических наблюдений «Махновичи», который расположен в южной части СГПР в зоне Червонослободско-Малодушинского разлома. Этот разлом имеет простирание с юго-востока на северо-запад и относится к региональным разломам, проникающим в чехол (рис. 1, разлом № 5).

Основные параметры разлома:

- длина — 120 км (в пределах площади СГПР);
- зона динамического влияния — 3–5 км;
- средний азимут простирания — 105–109°;
- глубинность — мантийный;
- характеристика плоскости — листрический;
- время формирования разлома — платформенный период;
- степень сейсмической активности — сейсмогенный (Разломы..., 2007).

За период 1983–2021 гг. зарегистрировано 130 землетрясений с эпицентрами в пределах сейсмоактивного участка Червонослободско-Малодушинского разлома в диапазоне энергетических классов  $K = 4.8–8.6$  (локальная магнитуда  $M = 0.4–2.5$ ).

Следует также отметить, что в районе 52.71° северной широты и 27.30° восточной долготы расположен узел пересечения Червонослободско-Малодушинского регионального разлома и Стоходско-Могилевского суперрегионального разлома.

Для проведения экспериментальных наблюдений ОАР использовался измерительный комплекс «Альфарад плюс», оснащенный системой передачи данных. Измерение активности радона-222 с использованием комплекса «Альфарад плюс» основано на электростатическом осаждении заряженных ионов  $^{218}\text{Po}$  из отобранной пробы воздуха на поверхность полупроводникового детектора. Объемная активность  $^{222}\text{Rn}$  определяется по количеству зарегистрированных альфа-частиц при распаде атомов  $^{218}\text{Po}$ , осевших на полупроводниковом детекторе.

При циклических измерениях ОАР в районе Червонослободско-Малодушинского регионального разлома отбор проб воздуха осуществлялся в соответствии со схемой перевода пробы в блок измерения объемной активности без специального пробоотборника. Измерения проводились в режиме «Циклический отбор воздуха» ежечасно в периоды с 30 июня по 30 июля 2025 г. и со 2 по 25 сентября 2025 г. (Руководство..., 2021).

## Результаты и обсуждение

Предел допустимой основной относительной погрешности измерения ОАР в пробах составляет  $\pm 20\%$  (Руководство..., 2021). В связи с этим исходные графики измерений характеризуются большой «изрезанностью». Для изучения характера изменений ОАР во времени были разработаны алгоритм и программа сглаживания полученных данных.

В разработанном алгоритме последовательно анализируются все полученные значения: «дата/время — объемная активность радона — абсолютная погреш-



ность измерения объемной активности радона» передаваемые от прибора «Альфарад плюс». Все первые нулевые значения ОАР игнорируются и находится первое значение, отличное от нуля. Для этого значения исходя из абсолютной погрешности измерения объемной активности радона находится диапазон возможного значения ОАР.

Выбирается следующее значение из массива данных, для которого находится диапазон возможного значения ОАР. Анализируется перекрытие двух диапазонов значений объемной активности радона. Если два диапазона перекрываются, оба значения объемной активности радона заносятся в промежуточный массив. Затем выбирается следующее значение из массива данных «дата/время — объемная активность радона — абсолютная погрешность измерения объемной активности радона» и процесс расчета и анализа повторяется.

Очевидно, что на каком-то этапе диапазоны значений перестают перекрываться. Тогда проверяется условие наличия в промежуточном массиве не менее двух значений. Если условие выполняется, то на основе данных ОАР массива находится среднее значение объемной активности радона, которое и присваивается всем элементам массива. Значение ОАР, вышедшее за диапазон, присваивается первому элементу промежуточного массива и процесс расчета и анализа повторяется снова.

Для реализации данного алгоритма разработана программа AverageRadonValue.exe. С помощью данной программы получены сглаженные зависимости «дата/время — объемная активность радона» в периоды с 30 июня по 30 июля 2025 г. (рис. 2) и со 2 по 25 сентября 2025 г.

Как видно на рис. 2, 10 июля 2025 года было два сильных «выброса» значений ОАР (рис. 2), первый —  $10\,599\text{ Бк/м}^3$  — в 14 ч. 37 мин. и второй —  $12\,074\text{ Бк/м}^3$  — в 16 ч. 35 мин. На следующий день, 11 июля 2025 года, в 8 ч. 56 мин. зарегистрировано сейсмическое событие магнитудой  $M = 1.4$  на расстоянии 59 км от пункта измерения ОАР.

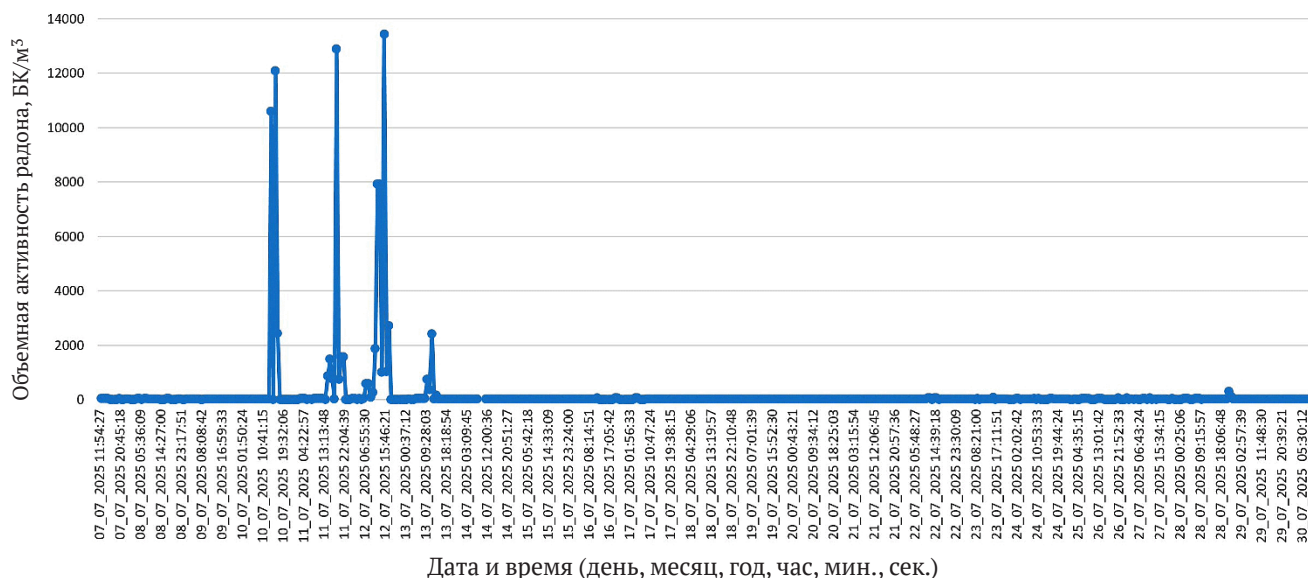


Рис. 2. Сглаженная объемная активность радона ( $\text{Бк/м}^3$ ) в период 7–30 июля 2025 г.

Fig. 2. Smoothed radon volume activity ( $\text{Bq/м}^3$ ) within July 7–30, 2025

В этот же день, 11 июля 2025 года, измеренное в 19 ч. 07 мин. значение ОАР составило  $12\,879\text{ Бк/м}^3$  (рис. 2), а 12 июля 2025 года в 07 ч. 43 мин. зарегистрировано сейсмическое событие магнитудой  $M = 1.8$  на расстоянии 41 км от пункта наблюдений ОАР.

Позднее, 12 июля 2025 года, измеренное в 15 ч. 46 мин. значение ОАР составило  $13\,427\text{ Бк/м}^3$  (рис. 2), а 13 июля 2025 года в 08 ч. 48 мин. произошло сейсмическое событие магнитудой  $M = 2.4$  на расстоянии 20 км от пункта наблюдений ОАР.

Следует отметить, что 13 июля 2025 года значение ОАР, измеренное в 12 ч. 25 мин., также оказалось достаточно высоким —  $2\,420\text{ Бк/м}^3$  (рис. 2), однако последующей сейсмической активности в пределах СГПР не наблюдалось. В период с 16 по 17 июля 2025 года максимальные значения ОАР составили  $52\text{--}60\text{ Бк/м}^3$ .

За весь период цикла наблюдений таких высоких значений ОАР, которые предшествовали местным сейсмическим событиям, больше не наблюдалось. Измеренные значения ОАР были достаточно стабильны и находились в пределах  $40\text{--}300\text{ Бк/м}^3$ .

Пространственное расположение сейсмических событий, зарегистрированных в пределах СГПР в период проведения мониторинга ОАР в 2025 году, представлено на рис. 3. На рисунке видно, что сейсмические события группируются в одном направлении. При этом сейсмические события 12 июля и 23 июля 2025 г. находятся практически на одном луче с разными эпицентрными расстояниями, из которых для ближнего расстояния наблюдались высокие значения ОАР, а для дальнего отсутствовали.

## Выводы

Выявлены признаки реакции активности радона, предшествующей местным сейсмическим событиям в Солигорском горнопромышленном районе, что обосновывает необходимость проведения дальнейшего мониторинга активности радона для изучения ее связи с происходящим сейсмическими событиями в Солигорском горнопромышленном районе.

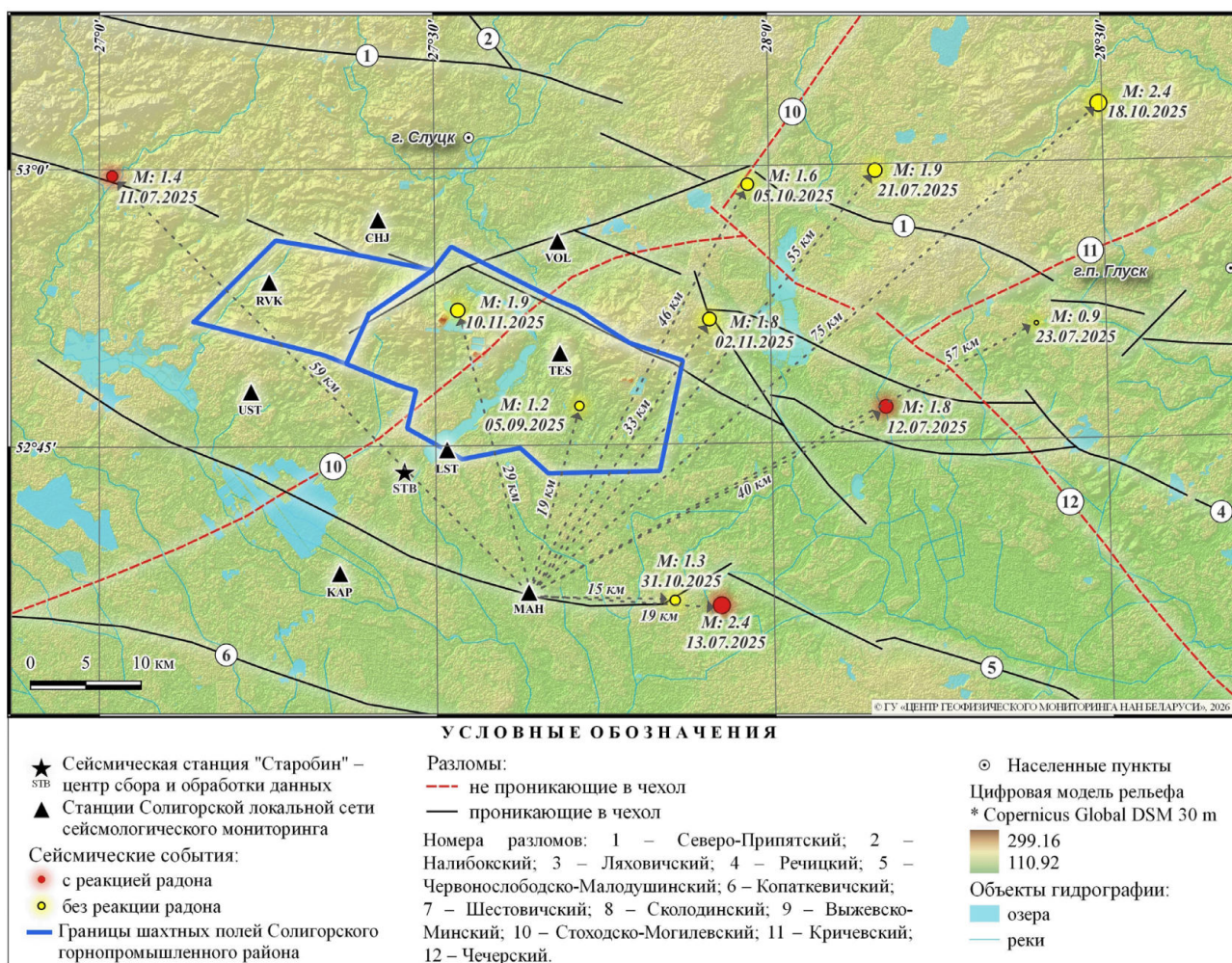


Рис. 3. Сейсмические события во время мониторинга объемной активности радона в 2025 году на Старобинском месторождении калийных солей

Fig. 3. Seismic events recorded during radon volume activity monitoring in the Starobin potassium salt deposit in 2025

## Литература / References

Козлова И. А., Юрков А. К., Бирюлин С. В. Вариации объемной активности радона при техногенных и тектонических сейсмических событиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 5—1. С. 119—130.

Kozlova I. A., Yurkov A. K., Birjulin S. V. Variations of the radon volumetric activity during man-made and tectonic seismic events. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2022;5(1):119—130. Russian.

Матвеев А. В., Автушко М. И., Исаченко С. А. О влиянии атмосферных осадков и лунно-солнечного гравитационного воздействия на концентрацию радона в поровом воздухе дисперсных грунтов // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2022. Т. 66, № 2. С. 223—228.

Matveyev A. V., Avtushko M. I., Isachenko S. A. About the influence of the atmospheric precipitation and lunar and solar gravity effect on the radon concentration in the pore air in dispersed soils. Doklady NAS of Belarus. 2022;66(2):223—228. Russian.

Разломы земной коры Беларуси: монография / Р. Е. Айзберг и др.; под ред. Р. Е. Айзберга. Минск: Красико-Принт, 2007. 372 с.

Faults of the Earth's Crust of Belarus. Aizberg R. Ye. et al. R. Ye. Aizberg — editor. Minsk: Krasiko-Print; 2007. 372 p. Russian.

Рудаков В. И. Эманионный мониторинг геосред и процессов. М.: Высшая школа, 2009. 176 с.

Rudakov V. I. Emanation monitoring of geological environments and processes. Moscow: Vysshaya Shkola; 2009. 176 p. Russian.

Руководство по эксплуатации БВЕК 590000.001 РЭ. Руководство по эксплуатации комплекса для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс РП». М., 2021. 81 с.

Operation Manual for BVEK 590000.001 RE. Operation manual for the measuring system for monitoring radon, thoron, and their progeny products "Alpharad plus RP". Moscow, 2021. 81 p. Russian.

Aronov A. G., Seroglazov R. R., Aronova T. I. Seismicity of Belarus. Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica. 2010;45(3 September):324—339.

Baskaran M. Radon: A tracer for geological, geophysical and geochemical studies. Springer Geochemistry; 2016. 260 p.

Поступила в редакцию / Received 4.03.2026