

УДК 553.53 (470.22)

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ РАДОНА-222 В ПРЕДЕЛАХ ОНЕЖСКОЙ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОЙ СТРУКТУРЫ, РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ

**А. М. Ильин, А. В. Шмаков\*, Д. Р. Семочкин**

*Петрозаводский государственный университет (пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), \*shav@microklin.ru*

Исследованы проявления объемной активности изотопа радона  $^{222}\text{Rn}$  на карьерах по добыче каменных строительных материалов, расположенных в пределах интрузивов габбро-долеритов Онежской палеопротерозойской структуры на территории Кондопожского и Прионежского районов Республики Карелия. Изменение активности  $^{222}\text{Rn}$  изучено также вне действующих карьеров вдоль простирающихся известных геологических разломов и вблизи урановых рудопроявлений, приуроченных к кварцитопесчаникам шокшинской и петрозаводской свит. Измерения объемной активности проводились с использованием комплекса «Альфарад+ АРП» на открытом пространстве и в помещениях методом подсчета альфа-распадов в ионизационной камере с экспозицией 20 мин. Экспериментальные данные были получены в соответствии с аттестованными для этих комплексов методиками. Наблюдения выполнялись на открытом пространстве действующих карьеров с измерениями изотопа радона до взрыва и после взрыва. Полученные результаты позволяют предположить наличие связи между сейсмическим воздействием на горный массив и изменением концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в воздухе. Также выявлены ураганные концентрации  $^{222}\text{Rn}$ , которые можно связать с известной ураноносностью горных пород исследуемого района.

Ключевые слова: изотоп радона-222; объемная активность; карьеры; каменные строительные материалы; Республика Карелия

Для цитирования: Ильин А. М., Шмаков А. В., Семочкин Д. Р. Исследования проявлений радона-222 в пределах Онежской палеопротерозойской структуры, Республика Карелия // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 6. С. 58–67. doi: 10.17076/geo1955

## **A. M. Ilyin, A. V. Shmakov\*, D. R. Semochkin. STUDIES OF RADON-222 OCCURRENCES WITHIN THE ONEGA PALAEOPROTEROZOIC STRUCTURE, REPUBLIC OF KARELIA**

*Petrozavodsk State University (33 Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), \*shav@microklin.ru*

The volumetric activity of the radon isotope  $^{222}\text{Rn}$  in quarries mined for stone building materials within gabbro-dolerite intrusions of the Onega Palaeoproterozoic structure in the Kondopozhsky and Prionezhsky Districts of the Republic of Karelia was studied. Also, changes in the activity were explored along the highway running along the southwestern shore of Lake Onego, considering the known geological faults and uranium ore occurrences

in quartzite sandstones of the Shoksha and Petrozavodsk suites. Volumetric activity measurements were conducted using the Alfarad+ ARP system outdoors and indoors by counting alpha decays in an ionization chamber during 20 min exposure. Experimental data were obtained using the techniques certified for such systems. Radon isotope measurements were taken in open spaces of active quarries before and after blasting. The results suggest there is a connection between the seismic impact on the rock massif and changes in  $^{222}\text{Rn}$  concentration in the air. We have also detected outlier concentrations of  $^{222}\text{Rn}$ , which can be associated with the known uranium content of rocks in the studied area.

**Keywords:** radon-222 isotope; volumetric activity; quarry; stone building materials; Republic of Karelia

For citation: Ilyin A. M., Shmakov A. V., Semochkin D. R. Studies of radon-222 occurrences within the Onega Palaeoproterozoic structure, Republic of Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 6. P. 58–67. doi: 10.17076/geo1955

## Введение

Радон (Rn) – это радиоактивный газ природного происхождения. Он образуется в процессе природного радиоактивного распада изотопов уранового ряда, присутствующих во всех горных породах и почвах [Титов и др., 2000]. Радон высвобождается в воздух с образованием радиоактивных частиц. Наиболее долгоживущим и устойчивым из четырех природных изотопов радона ( $^{218}\text{Rn}$ ,  $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ) является изотоп  $^{222}\text{Rn}$  (с периодом полураспада ( $T_{1/2}$ ) = 3,8 суток). От 40 до 90 % излучения среди всех природных источников приходится на долю радона и дочерних продуктов его распада [Киселев и др., 2019; Карпин, 2020].

Единицей измерения радиоактивности является беккерель (Бк). Принято считать, что концентрация радона в воздухе равна числу радиоактивных распадов в секунду в одном кубическом метре воздуха (Бк/м<sup>3</sup>). Уровни концентрации радона имеют широкий диапазон значений – от первых единиц до более 10 000 Бк/м<sup>3</sup> [Жуковский, 2009]. Геохимической особенностью кристаллических горных пород является содержание в том или ином количестве урана, входящего в состав породообразующих минералов. Транспортировка радона зависит от флюида и в значительной мере – от текстурно-структурных особенностей горных пород – проницаемости, порового пространства, трещиноватости [Ball et al., 1991]. Также на перенос  $^{222}\text{Rn}$  могут оказывать влияние метеорологические факторы, такие как скорость ветра и вертикальное перемешивание воздушных масс [Paatero et al., 2023].

Прямое влияние на эманацию радона из горных пород оказывает их структурная и текстурная неоднородность, степень разуплотнения, наличие зон тектонических нарушений в пределах отдельных массивов. Исследования влияния

геологических факторов на концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в Норвегии показали, что выходящие на дневную поверхность коренные породы, представленные гранитами и глиноземистыми сланцами, характеризуются повышенным содержанием радия, а высокопроницаемые рыхлые отложения (флювиогляциальные и речные) являются наиболее радоноопасными [Sundal et al., 2004]. В свою очередь, на территории Финляндии наиболее большие источники U и Rn приурочены к гранитам и мигматитам с обильными пегматитовыми жилами [Lahermo, Juntunen, 1991]. Известны случаи, когда в районе залегания богатых торием докембрийских карбонатитовых пород также были установлены высокие (до 1200 Бк/м<sup>3</sup>) значения уровня  $^{222}\text{Rn}$  [Sundal, Strand, 2004].

Согласно Нормам радиационной безопасности НРБ 99/2009 (СанПиН 2.6.1.2523 – 09) установлены предельные допустимые среднегодовые значения эквивалентной равновесной объемной активности радона и его дочерних продуктов распада в воздухе жилых и общественных зданий: 100 Бк/м<sup>3</sup> в строящихся и реконструируемых зданиях, а также зданиях, строительство которых осуществлялось после 1991 г.; 200 Бк/м<sup>3</sup> в эксплуатируемых зданиях, построенных до 1991 г. Для сравнения, измерение содержания радона в помещениях на территории Финляндии показало, что для примерно 30 % домов зарегистрированы концентрации выше 400 Бк/м<sup>3</sup> [Castren et al., 1985]. Активная добыча нерудных полезных ископаемых, таких как щебень и блочный камень, вероятно, также приводит к увеличению концентрации изотопа  $^{222}\text{Rn}$  в близповерхностном воздушном пространстве. Это может происходить вследствие формирования зон разуплотнения массивов пород при проведении горно-взрывных работ, в результате чего активизируются процессы эксхалляции радона [Булашевич и др., 1996; Уткин, Юрков, 2009; Козлова и др., 2022].

Таким образом, территорию Республики Карелия с точки зрения активности радона следует рассматривать в качестве потенциально опасной вследствие как особенностей геологического строения, так и развитой горнодобывающей отрасли. В настоящей работе представлены результаты исследования проявлений  $^{222}\text{Rn}$  в пределах Онежской палеопротерозойской структуры на территории Прионежского и Кондопожского районов Республики Карелия. В задачи исследования входило получение массива экспериментальных данных на открытых пространствах действующих карьеров по добыче каменных строительных материалов и последующий мониторинг концентраций  $^{222}\text{Rn}$  в моменты до и после промышленного взрыва, а также наблюдения в области развития уранового оруденения в Западном Прионежье.

## Материалы и методы

Регистрация объемной активности (ОА) радона проводилась с использованием комплекса «Альфарад+ АРП» (ООО «НТМ-Защита», Россия) в режиме ОА-20. В этом режиме осуществляется отбор пробы воздуха с поверхности с помощью встроенной воздуходувки в течение 3 минут, измерение ОА радона с экспозицией 20 минут, обработка полученных результатов и вывод их на экран. Значение ОА радона вычисляется по окончании измерения. Прибор позволяет измерять ОА радона до  $2 \times 10^6$  Бк/м<sup>3</sup>. Измерение ОА  $^{222}\text{Rn}$  основано на электростатическом осаждении заряженных ионов  $^{218}\text{Po}$  (RaA) из отобранной пробы воздуха на поверхность полупроводникового детектора. Определение ОА для  $^{222}\text{Rn}$  выполняется по количеству зарегистрированных альфа-частиц при распаде атомов RaA, осевших на полупроводниковом детекторе. Экспериментальные данные были получены в соответствии с аттестованными для этих комплексов методиками.

Полевые измерения  $^{222}\text{Rn}$  проводились на территории действующих карьеров «Суна», «Большая Уя», «Другорецкое-2», где регулярно выполняются взрывные работы. Расположение карьеров указано на обзорной геологической карте (рис. 1). Измерения ОА радона проводились на локальных участках открытого пространства карьеров (подшвы горизонтов) и в производственных помещениях (бытовые комплексы) методом подсчета альфа-распадов в ионизационной камере.

Месторождение щебня «Суна» расположено в Кондопожском районе Республики Карелия недалеко от с. Янишполе к юго-западу от г. Кондопога (N62°09'31", E34°11'18").

Полезная толща месторождения сложена интрузивными породами палеопротерозойского габбродолеритового дайкового комплекса. В структурном отношении эти породы приурочены к восточному крылу антиклинальной структуры третьего порядка, ось которой проходит западнее участка месторождения. Крылья антиклинали сложены мелкозернистыми диабазами, диабазовыми порфиритами, миндалекаменными диабазами, крупно-среднекристаллическими габбро и габбродиабазами. Мощность силла варьирует от 50 до 200 м [Кайряк, 1964; Михайлов, 1981]. Тектонических нарушений, влияющих на структуру участка, в пределах месторождения «Суна» не установлено [Дегтярев, 2006].

Месторождение щебня «Большая Уя» находится в Прионежском районе Республики Карелия в 5 км юго-восточнее ж/д станции Деревянка (N61°31'01", E34°32'13"). Месторождение располагается в юго-западной части Онежской структуры, приурочено к дайковому комплексу палеопротерозойского возраста, залегающему в виде мощного силла в кварцитопесчаниках шокшинской свиты. Полезная толща месторождения представлена массивными мелко-среднезернистыми и среднезернистыми габбродолеритами, разбитыми вертикальными и горизонтальными трещинами отдельности. Структура массива габбродолеритов имеет блоковое строение, обусловленное смещениями по зонам мощных тектонических разломов, рассекающих породы с северо-востока на юго-запад. Интенсивность удельной трещиноватости по данным ранее проведенных работ составила 2,25 м/м<sup>2</sup> (сильнотрещиноватые породы) [Торицын, 2009].

Месторождение облицовочного камня «Другорецкое-2» также располагается в пределах юго-западной части Онежской структуры (N61°15'14", E35°33'36"). Разлом, обрамляющий месторождение с северо-запада, образует крутой склон грядобразной возвышенности над долиной реки Другая. В геологическом аспекте месторождение «Другорецкое-2» представляет собой участок силла, сложенный габбродолеритом субширотного простирания с видимой мощностью около 60 м [Тыркин, 2016].

Следует отметить, что выбор для изучения месторождений «Большая Уя» и «Другорецкое-2» обусловлен их активным промышленным использованием и наличием различно проницаемых участков и тектонических зон в пределах горных массивов. Кроме того, для изучаемой территории характерна ураноносная минерализация в сероцветных песчаниках, которая потенциально может служить эндогенным источником радона [Онежская..., 2011].

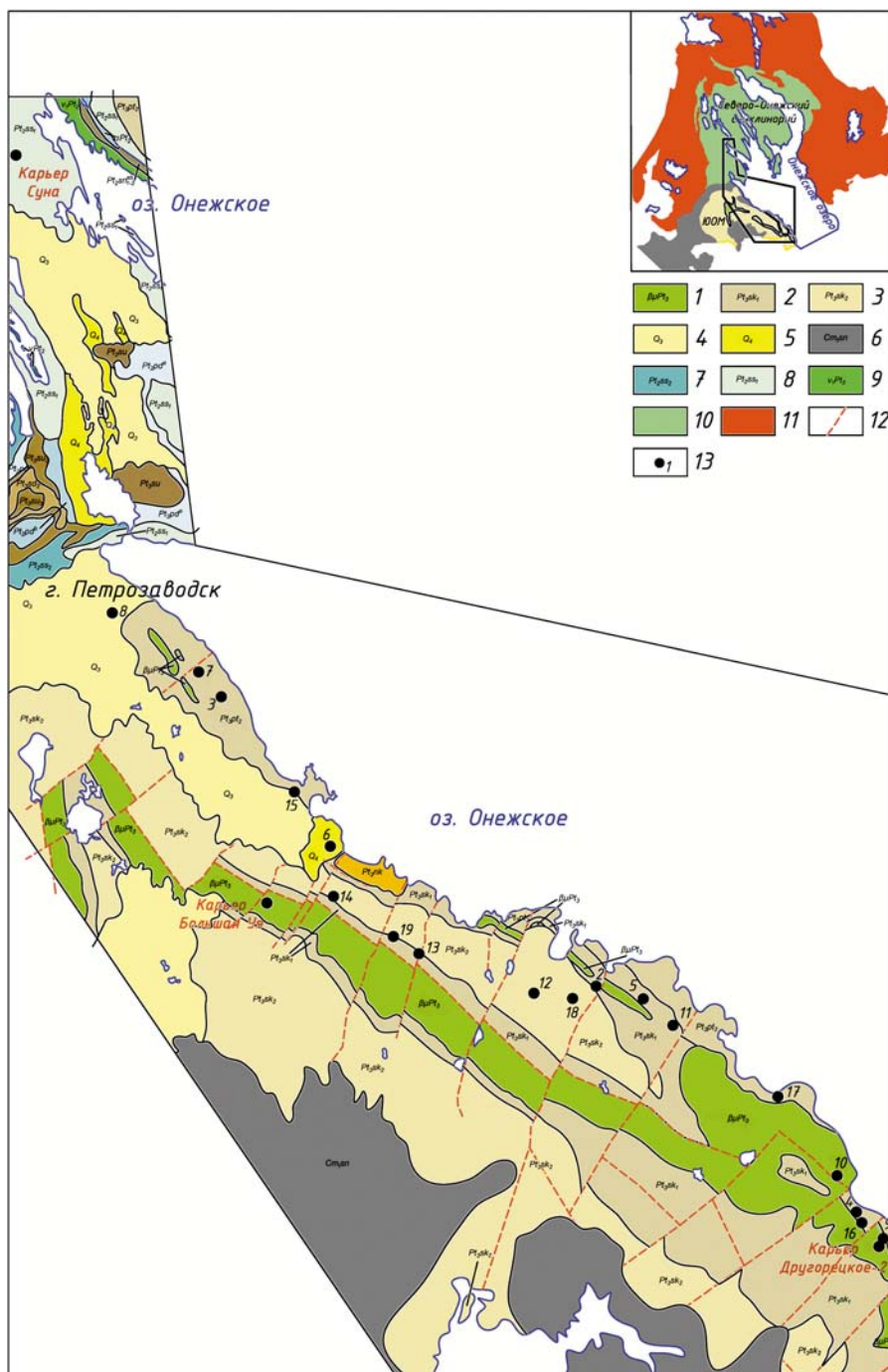


Рис. 1. Обзорная карта с указанием точек наблюдения. Фрагмент государственной геологической карты масштаба 1:200000, листы Р-36-ХVII, Р-36-ХХIII, Р-36-ХХIV, Р-36-ХХIX, Р-36-ХХХ. Масштаб 1:500000:

1) sillы габбродолеритов в Онежской структуре; 2) Шокшинская свита. Нижняя подсвита. Розовые и красные кварцитопесчаники, глинистые сланцы, алевриты и конгломераты; 3) Шокшинская свита. Верхняя подсвита. Косослоистые, гравелитистые красные песчаники, конгломераты. Малиновые и розовые кварцитопесчаники и конгломераты; 4) верхний отдел. Ледниковые валунные супеси; 5) четвертичные образования; 6) нерасчлененные саргаевский и пашинский горизонты глин; 7) Суйсарская свита. Нижняя подсвита. Афанитовые метапорфириты, туфобрекчии; 8) Суйсарская свита. Нижняя подсвита. Афанитовые, альбитовые, альбито-пироксеновые, пикритовые порфириты и туфосланцы; 9) ранние среднепротерозойские диабазы и габбродиабазы; 10) центральная часть бассейна Онежского озера с проявлениями мантийно-плюмового магматизма; 11) Водлозерский террейн: мезонеоархейская континентальная кора с реликтами палеоархейской; 12) крупные тектонические нарушения; 13) расположение точек наблюдения

Fig. 1. Overview map showing the observation points. A fragment of the state geological map at a scale of 1:200,000, sheets P-36-XVII, P-36-XXIII, P-36-XXIV, P-36-XXIX, P-36-XXX. Scale 1:500,000:

1) gabbrodolerite sills within the Onega structure; 2) Shoksha suite. The lower subsuite. Pink and red quartzite-sandstones, clay shales, siltstones and conglomerates; 3) Shoksha suite. The upper subsuite. Obliquely layered, gravelly red sandstones, conglomerates. Crimson and pink quartzite sandstones and conglomerates; 4) upper section. Glacial boulder sandy loams; 5) Quaternary formations; 6) the undifferentiated Sargaevsky and Pashinsky horizons of clays; 7) Suisar suite. The lower subsuite. Aphanite metaporphyrites, tufobrecchia; 8) Suisar suite. The lower subsuite. Aphanite, albite, albite-pyroxene, picrite porphyrites and tuff shale; 9) early Middle Proterozoic diabases and gabbro-diabases; 10) the central part of the Lake Onega basin with manifestations of mantle-plume magmatism; 11) Vodlozersky terrane: Mesoneoarchean continental crust with Paleoproterozoic relics; 12) large tectonic disturbances; 13) location of the observation points



Дополнительно были произведены измерения концентрации  $^{222}\text{Rn}$  вне действующих месторождений каменных строительных материалов в Прионежском районе вдоль трассы А-215 (рис. 2). Трасса проходит вдоль юго-западной

части Онежской структуры, ее направление совпадает с простираем крупного Прионежского разлома [Онежская..., 2011]. Предполагалось, что разломные зоны выступают путями миграции радона.

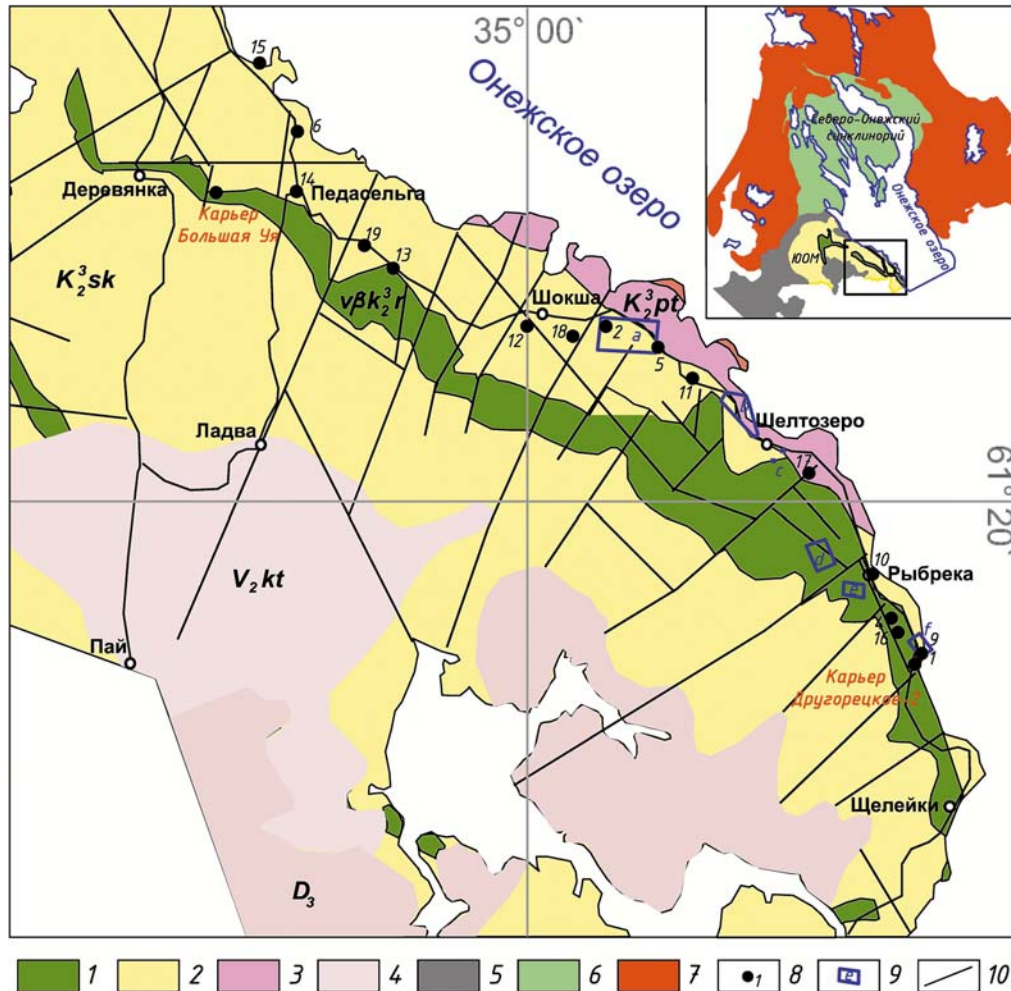


Рис. 2. Расположение разрывных нарушений в южной части Прионежского района [Кевель, Романишко, 1988] с дополнениями авторов. Масштаб 1:500 000:

1) нерасчлененная шокшинская свита песчаников, кварцитопесчаников, конгломератов, алевролитов; 2) нерасчлененная Петрозаводская свита кварцитопесчаников, песчаников, конгломератов; 3) Ропручейский интрузивный комплекс габбродолеритов, мелкозернистых диабазов; 4) нерасчлененные саргаевский и пашинский горизонты глин; 5) чехол Русской плиты Восточно-Европейской платформы; 6) центральная часть бассейна Онежского озера с проявлениями мантийно-плюмового магматизма; 7) Водлозерский террейр: мезонеоархейская континентальная кора с реликтами палеоархейской; 8) расположение точек наблюдения; 9) урановые проявления: а – аномалия Ишанино, b – рудопроявление Вехручей, с – аномалия Шелтозерка, d – рудопроявление Рыбрека, e – аномалия Южная Рыбрека, f – рудопроявление Другая Река; 10) крупные тектонические нарушения

Fig. 2. Location of the discontinuous faults in the southern part of the Prionezhsky District [Kevel', Romaniushko, 1988, with the authors' additions]. Scale 1:500,000:

1) the undifferentiated Shoksha suite of sandstones, quartzite sandstones, conglomerates, siltstones; 2) the undifferentiated Petrozavodsk suite of quartzite sandstones, sandstones, and conglomerates; 3) Ropruchey intrusive complex of gabbrodolerites, fine-grained diabases; 4) the undifferentiated Sargaevsky and Pashinsky horizons of clay; 5) the cover of the Russian plate of the Eastern European Platform; 6) the central part of the Lake Onega basin with manifestations of mantle-plume magmatism; 7) Vodlozersky terrane: Mesoneoarchean continental crust with relics of Paleoarchean; 8) location of the observation points; 9) Uranium manifestations: a – Ishanino Anomaly, b – Vekhruchey ore occurrence, c – Sheltozerka Anomaly, d – Rybreka ore occurrence, e – Yuzhnaya Rybreka Anomaly, f – Drugaya Reka ore occurrence; 10) major tectonic disturbances

## Результаты

Исследования на площади действующих карьеров по добыче каменных строительных материалов показали изменение концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в воздухе в пространстве и времени (табл. 1). Достаточно четко выявляется разность активности  $^{222}\text{Rn}$  до и после проведения взрывных работ. Однако на месторождении «Суна» (площадка ДСЗ) было обнаружено падение ОА радона почти в пять раз, тогда как на месторождениях «Большая Уя» (подошва карьера) и «Другорецкое-2» (подошва карьера), напротив, зафиксировано увеличение ОА примерно в 12 раз. Наблюдения в помещениях-бытовках показали значительно меньшее увеличение ОА, которое сохранилось в пределах НРБ. Этот факт может свидетельствовать о том, что большая часть выделившегося после взрыва радона переносится за пределы карьера воздушными потоками.

Полученные данные подтверждают влияние техногенных сейсмических воздействий на интенсивность эксхалляции радона. При этом изменение напряженного состояния массива и трансформация трещинно-порового

пространства горных пород может приводить как к увеличению, так и к снижению ОА. Это можно объяснить изменением напряженного состояния трещинно-порового пространства, сопутствующим перераспределением грунтовых вод и ускорением процессов диффузии в горной породе [Козлова и др., 2022].

Дополнительные измерения ОА  $^{222}\text{R}$  были проведены вдоль трассы А-215 на открытых пространствах. Точки измерения выбирались приближенно к нахождению известных тектонических разломов (рис. 2). Южная часть Прионежского района Республики Карелия в структурно-тектоническом плане является одной из составляющих Прионежской синеклизы, пересеченной рядом мощных тектонических разломов, пересекающих породы с северо-востока на юго-запад. Разломы пересекают урановые аномалии (Ишанино, Шелтозерка, Южная Рыбрека) и рудопроявления урана (Рыбрека, Другая Река, Вехручей) [Громов и др., 1982], которые могут служить естественным источником радона.

По результатам наблюдений зафиксированы ураганные значения концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в воздухе в районе р. Яни, д. Ишанино, 68 км трассы

Таблица 1. Результаты наблюдений на карьерах

Table 1. The results of the observations at the quarries

Карьер Quarry	Дата/Время Date/Time, 2023 г.	Расположение точки наблюдения Location of the observation point	Объемная активность, погрешность, Бк/м <sup>3</sup> Volumetrical activity, measurement error, Bq/m <sup>3</sup>
Большая Уя Bolshaya Uya	03.03/13:45	Бытовка до взрыва The cabin before the explosion	7 ± 10
	03.03/14:20	Подошва карьера до взрыва The sole of the quarry before the explosion	21 ± 15
	03.03/14:44	Площадка ДСЗ* The site of the crushing and screening plant	14 ± 13
	03.03/16:30	Подошва карьера после взрыва The sole of the quarry after the explosion	178 ± 55
	03.03/16:35	Бытовка The cabin	< 1
Суна Sunu	07.03/6:43	«	31 ± 21
	07.03/9:42	«	32 ± 22
	07.03/9:55	Площадка ДСЗ до взрыва The site of the crushing and screening plant before the explosion	917 ± 183
	07.03/11:31	Площадка ДСЗ после взрыва The site of the crushing and screening plant after the explosion	188 ± 25
	07.03/12:21	Бытовка The cabin	77 ± 34
Другорецкое-2 Drugoretskoye-2	12.03	Подошва карьера до взрыва The sole of the quarry before the explosion	6 ± 9
	12.03	Бытовка The cabin	56 ± 28
	12.03	Подошва карьера после взрыва The sole of the quarry after the explosion	100 ± 39

Примечание. \*ДСЗ – дробильно-сортировочный завод.

A-215 (табл. 2). Данные, приведенные в табл. 2, отличаются значительной вариативностью, что указывает на пространственную неоднородность эманиции радона из геологической среды в атмосферу. Наличие ураганных значений ОА  $^{222}\text{R}$  свидетельствует о возможной высокой

эманацирующей способности пород Онежской структуры, связанной с урановыми рудопроявлениями и/или крупными разломами. Однако отсутствие повторяемости, как, например, в точке «54 км» или точке «д. Ишанино», подчеркивает непостоянство потока радона.

Таблица 2. Результаты наблюдений вдоль трассы А-215

Table 2. The results of the observations along the A-215 highway

№ No.	Координаты Coordinates WGS84		Дата/Время Date/Time, 2023 г.	Расположение Location	Объемная активность, погрешность, Бк/м <sup>3</sup> Volumetrical activity, measurement error, Bq/m <sup>3</sup>
	N	E			
1	61.24542	35.58582	17.06/11:07	Другорецкое-2 Drugoretskoye-2	62 ± 33
2	61.45937	35.12666	17.06/12:36	р. Яни Yani River	271409 ± 54281
3	61.70829	34.50713	17.06	г. Петрозаводск Petrozavodsk	< 1
4.1	61.26719	35.54186	24.06/13:30	Дорога А-215, 54 км Road A-215, 54 km	29344 ± 5868
4.2	«	«	04.08/13:28	«	< 1
4.3	«	«	23.08/12:38	«	< 1
4.4	«	«	30.09/13:54	«	9 ± 13
4.5	«	«	11.10/15:11	«	< 1
5.1	61.44644	35.20294	24.06/14:41	д. Ишанино village Ishanino	324632 ± 64926
5.2	«	«	04.08/12:38	«	10 ± 14
6	61.58358	34.68251	24.06/15:05	Ерошкина Сельга Eroshkina selga	7373 ± 1494
7	61.72910	34.46999	24.06/15:29	д. Ужесельга Uzheselga village	< 1
8	61.77944	34.32627	24.06/17:01	г. Петрозаводск Petrozavodsk	< 1
9	61.24461	35.58458	29.06/13:59	Другорецкое-2 Drugoretskoye-2	< 1
10	61.29756	35.51273	29.06/19:32	д. Рыбрека Rybreka village	26502 ± 5300
11	61.42595	35.25222	29.06/19:57	д. Вехручей Vekhruchey village	18796 ± 3759
12.1	61.45751	35.01670	29.06/20:24	д. Шокша village Shoksha	< 1
12.2	«	«	04.08/14:01	«	34 ± 26
12.3	«	«	23.08/12:38	«	< 1
12.4	«	«	30.09/13:24	«	< 1
12.5	«	«	11.10/14:41	«	< 1
12.6	«	«	15.10/9:30	«	8 ± 11
13	61.49349	34.82509	29.06/20:50	ручей Вантик Vantik stream	1036 ± 207
14	61.54292	34.68446	29.06/21:14	п. Педасельга village Pedaselga	7297 ± 1459
15	61.62885	34.62529	29.06/21:41	с. Деревянное village Derevyannoye	< 1
16	61.25823	35.55006	30.07/07:35	д. Другая Река village Drugaya Reka	66586 ± 13317
17	61.36406	35.41989	30.07/17:31	Дорога А-215 68 км Road A-215 68 km	1428545 ± 285709
18	61.45175	35.08172	30.07/17:56	д. Шокша village Shoksha	22172 ± 4434

## Обсуждение

На предприятиях по добыче каменных строительных материалов в Республике Карелия измерения концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в воздухе ранее не проводились. Полученные данные измерений на карьерах позволяют предположить наличие связи между сейсмическим воздействием на горный массив и изменением концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в воздухе. Исследования других авторов [Семинский, Семинский, 2020; Козлова и др., 2022] показывают умеренное прямое влияние природной и техногенной сейсмичности на последующие всплески радоновой активности. Полученные результаты на карьерах показали соответствие концентрации радона существующим нормам радиационной безопасности.

Дальнейшие исследования на горнодобывающих предприятиях Республики Карелия требуют использования методик непрерывных мониторинговых наблюдений (установка на площадках наблюдения станций, оснащенных сейсмическими датчиками, метеодатчиками и радиометрами объемной активности  $^{222}\text{Rn}$ ) для уточнения обнаруженных зависимостей. Полученные данные дают информацию для создания карт локального радонового потенциала территорий Прионежского и Кондопожского районов Республики Карелия, а также для разработки новых геоэкологических рекомендаций по организации добычных работ на карьерах. Кроме того, поиск и локализация пространственного положения радоновых аномалий позволяет уточнять разломные зоны. Активная разработка нерудных полезных ископаемых (прежде всего щебня методом массовых взрывов) на территориях расположенных здесь карьеров может провоцировать выбросы  $^{222}\text{Rn}$  и быть связана с повышенными уровнями его объемной активности.

Установленные области высоких концентраций  $^{222}\text{Rn}$  вдоль трассы в первом приближении можно объяснить известной ураноносностью кварцитопесчаников Шокшинской и Петрозаводской свит. Однако полученные замеры отличаются слабой повторяемостью, поэтому условия выбросов больших объемов  $^{222}\text{Rn}$  в атмосферу пока неясны. Попытки привязать выбросы  $^{222}\text{Rn}$  к метеорологическим условиям результатов не дали в связи с высокой дискретностью и недостаточным объемом измерений. Необходимо организация измерений с использованием методик непрерывного наблюдения. Также следует отметить, что во время измерений происходил капитальный ремонт федеральной трассы А-215 с отсыпкой дорожного полотна

щебнем с месторождения «Большая Уя». Большое количество пыли могло повлиять на регистрируемую ОА.

## Заключение

В результате проведенных исследований установлены концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в атмосфере на территории карьеров нерудных строительных материалов в Прионежском и Кондопожском районах Республики Карелия. Полученные данные позволяют предположить существование связи между сейсмическим воздействием на горный массив и изменением концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в воздухе. Также следует констатировать возможность существования эпизодических ураганных концентраций радона в Прионежском районе Республики Карелия, природа и механизм возникновения которых пока не выяснены. Количество и дискретность проведенных измерений позволяют считать их предварительными, но пригодными для выявления признаков радонового загрязнения исследованных участков. Дальнейшее развитие данного направления в Республике Карелия является актуальным, поскольку геологическое строение и активное развитие горнодобывающей отрасли способствуют повышенной эманации радона в регионе. А наиболее значительный вклад в величину среднего индивидуального пожизненного радиационного риска для населения Российской Федерации вносит облучение радоном и дочерними продуктами его распада в воздухе помещений [О состоянии..., 2023]. Республика Карелия по данному фактору риска имеет показатель от  $3 \times 10^{-4}$  до  $5 \times 10^{-4}$ , что выше среднего показателя по России за 2022 г. ( $3,04 \times 10^{-4}$ ).

## Литература

- Булашевич Ю. П., Уткин В. И., Юрков А. К. Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах // Доклады Академии наук. 1996. Т. 346, № 2. С. 245–248.
- Громов Ю. А., Степанов И. В., Хасанов И. Д. и др. Отчет о результатах прогнозно-геологических работ масштаба 1:50 000 партии № 8 и партии № 7 на Прионежской площади в 1977 и 1981 годах (Геологическое задание 32-12)»/ Невское ПГО. п. Чебино, 1982.
- Дегтярев Н. К. Отчет о результатах геологоразведочных работ на месторождении диабазов Суна (строительный камень для производства щебня), выполненных в Кондопожском р-не РК в 2005–2006 гг. / Севпромпроект. Петрозаводск, 2006.
- Жуковский М. В. Радон: история и современность // Вестник УрО РАН. 2009. № 4(30). С. 32–40.
- Кайряк А. И., Кириллов И. А., Боровинин Е. Н. Отчет о геологосъемочных работах масштаба 1:50 000,



проведенных Кондопожской партией в Кондопожском и Медвежьегорском районах КАССР в 1962–1963 гг. Петрозаводск, 1964.

Карпин В. А. Современные экологические аспекты естественной эманации изотопов радона: обзор литературы // Экология человека. 2020. Т. 27, № 6. С. 34–40. doi: 10.33396/1728-0869-2020-6-34-40

Кевель С. А., Романишко А. С. Отчет о поисковых и поисково-оценочных работах на блочный камень для целей прецизионного машиностроения в Прионежском районе КАССР в 1987–88 гг. Петрозаводск, 1988.

Киселев С. М., Маренный А. М., Романов В. В. Радон. Современные подходы к регулированию радиационной безопасности населения // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 94–102. doi: 10.21514/1998-426X-019-12-2-94-102

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. doi: 10.25018/0236\_1493\_2022\_5\_1\_0\_119

Михайлов В. П., Карбовская Л. А. Отчет о результатах детальной разведки Восозерского месторождения габбро-диабазов (сырье на строительный щебень), проведенной в Кондопожском районе Карельской АССР в 1980–1981 гг. Петрозаводск, 1981.

Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Л. В. Глушанин, Н. В. Шаров, В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 431 с.

О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2022 году: Государственный доклад. М.: Роспотребнадзор, 2023. 368 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. Сер. Науки о Земле. 2020. Т. 33. С. 100–111. doi: 10.26516/2073-3402.2020.33.100

Титов В. К., Венков В. А., Черник Д. А., Мишина М. В. Классификация месторождений твердых полезных ископаемых по степени радоновыделения // Атомная энергия. 2000. Т. 88, вып. 6. С. 438–445.

Торицын А. Н. Отчет по оценке месторождения габбро-диабазов (строительный камень для производства щебня) Большая Уя в Прионежском районе Республики Карелия (с подсчетом запасов по категории С1+С2 по состоянию на 1.11.2009 г.). Петрозаводск, 2009.

Тыркин А. И. Отчет о результатах доразведки Юго-Восточной площади Северного участка Другоречного месторождения габбро-диабазов (блочный камень), проведенной в Прионежском муниципальном районе Республики Карелия в 2016 г. Петрозаводск, 2017.

Уткин В. И., Юрков А. К. Радон как «детерминированный» индикатор природных и техногенных геодинамических процессов // Доклады Академии наук. 2009. Т. 426, № 6. С. 816–820.

Ball T. K., Cameron D. G., Colman T. B., Roberts P. D. Behaviour of radon in the geological environment: a review // Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 1991. Vol. 24, no. 2. P. 169–182. doi: 10.1144/GSL.QJEG.1991.024.02.01.

Lahermo P. J., Juntunen R. Radiogenic elements in Finnish soils and groundwaters // Appl. Geochem. 1991. Vol. 6, no. 2. P. 169–183. doi: 10.1016/0883-2927(91)90027-M

Castren O., Voutilainen A., Winqvist K., Mäkeläinen I. Studies of high indoor radon areas in Finland // Radiation Protection Dosimetry. 1985. Vol. 15. P. 311–318. doi: 10.1016/0048-9697(85)90232-3

Paatero J., Hatakka J., Virtanen T. H. Outdoor radon-222 in Arctic Finland // Environ. Sci. Atmos. 2023. Vol. 3, no. 10. P. 1453–1459. doi: 10.1039/D3EA00097D

Sundal A. V., Henriksen H., Soldal O., Strand T. The influence of geological factors on indoor radon concentrations in Norway // Sci. Total Environ. 2004. Vol. 328, no. 1–3. P. 41–53. doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.02.011

Sundal A. V., Strand T. Indoor gamma radiation and radon concentrations in a Norwegian carbonatite area // J. Environ. Radioact. 2004. Vol. 77, no. 2. P. 175–189. doi: 10.1016/j.jenvrad.2004.03.007

## References

Ball T. K., Cameron D. G., Colman T. B., Roberts P. D. Behaviour of radon in the geological environment: a review. Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 1991;24(2):169–182. doi: 10.1144/GSL.QJEG.1991.024.02.01.

Bulashevich Y. P., Utkin V. I., Yurkov A. K. Changes in radon concentration associated with rock bursts in deep mines. Doklady Akademii nauk = Proceedings of the Academy of Sciences. 1996;346(2):245–248. (In Russ.)

Castren O., Voutilainen A., Winqvist K., Mäkeläinen I. Studies of high indoor radon areas in Finland. Radiation Protection Dosimetry. 1985;15:311–318. doi: 10.1016/0048-9697(85)90232-3

Degtyarev N. K. Report on the results of geological exploration work at the Sunadiabase deposit (building stone for crushed stone production), conducted in the Kondopoga District of the Republic of Karelia in 2005–2006. Sevpromproekt. Petrozavodsk; 2006. (In Russ.)

Glushanin L. V., Sharov N. V., Shchiptsov V. V. (eds.). Onega Paleoproterozoic structure (geology, tectonics, deep structure and mineral resource potential). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. 431 p. (In Russ.)

Gromov Yu. A., Stepanov I. V., Khasanov I. D. et al. Report on the results of predictive geological work at a scale of 1:50,000 for Party No. 8 and Party No. 7 in the Prionezhskaya area in 1977 and 1981 (Geological task 32-12). Nevskoye PGS. Chebino settlement; 1982. (In Russ.)

Kairyak A. I., Kirillov I. A., Borovin E. N. Report on geological survey work at a scale of 1:50,000 conducted by the Kondopoga Party in the Kondopoga and Medvezhyegorsk Districts of the KASSR in 1962–1963. Petrozavodsk; 1964. (In Russ.)

Karpin V. A. Modern ecological aspects of the natural emanation of radon isotopes: a literature review. Ekologiya cheloveka = Human Ecology. 2020;27(6):34–40. doi: 10.33396/1728-0869-2020-6-34-40

Kevel' S. A., Romanishko A. S. Report on prospecting and evaluation work on block stone for the purposes of precision engineering in the Prionezhsky District of KASSR in 1987-88. Petrozavodsk; 1988. (In Russ.)

Kiselev S. M., Marenniy A. M., Romanov V. V. Radon. Modern approaches to the regulation of radiation safety for the population. *Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2):94–102. (In Russ.). doi: 10.21514/1998-426X-019-12-2-94-102

Kozlova I. A., Yurkov A. K., Birulin S. V. Variations in the volume activity of radon during technogenic and tectonic seismic events. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mountain Informational Analytical Bulletin*. 2022;5-1:119–130. (In Russ.). doi: 10.25018/0236\_1493\_2022\_51\_0\_119

Lahermo P. J., Juntunen R. Radiogenic elements in Finnish soils and groundwaters. *Appl. Geochem*. 1991; 6(2):169–183. doi: 10.1016/0883-2927(91)90027-M

Mikhailov V. P., Karbovskaya L. A. Report on the results of detailed exploration of the Vozozerskoye deposit of gabbro-diabases (raw material for construction gravel), conducted in the Kondopozhsky District of the Karelian ASSR in 1980–1981. Petrozavodsk; 1981. (In Russ.)

On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Russian Federation in 2022: State Report. Moscow: Rospotrebnadzor; 2023. 368 p. (In Russ.)

Paatero J., Hatakka J., Virtanen T. H. Outdoor radon-222 in Arctic Finland. *Environ. Sci. Atmos*. 2023;3(10):1453–1459. doi: 10.1039/D3EA00097D

Seminskii A. K., Seminskii K. Zh. Preliminary results of the study of the relationship between seismic activity and radon concentration in groundwater of Southern Angara region. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo*

*universiteta. Ser. Nauki o Zemle = Proceedings of Irkutsk State University. Earth Sciences Ser.* 2020;33:100–111. (In Russ.). doi: 10.26516/2073-3402.2020.33.100

Sundal A. V., Henriksen H., Soldal O., Strand T. The influence of geological factors on indoor radon concentrations in Norway. *Sci. Total Environ*. 2004;328 (1–3):41–53. doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.02.011

Sundal A. V., Strand T. Indoor gamma radiation and radon concentrations in a Norwegian carbonatite area. *J. Environ. Radioact*. 2004;77(2):175–189. doi: 10.1016/j.jenvrad.2004.03.007

Titov V. K., Venkov V. A., Chernik D. A., Mishina M. V. Classification of deposits of solid minerals by the degree of radon emission. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2000;88(6):438–445. (In Russ.)

Toritsyn A. N. Report on the assessment of the Bolshaya Uya gabbro-dabase deposit (construction stone for crushed stone production) in the Prionezhsky District of the Republic of Karelia (with the reserves calculation according to categories C1+C2 as of 01.11.2009). Petrozavodsk; 2009. (In Russ.)

Tyrkin A. I. Report on the results of further exploration of the Southeast area of the Northern site of the Dru-goretskoye gabbro-dolerite deposit (block stone), conducted in the Prionezhsky Municipal District of the Republic of Karelia in 2016. Petrozavodsk; 2017. (In Russ.)

Utkin V. I., Yurkov A. K. Radon as a “deterministic” indicator of natural and technogenic geodynamic processes. *Doklady Akademii nauk = Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2009;426(6):816–820. (In Russ.)

Zhukovskii M. V. Radon: history and modernity. *Vestnik UrO RAN = Bulletin of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2009;4(30):32–40. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 03.09.2024; принята к публикации / accepted: 09.10.2024.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Ильин Андрей Михайлович

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры наук о Земле и геотехнологий Института лесных, горных и строительных наук

e-mail: andrey.m.ilin@gmail.com

### Шмаков Александр Владимирович

старший преподаватель кафедры наук о Земле и геотехнологий Института лесных, горных и строительных наук

e-mail: shav@microklin.ru

### Семочкин Даниил Романович

студент 5 курса специализации «Открытые горные работы» кафедры наук о Земле и геотехнологий Института лесных, горных и строительных наук

e-mail: stelsman74@gmail.com

## CONTRIBUTORS:

### Ilyin, Andrey

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor

### Shmakov, Alexander

Senior Lecturer

### Semochkin, Daniil

Student