ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(5–1):119–130
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 551.21 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_119

ВАРИАЦИИ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА ПРИ ТЕХНОГЕННЫХ И ТЕКТОНИЧЕСКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЯХ

И. А. Козлова[1], А. К. Юрков[1], С. В. Бирюлин[1]

[1] Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук (ИГФ УрО РАН), Екатеринбург, Россия, igfuroran@mail.ru

Аннотация: Объемная активность почвенного радона (ОАР) достаточно часто используется как информативный критерий изменений напряженно-деформированного состояния верхней части геологической среды. Многие исследователи связывают аномалии радона с сейсмическими событиями, но при интерпретации получаемых результатов необходимо учитывать, что механизмы возникновения аномалий объемной активности радона при техногенных и тектонических сейсмических событиях существенно различаются. В данной статье приведены результаты экспериментальных натурных исследований объемной активности почвенного радона, проведенных на Исетском щебеночном карьере (Свердловская область) и Южно-Курильском геодинамическом стационаре (о. Кунашир). Для регистрации объемной активности почвенного радона использовались два режима измерений: диффузионный (радон поступает в детектор за счет процесса диффузии) и режим вынужденной конвекции (радон доставляется к детектору насосом). Аномалии радона, связанные с техногенными событиями, происходят после карьерного взрыва и не вносят существенного вклада в изменение структуры трещинно-порового пространства на значительном расстоянии от эпицентра. Полученные статистически значимые зависимости между объемной активностью почвенного радона и тектоническими событиями свидетельствуют о том, что аномалии радона появляются перед землетрясениями и связаны с изменением напряженно-деформированного состояния трещинно-порового пространства горных пород. Время проявления аномалий зависит от геолого-тектонических условий, магнитуды и расстояния до эпицентра.

Ключевые слова: радон, аномалия, трещинно-поровое пространство, сейсмическое событие, взрыв, землетрясения, эксперимент, геологическая среда.

Для цитирования: *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_51_0_119.

Variations in the volume activity of radon during technogenic and tectonic seismic events

I. A. Kozlova[1], A. K. Yurkov[1], S. V. Biryulin[1]

[1] Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IGF UB RAS), Ekaterinburg, Russia, igfuroran@mail.ru

© И. А. Козлова, А. К. Юрков, С. В. Бирюлин. 2022

Abstract: the volumetric activity of soil radon (VAR) is quite often used as an informative criterion for changes in the stress-strain state of the upper part of the geological environment. Many researchers associate radon anomalies with seismic events. But when interpreting the results obtained, it must be taken into account that the mechanisms of the occurrence of anomalies in the volumetric activity of radon during man-made and tectonic seismic events differ significantly. This article presents the results of experimental field studies of the volumetric activity of soil radon carried out at the Isetsky gravel quarry (Sverdlovsk region) and the Yuzhno-Kurilsk geodynamic station (Kunashir island). To register the volumetric activity of soil radon, two measurement modes were used — diffusion (radon enters the detector due to the diffusion process) and forced convection mode (radon is delivered to the detector by a pump). Radon anomalies associated with technogenic events occur after a quarry explosion and do not make a significant contribution to the change in the structure of the fissure-pore space at a significant distance from the epicenter. The obtained statistically significant correlation dependences between the volumetric activity of soil radon and tectonic events indicate that radon anomalies appear before earthquakes and are associated with a change in the stress-strain state of the fissure-pore space of rocks. The time of manifestation of anomalies depends on the geological and tectonic conditions, magnitude and distance to the epicenter.

Key words: radon, anomaly, fractured pore space, seismic event, explosion, earthquakes, experiment, geological environment.

For citation: Kozlova I. A., Yurkov A. K., Biryulin S. V. Variations in the volume activity of radon during technogenic and tectonic seismic events. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5—1):119—130. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_119.

Введение

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. Целью представленных в статье исследований является изучение радона с точки зрения возможного прогностического критерия для природных сейсмических событий.

Дискуссия по взаимосвязи вариаций почвенного радона с сейсмическими событиями продолжается до сих пор. Один из наиболее часто возникающих вопросов — как могут отражаться в поле объемной активности радона тектонические события, происходящие на значительных расстояниях (десятки километров) от пункта регистрации. Но полученные многими исследователями закономерности изменения объемной активности почвенного радона свидетельствуют о взаимосвязи аномальных значений ОАР с сейсмическими событиями. Тем не менее рассматривать радон в качестве надежного прогностического признака сложно из-за отсутствия единого подхода к методикам измерений и интерпретации получаемых данных. Аномальные значения радона фиксируются как в сейсмоактивных регионах, так и в сейсмопассивных [1—4]. Исследования проводятся в различных геолого-тектонических условиях, на разломных структурах, в пещерах и др. [5—7]. При радоновых измерениях используют диффузионный режим измерений и шпуровую съемку [8, 9, 10]. Также осуществляется мониторинг радиогенных газов с целью контроля горных ударов в шахтах [11]. Проводятся лабораторные и натурные исследования по изучению зависимости объемной активности радона от упругих колебаний [12, 13].

Объемная активность почвенного радона достаточно часто используется

как информативный параметр изменений напряженно-деформированного состояния верхней части геологической среды. Существует множество моделей подготовки тектонического события, но практически все описывают соотношение напряжение — деформация с некоторыми отличиями по стадиям трещинообразования. За счет изменения напряженного состояния геологической среды могут образовываться зоны сжатия и растяжения. Объемная активность почвенного радона 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 [14]. Для того, чтобы правильно интерпретировать получаемые результаты, необходимо учитывать, что механизмы возникновения аномалий объемной активности почвенного радона при техногенных и тектонических сейсмических событиях существенно различаются.

В данной статье приведены результаты экспериментальных натурных исследований объемной активности почвенного радона, проведенных на Исетском щебеночном карьере (Свердловская область) и Южно-Курильском геодинамическом стационаре (о.Кунашир). Для регистрации ОАР использовались два режима измерений: диффузионный (радон поступает в детектор за счет процесса диффузии) и режим вынужденной конвекции (радон доставляется к детектору насосом) (рис. 1).

Необходимо отметить, что при интерпретации и сравнении результатов использовались относительные

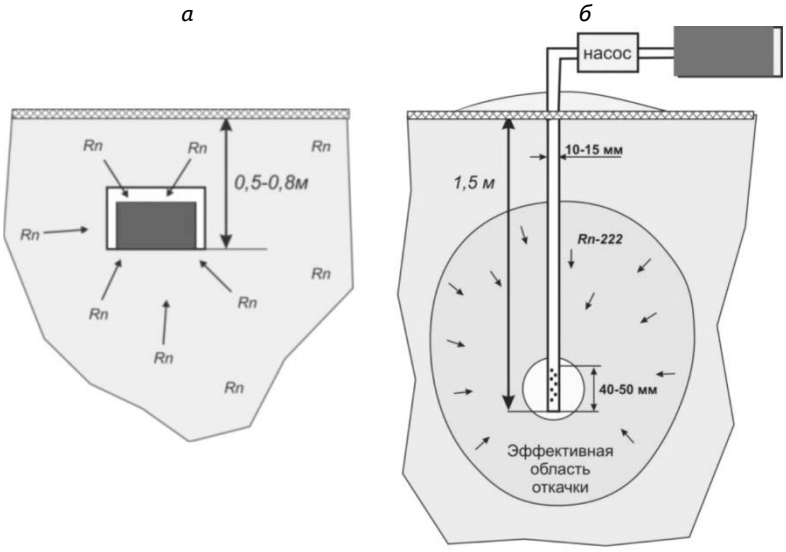

Рис. 1. Режимы измерений объемной активности почвенного радона: а — диффузионный режим; *б* — режим вынужденной конвекции

Fig. 1. Modes of measuring the volumetric activity of soil radon: a — diffusion mode; *b* — forced convection mode

значения ОАР. Абсолютные значения объемной активности почвенного радона существенно зависят от геологического строения и состава горных пород конкретного участка исследования, а также от содержания радия во вмещающих породах, но для данного исследования роли не играют.

Вариации радона при техногенных событиях

Для изучения связи карьерных взрывов и вариаций объемной активности почвенного радона (ОАР) были проведены натурные экспериментальные работы в условиях щебеночного карьера на Исетском месторождении. Исетское месторождение гранитов находится в пределах Верхисетско-Верхотурского пояса, расположенного вдоль западной окраины Восточно-Уральского поднятия. Верхисетский гранитный массив занимает площадь около 1500 км^2 и залегает среди метаморфических толщ, включающих преимущественно амфиболиты и гнейсы. Особенностью массива является его зональное строение от гранитов в центральной части к чередованию гранодиоритов и кварцевых диоритов в боковых частях структуры. Среди гранитов присутствуют дугообразные полосы габбро и пироксенитов.

При проведении исследований измерительные приборы (детекторы) располагались на глубине 0,5—0,8 м в коре выветривания на расстоянии 500—600 м от борта Исетского щебеночного карьера. Измерения проводились в диффузионном режиме, регистрация объемной активности радона осуществлялась непрерывно с четырехчасовым осреднением (см. рис. 1).

Карьерные взрывы регистрировались сейсмостанцией «Аверино», которая располагалась в 83 км к юго-востоку от Исетского щебеночного карьера. В состав сейсмостанции входили регистратор REF TEK 130—01 и 3-компонентный акселерометр СК-1П с собственной частотой колебаний 1 Гц. Частота квантования записи 50 Гц. Приемником глобальной системы определения координат GPS осуществлялась временная привязка. На рис. 2 представлены сейсмограммы карьерных взрывов (мощность взрывов около 40 т взрывчатого вещества).

На рис. 3 приведены результаты двух двадцатидневных циклов измерений объемной активности радона.

Отчетливо наблюдается, что через 3—4 дня после проведения карьерных взрывов начинает увеличиваться объемная активность радона (ОАР). Уровень увеличивается примерно на 40%, а затем происходит снижение значений ОАР до фонового уровня. Трещиновато-поровая среда массива состоит из системы хаотически расположенных открытых и закрытых пор, а также проницаемых трещин. В этой системе находится радон, который постоянно генерируется, мигрирует и распадается, при этом его фоновое значение меняется незначительно. Для повышения объемной активности радона на 40% необходим источник дополнительного радона. При карьерном взрыве в точке установки детектора не наблюдается разрушения горных пород, которое могло бы стать причиной повышения концентрации радона. Рост ОАР за счет миграции к детектору выделившегося радона непосредственно в самом карьере при взрыве маловероятен, в связи с малым временем жизни радона и медленным диффузионным переносом. Одной из возможных причин аномалий радона может быть распространение упругих волн, инициированных карьерным взрывом. В результате техногенного события и прохождения упругих волн

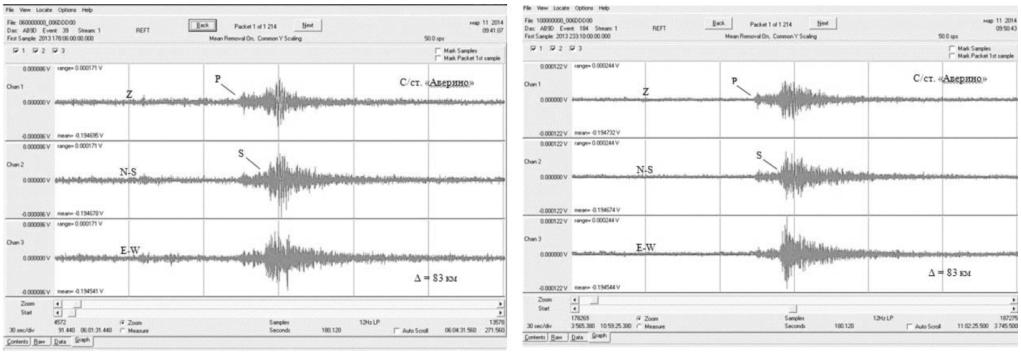

Рис. 2. Сейсмограммы карьерных взрывов. Запись скорости смещения почвы; компоненты записи: Z — вертикальная, *N–S* и *E–W —* горизонтальные север–юг и восток–запад; *P* и *S —* первые вступления продольных и поперечных волн; Δ — эпицентральное расстояние

Fig. 2. Seismograms of quarry explosions. Recording the rate of soil displacement; record components: Z — vertical, *N–S* and *E–W —* horizontal north-south and east-west; *P* and *S* are the first arrivals of longitudinal and transverse waves; Δ — epicentral distance

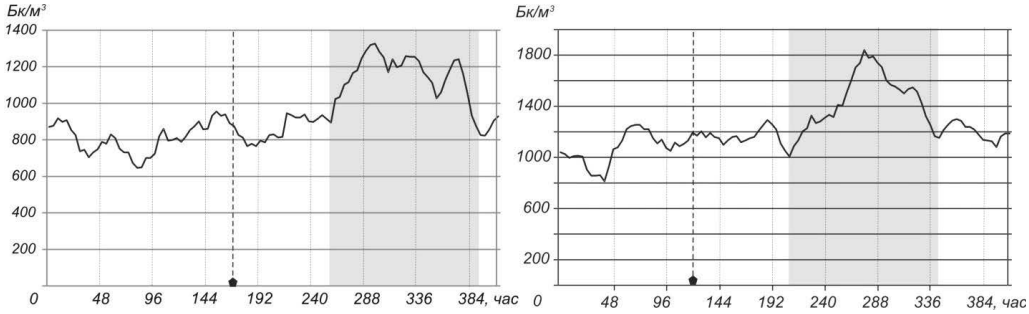

Рис. 3. Вариации объемной активности почвенного радона в пунктах наблюдения (пятиугольник — момент карьерного взрыва)

Fig. 3. Variations in the volumetric activity of soil radon at observation points (pentagon — the moment of an quarry explosion)

происходит сброс дополнительного радона, сорбированного на стенках трещинно-порового пространства непосредственно в зоне расположения детектора.

Еще одной особенностью вариаций радона после карьерного взрыва оказалась 4-дневная аномалия ОАР. Возможным объяснением является то, что из трещинно-порового пространства в ближайшей области установки детектора поступление радона было существенно выше, чем его убывание за счет естественного радиоактивного распада. Далее радон приходит в равновесие с продуктами распада, и объемная активность радона выходит на фоновый уровень.

Таким образом, наиболее вероятной причиной аномальных значений объемной активности почвенного радона после техногенных сейсмических событий является выделение «дополнительного» радона в области установки детектора в результате прохождения упругих волн.

Вариации радона при тектонических событиях

С 2011 г. сотрудники Института геофизики УрО РАН проводят мониторинговые наблюдения объемной актив-

ности радона с целью изучения напряженно-деформированного состояния геологической среды на Южно-Курильском геодинамическом стационаре (о. Кунашир). Остров Кунашир является самым южным островом Большой гряды Курильских островов. Преимущественно имеет блоковое строение и сложен вулканическими породами — туфами, туфобрекчиями, андезитовыми и базальтовыми лавами. С современными тектоническими движениями тесно связана сейсмическая активность региона.

Измерения ОАР проводились в режиме вынужденной конвекции из шпура с перфорацией на глубине 0,7 м серийно выпускаемой аппаратурой — детекторами радона (см. рис. 1). Режим вынужденной конвекции заключается в непрерывной принудительной откачке насосом почвенного воздуха. За счет данного режима не нарушается пористость и проницаемость среды и увеличивается объем области исследования. По результатам многолетнего радонового мониторинга была разработана методика интерпретации радоновых аномалий и сопоставления их с тектоническими событиями. Тектонические события для ретроспективного анализа выбирались из каталогов сейсмических событий USGS (Геологическая служба США). На основе разработанной методики была выявлена зависимость между объемной активностью почвенного радона и землетрясениями с M≥4, произошедшими в радиусе 500 км от расположения детектора радона [15].

На рис. 4 представлен годовой непрерывный ряд вариаций объемной активности радона за 2017 год на станции Южно-Курильск (о. Кунашир). На вариации радона существенное влияние могут оказывать различные факторы: геолого-тектонические условия, режимы измерения, метеорологические явления, лунно-солнечные приливы, технические помехи. Режим вынужденной конвекции, примененный для данного исследования, позволил исключить влияние большей части мешающих факторов. За представленный период наблюдений средний фоновый уровень ОАР составляет 1200 Бк/м^3. На рисунке видно наличие радоновых аномалий, превышающих фоновые значения в несколько раз. Но одной из главных проблем при интерпретации кривых ОАР является определение аномалий, связанных именно с готовящимся тектоническим событием. Так, например, ставится вопрос: к какому временному интервалу аномалии ОАР отнести сейсмическое событие? Немаловажным фактором для анализа данных является учет тектонических событий малой магнитуды. Кроме того, сейсмические события, происходящие друг за другом через небольшие временные промежутки, могут проявляться пониженными значениями ОАР, в связи с недостаточным периодом для установления равновесия в ряду радий–радон после изменения трещинно-порового пространства, связанного с подготовкой и реализацией тектонических событий [16].

На рис. 5 представлены вариации объемной активности радона с января по апрель 2018 г. За данный период произошли десятки тектонических событий с различной магнитудой, но землетрясений, которые отразились в вариациях ОАР, не более десятка.

При более детальном анализе было установлено, что землетрясения, отвечающие необходимым критериям, происходят только после прохождения экстремума аномалии объемной активности радона. А временной интервал от экстремума до момента землетрясения зависит от расстояния

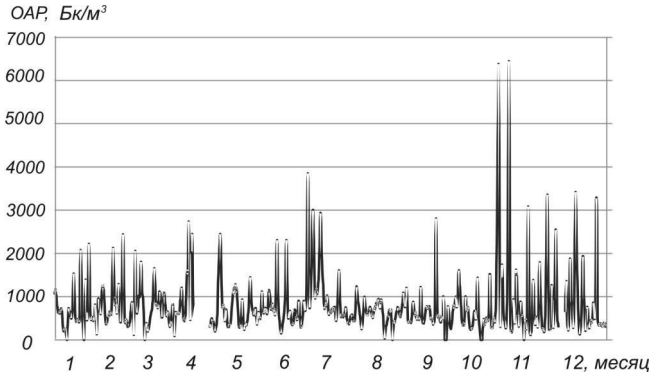

Рис. 4. Вариации объемной активности радона в пункте наблюдения Южно-Курильск за 2017 г.
Fig. 4. Variations in radon volumetric activity at the observation point Yuzhno-Kurilsk for 2017

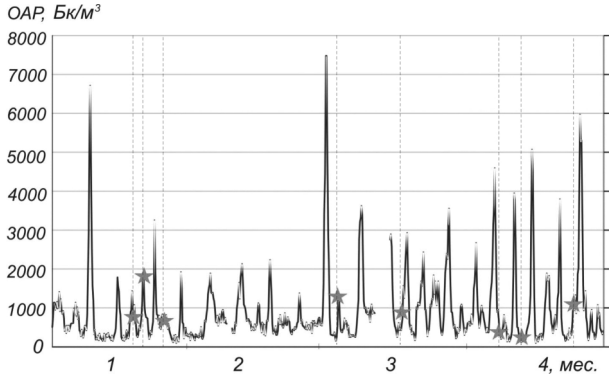

Рис. 5. Вариации объемной активности радона в пункте наблюдения Южно-Курильск за январь–апрель 2018 г. (звездочка — момент землетрясения с M ⩾ 4)
Fig. 5. Variations in the volumetric activity of radon at the observation point Yuzhno-Kurilsk for January–April 2018 (asterisk — the moment of the earthquake with M ⩾ 4)

расположения детектора до эпицентра. Тектоническое событие может происходить сразу после прохождения максимального значения ОАР либо через несколько дней после выхода значений ОАР на фоновый уровень (рис. 6).

Разработанная методика сопоставления радоновых аномалий с сейсмическими событиями позволила провести разделение области исследования на «ближнюю» и «дальнюю» зоны. Было проанализировано 166 тектонических землетрясений с M ⩾ 4.0, произошедших в радиусе 500 км от Южно-Курильского геодинамического стационара. Из них 148 событиям предшествовали аномалии объёмной активности почвенного радона. По временному моменту отражения сейсмического события в вариации ОАР определено, что радиус ближней зоны — до 130 км от пункта наблюдения, а радиус дальней — более 180 км. Аномалии объемной активности радона возникают перед землетрясениями не раньше, чем за 28 дней для «ближних» событий и 8 дней для «дальних».

Отражение в вариациях объемной активности радона сейсмических собы-

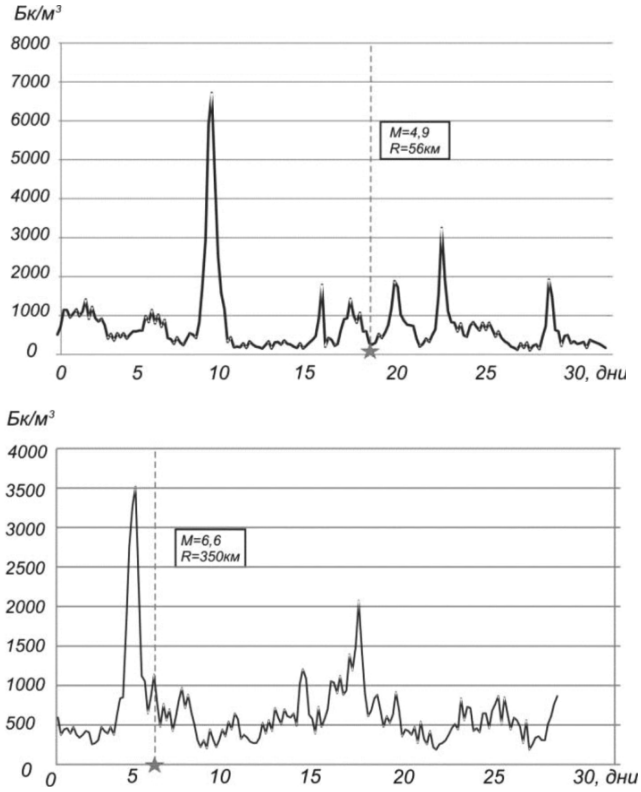

Рис. 6. Изменение объемной активности радона в пункте наблюдения Южно-Курильск (звездочка — момент землетрясения)
Fig. 6. Change in the volumetric activity of radon at the observation point Yuzhno-Kurilsk (asterisk — the moment of the earthquake)

тий в «ближней» (зоне сжатия) и «дальней» (зоне растяжения) зонах может служить подтверждением зависимости ОАР от изменения напряженно-деформированного состояния геологической среды при подготовке землетрясения.

Заключение

Проведенные экспериментальные натурные исследования могут свидетельствовать о взаимосвязи вариаций объемной активности почвенного радона с техногенными и тектоническими сейсмическими событиями.

Механизмы возникновения радоновых аномалий при техногенном и тектоническом сейсмическом событиях различны. Аномалии радона, связанные с техногенной природой, появляются через 3—4 дня после событий, за счет прохождения упругих волн и выделения «дополнительного» радона в трещинно-поровом пространстве в зоне установления детектора. Выход значений объемной активности почвенного радона на фоновый уровень через несколько дней после карьерного взрыва свидетельствует о том, что в результате структура порово-трещинного пространства не претерпела существенных изменений. Таким образом, влияние техногенных сейсмических событий не вносит существенный вклад в изменение структуры трещинно-порового

пространства на значительном расстоянии от эпицентра.

Аномалии радона, связанные с тектоническими событиями, появляются перед ними и связаны с изменением напряженно-деформированного состояния трещинно-порового пространства горных пород. Время проявления аномалий зависит от геолого-тектонических условий, магнитуды и расстояния до эпицентра. Разработанная методика сопоставления радоновых аномалий с сейсмическими событиями позволила провести разделение области исследования на «ближнюю» и «дальнюю» зоны. Для условий Южно-Курильского геодинамического стационара дальние тектонические события происходят практически всегда после прохождения экстремума объемной активности радона на его нисходящей ветви или в самом начале фоновых значений. Близкие события отмечаются после выхода нисходящей ветви аномалии на стабильные фоновые значения ОАР. По временному моменту отражения сейсмического события в вариации ОАР определено, что радиус ближней зоны — до 130 км от пункта наблюдения, а радиус дальней — более 180 км.

Отметим, что сотрудниками Института геофизики УрО РАН в 90-х годах прошлого столетия на шахтах Североуральского бокситового рудника (СУБР) были проведены экспериментальные работы по изучению зависимости радона от горных ударов [17]. В стенках глубоких шахт регистрировалась объемная активность радона, и тогда впервые было установлено ее существенное снижение перед горными ударами и высказано предположение о сжатии массива в зоне установки детектора. Полученные закономерности при тектоническом землетрясении, представленные в статье, имеют похожую картину. В дальнейших планах авторов провести натурные исследования в шахтах с целью разработки методики контроля и прогноза горных ударов.

Авторский вклад

Авторы внесли равноценный вклад в написание данной статьи. Юркову А. К. принадлежит основная идея для постановки исследований, организация геодинамических полигонов, получение первичных материалов на Южно-Курильском стационаре, написание текста и редактирование. Козлова И. А. проводила экспериментальные работы по карьерным взрывам, разработала режим измерений радона, примененный на Южно-Курильском стационаре, писала и редактировала текст. Бирюлин С. В. разработал методику сопоставления радоновых аномалий с тектоническими событиями, провел сбор и обработку материала, статистическую обработку данных. В написание введения и заключения принимали участие все авторы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шитов А. В.*, *Долгов Д. П.*, *Барсуков А. А.* О возможном изменении динамики объемной активности радона в связи с крупнейшими землетрясениями (на примере станции мониторинга ОАР Горно-Алтайск) // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. — 2019. — Т. 29. — № 4. — С. 223—231.

2. *Фирстов, П. П.*, *Макаров Е. О.* Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения. — Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2018. — 148 с.

3. *Malik A.*, *Chakraborty T.*, *Rao S.* Strain rate effect on the mechanical behavior of basalt: observations from static and dynamic tests // Thin-walled structures. 2018, pp. 127—137. DOI: 10.1016/j.tws.2017.10.014.

4. *Sciarra A.*, *Mazzini A.*, *Inguaggiato S.*, *Vita F.*, *Lupi M.*, *Hadi S.* Radon and carbon gas anomalies along the Watukosek Fault System and Lusi mud eruption, Indonesia // Marine and petroleum geology. 2018, vol. 90, pp. 77—90.

5. *Аптикаева О. И.*, *Шитов А. В.* Динамика радоновой активности в связи с землетрясениями (на примере Алтайской сейсмоактивной области) // Геофизические процессы и биосфера. — 2016. — Т. 15. — № 1. — С. 25—42.

6. *Ciotoli G.*, *Sciarra A.*, *Ruggiero L.*, *Annunziatellis A.*, *Bigi S.* Soil gas geochemical behaviour across buried and exposed faults during the 24 August 2016 central Italy earthquake // Ann. Geophys. 2016, vol. 59, Fast Track 5. DOI: 10.4401/ag-7242.

7. *Oh Y.*, *Kim G.* A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor // Sci. Rep. 2015, no. 5, 13084. DOI: 10.1038/srep13084.

8. *Martinelli G.*, *Riggio A.*, *Dadomo A.*, *Italiano F.*, *Petrini R.*, *Pierotti L.*, *Santulin M.*, *Slejko F.*, *Tamaro A.* Database of time series relative to hydrogeochemical and radon observations // D1.2 DPC-INGV-S3 Project, Short term earthquake prediction and preparation. 2013, 22 p.

9. *Baldev R.* Arora, Arvind Kumara, Vivek Waliaa, Tsanyao Frank Yangb, Ching-Chou Fub, Tsung-Kwei Liub, Kuo-Liang Wena, Cheng-Hong Chen. Assesment of the response of the meteorological/hydrological parameters on the soil gas radon emission at Hsinchu, northern Taiwan: A prerequisite to identify earthquake precursors. // Journal Asian Earth Science. 2017, vol. 149, pp. 49—63.

10. *Immè G.*, *Morelli D.* Radon as earthquake precursor // Radon as earthquake precursor, earthquake research and analysis — statistical studies, observations and planning, dr. D'*Amico S.* (Ed.). 2012, pp. 143—160. DOI: 10.5772/29917.

11. *Коршунов Г. И.*, *Мироненкова Н. А.*, *Потапов Р. В.*, *Пальцев А. И.* Мониторинг напряженно-деформированного состояния массива горных пород на основе наблюдения за радиогенными газами // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2012. — № 6. — С. 197—200.

12. *Адушкин В. В.*, *Спивак А. А.* Физические поля в приповерхностной геофизике. — М.: ГЕОС, 2014. — 360 с.

13. *Ishimori Y.*, *Lange K.*, *Martin P.*, *Mayya Y. S.*, *Phaneuf M.* Measurement and calculation of radon releases from NORM residues. // International atomic energy agency. Vienna. 2013, Technical reports serie, no. 474. — p. 85.

14. *Уткин В. И.*, *Козлова И. А.*, *Юрков А. К.* Мониторинг радона как индикатор возможного тектонического события // Геология и геофизика Юга России. — 2012. — № 4. — С. 3—8.

15. *Бирюлин С. В.*, *Козлова И. А.*, *Юрков А. К.* Исследование информативности объёмной активности почвенного радона при подготовке и реализации тектонических землетрясений на примере Южно-Курильского региона // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. — 2019. — № 4 (44). — С. 73—83.

16. *Kozlova I. A.*, *Yurkov A. K.* Variation of radon volumetric activity during successive seismic events // 19 International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2019: Conference proceedings. vol. 19., Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, pp. 1015—1021.

17. *Булашевич Ю. П.*, *Уткин В. И.*, *Юрков А. К.* Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах // Доклады РАН. — 1996. — Т. 346. — № 2. — С. 245—248. ГИАБ

REFERENCES

1. Shitov A. V., Dolgov D. P., Barsukov A. A. On a possible change in the dynamics of radon volumetric activity in connection with the largest earthquakes (on the example of the monitoring station of the Gorno-Altaisk OAR). *Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematičeskie nauki*. 2019, vol. 29, no. 4, pp. 223—231. [In Russ]
2. Firstov, P. P., Makarov E. O. Subsoil radon dynamics in Kamchatka and strong earthquakes. Petropavlovsk-Kamchatsky: KamGU im. Vitus Bering, 2018, 148 p. [In Russ]
3. Malik A., Chakraborty T., Rao S. Strain rate effect on the mechanical behavior of basalt: observations from static and dynamic tests. *Thin-walled structures*. 2018, pp. 127—137. DOI: 10.1016/j.tws.2017.10.014.
4. Sciarra A., Mazzini A., Inguaggiato S., Vita F., Lupi M., Hadi S. Radon and carbon gas anomalies along the Watukosek Fault System and Lusi mud eruption, Indonesia. *Marine and petroleum geology*. 2018, vol. 90, pp. 77—90.
5. Aptikaeva O. I., Shitov A. V. Dynamics of radon activity in connection with earthquakes (on the example of the Altai seismically active region. *Geophysical processes and biosphere*. 2016, vol. 15, no. 1, pp. 25—42. [In Russ].
6. Ciotoli G., Sciarra A., Ruggiero L., Annunziatellis A., Bigi S. Soil gas geochemical behaviour across buried and exposed faults during the 24 August 2016 central Italy earthquake. *Ann. Geophys*. 2016, vol. 59, Fast Track 5. DOI: 10.4401/ag-7242.
7. Oh Y., Kim G. A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor. *Sci. Rep*. 2015, no. 5, 13084. DOI: 10.1038/srep13084.
8. Martinelli G., Riggio A., Dadomo A., Italiano F., Petrini R., Pierotti L., Santulin M., Slejko F., Tamaro A. Database of time series relative to hydrogeochemical and radon observations. *D1.2 DPC-INGV-S3 Project, Short term earthquake prediction and preparation*. 2013, 22 p.
9. Baldev R. Arora, Arvind Kumara, Vivek Waliaa, Tsanyao Frank Yangb, Ching-Chou Fub, Tsung-Kwei Liub, Kuo-Liang Wena, Cheng-Hong Chen. Assesment of the response of the meteorological/hydrological parameters on the soil gas radon emission at Hsinchu, northern Taiwan: A prerequisite to identify earthquake precursors. *Journal Asian Earth Science*. 2017, vol. 149, pp. 49—63.
10. Immè G., Morelli D. Radon as earthquake precursor. *Radon as earthquake precursor, earthquake research and analysis statistical studies, observations and planning*, dr. D'Amico S. (Ed.). 2012, pp. 143—160. DOI: 10.5772/29917.
11. Korshunov G. I., Mironenkova N. A., Potapov R. V., Paltsev A. I. Monitoring of the stress-strain state of a rock mass based on the observation of radiogenic gases. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2012, no. 6, pp. 197—200. [In Russ].
12. Adushkin V. V., Spivak A. A. Physical Fields in Subsurface Geophysics. Moscow: GEOS, 2014. 360 p. [In Russ].
13. Ishimori Y., Lange K., Martin P., Mayya Y. S., Phaneuf M. Measurement and calculation of radon releases from NORM residues. *International atomic energy agency, Vienna. Technical reports series*. 2013, no. 474, 85 p.
14. Utkin V. I., Kozlova I. A., Yurkov A. K. Radon monitoring as an indicator of a possible tectonic event. *Geologya and Geophysica Yuga Russia*, 2012, no. 4, pp. 3—8. [In Russ].
15. Biryulin S. V., Kozlova I. A., Yurkov A. K. Investigation of the information content of the volumetric activity of soil radon during the preparation and implementation of tectonic earthquakes on the example of the South Kuril region. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*, 2019, no. 4 (44), pp. 73—83. DOI: 10.31431/1816—5524—2019—4—44—73—83. [In Russ].
16. Kozlova I. A., Yurkov A. K. Variation of radon volumetric activity during successive seismic events. 19 International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2019:

Conference proceedings. vol. 19, Science and Technologies in Geology, *Exploration and Mining*, pp. 1015 – 1021.

17. Bulashevich Y. P., Utkin V. I., Yurkov A. K. Changes in radon concentration due to rock bursts in deep mines. *Reports of the Russian Academy of Sciences*. 1996, vol. 346, no. 2, pp. 245 – 248.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Козлова Ирина Анатольевна[1] — директор, канд. геол.-минерал. наук, ORCID ID 0000-0002-0281-9218, ikozlova75@mail.ru;
Юрков Анатолий Константинович[1] — заведующий лабораторией геодинамики, кандидат геол-мин.наук, ORCID ID 0000-0002-6790-0340, akyurkov@mail.ru;
Бирюлин Сергей Викторович[1] — научный сотрудник, ORCID ID 0000-0003-4811-9185, serrega2009@gmail.com;
[1] ФГБУН Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, 620016, Екатеринбург, Амундсена 100, Россия.
Для контактов: *Козлова Ирина Анатольевна*, e-mail: ikozlova75@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kozlova I. A.[1], Director, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), ORCID ID 0000-0002-0281-9218, ikozlova75@mail.ru;
Yurkov A. K.[1], Head of the Geodynamics Laboratory, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), ORCID ID 0000-0002-6790-0340, akyurkov@mail.ru;
Biryulin S. V.[1], Researcher, ORCID ID 0000-0003-4811-9185, serrega2009@gmail.com;
[1] Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IGF UB RAS), Ekaterinburg, Russia, igfuroran@mail.ru;
For contacts: *Kozlova I. A.*, e-mail: ikozlova75@mail.ru.

Получена редакцией 01.11.2021; получена после рецензии 16.03.2022; принята к печати 10.04.2022.
Received by the editors 01.11.2021; received after the review 16.03.2022; accepted for printing 10.04.2022.