



CORRELATION OF RADON AND SEISMIC ACTIVITY IN THE BAIKAL RIFT ZONE ACCORDING TO EMANATION MONITORING DATA

K.Zh. Seminsky  , A.A. Bobrov 

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT: Long series of the emanation monitoring organized at Tyrgan (2018–2023), Buguldeika (2020–2023) and Maksimikha (2022–2023) stations in the central part of the Baikal Region (the Eastern Siberia) are studied to reveal the relationship of the subsurface radon volumetric activity (RVA) with the seismicity of the Baikal rift zone (BRZ). The comparison of the weekly averaged RVA values at different stations and the degree of dependence of this parameter on the logarithm of the total earthquakes energy ($Lg\Sigma E$) showed that during the periods of seismic activity the impact of tectonic forces makes significant corrections in the character of emanations, which in general is determined by non-tectonic factors. It has been established that seismic activity represented by the enough strong for the Baikal Region earthquakes with $K \geq 13.3$ correspond to synchronicity intervals of RVA at different monitoring stations, as well as coincidence of maximum values of the logarithm of the total earthquakes energy with local maximums of the correlation coefficient between RVA and $Lg\Sigma E$ parameters. The area, including the earthquake epicenters that generated such an emanation response at monitoring stations, is in the form of an ellipse extended in the northeastern direction – along the main fault structures of the BRZ. The obtained results, besides confirming the previously proposed model of radon field formation in the Baikal Region under the influence of external and internal forces, provide the for the identification of further stable precursors of strong earthquakes based on a comprehensive analysis of data from a branched emanation monitoring network.

KEYWORDS: radon; earthquakes; monitoring; Baikal rift

FUNDING: The work was carried out as a part of the state assignment of IEC SB RAS for 2021–2025. "Modern geodynamics, mechanisms of lithosphere destruction and dangerous geological processes in Central Asia" using the Large-Scale Research Facilities "South-Baikal instrumental complex for monitoring of hazardous geodynamic processes" of the Centre for Geodynamics and Geochronology at the IEC SB RAS (grant 075-15-2021-682).



EDN: VGLECE

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Konstantin Zh. Seminsky, seminsky@crust.irk.ru

Received: December 12, 2023

Revised: January 9, 2024

Accepted: January 11, 2024

FOR CITATION: Seminsky K.Zh., Bobrov A.A., 2024. Correlation of Radon and Seismic Activity in the Baikal Rift Zone According to Emanation Monitoring Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (1), 0744. doi:10.5800/GT-2024-15-1-0744

СООТНОШЕНИЕ РАДОНОВОЙ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ ПО ДАННЫМ ЭМАНАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

К.Ж. Семинский, А.А. Бобров

Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

АННОТАЦИЯ. Длинные ряды эманационного мониторинга, организованного на станциях «Тырган» (2018–2023 гг.), «Бугульдейка» (2020–2023 гг.) и «Максимиha» (2022–2023 гг.) в центральной части Прибайкалья (Восточная Сибирь), изучены с целью выявления связи объемной активности подпочвенного радона (ОАР) с сейсмичностью Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Сопоставление осредненных за неделю значений ОАР на разных станциях и степени зависимости данного параметра от логарифма суммарной энергии землетрясений ($Lg\Sigma E$) показало, что в периоды сейсмических активизаций воздействие тектонических сил вносит значимые коррективы в характер эманаций, который в целом определяется нетектоническими факторами. Установлено, что сейсмическим активизациям, представленным достаточно сильными для Прибайкалья землетрясениями с $K \geq 13.3$, соответствуют интервалы нарушения синхронности вариаций ОАР на разных станциях мониторинга, а также совпадение максимальных величин логарифма суммарной энергии землетрясений с локальными максимумами коэффициента корреляции связи между параметрами ОАР и $Lg\Sigma E$. Область, включающая эпицентры землетрясений, генерировавших подобный эманационный отклик на станциях мониторинга, имеет форму эллипса, вытянутого в северо-восточном направлении – вдоль главных разломных структур БРЗ. Полученные результаты, кроме подтверждения предложенной ранее модели формирования поля радона в Прибайкалье под воздействием внешних и внутренних сил, представляют основу для выявления в дальнейшем устойчивых предвестников сильных землетрясений на базе комплексного анализа данных разветвленной сети эманационного мониторинга.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радон; землетрясения; мониторинг; Байкальский рифт

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работы выполнены в рамках госзадания ИЗК СО РАН на 2021–2025 гг. «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии» с использованием оборудования и инфраструктуры Уникальной научной установки «Южно-Байкальский инструментальный комплекс для мониторинга опасных геодинамических процессов» ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН по гранту 075-15-2021-682.

1. ВВЕДЕНИЕ

Эманации радона формируют одно из наиболее перспективных для поиска предвестников землетрясений природных полей, что является причиной организации мониторинговых измерений практически во всех крупных странах мира, в границы которых попадают регионы с высокой сейсмической активностью. Как следствие, результаты анализа данных эманационного мониторинга отражены в большом объеме публикаций, количество которых постоянно возрастает, свидетельствуя об актуальности исследований отклика поля радона на сейсмические активизации.

Основные достижения в данной области отражены в ряде научных обзоров [Thomas, 1988; Toutain, Baubron, 1999; Hartmann, Levy, 2005; Utkin et al., 2006; King et al., 2006; Cicerone et al., 2009; Ghosh et al., 2009; Utkin, Yurkov, 2010; Jordan et al., 2011; Riggio, Santulin, 2015; Woith, 2015; Firstov, Makarov, 2018], анализ которых позволяет оценить современное состояние проблемы взаимосвязи радоновой и сейсмической активности в разных регионах мира. В целом, несмотря на широкое развитие сетей эманационного мониторинга в сейсмоактивных регионах мира, к настоящему времени не удалось выделить устойчивые аномалии,

предшествующие сильным землетрясениям, что связано с существенным разнообразием эманационных откликов на сейсмические активизации. Более того, наблюдается сходство подобных аномалий с реакцией поля радона на события нетектонической природы. Это послужило причиной отнесения многими исследователями эманационных предвестников к категории слабоэффективных, хотя практически все специалисты придерживаются мнения о необходимости включения систематических измерений концентрации радона в почве или подземных водах в комплекс систематических наблюдений, направленных на прогнозирование сильных сейсмических событий.

На юге Восточной Сибири, где интенсивная сейсмическая активность обусловлена развитием Байкальской рифтовой зоны [Logachev, Florensov, 1977; Sherman, 1977; Ruzhich, 1997; Mats et al., 2001; Logachev, 2003; Petit, Deverchere, 2006], эманационный мониторинг с целью поиска предвестников землетрясений проводится с 2010 г. Кроме основных закономерностей пространственно-временных вариаций концентрации радона в почве [Seminsky, Bobrov, 2009, 2013] и подземных водах [Seminsky, 2022], для территории Прибайкалья установлено существенное влияние на данный параметр

внешних факторов, мерой которых в условиях применяемой технологии мониторинга является атмосферное давление (Р). Анализ первых рядов систематических измерений в одном пункте («Тырган») позволил предположить обобщенную модель формирования эманационного поля [Seminsky, Bobrov, 2013], согласно которой в тектонически стабильные периоды времени объемную активность радона (ОАР) в подпочвенном воздухе контролирует атмосферное давление. Низкие значения Р способствуют выходу радиоактивного газа из недр, а высокие величины, наоборот, сдерживают этот процесс. Синхронность вариаций параметров Р и ОАР нарушается при возрастании тектонической нагрузки, которая в эти периоды обуславливает как режим эманаций, так и сейсмическую активность.

Предложенная модель открывает определенные перспективы для поиска устойчивых предвестников сильных землетрясений в Прибайкалье, которыми, согласно [Seminsky, Bobrov, 2023], являются моменты нарушения связи объемной активности подпочвенного радона и атмосферного давления. Однако для разработки теоретических основ среднесрочного прогноза, базирующегося на данных эманационного мониторинга, необходимо подтверждение и второй составляющей модели, т.е. связи поля радона с сейсмичностью. Как следствие, целью исследований, результаты которых изложены в статье, было установить соотношение радоновой и сейсмической активности в Байкальской рифтовой зоне на основе анализа длинных рядов мониторинга радона в Прибайкалье.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПУНКТОВ ЭМАНАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА, СОЗДАНЫХ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

Байкальская рифтовая зона (БРЗ), формирующаяся вследствие относительных перемещений Сибирского и Амурского блоков литосферы, в настоящее время представляет изогнутую в плане линейно вытянутую область сгущения активных разломов и интенсивной сейсмичности (рис. 1). В ее пределах выделяется центральный сегмент (собственно Байкальский рифт), характеризующийся северо-восточным простиранием, а также юго-западный и северо-восточный фланги, занимающие субширотное положение.

Сеть мониторинга подпочвенного радона создана в центральной части Байкальского рифта и включает пять пунктов, три из которых («Бугульдейка», «Тырган» и «Максимиха») характеризуются наиболее длинными рядами систематических измерений – более 2 лет, что и послужило причиной использования их для достижения цели исследования (рис. 1). Основной задачей работ по организации сети мониторинга было создание максимально возможного подобия условий измерения на отдельных пунктах. Это позволяет снизить влияние на характер эманаций второстепенных факторов, осложняющих выявление основных закономерностей эманаций при сопоставлении рядов измерений, полученных на разных станциях.

Во-первых, пункты мониторинга размещались в зонах главных рифтообразующих сбросов, которые на современном этапе развития характеризуются активными перемещениями крыльев и высоким уровнем сейсмичности, что предполагает наличие в их пределах интенсивной флюидодинамики. Станции «Бугульдейка» и «Тырган», находясь на расстоянии 25 км друг от друга, принадлежат к осевой части Обручевской сбросовой зоны, которая формирует северо-западный борт Байкальского рифта. Пункт мониторинга «Максимиха» принадлежит к крупной сбросовой зоне юго-восточного борта и располагается на расстояниях, соответственно, 191 и 170 км от двух первых станций.

Во-вторых, на всех трех пунктах была реализована аналогичная схема измерений, которая обеспечивает максимальную защищенность от влияния климатических факторов и была детально описана ранее [Seminsky et al., 2022]. Здесь необходимо лишь отметить главные параметры мониторинга: глубина пробоотбора ≈ 2.5 м; размеры опробуемого объема рыхлых отложений, имеющего цилиндрическую форму (длина/радиус), – 800/11 см; измерительное оборудование – скважинный радиометр радона ВМС-2 (Франция); чувствительность датчика – 50 Бк/м³; частота измерений в автоматическом режиме – 1 ч; регистрируемые параметры – дата и время измерения, объемная активность радона (Бк/м³), атмосферное давление (мБар), температура воздуха (°С).

Продолжительность регулярных измерений отличается для отдельных станций эманационного мониторинга, поскольку они были организованы в разное время. Базовыми для обработки стали ряды замеров, полученных для станции «Бугульдейка» с 27.08.2020 г. по 14.08.2023 г., для станции «Тырган» с 17.09.2017 г. по 03.08.2023 г., для станции «Максимиха» – с 12.11.2021 г. по 17.08.2023 г. На рис. 2 для каждой из станций приведены графики вариаций значений ОАР, осредненных за недельный интервал времени. Перерывы в рядах, имевшие место на станциях «Тырган» и «Максимиха», обусловлены техническими сбоями и необходимостью проведения профилактических работ. Как следует из табл. 1, количественные характеристики, полученные в периоды мониторинга для разных станций, существенно отличаются друг от друга. В пунктах «Максимиха» и «Тырган» концентрация радона в подпочвенном воздухе в четыре раза выше, чем на станции «Бугульдейка». В то же время для целей данного исследования важен характер вариаций, который, судя по форме колебаний величины ОАР, на разных станциях подобен (рис. 2).

Для выполнения цели исследования ряды эманационного мониторинга сопоставлялись с сейсмической активностью в период 2018–2023 гг., который соответствовал наиболее длительному интервалу систематических измерений на станции «Тырган». За это время в БРЗ, согласно каталогу БФ ФИЦ ЕГС РАН, произошло почти две тысячи землетрясений с энергетическим классом $K \geq 8.6$ (см. рис. 1). На фоне сотен сейсмических

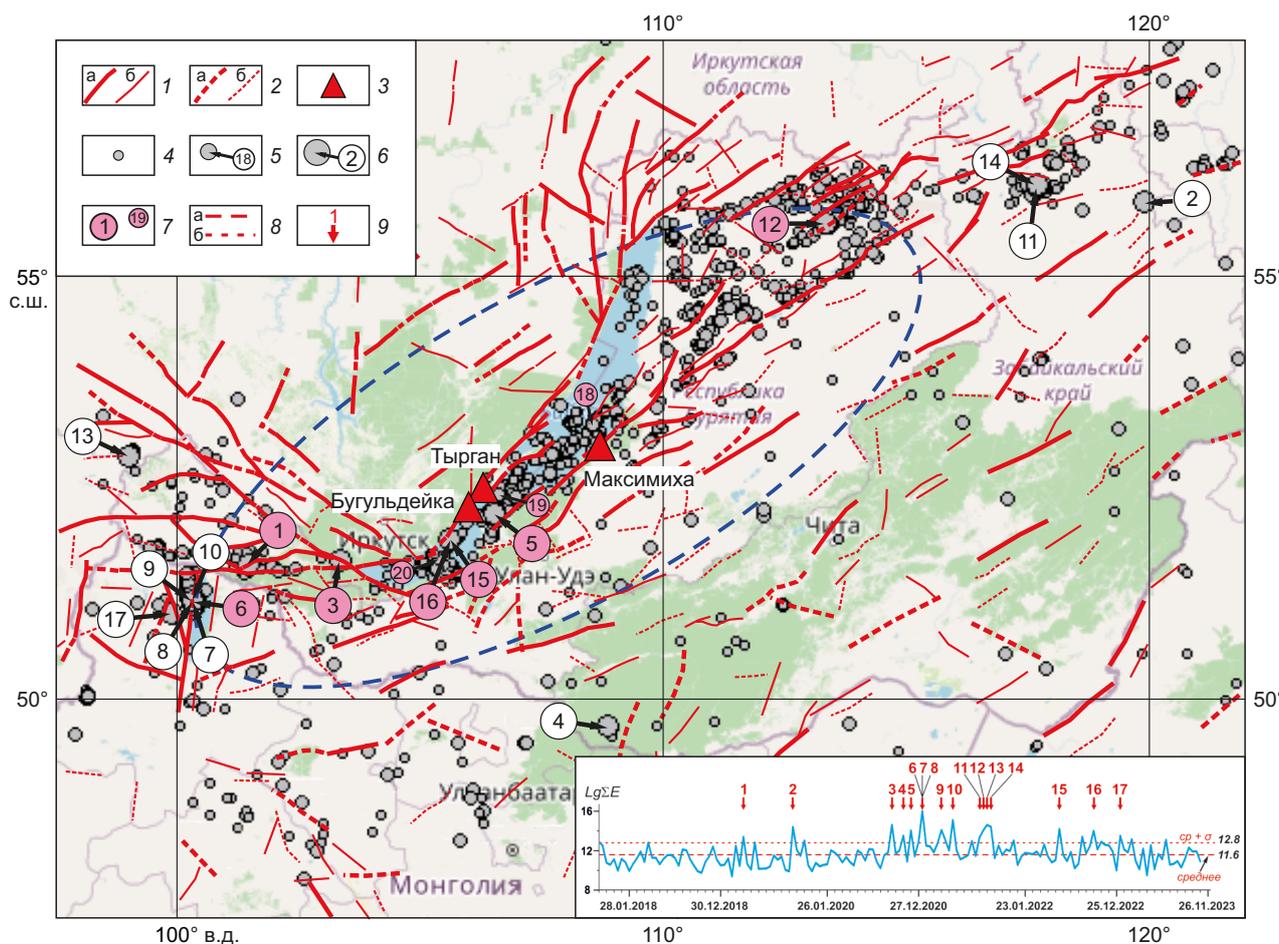


Рис. 1. Расположение пунктов мониторинга почвенного радона на схеме разломов и эпицентров землетрясений Прибайкалья и Забайкалья.

На врезке – график вариаций логарифма суммарной энергии землетрясений с $K \geq 8.6$ ($Lg\Sigma E$), рассчитанного по двухнедельным интервалам для периода 2018–2023 гг. согласно каталогу Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН (<https://seis-bykl.ru>). 1 – крупные (а) и мелкие (б) разломы отчетливо проявленные в рельефе; 2 – крупные (а) и мелкие (б) разломы, менее отчетливо проявленные в рельефе; 3 – станции эманационного мониторинга; 4–6 – землетрясения с $K=8.6-9.9$ (4), с $K=10.0-13.1$ (5) и с $K=13.3-16.0$ (6) и их номера; 7 – эпицентры землетрясений, оказавших воздействие на поле почвенного радона в пределах станций эманационного мониторинга и граница области их распространения; 8 – уровни среднего арифметического (а) и среднеквадратичного отклонения σ (б) для графика $Lg\Sigma E$; 9 – моменты землетрясений с $K \geq 13.3$ и их порядковые номера на врезке.

Fig. 1. Location of the monitoring stations of soil radon on the scheme of faults and earthquakes epicenters of the Baikal Region and Transbaikalia.

On the frame is a graph of the logarithm variations of the earthquakes total energy with $K \geq 8.6$ ($Lg\Sigma E$), calculated in two-week intervals for the period of 2018–2023 according to the catalogue of the Baikal Branch of GS RAS (<https://seis-bykl.ru>). 1 – large (a) and small (б) faults clearly manifested in relief; 2 – large (a) and small (б) faults less clearly manifested in relief; 3 – stations of emanation monitoring; 4–6 – earthquakes with $K=8.6-9.9$ (4), with $K=10.0-13.1$ (5) and with $K=13.3-16.0$ (6) and their numbers; 7 – earthquakes epicenters affecting on the soil radon field within the stations of emanation monitoring and the boundary of their distribution area; 8 – levels of the arithmetical mean (а) and standard deviation σ (б) for $Lg\Sigma E$ chart; 9 – moments of earthquakes with $K \geq 13.3$ and their serial numbers on the frame.

Таблица 1. Максимальные и средние значения объемной активности радона, установленные в разных пунктах мониторинговых измерений

Table 1. Maximum and average values of the radon volumetric activity established at different monitoring measurement sites

Пункт мониторинга	Среднее значение ОАР, Бк/м ³	Максимальное значение ОАР, Бк/м ³
«Бугульдейка»	4275	9013
«Тырган»	19299	41245
«Максимиха»	26124	48364

событий, для которых $K \leq 13.1$, выделяется группа из 17 наиболее сильных землетрясений с $K \geq 13.3$ (см. рис. 1; табл. 2). Некоторые из них сопровождались сотрясениями с интенсивностью 5 баллов в городах юга Восточной Сибири. Это Быстринское (№ 3: 21.09.2020 г., $K=14.6$), Кударинское (№ 5: 09.12.2020 г., $K=14.0$) и Хубсугульское (№ 6: 11.01.2021 г., $K=16.0$) землетря-

сения, а также сейсмическое событие с $K=14.2$ (№ 15: 08.06.2022 г.), эпицентр которого находился в акватории оз. Байкал примерно в 100 км к восток-юго-востоку от г. Иркутска [Seminsky et al., 2021; Tubanov et al., 2021; Earthquakes..., 2022, 2023].

Характеристики некоторых из этих землетрясений (время, эпицентральное расстояние, энергетический

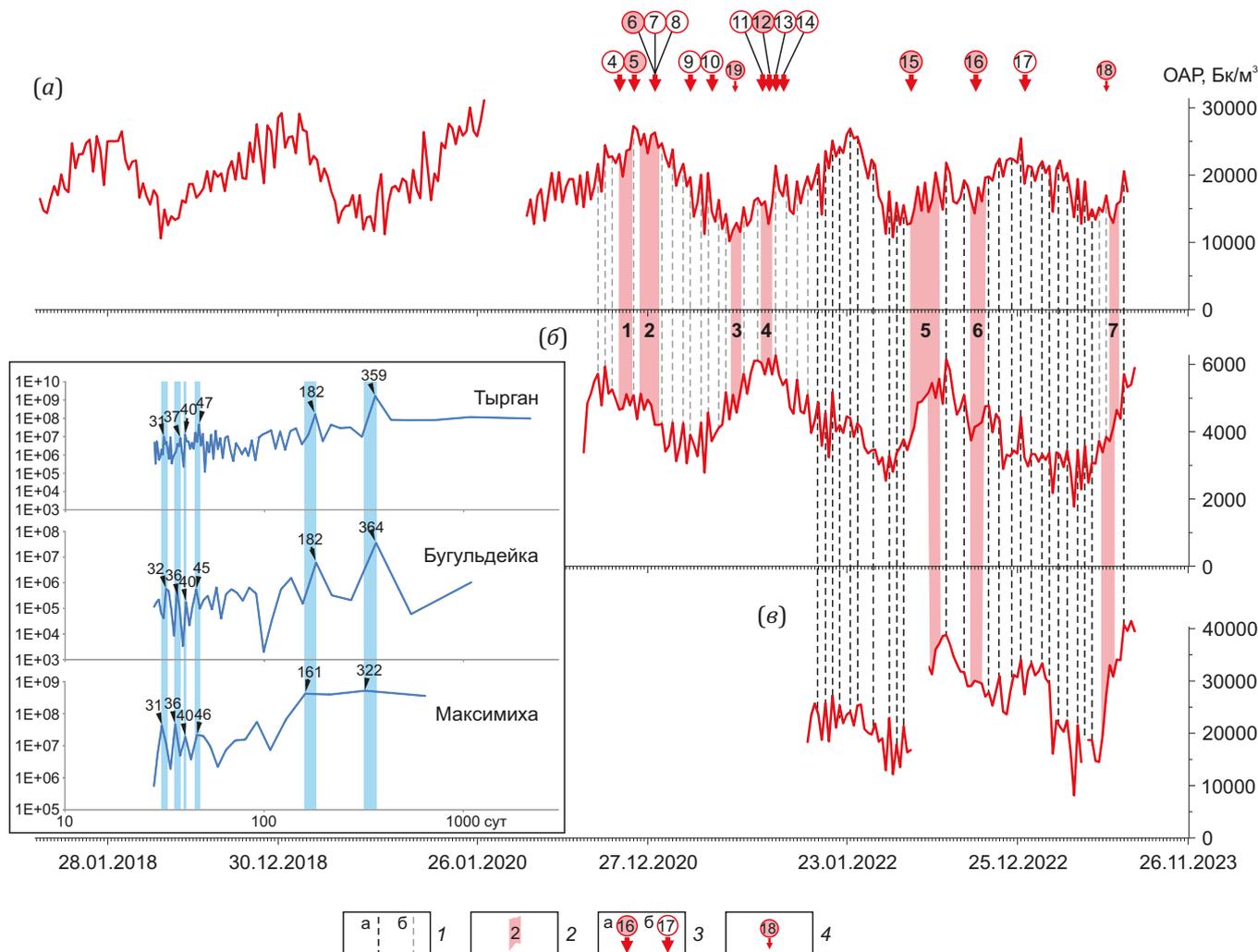


Рис. 2. Графики временных вариаций объемной активности радона (ОАР) по данным систематических измерений в пунктах «Тырган» (а), «Бугульдейка» (б) и «Максимиха» (в).

На врезке – периодограммы Фурье-анализа, полученные для рядов данных, показанных на графиках а, б и в соответственно. Пояснение в тексте. 1 – линии, отражающие соответствие максимумов ОАР, выявленных по измерениям в трех (а) или двух (б) пунктах мониторинга; 2 – интервалы и их номера, для которых отсутствует соответствие максимумов ОАР, выявленных по измерениям в разных пунктах мониторинга (интервалы асинхронности вариаций); 3 – моменты землетрясений с $K \geq 13.3$, которым соответствуют (а) или не соответствуют (б) интервалы асинхронности проявления максимумов ОАР, выявленные для разных станций мониторинга; 4 – моменты землетрясений с $K \leq 13.3$, которым соответствуют интервалы асинхронности проявления максимумов ОАР, выявленные для разных станций мониторинга.

Fig. 2. Graphics of temporal variations of the radon volumetric activity (RVA) according to the systematic measurements at the stations "Tyrgan" (a), "Buguldeika" (b) and "Maksimikha" (v).

The frame shows Fourier analysis periodograms obtained for the data series shown in Figures a, б and в, respectively. Explanation in the text. 1 – lines reflecting the correspondence of the maxima of RVA, detected by measurements in three (a) or two (б) monitoring points; 2 – intervals and their numbers, for which there is no correspondence of maxima of RVA, detected by measurements in different monitoring points (intervals of asynchronous variations); 3 – moments of earthquakes with $K \geq 13.3$, which correspond (a) or do not correspond (б) to the intervals of asynchrony of manifestation of RVA maxima, detected for different monitoring stations; 4 – moments of earthquakes with $K \leq 13.3$, which correspond to the intervals of asynchrony of manifestation of RVA maxima, detected for different monitoring stations.

Таблица 2. Параметры наиболее сильных землетрясений, произошедших в Байкальской рифтовой зоне в период эманационного мониторинга**Table 2.** Parameters of the strongest earthquakes that occurred in the Baikal rift zone during the emanation-monitoring period

№	Дата	Широта	Долгота	К	Расстояние до пункта мониторинга, км		
					Бугульдейка	Тырган	Максимиха
1	29.03.2019	51.72°	101.52°	13.4	324	356	517
2	28.09.2019	56.15°	119.94°	14.4	988	950	793
3	21.09.2020	51.78°	103.41°	14.6	195	236	397
4	05.11.2020	49.6°	108.92°	13.5	383	397	414
5	09.12.2020	52.38°	106.59°	14	38	49	173
6	11.01.2021	51.27°	100.38°	16	413	447	612
7	11.01.2021	51.21°	100.41°	13.5	413	447	612
8	11.01.2021	51.28°	100.35°	13.7	413	447	612
9	31.03.2021	51.21°	100.38°	14.1	413	447	612
10	03.05.2021	51.33°	100.39°	15.1	413	447	612
11	15.08.2021	56.33°	117.73°	13.3	868	828	674
12	31.08.2021	55.9°	113.39°	14	606	575	416
13	06.09.2021	53.09°	99.08°	14.6	476	494	643
14	22.09.2021	56.34°	117.73°	14.4	868	828	674
15	08.06.2022	52.05°	105.67°	14.2	59	98	247
16	14.10.2022	52.06°	105.66°	14	59	98	247
17	14.01.2023	51.1°	99.96°	13.5	448	482	641

класс) далее будут привлекаться к анализу для объяснения специфики вариаций ОАР на станциях мониторинга. В то же время в качестве основного показателя интенсивности сейсмического процесса, использованного для сопоставления с радоновой активностью, на представляемом в статье начальном этапе исследований рассматривался логарифм суммарной энергии землетрясений ($Lg\Sigma E$) с $K \geq 8.6$. Оценки $Lg\Sigma E$ производились для двухнедельного интервала времени, который был минимальным для построения непрерывного и представительного графика вариаций данного параметра, характеризующего сейсмическую активность в пределах изучаемого региона (см. рис. 1, врезка).

Обработка результатов мониторинга проводилась в два этапа. На первом из них осуществлялось сопоставление графиков вариаций ОАР, полученных на разных станциях, с целью выявления таких особенностей кривых, которые являются общими для эманаций радиоактивного газа в центральной части Байкальского рифта. На втором этапе проводилось их сравнение с графиками временных вариаций параметра $Lg\Sigma E$ с применением корреляционного анализа.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЭМАНАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА И ИХ СОПОСТАВЛЕНИЕ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ

Сравнение вариаций объемной активности радона на разных станциях мониторинга свидетельствует о

том, что они характеризуются определенным подобием (рис. 2). Это подтвердили результаты Фурье-анализа, реализованного в программном комплексе «Statistica» (рис. 2, врезка). Периодограммы, полученные для станций «Тырган» и «Бугульдейка», характеризуются существенным подобием, хотя и отличаются по количеству пиков, что связано с практически двукратным различием в продолжительности проанализированных рядов: ≈ 6 и ≈ 3 года соответственно. Отличие графика для пункта «Максимиха» по количеству пиков обусловлено еще более коротким периодом мониторинга (≈ 2 года), а по их положению (особенно в области больших периодов) – двумя перерывами в измерениях.

Несмотря на это, выделяется несколько периодов, характерных для всех кривых (рис. 2, полосы голубого цвета на врезке): 322–364, 161–182, 45–47, 40, 36–37 и 31–32 сут. Видно, что первый из периодов соответствует году, а второй – полугодию. Из четырех периодов, занимающих близкое положение в левой части графиков, наиболее представительным, по крайней мере для «Бугульдейки» и «Максимихи», является период в 31 сут. Поскольку периоды, кратные году (месячный, полугодовой и годовой), соответствуют колебаниям приливной силы и воздействуют на вариации атмосферной нагрузки [Sidorenkov, 2015], можно сделать предварительное заключение о том, что ключевую роль в режиме эксхалляции радона в центральной части Байкальского рифта играют внешние по отношению к Земле (нетектонические) факторы.

Визуально наиболее отчетливо на всех графиках (рис. 2, а–в) выделяется гармоника с годовым периодом, которая образует основной тренд вариаций ОАР на станциях, а также колебания, придающие этому тренду «пилообразную» форму с месячным и близкими к нему периодами.

Для годового периода сопоставление интервалов минимальных и максимальных величин ОАР в разных пунктах мониторинга свидетельствует о том, что колебания подобны на станциях «Бугульдейка» и «Максимиха», где пониженные значения приходятся на март – май, в отличие от пункта «Тырган», где они смещаются на апрель – июнь (рис. 2). Период максимальных значений для первой группы станций – июль – сентябрь, а для пункта «Тырган» – октябрь – февраль. Подобие сезонных вариаций поля радона на разных бортах рифта (станции «Бугульдейка» и «Максимиха») и их некоторое отличие для пунктов, располагающихся на расстоянии 25 км в пределах зоны Обручевского сброса на западном плече рифта (станции «Бугульдейка» и «Тырган»), подтверждают сделанный ранее вывод о влиянии нетектонических факторов. Наиболее значимыми из них являются отличающиеся по временам года режимы промерзания – оттаивания и выпадения осадков, которые в условиях юга Восточной Сибири оказывают определяющее воздействие на характер проницаемости верхнего слоя рыхлых отложений для газов.

Колебания с периодом, составляющим один месяц и более, как уже отмечалось, придают «пилообразную» форму тренду годовых колебаний на всех станциях мониторинга (рис. 2). Более того, пунктирные линии, соединяющие максимумы этих колебаний на графиках, свидетельствуют об их практически полном подобию на разных измерительных пунктах. Следовательно, можно предположить, что факторы, формирующие режим этих флуктуаций на обширной территории центральной части Байкальского рифта, как и для годовых колебаний, в своей основе являются нетектоническими.

Отклонения от синхронности вариаций ОАР на разных станциях происходят лишь в течение сравнительно коротких интервалов времени, отмеченных на рис. 2 полосами розового цвета. Их сопоставление с моментами проявления наиболее сильных для региона землетрясений, показанных в верхней части рис. 2, свидетельствует об определенной генетической связи. Так, полосе 1 можно поставить в соответствие сейсмические события № 4 и 5, полосе 2 – № 6–8, полосе 4 – № 11 и 12, полосе 5 – № 15 и полосе 6 – № 16.

Землетрясения № 9, 10, 13, 14 и 17 не нарушили синхронности колебаний ОАР на станциях мониторинга, что, по-видимому, можно объяснить их недостаточно высоким энергетическим классом для воздействия на эманационное поле центральной части Байкальского рифта (см. рис. 1). Эпицентральное расстояние (r) для этих сейсмических событий превышает 400 км (табл. 2). Поскольку подобным соотношением K и r характеризуются сейсмические события № 7 и 8, то

полосу 2 логично связывать только с главным толчком Хубсугульского землетрясения (№ 6), которое при том же эпицентральном расстоянии характеризуется существенно более высоким энергетическим классом ($K=16$). Подобный анализ полосы 1 позволяет связывать ее происхождение лишь с Кударинским землетрясением (№ 5), которое характеризуется величиной $r < 200$ км, тогда как эпицентр сейсмического события № 4 располагается на расстояниях 383–414 км от станций мониторинга (табл. 2), причем за пределами БРЗ (см. рис. 1).

Из землетрясений, ассоциирующихся с полосой 4, нарушение синхронности колебаний ОАР вряд ли вызвано сейсмическим событием № 11, удаленным от станций мониторинга на расстояния 868, 826 и 674 км (табл. 2). Землетрясение № 12 характеризуется меньшими эпицентральными расстояниями – 606, 578 и 416 км. Однако оно, в отличие от рассмотренных выше сейсмических событий юго-западного фланга, локализуется, как и станции мониторинга, в разломной зоне северо-восточного простириания (см. рис. 1). Поскольку, согласно [Bobrov, 2016], «чувствительность» станций мониторинга выше вдоль простириания разломных зон, можно предположить, что появление полосы 4 связано только с сейсмическим событием № 12.

Кроме рассмотренных полос, рис. 2 позволяет выделить еще два узких интервала нарушения синхронности вариаций ОАР на станциях мониторинга – 3 и 7 (рис. 2). В их границы попадают более слабые сейсмические события № 19 (21.06.2021; $K=9.8$) и № 18 (08.06.2023; $K=11.6$), особенностью которых является близкое расположение к станциям мониторинга: № 19 – 24 км от станции «Бугульдейка», № 18 – 31 км от станции «Максимиха» (см. рис. 1). Это и, вероятно, какие-то дополнительные свойства локализации и механизма очагов послужили причиной того, что землетрясения № 18 и 19 привели к непродолжительным возмущениям поля радона, зафиксированным пунктами мониторинга.

Таким образом, проведенные сопоставления позволяют считать вероятной причиной появления асинхронности вариаций поля радона на разных станциях мониторинга наиболее сильные землетрясения № 5, 6, 12, 15 и 16 ($K \geq 13.3$), а также относительно слабые сейсмические события № 18 и 19, которые характеризуются достаточно близкой локализацией эпицентров к пунктам регулярных измерений ОАР. Для подтверждения намеченной связи эманаций радона с сейсмичностью на втором этапе обработки данных эманационного мониторинга они сопоставлялись с интегральной характеристикой сейсмической активности в пределах рассматриваемого региона – логарифмом суммарной энергии землетрясений.

Как видно из рис. 1 (врезка), выделение сейсмической энергии в регионе за рассматриваемый период времени характеризуется отчетливой неравномерностью, проявляющейся в колебаниях параметра $Lg\Sigma E$ относительно среднего значения (11.6). Неравномерностью

1-го порядка является существование продолжительного интервала времени между землетрясениями № 3 и 17, для которого в целом характерно превышение значениями $Lg\Sigma E$ уровня среднего арифметического, тогда как в левой половине и на крайнем правом отрезке графика наблюдается обратная закономерность. Неравномерность 2-го порядка проявляется в виде максимумов графика, превышающих среднее квадратичное отклонение (12.8). Практически каждому из них соответствует одно (№ 1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 15, 16, 17) или группа сближенных (№ 6–8, № 11–14) землетрясений с $K \geq 13.3$. Установление связи сейсмической и радоновой активности в рамках этих уровней неоднородности было основной задачей представленного ниже сопоставления графиков временных вариаций ОАР и $Lg\Sigma E$.

В связи с тем, что визуальное сравнение кривых не позволило выявить устойчивые закономерности, сопоставление проводилось на основе корреляционного анализа. Прямое коррелирование массивов данных ОАР и $Lg\Sigma E$ показало, что зависимость между рассматриваемыми параметрами отсутствует. Вследствие этого для каждой из станций мониторинга была проведена поинтервальная оценка рассматриваемой зависимости. На рис. 3, б–г, представлены графики временных вариаций коэффициента корреляции (R), рассчитанного в скользящем окне (2 месяца) для связи между параметрами ОАР и $Lg\Sigma E$ по каждому из пунктов эманационного мониторинга. Видно, что абсолютным значениям коэффициентов корреляции свойственны существенные колебания. Величины R могут достигать 0.85 и опускаться до -0.92 , но интервалы наличия значимой связи между параметрами ОАР и $Lg\Sigma E$ непродолжительны. Например, для наиболее представительной по набору данных станции «Тырган» суммарная длительность интервалов с $R > 0.4$ составляет 12 % и интервалов с $R < -0.4$ – 22 % от общей продолжительности мониторинговых измерений.

Отсутствие статистической связи между рассматриваемыми характеристиками радоновой и сейсмической активности позволяет на данном этапе исследований ограничиться результатами анализа вариаций коэффициента R на качественном уровне. Как видно из рис. 3, б–г, графики, соответствующие разным станциям, во многом подобны, что закономерно вследствие установленной ранее аналогии в вариациях объемной активности радона (см. рис. 2). Поскольку эта аналогия определяется, прежде всего, колебаниями месячного периода, соответствие максимумов и минимумов, придающих кривым вариаций коэффициента R на разных станциях «пилообразный» вид, на графиках рис. 3, б–г, выражено достаточно отчетливо.

Нарушение синхронности рассматриваемых колебаний объемной активности радона для разных станций во время реализации сильных для региона сейсмических событий позволяет предполагать, что и степень тесноты связи ОАР и $Lg\Sigma E$ будет по-разному проявляться в периоды высокой и низкой сейсмической активности. Для установления характера этих

взаимоотношений сопоставлялось положение максимумов на графике вариаций параметра $Lg\Sigma E$ (рис. 3, а) и максимумов коэффициента R , выявленных для одной (рис. 3, б), а также двух (рис. 3, б, в) и трех (рис. 3, б–г) станций мониторинга одновременно. Видно, что пунктиры, отражающие их совпадение, маркируют несколько соседних максимумов параметра $Lg\Sigma E$. Это позволило выделить временные интервалы (полосы розового цвета), на протяжении которых рассматриваемым всплескам сейсмической активности соответствует повышение коэффициента корреляции связи между объемной активностью радона и логарифмом суммарной энергии землетрясений. Для оставшихся неокрашенных интервалов устойчивой закономерности не наблюдается: либо нет соответствия в вариациях коэффициента R на разных станциях, либо всплеску сейсмической активности соответствует минимум коэффициента корреляции, но в большинстве случаев экстремумы графиков $Lg\Sigma E$ и R не совпадают друг с другом.

Как видно из рис. 3, выделяется девять интервалов совпадения максимумов на графиках вариаций $Lg\Sigma E$ и R , которые неравномерно распределены в пределах рассматриваемого 6-летнего периода времени. Четыре сближенных во времени широких полосы соответствуют продолжительному отрезку времени, отражающему неравномерность 1-го порядка в выделении сейсмической энергии и характеризующемуся в целом значениями $Lg\Sigma E$, большими уровнями среднего арифметического (см. рис. 1, врезка; рис. 3, а). Неравномерность 2-го порядка выражена максимумами $Lg\Sigma E$, превышающими среднее квадратичное отклонение, большинство из которых обязано своим происхождением одному землетрясению или группе сейсмических событий с $K \geq 13.3$. Номера этих событий, моменты которых совпадают с максимумами коэффициента R , окрашены на рис. 3 розовым цветом. Видно, что к полосе 5 относятся землетрясения № 3–9, к полосе 6 – № 11–14, к полосе 7 – № 15, к полосе 8 – № 16. Кроме того, в пределы полосы 6 попадает землетрясение № 19 с $K \leq 13.3$, эпицентр которого располагается сравнительно близко к станциям эманационного мониторинга (см. рис. 1).

В пределах левой половины и крайней правой части рис. 3, характеризующихся в целом сравнительно низкой сейсмической активностью, имеют место узкие интервалы совпадения максимумов $Lg\Sigma E$ и R . В их положении, хотя и с меньшей отчетливостью, чем для широких полос, тоже устанавливается определенная связь с сейсмическими событиями в регионе. Полосе 9 можно поставить в соответствие землетрясение № 18 с $K \leq 13.3$, эпицентр которого располагается всего в 31 км от пункта эманационного мониторинга «Максими́ха» (см. рис. 1). Происхождение полосы 1, по-видимому, также объясняется слабым землетрясением № 20 (20.07.2018; $K=10.1$), эпицентр которого находился в 95 км от станции «Бугульдейка», но принадлежал к зоне Обручевского сброса, как и упомянутый пункт мониторинга. Это увеличивает его «чувствительность»

к изменению напряженно-деформированного состояния пород, на которое реагирует поле подпочвенного радона [Bobrov, 2016]. В границы полосы 3 попадает сейсмическое событие № 1 из группы землетрясений с $K \geq 13.3$, с подготовкой которого, возможно, связано и

соответствие максимумов $Lg\Sigma E$ и R в близлежащей и также узкой полосе 2. Для оставшейся полосы 4 в каталоге БФ ФИЦ ЕГС РАН с $K \geq 8.6$ не установлено землетрясений, эпицентры которых были бы близко расположены к станции «Тырган». Возможно, причиной

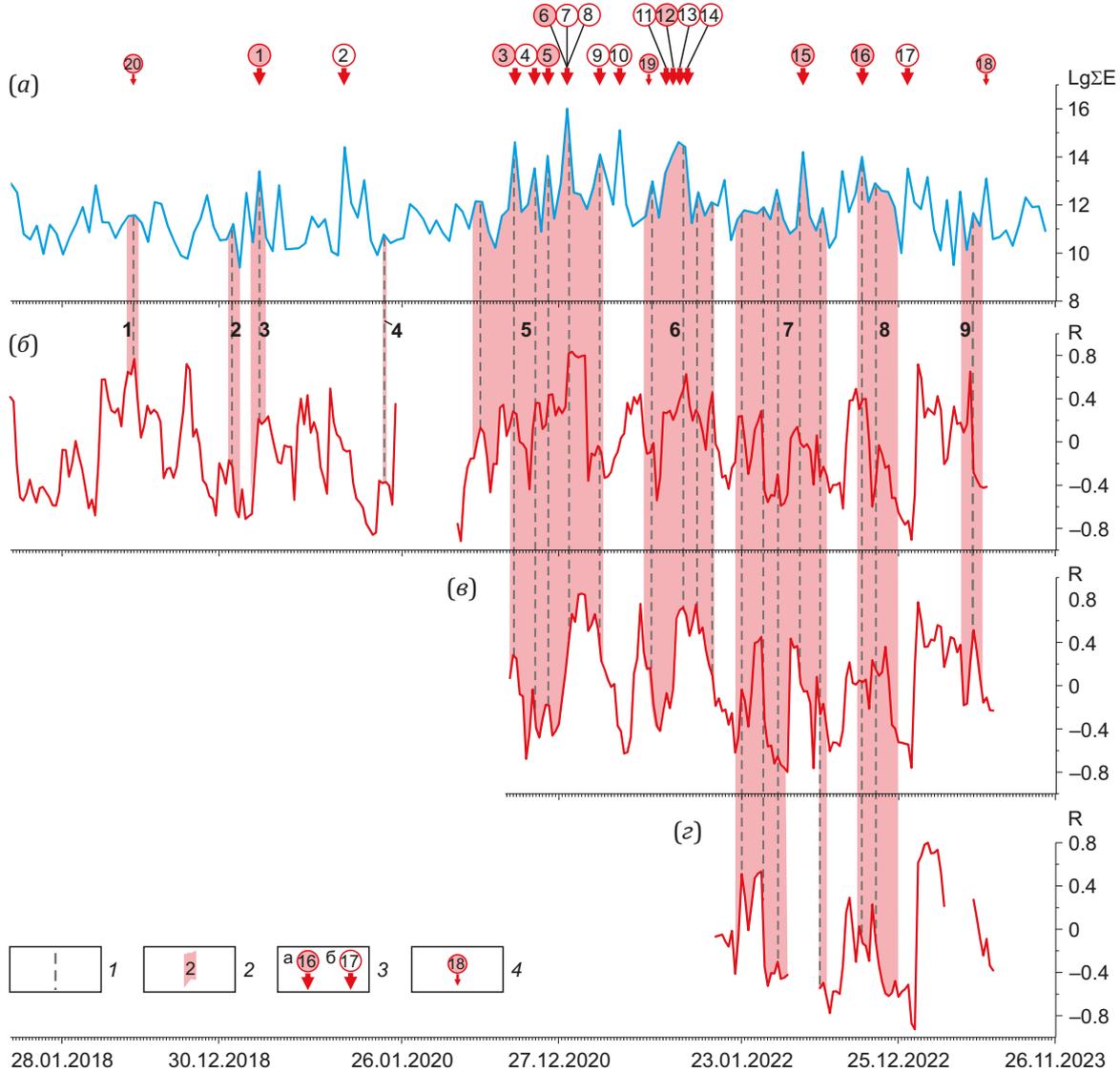


Рис. 3. Степень взаимосвязи объемной активности радона (OAP) и логарифма суммарной энергии землетрясений ($Lg\Sigma E$) в разные периоды сейсмической активности БРЗ для 2018–2023 гг.

(а) – график временных вариаций параметра $Lg\Sigma E$; (б–г) – графики временных вариаций коэффициента корреляции (R), рассчитанного в скользящем окне (2 месяца) для зависимости между параметрами OAP и $Lg\Sigma E$ в пунктах эманационного мониторинга «Тырган» (б), «Бугульдейка» (в) и «Максимиха» (г). 1 – линии, отражающие соответствие в положении максимумов параметров $Lg\Sigma E$ и R ; 2 – интервалы графиков (и их номера), для которых имеет место соответствие максимумов параметров $Lg\Sigma E$ и R ; 3 – моменты землетрясений с $K \geq 13.3$, которым соответствуют (а) или не соответствуют (б) интервалы совпадения максимумов параметров $Lg\Sigma E$ и R ; 4 – моменты землетрясений с $K \leq 13.3$, которым соответствуют интервалы совпадения максимумов параметров $Lg\Sigma E$ и R .

Fig. 3. Correlation degree between the radon volumetric activity (RVA) and the logarithm of total earthquake energy ($Lg\Sigma E$) in different periods of seismic activity of BRZ for 2018–2023.

(а) – graph of temporal variations of the parameter $Lg\Sigma E$; (б–г) – graphs of temporal variations of the correlation coefficient (R) calculated in a sliding window (2 months) for the relationship between the RVA and $Lg\Sigma E$ parameters at the emanation monitoring sites "Tyrgan" (б), "Buguldeika" (в) and "Maksimikha" (г). 1 – lines reflecting correspondence in position of maxima of $Lg\Sigma E$ and R parameters; 2 – intervals of graphs (and their numbers), for which there is a correspondence of maxima of $Lg\Sigma E$ and R parameters; 3 – moments of earthquakes with $K \geq 13.3$, to which correspond (а) or do not correspond (б) intervals of coincidence of maxima of $Lg\Sigma E$ and R parameters; 4 – earthquakes moments with $K \leq 13.3$, to which correspond intervals of coincidence of maxima of $Lg\Sigma E$ and R parameters.

происхождения этой самой узкой из девяти полос является более слабое сейсмическое событие или случайное совпадение небольших максимумов.

Из землетрясений с $K \geq 13.3$ для двух сейсмических событий (№ 2 и 17) не выявлено совпадений максимумов на графиках временных вариаций параметров $Lg\Sigma E$ и R . Они произошли в пределах восточного и западного окончаний Байкальской рифтовой зоны (см. [рис. 1](#)). Эпицентр землетрясения № 2 ($K=14.4$) располагается на расстоянии 793 км от ближайшей станции мониторинга «Максимиха» ([табл. 2](#)). Событие № 17 удалено от крайнего западного пункта «Бугульдейка» на 448 км, но характеризуется существенно меньшим энергетическим классом ($K=13.5$). Таким образом, отсутствие признаков подготовки и реализации этих событий в поле радона центральной части Байкальского рифта, где расположены станции эманационного мониторинга, представляется вполне закономерным.

Итак, результаты изучения вариаций коэффициента корреляции между объемной активностью радона и логарифмом суммарной энергии землетрясений в течение пятилетнего периода времени показали, что их характер отличается вполне определенной связью с двумя порядками неравномерности выделения сейсмической энергии в рассматриваемом регионе. Это в совокупности с закономерностями эманаций радона на отдельных станциях мониторинга, установленными на первом этапе обработки данных, является основанием для итогового анализа по проблеме связи радоновой и сейсмической активности в Байкальской рифтовой зоне.

4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ПОЛЕ ПОДПОЧВЕННОГО РАДОНА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА

Поинтервальное коррелирование в скользящем окне длинных рядов изменений объемной активности радона и логарифма суммарной энергии землетрясений показывает существенную изменчивость характера зависимости между этими параметрами во времени ([рис. 3, б–г](#)). Абсолютные величины данного параметра, как и прямое коррелирование массивов измерений или визуальное сопоставление временных вариаций ОАР и $Lg\Sigma E$, свидетельствуют в целом об отсутствии рассматриваемой связи. При этом имеет место вполне определенное подобие графиков вариаций коэффициента R , построенных для станций эманационного мониторинга «Бугульдейка», «Тырган» и «Максимиха», что отражает однотипное воздействие на поле радона в пределах обширной территории со стороны процессов нетектонической природы (см. [рис. 2](#)). Данное заключение подтверждается тем, что во флуктуациях объемной активности радона на станциях центральной части Байкальского рифта и других регионов присутствуют периоды колебаний ≈ 1 месяц и 1 год, свойственные вариациям атмосферного давления [[Spivak et al., 2009](#); [Adushkin et al., 2017](#)], которые, в свою оче-

редь, формируются под влиянием режима вращения Земли и ее гравитационного взаимодействия с Луной и Солнцем.

В то же время анализ особенностей временных вариаций параметров ОАР и R позволил установить, что они находятся в определенных соотношениях с сейсмической активностью в регионе. Синхронность изменений величины ОАР на разных станциях, определяющихся в целом упомянутыми выше региональными нетектоническими факторами, нарушается в сравнительно короткие периоды подготовки и реализации сильных или слабых землетрясений, центры которых расположены близко к станциям мониторинга (см. [рис. 2](#)). Кроме того, для большинства максимумов $Lg\Sigma E$, представленных подобными сейсмическими событиями, характерно увеличение коэффициента R на всех работавших станциях эманационного мониторинга ([рис. 3](#)). Повышение частоты проявления таких землетрясений отражается в виде интервалов, для которых имеет место модулирование флуктуаций поля радона сейсмической активностью на уровне месячных колебаний. Закономерно то, что подобные интервалы доминируют в пределах периода сейсмической активизации в БРЗ, началом которого стало Быстринское землетрясение (№ 3).

Таким образом, установленные закономерности подтверждают справедливость предложенной ранее для Прибайкалья модели изменения объемной активности радона под воздействием внешних и внутренних факторов [[Seminsky, Bobrov, 2013](#)]. В периоды сейсмических активизаций возрастает роль тектонических сил в формировании напряженно-деформированного состояния породного массива, что влияет на выход радона. Коэффициент корреляции взаимосвязи между количественными характеристиками этих процессов увеличивается, а синхронность вариаций объемной активности радона на разных станциях мониторинга нарушается вследствие различий их пространственных соотношений с эпицентром землетрясения.

Практическая значимость полученных результатов состоит не только в том, что они усиливают обоснованность теоретической модели, которая может использоваться для сеймопрогностических исследований. Особенности отражения сейсмических активизаций в эманационном поле радона установлены для исходных рядов ОАР, которые не подвергались каким-либо корректировкам. Исключение трендов, обусловленных воздействием нетектонических факторов [[Crockett et al., 2010](#); [Kumar et al., 2015](#)], безусловно, представляет перспективное направление прогностических исследований, однако в ходе их реализации существует большая вероятность потери полезных сигналов. В связи с этим в заключительной части раздела необходимо остановиться на характеристике полученных результатов в плане возможности и перспектив их применения к прогнозу сильных землетрясений в Прибайкалье, базирующихся на данных эманационного мониторинга.

В качестве возможного предвестника сильных для региона землетрясений могут рассматриваться интервалы увеличения коэффициента корреляции между параметрами ОАР и $Lg\Sigma E$, которые имеют место на фоне повышения в целом логарифма суммарной энергии землетрясений (рис. 3). В противоположность этим периодам возрастание $Lg\Sigma E$ при снижении коэффициента R приводит к реализации на большой площади множества достаточно слабых землетрясений, которые снимают напряжения, накопившиеся при доминирующем воздействии внешних факторов. В рамках рассмотренного здесь ретроспективного анализа описанный подход позволил выявить разные по продолжительности интервалы сейсмических активизаций, представленных не только одним, но и серией достаточно сильных землетрясений (рис. 3). Это предполагает возникновение трудностей при попытке прогноза отдельного сейсмического события на основе анализа динамики параметров в реальном времени. Оценка в дальнейшем эффективности рассмотренного подхода связана с привлечением к исследованию землетрясений с меньшим энергетическим классом, что позволит за счет сокращения интервала осреднения параметров R и $Lg\Sigma E$ выявить детали их взаимосвязи перед сильными сейсмическими событиями.

Вторым эффектом, связанным со спецификой накопления тектонических напряжений, является нарушение в течение сейсмических активизаций синхронности вариаций ОАР на разных станциях, которая обусловлена суммарным воздействием внешних факторов. Преимущество данного эффекта состоит в простоте регистрации при условии использования аналогичной схемы измерений объемной активности радона на всех станциях мониторинговой сети. При недельном окне подсчета параметра ОАР интервалы нарушения синхронности его вариаций непродолжительны (см. рис. 2), что придает большую определенность их соотношению с моментами сейсмических событий. В то же время в двух из семи зарегистрированных случаев они имеют место после момента землетрясения, т.е. не являются предвестниковыми. Установление характера асинхронности, сопровождающей разные сейсмические активизации, является темой отдельного целенаправленного исследования, в котором обработка данных мониторинга должна осуществляться с разными интервалами осреднения параметра ОАР и учетом различных пространственных соотношений положений эпицентра и регистрирующих станций.

Кроме того, что рассмотренные выше результаты исследования имеют выход на прогноз времени землетрясения, они несут полезную информацию о возможностях мониторинга в плане оценки места сейсмического события, необходимости и направлении развития регистрирующей сети. Основанием для этого является анализ взаимного положения станций мониторинга и эпицентров сейсмических событий, вызвавших отклик в эманационном поле по данным двух подходов к выделению аномалий. Это, прежде всего, землетря-

сения № 5, 6, 12, 15, 16, 18 и 19, с которыми ассоциируются кратковременные нарушения в синхронности вариаций ОАР на разных станциях мониторинга (см. рис. 2), а также сейсмические события № 1 и 20, выраженные узкими интервалами увеличения коэффициента корреляции связи между параметрами ОАР и $Lg\Sigma E$, которые имеют место на фоне повышения в целом логарифма суммарной энергии землетрясений (рис. 3). В эту же группу включено Быстринское землетрясение (№ 3), которому предшествовал интервал нарушения связи ОАР и атмосферного давления в пункте мониторинга «Тырган» [Seminsky, Bobrov, 2023]. Можно предполагать, что соответствующую аномалию, связанную с различием вариаций ОАР на разных станциях, не удалось обнаружить из-за отсутствия необходимых для сравнения рядов измерений на станциях «Бугульдейка» или «Максимиha».

Граница области распространения этих сейсмических событий имеет эллиптическую форму (см. рис. 1), поскольку круг с центром на середине расстояния между станциями «Максимиha» и «Бугульдейка» и радиусом, определяющимся положением наиболее отдаленного землетрясения № 12, охватывает эпицентр землетрясения № 4, не проявившегося в поле эманаций радона. Развитие сети мониторинга и анализ ее возможностей в плане регистрации вариаций поля радона в ответ на происходящие землетрясения позволят уточнить сделанные построения. Однако эллиптическая форма с длинной осью, вытянутой вдоль главных структур БРЗ, представляется закономерной, поскольку чувствительность станций мониторинга увеличивается вдоль разломных зон и уменьшается в поперечном направлении [Bobrov, 2016].

Внутри эллипса имеет место меньший по размерам участок, в пределах которого локализуются эпицентры землетрясений № 18–20 меньшего энергетического класса ($K \leq 11.6$) (см. рис. 1; табл. 1), зафиксированных в поле радона на станциях мониторинга вследствие сравнительно небольшого эпицентрального расстояния ($r < 235$ км). Следовательно, существует принципиальная возможность в дальнейшем при наличии достаточно протяженных рядов наблюдений установить для каждой станции мониторинга зональное строение области локализации эпицентров землетрясений, которые производят на участке ее расположения эманационный отклик. Подобная информация при условии расширения сети станций мониторинга подпочвенного радона может быть реальной основой для разработки методики прогноза места подготовки сильного сейсмического события в Прибайкалье.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа длинных рядов еженедельных оценок концентрации радона в подпочвенном воздухе трех станций эманационного мониторинга в Прибайкалье («Бугульдейка», «Тырган» и «Максимиha») установлен характер связи радоновой и сейсмической активности в Байкальской рифтовой зоне.

1. Показано, что режим выхода радона из недр, определяющийся главным образом факторами нетектонической природы, приобретает в периоды сейсмических активизаций отличительные особенности, которые устанавливаются посредством детального анализа вариаций ОАР и результатов коррелирования ОАР с величиной логарифма суммарной энергии землетрясений ($Lg\Sigma E$), произошедших в районе исследований вследствие формирования БРЗ.

2. Установлено, что, во-первых, в периоды сейсмических активизаций максимальным значениям логарифма суммарной энергии землетрясений соответствуют локальные максимумы коэффициента корреляции связи между параметрами ОАР и $Lg\Sigma E$, которые фиксируются на всех работающих станциях мониторинга. Во-вторых, в периоды сейсмических активизаций, характеризующихся реализацией наиболее сильных для изучаемого периода (2018–2023 гг.) землетрясений с $K \geq 13.3$, нарушается заложенная воздействием нетектонических факторов синхронность в вариациях ОАР на разных пунктах мониторинга.

Установленные закономерности отражают повышение в рассматриваемые периоды времени вклада тектонических сил в формирование напряженно-деформированного состояния пород, с которым связана интенсивность миграции радиоактивного газа в подпочвенном воздухе. Использование выявленных признаков сейсмических активизаций в качестве основы прогностических исследований по параметрам «время» и «сила» связано с оценкой их предвестниковой роли, которая возможна при детализации показателей эманационного отклика за счет сокращения периодов осреднения ключевых параметров и удлинения рядов регулярных измерений.

3. Оконтурена область распространения сейсмических событий с $K \geq 13.3$, оказавших влияние на поле подпочвенного радона в пределах станций мониторинга «Бугульдейка», «Тырган» и «Максимиha», которые локализованы в центральной части Байкальской рифтовой зоны. Эта область имеет форму эллипса, вытянутого вдоль простирания БРЗ, и характеризуется наличием зависимости эманационного отклика от эпицентрального расстояния и силы землетрясения.

Установление зональности строения выделенной области, отражающей «чувствительность» станций мониторинга по отношению к землетрясениям разного энергетического класса, открывает перспективы прогностических исследований по параметрам «место» и «сила». Однако корректное решение этой задачи связано не только с углубленным анализом длинных рядов наблюдений, но и с расширением сети эманационного мониторинга в Прибайкалье.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны кандидату геол.-мин. наук Ц.А. Тубанову (Геологический институт СО РАН) и кандидату физ.-мат. наук Е.О. Макарову (Камчатский филиал ФГБУН ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН») за

рецензирование и рекомендации, сделанные при подготовке статьи к печати.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Both authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

Both authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Adushkin V.V., Spivak A.A., Rybnov Yu.S., Kharlamov V.A., 2017. Tidal Waves and Pressure Variations in the Earth's Atmosphere. *Geophysical Research* 18 (3), 67–80 (in Russian) [Адушкин В.В., Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А. Приливные волны и вариации давления в атмосфере Земли // Геофизические исследования. 2017. Т. 18. № 3. С. 67–80]. <https://doi.org/10.21455/gr2017.3-6>.

Bobrov A.A., 2016. To Seismic Activity and Radon Field in Priolkhonie (Western Baikal Region). *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits* 3 (56), 76–85 (in Russian) [Бобров А.А. К вопросу о сейсмической активности и поле радона в Приольхонье (Западное Прибайкалье) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 3 (56). С. 76–85]. DOI:10.21285/0130-108X-2016-56-3-76-85.

Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J., 2009. A Systematic Compilation of Earthquake Precursors. *Tectonophysics* 476 (3–4) 371–396. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.06.008>.

Crockett R.G.M., Perrier F., Richon P., 2010. Spectral-Decomposition Techniques for the Identification of Periodic and Anomalous Phenomena in Radon Time-Series. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10 (3), 559–564. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-559-2010>.

Earthquakes in Russia in 2020, 2022. GS RAS, Obninsk, 204 p. (in Russian) [Землетрясения России в 2020 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. 204 с.].

Earthquakes in Russia in 2021, 2023. GS RAS, Obninsk, 224 p. (in Russian) [Землетрясения России в 2021 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. 224 с.].

Firstov P.P., Makarov E.O., 2018. Dynamics of Subsurface Radon in Kamchatka and Strong Earthquakes. *KamSU, Petropavlovsk-Kamchatsky*, 148 p. (in Russian) [Фирстов П.П., Макаров Е.О. Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2018. 148 с.].

Ghosh D., Deb A., Sengupta R., 2009. Anomalous Radon Emission as Precursor of Earthquake. *Journal of Applied Geophysics* 69 (2), 67–81. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.06.001>.

Hartmann J., Levy J.K., 2005. Hydrogeological and Gas-geochemical Earthquake Precursors – A Review for Application. *Natural Hazards* 34, 279–304. <https://doi.org/10.1007/s11069-004-2072-2>.

Jordan T.H., Gasparini P., Main I., Marzocchi W., Papadopoulos G., Sobolev G., Yamaoka K., Zschau J., 2011. Operational Earthquake Forecasting. State of Knowledge and Guidelines for Utilization. *Annals of Geophysics* 54 (4), 315–391. <https://doi.org/10.4401/ag-5350>.

King C.-Y., Zhang W., Zhang Z., 2006. Earthquake-Induced Groundwater and Gas Changes. *Pure and Applied Geophysics* 163, 633–645. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0049-7>.

Kumar A., Walia V., Arora B.R., Yang T.F., Lin S.J., Fu C.C., Chen C.H., 2015. Identifications and Removal of Diurnal and Semidiurnal Variations in Radon Time Series Data of Hsinhua Monitoring Station in SW Taiwan Using Singular Spectrum Analysis. *Natural Hazards* 79, 317–330. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1844-1>.

Logachev N.A., 2003. History and Geodynamics of the Baikal Rift. *Russian Geology and Geophysics* 4 (5), 391–406 (in Russian) [Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 5. С. 391–406].

Logachev N.A., Florensov N.A., 1977. The Baikal System of Rift Valleys. In: *A Role of Rifting in the Geological History of the Earth*. Nauka, Novosibirsk, p. 19–29 (in Russian) [Логачев Н.А., Флоренсов Н.А. Байкальская система рифтовых долин // Роль рифтогенеза в геологической истории Земли. Новосибирск: Наука, 1977. С. 19–29].

Mats V.D., Ufimtsev G.F., Mandelbaum M.M., Alakshin A.M., Pospeev A.V., Shimaraev M.N., Khlystov O.M., 2001. The Cenozoic Baikal Rift Basin: Its Structure and Geological History. *GEO, Novosibirsk*, 252 p. (in Russian) [Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакшин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлыстов О.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск: Гео, 2001. 252 с.].

Petit C., Deverchere J., 2006. Structure and Evolution of the Baikal Rift: A Synthesis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 7 (11), Q11016. <https://doi.org/10.1029/2006GC001265>.

Riggio A., Santulin M., 2015. Earthquake Forecasting: A Review of Radon as Seismic Precursor. *Bulletin of Geophysics and Oceanography* 56 (2), 95–114. <https://doi.org/10.4430/bgta0148>.

Ruzhich V.V., 1997. Seismotectonic Destruction in the Crust of the Baikal Rift Zone. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 144 p. (in Russian) [Ружич В.В. Сейсмотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 144 с.].

Seminsky A.K., 2022. Variations in Radon Concentrations in the Underground Waters during the Generation

and Occurrence of Seismic Events in the Baikal Region. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0631 (in Russian) [Семинский А.К. Вариации радона в подземных водах при подготовке и реализации сейсмических событий Байкальского региона // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. 0631]. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0631>.

Seminsky K.Zh., Bobrov A.A., 2009. Radon Activity of Faults (Western Baikal and Southern Angara Areas). *Russian Geology and Geophysics* 50 (8), 674–684. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.12.010>.

Seminsky K.Zh., Bobrov A.A., 2013. The First Results of Studies of Temporary Variations in Soilradon Activity of Faults in Western Pribaikalie. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (1), 1–12 (in Russian) [Семинский К.Ж., Бобров А.А. Первые результаты исследований временных вариаций эманационной активности разломов Западного Прибайкалья // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 1. С. 1–12]. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-1-0088>.

Seminsky K.Zh., Bobrov A.A., 2023. Irregularities in the Relationship of Variations in the Radon Volume Activity and Atmospheric Pressure during Seismic Activation (by the Example of the Baikal Region). *Doklady Earth Sciences* 510, 312–316. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23600160>.

Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Radziminovich N.A., Rasskazov S.V., Sankov V.A., Mialle P., Bobrov A.A. et al., 2021. The Bystrinskoe Earthquake in the Southern Baikal Region (21 September, 2020, Mw=5.4): Main Parameters, Precursors, and Accompanying Effects. *Russian Geology and Geophysics* 62 (5), 589–603. <https://doi.org/10.2113/RGG20204296>.

Seminsky K.Zh., Dobrynina A.A., Bornyakov S.A., Sankov V.A., Pospeev A.V., Rasskazov S.V., Perevalova N.P., Seminskiy I.K. et al., 2022. Integrated Monitoring of Hazardous Geological Processes in Pribaikalye: Pilot Network and First Results. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (5), 0677 (in Russian) [Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Перевалова Н.П., Семинский И.К. и др. Комплексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 5. 0677]. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0677>.

Sherman S.I., 1977. Physical Regularities of Crustal Faulting. Nauka, Novosibirsk, 102 p. (in Russian) [Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977. 102 с.].

Sidorenkov N.S., 2015. Celestial-Mechanical Factors of the Weather and Climate Change. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics* 14 (3), 5–25 (in Russian) [Сидоренков Н.С. Небесно-механические причины изменения погоды и климата // Геофизические процессы и биосфера. 2015. Т. 14. № 3. С. 5–26].

Spivak A.A., Kozhukhov S.A., Sukhorukov M.V., Kharlamov V.A., 2009. Radon Emanation as an Indicator of the Intensity of Intergeospheric Interactions at the Earth's

Crust-Atmosphere Interface. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 45, 118–133. <https://doi.org/10.1134/S1069351309020037>.

Thomas D.M., 1988. Geochemical Precursors to Seismic Activity. *Pure and Applied Geophysics* 126, 241–266. <https://doi.org/10.1007/BF00878998>.

Toutain J.-P., Baubron J.-C., 1999. Gas Geochemistry and Seismotectonics: A Review. *Tectonophysics* 304 (1–2), 1–27. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00295-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00295-9).

Tubanov Ts.A., Predein P.A., Tsydyпова L.R., Sanzhieva D.P.-D., Radziminovich N.A., Bazarov A.D., 2021. Results and Prospects of Seismological Observations in the Central Part of the Baikal Rift. *Russian Journal of Seismology* 3 (4), 38–57 (in Russian) [Тубанов Ц.А., Предеин П.А., Цыдыпова Л.Р., Санжиева Д.П.-Д., Радзиминович Н.А., Базаров А.Д. Результаты и перспективы сейсмологических

наблюдений в центральной части Байкальского рифта // *Российский сейсмологический журнал*. 2021. Т. 3. № 4. С. 38–57]. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.4.03>.

Utkin V.I., Mamyrov E., Kan M.V., Krivasheev S.V., Yurkov A.K., Kosyakin I.I., Shishkanov A.N., 2006. Radon Monitoring in the Northern Tien Shan with Application to the Process of Tectonic Earthquake Nucleation. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 42, 775–784. <https://doi.org/10.1134/S1069351306090072>.

Utkin V.I., Yurkov A.K., 2010. Radon as a Tracer of Tectonic Movements. *Russian Geology and Geophysics* 51 (2), 220–227. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.12.022>.

Woith H., 2015. Radon Earthquake Precursor: A Short Review. *The European Physical Journal Special Topics* 224, 611–627. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2015-02395-9>.