

УДК (550.8:551.2.08)::546.296

DOI: 10.46698/VNC.2025.53.30.003

Оригинальная статья

Особенности проведения радонового мониторинга в режиме принудительной доставки почвенного воздуха к детектору в регионах с различными геодинамическими условиями

А.К. Юрков¹, В.Б. Заалишвили², И.А. Козлова¹, С.В. Бирюлин¹,
Д.А. Мельков², Ю.В. Бутанаев³, К.М. Рычкова³, С.А. Имашев⁴,
Е.А. Лазарева⁴, П.А. Каменев⁵

¹ Институт геофизики УрО РАН, Россия, 620016, г. Екатеринбург,
ул. Амундсена, 100, e-mail: akurkov@mail.ru;

² Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002,
г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: vzaal@mail.ru;

³ Тувинский Институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Россия,
667007, г. Кызыл, ул. Интернациональная, 117а, e-mail: jyra3@mail.ru;

⁴ Научная станция РАН в г. Бишкеке, Кыргызстан, 720049, г. Бишкек-49,
e-mail: sanzhar.imashev@gmail.com;

⁵ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Россия, 693022,
г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1, e-mail: p.kamenev@imgg.ru

Статья поступила: 27.01.2025, доработана: 12.03.2025, принята к публикации: 14.03.2025

Резюме: Актуальность работы. Установление связи геодинамических процессов с данными геолого-геофизического мониторинга остается актуальной задачей. К наиболее известным и хорошо исследованным относятся явления, связанные с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород, которое влияет на состояние подземной гидросферы и атмосферы. Несмотря на большой объем радоновых исследований, до сих пор не выявлены надежные закономерности поведения объемной активности радона, связанные с процессом подготовки сейсмического события. **Цель исследования.** Целью работы является изучение особенностей изменения радонового поля (вариаций объемной активности почвенного радона) при подготовке тектонического землетрясения в сейсмически активных регионах с отличающейся геолого-тектонической обстановкой. **Методы работы.** Мониторинг радона проводился в режиме принудительной доставки почвенного радона к детектору. Интерпретация проводилась по методике, разработанной по результатам, полученным для условий зоны субдукции. **Результаты работ.** Выполнен анализ вариаций объемной активности радона (ОАР) при подготовке землетрясений, полученных при мониторинговых наблюдениях в регионах России отличающихся различной геодинамической активностью. Подтверждена причинно-следственная связь вариаций ОАР с процессом подготовки землетрясений. Установлено, что получаемые закономерности проявления в кривых объемной активности радона процесса подготовки землетрясений не противоречат ранее полученным. Изучены и обобщены ошибки при организации наблюдений с использованием режима принудительной доставки радона к детектору. Показано, что для получения достоверных результатов, позволяющих сравнивать получаемые закономерности поведения ОАР, необходимо учитывать геологические условия установки станций и соблюдать методику измерений в режиме принудительной доставки почвенного радона к детектору.

Ключевые слова: землетрясение, радон, вариации, мониторинг, принудительная доставка, прогноз.

Для цитирования: Юрков А.К., Заалишвили В.Б., Козлова И.А., Бирюлин С.В., Мельков Д.А., Бутанаев Ю.В., Рычкова К.М., Имашев С.А., Лазарева Е.А., Каменев П.А. Особенности проведения радонового мониторинга в режиме принудительной доставки почвенного воздуха к детектору в регионах с различными геодинамическими условиями. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 32-44. DOI: 10.46698/VNC.2025.53.30.003

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

DOI: 10.46698/VNC.2025.53.30.003

Original paper

Features of radon monitoring in the mode of forced delivery of soil air to the detector in the regions with different geodynamic conditions

A.K. Yurkov¹, V.B. Zaalishvili², I.A. Kozlova¹, S.V. Biryulin¹,
D.A. Melkov², Yu.V. Butanaev³, K.M. Rychkova³, S.A. Imashev⁴,
E.A. Lazareva⁴, P.A. Kamenev⁵

¹ Institute of Geophysics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
100 Amundsena Str., Ekaterinburg 620016, Russian Federation,
e-mail: akyurkov@mail.ru;

² Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: vzaal@mail.ru;

³ Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources, Siberian Branch,
Russian Academy of Science, 117a Internationalnaya Str., Kyzyl 667007,
Russian Federation, e-mail: jyra3@mail.ru;

⁴ Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek,
Bishkek-49 720049, Kyrgyzstan, e-mail: sanzhar.imashev@gmail.com;

⁵ Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch,
Russian Academy of Science, 1 Nauki Str., Yuzno-Sakhalinsk 693022,
Russian Federation, e-mail: p.kamenev@imgg.ru

Received: 27.01.2025, revised: 12.03.2025, accepted: 14.03.2025

Abstract: Relevance. Establishing the connection between geodynamic processes and geological and geophysical monitoring data remains an urgent task. The most well-known and well studied are the phenomena associated with changes in the stress-strain state of rocks, which affects the state of the underground hydrosphere and atmosphere. Despite the large volume of radon studies, no reliable regularities of behavior of radon volumetric activity related to the process of seismic event preparation have been revealed so far. Purpose of the study. **The aim** of the work is to study the peculiarities of the radon field changes (variations of soil radon volumetric activity) during the preparation of a tectonic earthquake in seismically active regions with different geological and tectonic conditions. **Methods.** Radon monitoring was carried out in the mode of forced delivery of soil radon to the detector. The interpretation was carried out according to the methodology developed based on the results obtained for the conditions of the subduction zone. **Results.** The analysis of variations in the volumetric radon activity (VRA) in the preparation of earthquakes obtained during monitoring observations in regions of Russia with different geodynamic activity has been performed. The cause-and-effect relationship of the variations of the VRA with the earthquake preparation process has been confirmed. It is established that the obtained patterns of manifestation in the curves of the volumetric radon activity of the earthquake preparation process do not contradict the previously obtained ones. Errors in the organization of observations using the mode of forced delivery

of radon to the detector have been studied and generalized. It is shown that in order to obtain reliable results that make it possible to compare the obtained patterns of VRA behavior, it is necessary to take into account the geological conditions of station installation and follow the measurement procedure in the mode of forced delivery of soil radon to the detector.

Keywords: earthquake, radon, variations, monitoring, forced delivery, forecast.

For citation: Yurkov A.K., Zaalishvili V.B., Kozlova I.A., Biryulin S.V., Melkov D.A., Butanaev Yu.V., Rychkova K.M., Imashev S.A., Lazareva E.A., Kamenev P.A. Features of radon monitoring in the mode of forced delivery of soil air to the detector in the regions with different geodynamic conditions. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 32-44. DOI: 10.46698/VNC.2025.53.30.003

Введение

Практически каждый день по всему земному шару происходят землетрясения, которые остаются одними из самых опасных и до конца не изученных природных явлений. В настоящее время более 30 % территории России относится к сейсмоопасным зонам. В этих районах расположены крупные мегаполисы, объекты атомной промышленности и энергетики, поэтому уменьшение опасности для жизни людей и снижение экономических потерь от катастрофических явлений остается актуальной задачей. Очевидно, что определение точного времени, места и магнитуды события задача чрезвычайно сложная, но даже определение составляющих прогноза землетрясения может уменьшить человеческие потери и экономический ущерб от воздействия природных катастроф. Несмотря на достаточно многочисленные исследования, связанные с изучением предвестников землетрясений – прогноз остается нерешенной задачей. Тем не менее, развитие сейсмологических наблюдений, проведение лабораторных экспериментов и теоретических исследований, накопление большого статистического материала при натурных исследованиях позволяет полнее понять процесс подготовки землетрясения и на этой основе разрабатывать новые методы его прогноза.

Предвестниками обычно выступают особенности поведения различных физических полей, не всегда одинаково реагирующих на процесс подготовки землетрясения. Поэтому для успешного прогноза необходимо использовать несколько предвестников, подтвердивших свою эффективность на большом статистическом материале [Завьялов, 2006]. Радон, как индикатор изменений напряженного состояния горных пород, приводящих к тектоническим землетрясениям, широко применяется во всем мире [Уткин, Юрков, 1998; Фирстов, Макаров, 2018; Hatuda, 1953; Kasahara, 1979; King et al., 1996; Teng, 1980]. Возникновение аномальных временных изменений концентраций радона изучалось рядом авторов, специализирующихся на измерениях Rn в почвенном газе [Kuo et al., 2010; Mogro-Campero et al., 1980; Planinic et al., 2001; Ramola et al., 1990; Reddy, Nagabhushanam, 2011], в грунтовых водах [Favara et al., 2001; Gregoric et al., 2008; Singh et al., 1999], в приземной атмосфере [Oh, Kim, 2015; Omori et al., 2007].

Получение статистически значимого материала, в первую очередь, связано с количеством происходящих землетрясений. Причем одинаково плохо как малое их количество, так и большое. В последнем случае трудно выделить закономерности подготовки конкретного события. Уникальным объектом для исследований стали Южные Курилы, где частота происходящих землетрясений позволяла проследить подготовку отдельных событий. При поддержке сотрудников Института морской геологии и геофизики ДВО РАН удалось организовать мониторинговые наблюдения объемной активности радона на нескольких Южно-Курильских островах.

В период с 2011 по 2023 гг. сотрудниками Института геофизики УрО РАН получены результаты непрерывного радонового мониторинга на островах Кунашир, Итуруп, Шикотан. На основании этих наблюдений была разработана методика интерпретации и установлены статистически обоснованные закономерности поведения ОАР при подготовке землетрясений применительно к зоне субдукции [Бирюлин, 2022]. Для решения вопроса о применимости полученных закономерностей для других регионов, в последние годы была расширена сеть радонового мониторинга с охватом Урала, Северного Кавказа, Сахалина, Саян, Северного Тянь-Шаня, Крыма. Понятно, что для получения конкретных количественных значений для каждого региона необходимо проведение длительного мониторинга ОАР при достаточном количестве происходящих землетрясений. Кроме этого, условием объективного сравнения получаемых закономерностей поведения ОАР при подготовке землетрясений в регионах, различающихся геодинамической активностью, является соблюдение методики проведения измерений в режиме принудительной доставки радона к детектору и оптимальный выбор геолого-тектонических условий для размещения станций наблюдения. Выбор информативных точек наблюдения очень важен, так как вариации ОАР определяются способностью среды к деформациям в точке наблюдения. В данной статье проведем анализ соответствия характеристик работающих станций радонового мониторинга этим требованиям и покажем особенности отражения подготовки землетрясений в поле радона.

Объекты и методика исследований

Объектом исследований являются вариации объемной активности почвенного радона, полученные в результате проведения радонового мониторинга в различных регионах с отличающейся геодинамической активностью. Методика исследований заключается в проведении анализа отражения сейсмических событий в аномалиях радона, полученных при непрерывных измерениях, выполненных в режиме принудительной доставки почвенного (породного) радона к детектору. Режим принудительной доставки радона из почвы осуществляется с помощью насоса из зонда, установленного на глубину не менее 0.7 м. Данная глубина является наименее градиентной, учитывая вертикальное распределение радона, и на ней существенно снижено влияние на вариации ОАР суточных перепадов температуры и атмосферного давления [Козлова, Юрков, 2005]. Тонкий зонд, перфорированный на конце, не искажает трещинно-поровое пространство и практически не влияет на напряженно-деформированное состояние среды. Применение способа вынужденной доставки радона к детектору существенно увеличивает эффективный объем горных пород, что приводит к «осреднению» их петрофизических характеристик. Как показали исследования по сравнению диффузионного режима измерений и режима вынужденной доставки, регистрируемые аномалии ОАР в последнем случае имеют более высокую амплитуду, небольшую продолжительность (несколько суток), что является важным при краткосрочном прогнозе землетрясений. Для мониторинговых измерений используется недорогая и серийно-выпускаемая аппаратура: регистраторы радона – SIRAD, Radex-107, Radex-107+, насос Sonic-108.

При интерпретации полученных результатов анализировались сейсмические события, происходящие в области установки станции наблюдения. Оценка радиуса проявления радонового предвестника землетрясения основана на соотношении магнитуды к логарифму расстояния от эпицентра события до станции наблюдения

(геодинамический критерий). По разработанной методике отражение в поле радона подготовки землетрясения возможно и при соотношении $M/\lg R \geq 2$ [Бирюлин, 2022]. Данная методика позволяет оценить временной интервал проявления землетрясения в поле радона и отнести событие к «дальней» или «ближней» зоне.

Результаты исследований и их обсуждение

Станция Южно-Курильск (о. Кунашир)

Расположена в зоне субдукции, зонд установлен в подвале сейсмостанции п. г. т. Южно-Курильск на глубине 0.7 м в коре выветривания пород андезито-базальтового состава, слагающих монолитный лавовый поток. Условия проведения измерений на этой станции полностью соответствуют режиму принудительной доставки радона к детектору. Выделяемые аномалии объемной активности радона (ОАР) контрастные, с хорошим превышением над фоном. При интерпретации результатов учитывались события с магнитудой более 4 и радиусом не более 500 км, для выполнения геодинамического критерия $M/\lg R \geq 2$ [Бирюлин, 2022]. За период с 2011 по 2023 гг. было проанализировано 289 событий, удовлетворяющих геодинамическому критерию, и установлено, что 267 предшествовали аномалии ОАР (что составляет 96%). На рисунке 1 представлен пример отражения землетрясений «ближней» (меньше 130 км) зоны.

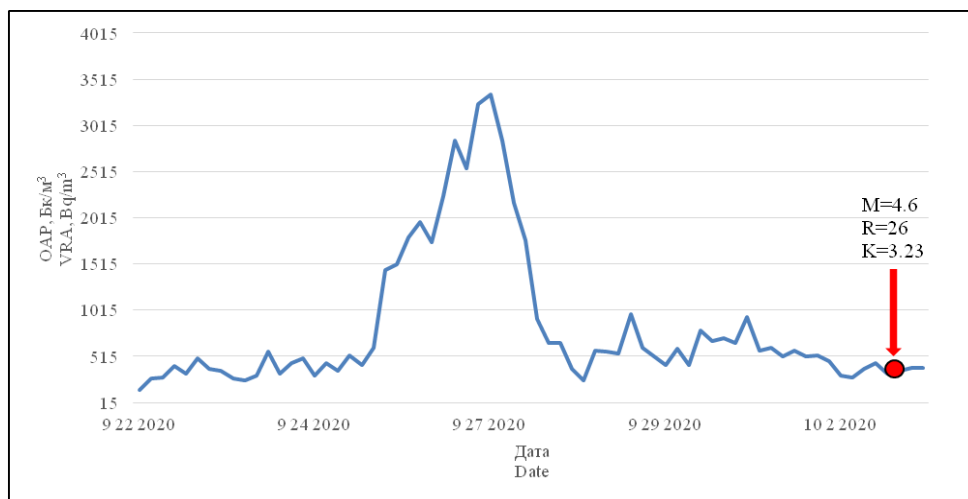


Рис. 1. Фрагмент записи ОАР на Станции Южно-Курильск /
Fig. 1. A fragment of the recording of the VRA at the Yuzhno-Kurilsk Station

Станция Коуровка (Средний Урал)

Средний Урал не относится к сейсмоактивным районам. Редкие ощутимые землетрясения произошли в 1914 г. – Билимбаевское, с магнитудой около 5.5, в 2015 г. – Среднеуральское с магнитудой 4.7, в 2018 г. – Катав-Ивановское с магнитудой 5.6.

Станция наблюдений «Коуровка» расположена на массиве монолитных известняков девонского возраста. Зонд установлен на глубине 0.7 м в подвальном помещении наблюдательного павильона. Наблюдения проводятся в режиме принудительной доставки радона к детектору. Так как события происходят редко, то их достаточно легко выделять и соотносить с аномалиями ОАР. Пример поведения ОАР перед землетрясениями приведен на рисунке 2. После прохождения аномалии через 5–6 дней произошли землетрясения, которые являются «дальними» (расстояние от

пункта наблюдений более 300 км), что соответствует ранее выявленным закономерностям. Особенностью проявления землетрясений в кривых ОАР стал геодинамический критерий $M/\lg R \geq 1.6$, т.е. меньше 2.0. Это может свидетельствовать о том, что для условий Среднего Урала геодинамический критерий, при котором землетрясения отражаются в кривых ОАР, может быть меньше.

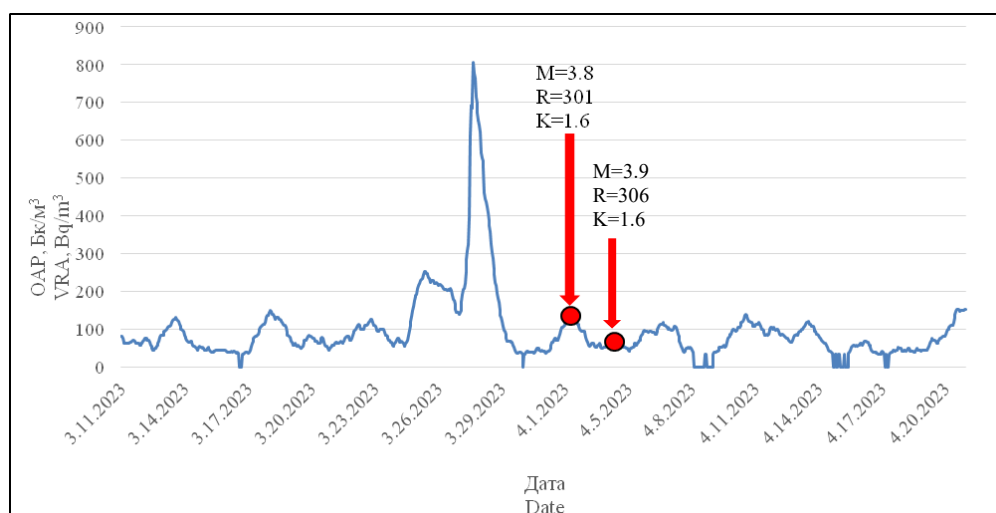


Рис. 2. Фрагмент записи ОАР на станции Коуровка [Юрков и др., 2023в] /
Fig. 2. Fragment of the recording of the VRA at the Kourovka station [Yurkov et al., 2023c]

Еще одна уральская станция наблюдений была установлена в г. Катав-Ивановск после землетрясения в 2018 г. Станция «Катав-Ивановск» расположена на вершине антиклинальной складки в коре выветривания известняков. Режим измерений соответствует принудительной доставке радона, но зонд расположен в подвале административного здания в центре города. Большое количество техногенных помех вносит отрицательный вклад в измерения почвенного радона. С октября 2018 г. по настоящее время в радиусе 200 км не произошло землетрясений с магнитудой больше 2, удовлетворяющих геодинамическому критерию больше 1,6. На рисунке 3 приведен пример записи ОАР, аномалии 16.02.24 г., 18.02.24 г. вызваны техническими помехами. Станция оказалась малоинформативна, в связи с отсутствием происходящих землетрясений.

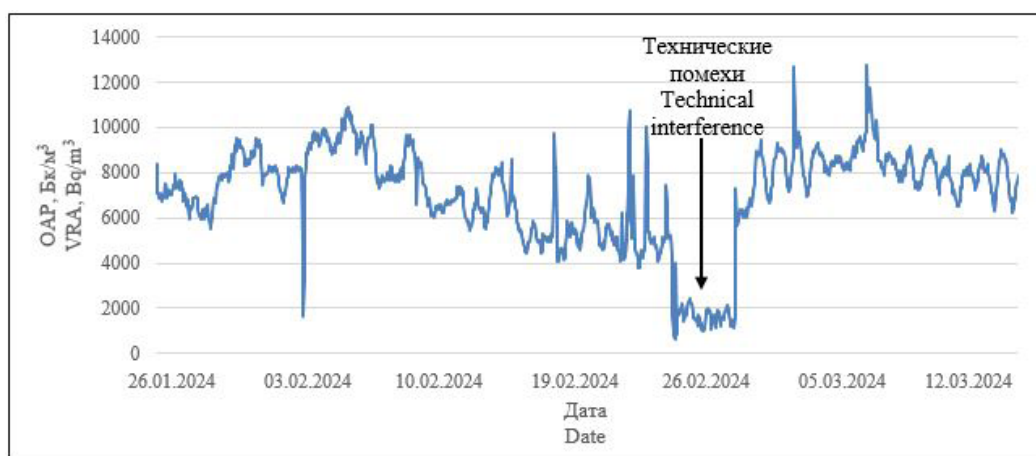


Рис. 3. Фрагмент записи ОАР на станции Катав-Ивановск /
Fig. 3. A fragment of the recording of the VRA at the Katav-Ivanovsk station

Станция «Кармадон» (Северный Кавказ)

Станция расположена в районе развития вулканогенных отложений на склоне вулкана Казбек. Зонд помещен в кору выветривания в павильоне сейсмостанции на глубину 0.7 м. Условия измерений на станции соответствуют методике измерений в режиме принудительной доставки радона к детектору. Пример отражения землетрясения в поле радона приведен на рисунке 4. Аномалия объемной активности радона (ОАР) достаточно контрастная, с хорошим превышением над фоном, что позволяет легко ее выделить. Землетрясение произошло через 10 дней после появления аномалии и выхода ее на фоновый уровень (26.10.18), что соответствует проявлению «близкого» события. К сожалению, на этой станции за период наблюдений дальние события не проявились в вариациях ОАР. Возможная причина – экранирующее влияние системы хребтов Кавказского орогена и геодинамический критерий событий был меньше 2.0.

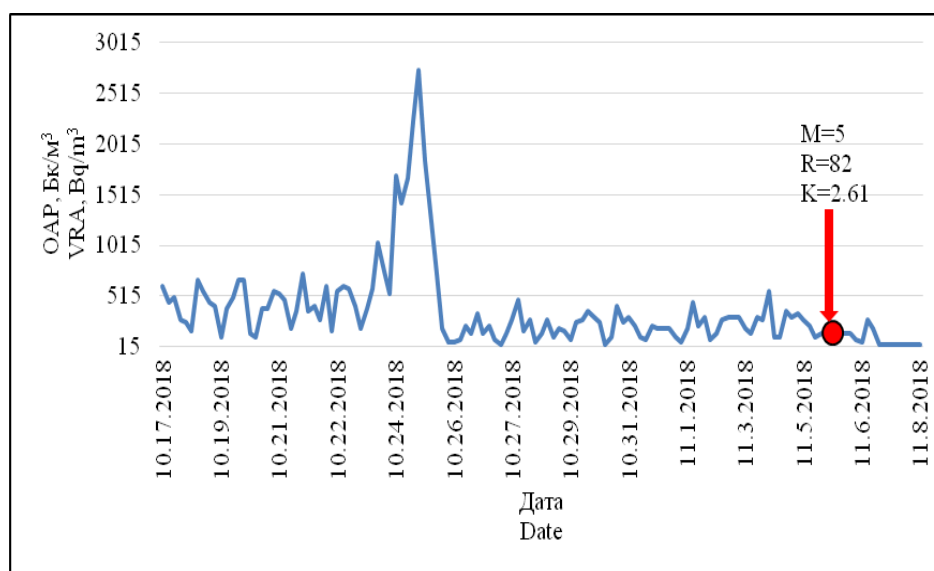


Рис. 4. Фрагмент записи ОАР на станции Кармадон, Северный Кавказ
[Заалишвили и др., 2022]/

Fig. 4. Fragment of the recording of the VRA at Karmadon station, North Caucasus
[Zaalishvili et al., 2022]

Станция Владикавказ (г. Владикавказ)

Расположена в цокольном этаже Геофизического Института ВНЦ РАН. Зонд установлен в валунно-галечных отложениях. Режим измерений – принудительная доставка радона. На данной станции, кроме неудачного расположения в валунно-галечных отложениях, присутствует отрицательное воздействие техногенных помех, влияющих на измеряемую величину ОАР (рис. 5). Проявление процесса подготовки землетрясений в кривой ОАР проявляется нечетко. За период с 20.07.2021 г. по 04.09.2021 г. произошло 3 землетрясения. Исходя из геодинамического критерия, они относятся к «дальней» зоне, но при анализе соотнести их с радоновыми аномалиями сложно как по амплитуде, так и по положению на кривой ОАР.

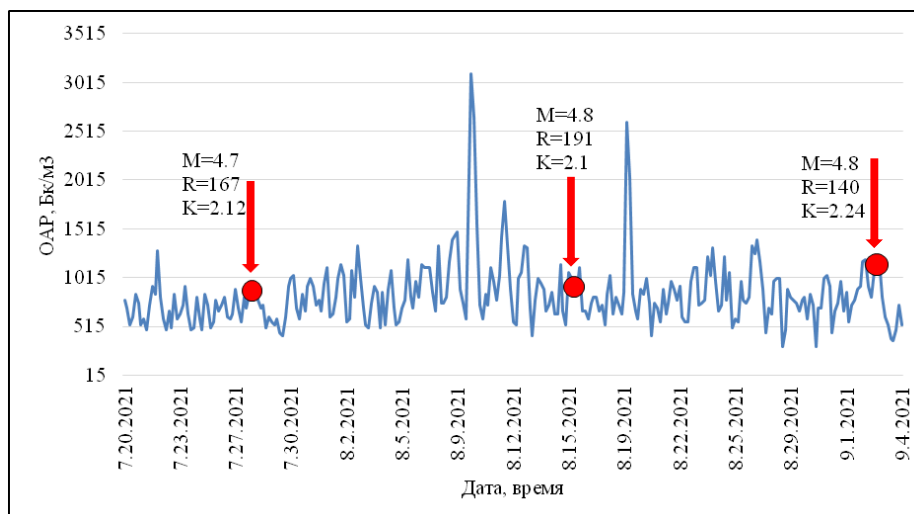


Рис. 5. Фрагмент записи кривой ОАР на станции Владикавказ /

Fig. 5. A fragment of the recording of the curve of the UAR at Vladikavkaz station

Станция Кызыл (Республика Тыва)

Расположена в пойменных и русловых отложениях реки Ка-Хем (Малый Енисей). Зонд установлен в грубообломочных пролювиальных отложениях, слабо передающих возникающие деформации. Измерения соответствуют режиму принудительной доставки радона. Пример записи приведен на рисунке 6. Видно, что характер вариаций ОАР затрудняет проведение их интерпретации. Величина аномалий незначительно превышает фоновые значения, что может быть объяснено удаленностью событий. Суточные вариации ОАР нечеткие, геодинамический критерий для дальних событий не достигает величины 2.0, при которой возможно их проявление в кривых ОАР. Практически все произошедшие в этот период землетрясения отмечаются как дальние. Близкое событие 15 сентября 2024 г. ориентировочно можно связать с незначительной аномалией 2–4 сентября. Хотя по величине геодинамического критерия – 2.43, данное землетрясение должно было уверенно проявиться в кривой ОАР. Основные причины нечетких аномалий – неудачное расположение радоновой станции и возможные технические помехи из-за ее размещения в здании Института.

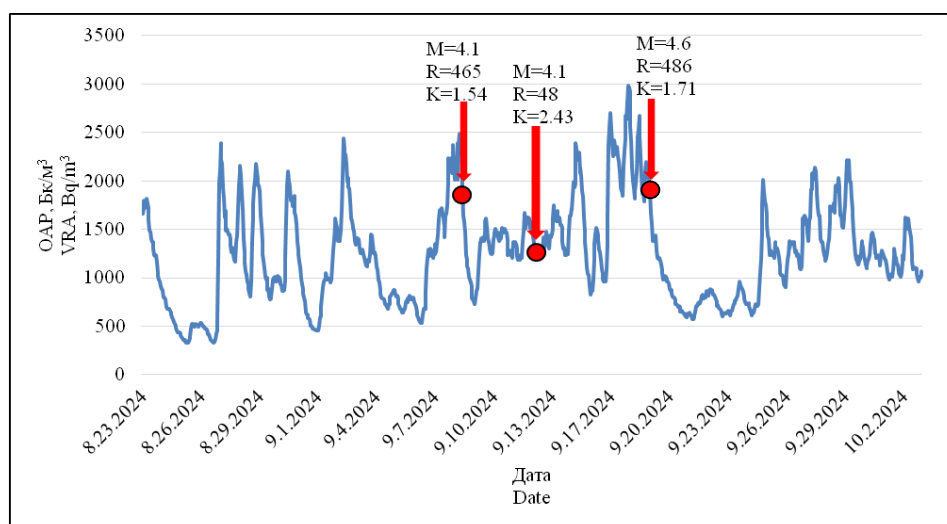


Рис. 6. Фрагмент записи кривой ОАР на станции Кызыл /

Fig. 6. A fragment of the recording of the curve of the VRA at the Kyzyl station

Станция «Иссык-Ата» (Кыргызстан)

Станция находится на Северном Тянь-Шане, в зоне складчато-разрывного сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины. Станция установлена в ~1 км от тальвега на правом борту р. Иссык-Ата в разнообломочных пролювиальных средне-верхнечетвертичных отложениях (rQ_{2-3}), лежащих на гранодиоритах ордовика с ксеноблоками верхнепротерозойских сланцев. Породы палеозойского фундамента сильно трещиноваты и с признаками дробления из-за близости (~1.5 км) линии Шамсинского взброса с падением его плоскости сместителя под углом 40–50° в сторону станции.

В подвальном помещении павильона Научной станции РАН установлена квадратная труба сечением 20 мм на 20 мм длиной 1 м с перфорированным основанием, заглублена на 0.6 м, в нее установлен зонд с выходящей из него трубкой с выходом в операторское помещение, где установлен прокачивающий насос и детектор радона. Такая схема установки зонда не соответствует режиму принудительной доставки радона. Наличие дополнительного объема за счет внешней квадратной трубы приводит к разбавлению и усреднению величины ОАР. Связь открытого конца квадратной трубы с помещением обуславливает поступление в нее воздуха с низким содержанием радона и при отключении насоса, детектор регистрирует содержание радона в воздухе помещения. При такой схеме измерений регистрация короткопериодных высокоамплитудных аномалий затруднительна, а получаемые вариации неприменимы для качественной интерпретации.

На рисунке 7 приведен фрагмент записи ОАР с 31.01.2023 г. по 19.02.2024 г. Произошедшие за этот промежуток времени землетрясения в ноябре 2023 г. и январе 2024 г., по геодинамическому критерию должны были отразиться в поле радона. Но процесс их подготовки не отразился в вариациях объемной активности почвенного радона, что, скорее всего, объясняется осреднением величины ОАР в дополнительном объеме – квадратной трубе.

Резкий спад величины ОАР после землетрясения 22.01.2024 г. вероятнее всего, вызван техническими неисправностями работы насоса или разгерметизацией соединительных элементов от зонда к детектору. На это указывают последующие фоновые значения ОАР.

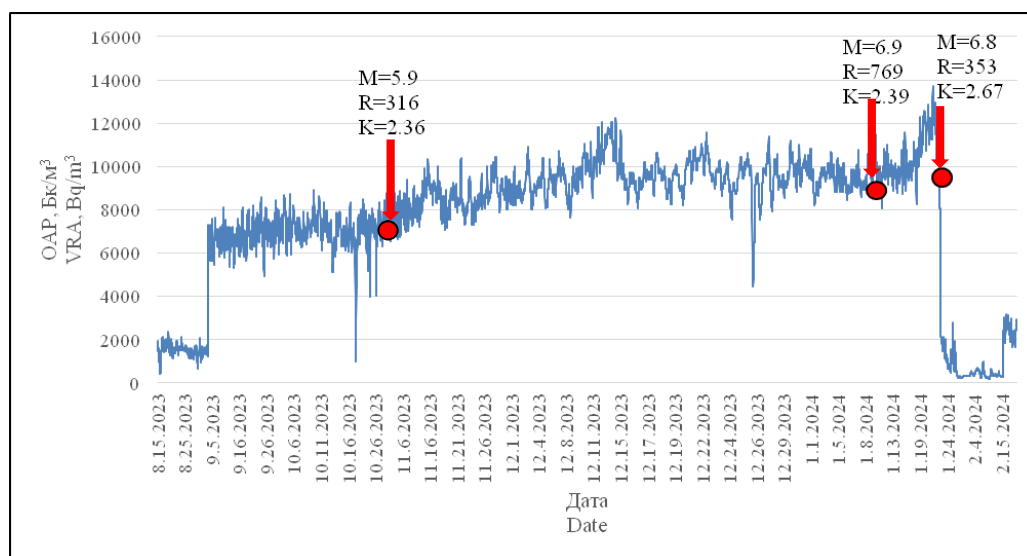


Рис. 7. Фрагмент записи кривой ОАР на станции «Иссык-Ата» /
Fig. 7. A fragment of the recording of the VRA curve at the «Issyk-Ata» station

Станция «Петропавловская» (о. Сахалин)

Пункт наблюдения в с. Петропавловское, расположен в южной части острова, непосредственно в зоне регионального субмеридионального Центрально-Сахалинского разлома. В структурном плане, разлом представляет собой взбросо-надвиг, с падением сместителя на запад под углом 55° . На земной поверхности его трасса ярко выражена наползанием резко пересеченного гористого рельефа, сложенного холмской и невеличской свитами, на западный фланг низменной равнины Сусунайской депрессии, заполненной Маруямскими отложениями. Непосредственно в месте установки шпура для отбора газовых проб, породы представлены аллювиально-пролювиальными желтыми и серыми глинами и суглинками современного четвертичного возраста с мощностью толщи до 4 м.

Условия измерений соответствуют режиму принудительной доставки радона. За период наблюдений с 17.10.2024 г. по 29.12.2024 г. отразилось только одно землетрясение 23.10.2024 г. с геодинамическим критерием 2.2 на расстоянии 928 км. В кривой ОАР оно отметилось как дальнейшее событие, на спаде аномалии, что соответствует полученным ранее закономерностям (рис. 8). Аномалии ОАР на этой станции имеют небольшое превышение над фоновыми значениями ОАР, что затрудняет их выделение. Возможной причиной этого может быть неудачное размещение зонда, под которым находится подвальное помещение, за счёт этого возможно искажение деформационной картины при подготовке землетрясения. Наблюдаемая высокая влажность объясняется условиями депрессионной воронки, возникающей из-за подвального помещения.

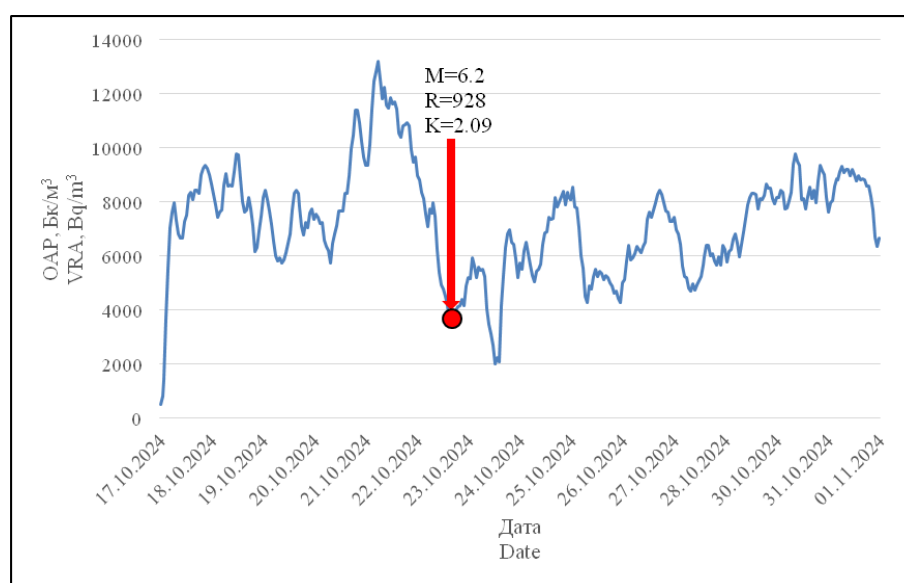


Рис. 8. Фрагмент записи ОАР на станции «Петропавловская», о. Сахалин /
Fig. 8. Fragment of the recording of the VRA at the Petropavlovsk station, Sakhalin Island

Выводы

Станции Южно-Курильск, Петропавловская, Коуровка и Кармадон расположены в коре выветривания монолитных горных пород, реагирующих изменением структуры трещинно-порового пространства при подготовке землетрясения, что отражается в кривой ОАР. Условия измерения полностью соответствуют режиму принудительной доставки почвенного радона к детектору. Отражения землетрясе-

ний в кривых объемной активности радона (ОАР), получаемых на этих станциях, укладываются в закономерности для «ближней» и «дальней» зон, полученные для зоны субдукции.

Станции в Кызыле (Саяны) и Владикавказе расположены в грубообломочных породах, плохо передающих деформации, и даже при измерениях в режиме принудительной доставки радона к детектору, не удается получать качественные кривые ОАР, пригодные для выделения закономерностей отражения в них процесса подготовки землетрясений.

Станция в Иссык-Ате не соответствует методике измерений в режиме принудительной конвекции из-за наличия дополнительного объема (объема наружной трубы) в системе доставки почвенного радона к детектору. Эта причина и учитывая то, что используемый насос для создания режима принудительной доставки радона, имеет незначительную производительность, не позволяет проследить в кривых ОАР процесс подготовки землетрясений.

Таким образом, при выборе места установки станций радонового мониторинга, необходимо учитывать геолого-тектонические условия точки мониторинга [Маркин, 2023; Zaalishvili et al., 2024]. Обустройство станции и проведение измерений необходимо осуществлять строго в соответствии с методикой режима принудительной доставки радона к детектору.

Правильно работающая сеть станций радонового мониторинга позволит получить количественные характеристики закономерностей отражения процесса подготовки землетрясения в вариациях объемной активности радона в различных геодинамических условиях.

Литература

1. Бирюлин С.В. Пространственно-временные закономерности проявления аномалий объёмной активности радона перед тектоническими землетрясениями в районе Южных Курил. Автореф. дисс. канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10 / Бирюлин Сергей Викторович. – Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2022. – 24 с.
2. Заалишвили В.Б., Бирюлин С.В., Козлова И.А., Мельков Д.А., Юрков А.К. Закономерности проявления аномалий объёмной активности радона перед землетрясениями в различных сейсмоактивных регионах. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 35–50. DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003.
3. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, – 2006. 242 с.
4. Козлова И.А., Юрков А.К. Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях. // Уральский геофизический вестник. – 2005. – № 1. – С. 30–34.
5. Маркин М.Ю. Оценка объемной активности радона тектонических разломов в границах городской агломерации Усть-Каменогорск (Республика Казахстан). // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Vol. 13. No. 2. – pp. 29–39. DOI: 10.46698/VNC.2023.93.88.003.
6. Уткин В.И., Юрков А.К. Динамика выделения радона из массива горных пород как краткосрочный предвестник землетрясения. // Доклады РАН. – 1998. – Т. 358. № 5. – С. 675–680.
7. Фирстов П.П., Макаров Е.О. Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2018. – 148 с.
8. Favara R., Grassa F., Inguaggiato S., Valenza M. Hydrogeochemistry and stable isotopes of thermal springs: earthquake-related chemical changes along Belice Fault (Western Sicily). // Applied Geochemistry. – 2001. – Vol. 16. No. 1. – pp. 1–17.

9. Gregoric A., Zmazek B., Vaupotic J. Radon concentration in the thermal water as an indicator of seismic activity. // *Collegium Antropologicum*. – 2008. – No. 32. – pp. 95–98.
10. Hatuda Z. Radon content and its change in soil air near the ground surface. // *Memoirs of the College of Science, University of Kyoto*. – 1953. – Ser. B. Vol. 20. – pp. 285–306.
11. Kasahara K. Migration of crustal deformation. // *Tectonophysics*. – 1979. – Vol. 52. No. 1-4. – pp. 329–341.
12. King C.-Y. King B.-S., William C.E., Zhanget W. Spatial radon anomalies on active faults in California. // *Applied Geochemistry*. – 1996. – Vol. 11. Issue 4. – pp. 497–510.
13. Kuo T., Su C., Chang Ch., Lin Ch. et al. Application of recurrent radon precursors for forecasting large earthquakes ($M_w > 6.0$) near Antung, Taiwan. // *Radiation Measurements*. – 2010. – Vol. 45. No. 9. – pp. 1049–1054.
14. Mogro-Campero A., Fleischer R.L., Likes R.S. Changes in subsurface radon concentration associated with earthquakes. // *Journal of Geophysical Research*. – 1980. – Vol. 85. No. NB6. – pp. 3053–3057.
15. Oh Y., Kim G. A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor. // *Scientific Reports*. – 2015. – No. 5. – Art. No. 13084. DOI: 10.1038/srep13084.
16. Omori Y., Yasuoka Y., Nagahama H., Kawada Y., et al. Anomalous radon emanation linked to preseismic electromagnetic phenomena. // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2007. – No. 7. – pp. 629–635.
17. Planinic J., Radolic V., Lazanin Z. Temporal variations of radon in soil related to earthquakes. // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2001. – Vol. 55. No. 2. – pp. 267–272.
18. Ramola R.C., Singh M., Sandhu A.S., Singh Sh.V. et al. The use of radon as an earthquake precursor. // *Nuclear Geophysics*. – 1990. – Vol. 4. No. 2. – pp. 275–287.
19. Reddy D.V., Nagabhushanam P. Groundwater electrical conductivity and soil radon gas monitoring for earthquake precursory studies in Koyna, India. // *Applied Geochemistry*. – 2011. – Vol. 26. No. 5. – pp. 731–737.
20. Singh M., Kumar M., Jain R.K., Chatrath R.P. Radon in ground water related to seismic events. // *Radiation Measurements*. – 1999. – Vol. 30. No. 4. – pp. 465–469.
21. Teng T. Some recent studies on groundwater radon content as an earthquake precursor. // *Journal of Geophysical Research*. – 1980. – Vol. 6. No. 85. – pp. 3089–3099.
22. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Martyushev N.V. Klyuev R.V., Kukartsev V.V., Konyukhov V.Yu., Kononenko R.V., Gendon A.L., Oparina T.A. Radon emanation and dynamic processes in highly dispersive media. // *Geosciences (Switzerland)*. – 2024. – Vol. 14. No. 4. – pp. 102. DOI 10.3390/geosciences14040102.

References

1. Biryulin S.V. Spatial and temporal patterns manifestations of volume radon anomalies before tectonic earthquakes in the South Kuril Islands. The abstract of the dissertation of Cand. Geol.-mineral. Sci. Ekaterinburg. IGF UB RAS. 2022. 24 p. (In Russ.)
2. Zaalishvili V.B., Biryulin S.V., Kozlova I.A., Melkov D.A., Yurkov A.K. Anomalies of radon volumetric activity before earthquakes in various seismically active regions. *Geologiya Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 35–50. DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003. (In Russ.)
3. Zavyalov A.D. Medium-term earthquake forecast: fundamentals, methodology, implementation. Moscow. Nauka. 2006. 242 p. (In Russ.)
4. Kozlova I.A., Yurkov A.K. The Methodic problems of concentration of Radon-222 measuring in soil air during monitoring organisation. *Ural Geophysical Bulletin*. 2005. No. 1. pp. 30–34. (In Russ.)
5. Markin M.Yu. Assessment of radon volumetric activity of tectonic faults within the boundaries of the Ust-Kamenogorsk urban agglomeration (Republic of Kazakhstan). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 29–39. DOI: 10.46698/VNC.2023.93.88.003. (In Russ.)

6. Utkin V.I., Yurkov A.K. Dynamics of radon release from a rock mass as a short-term precursor to an earthquake. *Doklady RAS*. 1998. Vol. 358. No. 5. pp. 675–680. (In Russ.)
7. Firstov P.P., Makarov E.O. Dynamics of subsurface radon in Kamchatka and strong earthquakes. *Petropavlovsk-Kamchatsky. Vitus Bering KamSU*. 2018. 148 p. (In Russ.)
8. Favara R., Grassa F., Inguaggiato S., Valenza M. Hydrogeochemistry and stable isotopes of thermal springs: earthquake-related chemical changes along Belice Fault (Western Sicily). *Applied Geochemistry*. 2001. Vol. 16. No. 1. pp. 1–17.
9. Gregoric A., Zmazek B., Vaupotic J. Radon concentration in the thermal water as an indicator of seismic activity. *Collegium Antropologicum*. 2008. No. 32. pp. 95–98.
10. Hatuda Z. Radon content and its change in soil air near the ground surface. *Memoirs of the College of Science. University of Kyoto*. 1953. Ser. B. Vol. 20. pp. 285–306.
11. Kasahara K. Migration of crustal deformation. *Tectonophysics*. 1979. Vol. 52. No. 1-4. pp. 329–341.
12. King C.-Y. King B.-S., William C.E., Zhanget W. Spatial radon anomalies on active faults in California. *Applied Geochemistry*. 1996. Vol. 11. Issue 4. pp. 497–510.
13. Kuo T., Su C., Chang Ch., Lin Ch. et al. Application of recurrent radon precursors for forecasting large earthquakes ($M_w > 6.0$) near Antung, Taiwan. *Radiation Measurements*. 2010. Vol. 45. No. 9. pp. 1049–1054.
14. Mogro-Campero A., Fleischer R.L., Likes R.S. Changes in subsurface radon concentration associated with earthquakes. *Journal of Geophysical Research*. 1980. Vol. 85. No. NB6. pp. 3053–3057.
15. Oh Y., Kim G. A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor. *Scientific Reports*. 2015. No. 5. Art. No. 13084. DOI: 10.1038/srep13084.
16. Omori Y., Yasuoka Y., Nagahama H., Kawada Y., et al. Anomalous radon emanation linked to preseismic electromagnetic phenomena. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2007. No. 7. pp. 629–635.
17. Planinic J., Radolic V., Lazanin Z. Temporal variations of radon in soil related to earthquakes. *Applied Radiation and Isotopes*. 2001. Vol. 55. No. 2. pp. 267–272.
18. Ramola R.C., Singh M., Sandhu A.S., Singh Sh.V. et al. The use of radon as an earthquake precursor. *Nuclear Geophysics*. 1990. Vol. 4. No. 2. pp. 275–287.
19. Reddy D.V., Nagabhushanam P. Groundwater electrical conductivity and soil radon gas monitoring for earthquake precursory studies in Koyna, India. *Applied Geochemistry*. 2011. Vol. 26. No. 5. pp. 731–737.
20. Singh M., Kumar M., Jain R.K., Chatrath R.P. Radon in ground water related to seismic events. *Radiation Measurements*. 1999. Vol. 30. No. 4. pp. 465–469.
21. Teng T. Some recent studies on groundwater radon content as an earthquake precursor. *Journal of Geophysical Research*. 1980. Vol. 6. No. 85. pp. 3089–3099.
22. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Kukartsev V.V., Konyukhov V.Yu., Kononenko R.V., Gendon A.L., Oparina T.A. Radon emanation and dynamic processes in highly dispersive media. *Geosciences (Switzerland)*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 102. DOI 10.3390/geosciences14040102.