GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS
Published by the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

RECENT GEODYNAMICS

2024 VOLUME 15 ISSUE 4 ARTICLE 0774

ISSN 2078-502X

DOI: 10.5800/GT-2024-15-4-0774

THE RESULTS OF SOIL RADON VOLUME ACTIVITY MONITORING IN THE SOUTHERN KURIL ISLANDS FOR THE PERIOD 2019–2023

I.A. Kozlova, S.V. Biryulin ✉, A.K. Yurkov

Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 100 Amundsen St, Ekaterinburg 620016, Russia

ABSTRACT. The paper presents the results of processing of the soil radon volume activity (RVA) monitoring data obtained at the Yuzhno-Kurilsk station from 2019 to 2023. There have been confirmed the patterns obtained previously for the reflection of tectonic events in the variations of RVA. There has been made a comparison showing the coincidence of the sizes of the "near" zone with those of the "far" zone, and the time of manifestation of the RVA anomaly before the earthquake.

KEYWORDS: earthquakes; precursors; forecast; radon; Southern Kuril Islands; monitoring

FUNDING: This work was conducted as part of the state assignment of the Bulashevich Institute of Geophysics UB RAS, approved by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

EDN: EJYIII

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Sergey V. Biryulin, serrega2009@gmail.com

Received: March 1, 2024
Revised: July 12, 2024
Accepted: July 15, 2024

FOR CITATION: Kozlova I.A., Biryulin S.V., Yurkov A.K., 2024. The Results of the Volume Soil Radon Activity Monitoring in the Southern Kuril Islands for 2019–2023. Geodynamics & Tectonophysics 15 (4), 0774. doi:10.5800/GT-2024-15-4-0774

© Kozlova I. A., Biryulin S. V., Yurkov A. K., 2024

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВЕННОГО РАДОНА НА ЮЖНЫХ КУРИЛАХ ЗА 2019–2023 гг.

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

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе приведены результаты обработки данных мониторинга объемной активности почвенного радона (ОАР), полученных на станции «Южно-Курильск» с 2019 по 2023 г. Подтверждены полученные ранее закономерности отражения тектонических событий в вариациях ОАР. Проведено сравнение и показано совпадение размеров «ближней» и «дальней» зоны, времени проявления аномалии ОАР перед землетрясением.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: землетрясения; предвестники; прогноз; радон; Южные Курилы; мониторинг

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках государственного задания Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, утвержденного Минобрнауки РФ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема полного прогноза землетрясений, включающего время, место и магнитуду, по-прежнему остается нерешенной и актуальной. Наибольшее практическое значение имеет краткосрочный прогноз [Panteleev, Naimark, 2017]. К настоящему моменту известно лишь два случая реального прогноза землетрясений, на основе которых были осуществлены практические действия по снижению негативных последствий. Это землетрясение в Китае (1975 г.) и Италии (2009 г.) [Fengming, Ge, 1975; Giuliani et al., 2009]. В основе первого прогноза лежат данные по вариациям почвенного радона, изменениям уровня грунтовых вод в скважинах и колодцах и сейсмологические наблюдения [Fengming, Ge, 1975]. Прогноз второго осуществлен по вариациям радона [Giuliani et al., 2009]. Из более двухсот известных физических явлений, рассматриваемых в качестве вероятных предвестников, лишь единицы нашли практическое применение. Фактически наука подошла к черте, когда общество не устраивает затянувшийся поиск предвестников, способных быть основой конкретного прогноза, и ставится задача реального решения этой проблемы, несмотря на ее сложность.

По мнению авторов данной статьи, необходимо использовать явления, вызываемые изменением напряженно-деформированного состояния горных пород в зоне готовящегося события. Достижение критических напряжений в геологической среде приводит к образованию магистрального разрыва – землетрясению. Изменения напряженно-деформированного состояния горных пород непосредственно сказываются на изменении пористости, проницаемости и вызывают трещинообразование. Методов, которые могут предоставить информацию о протекании этих процессов, не так много. Среди них сейсмологические наблюдения, мониторинг изменений в подземной гидросфере и подземной атмосфере. К сожалению, приходится констатировать тот факт, что предвестники, успешно проявившие себя при оперативном прогнозе, часто не привлекают внимание исследователей. Разработанный в Институте геофизики (ИГФ) УрО РАН метод наблюдений за движением жидкости по стволу скважины, который существенно расширил возможности простого измерения уровня столба жидкости, не нашел широкого применения среди российских исследователей. Сейчас этот метод активно разрабатывается китайскими учеными [He, Singh, 2019], хотя именно по температурным наблюдениям в скважине на о-ве Кунашир сотрудниками ИГФ УрО РАН было спрогнозировано землетрясение Тохоку за два дня до события [Demezhko et al., 2012].

Исследование возможностей радона при изучении геодинамических процессов в Институте геофизики начиналось с горных ударов на шахтах [Bulashevich et al., 1996]. После выявления определенных закономерностей появилась возможность применения радоновых измерений для изучения процесса подготовки землетрясений. Были организованы исследования на Северном Тянь-Шане (2001–2004 гг.), а с 2006 г., основным районом для изучения процесса подготовки землетрясений стали Южно-Курильские острова. С 2011 г. ведется практически непрерывный мониторинг объемной активности почвенного радона (ОАР). По результатам обработки данных за период 2011–2018 гг. разработана методика интерпретации и установлены закономерности поведения объемной активности радона в процессе подготовки тектонического события. В основу методики заложен геодинамический критерий – соотношение магнитуды события и логарифма расстояния от точки наблюдения до эпицентра события. При анализе событий с магнитудой более 4 в радиусе 500 км от установки детектора (г. Южно-Курильск) была определена «ближняя» и «дальняя» зона происходящих землетрясений по времени их отражения в ОАР [Kozlova et al., 2021].

Необходимо отметить, что одной из причин малого количества реальных прогнозов на основе радона и температуры является отсутствие, как в данном случае, возможности оперативного получения данных со станций, где проводятся мониторинговые наблюдения.

Прогноз по температурным данным землетрясения Тохоку стал возможен лишь потому, что температурные данные со станции «Южно-Курильск» были получены за четыре дня до события (обработаны за два дня) [Demezhko et al., 2012]. Такие случаи носят единичный характер. Как правило, при отсутствии оперативного получения результатов наблюдений возможно только ретроспективное сопоставление предвестниковых явлений и землетрясений. Отсюда следует очень важное условие для осуществления реального прогноза землетрясений – возможность оперативного получения данных с наблюдательных станций.

В настоящей статье приведены результаты обработки и интерпретации мониторинговых измерений ОАР за период 2019–2023 гг.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исследования проводились с применением метода адвективной доставки почвенного радона к детектору [Kozlova, Yurkov, 2005]. Принципиальным отличием адвективного режима измерений от повсеместно используемого диффузионного является непрерывная откачка насосом воздуха из почвы с глубины более 1 м через перфорированный на конце зонд и поступление его в регистрирующий прибор (детектор). В адвективном режиме при достижении области откачки границы земля – воздух устанавливается квазистационарное состояние. При этом захватывается часть пространства ниже зонда, что увеличивает эффективный объем горных пород, повышая величину ОАР. Детектор непрерывно регистрирует вариации ОАР в воздухе, который поступает из трещинно-порового пространства массива горных пород. Также при помощи адвективного режима максимально снижается влияние метеорологических факторов на вариации ОАР. В качестве детектора радона использовались приборы Sirad и Radex107.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализировались все землетрясения, произошедшие с 2019 по 2023 г. в радиусе 500 км от станции радонового мониторинга в г. Южно-Курильске (рис. 1).

Рассматривать длительные интервалы времени наблюдений нецелесообразно, так как невозможно выделить особенности поведения ОАР непосредственно перед землетрясением.

При обработке результатов долговременного мониторинга ОАР на станциях Южно-Курильского полигона принцип выделения аномалий был следующий: в качестве аномалии на кривой ОАР рассматривался участок, на котором не менее трех значений ОАР (при измерениях каждые четыре часа) как минимум в два раза превышали фоновый уровень перед началом повышения объемной активности радона. Фоновый уровень ОАР определялся перед каждым конкретным землетрясением, так как он зависит от нескольких факторов (температура, влажность, приливные воздействия и др.).

Для характеристики положения момента сейсмического события на кривой ОАР были определены (рис. 2): продолжительность аномалии (АВ), время от начала аномалии до тектонического события (АГ), время от

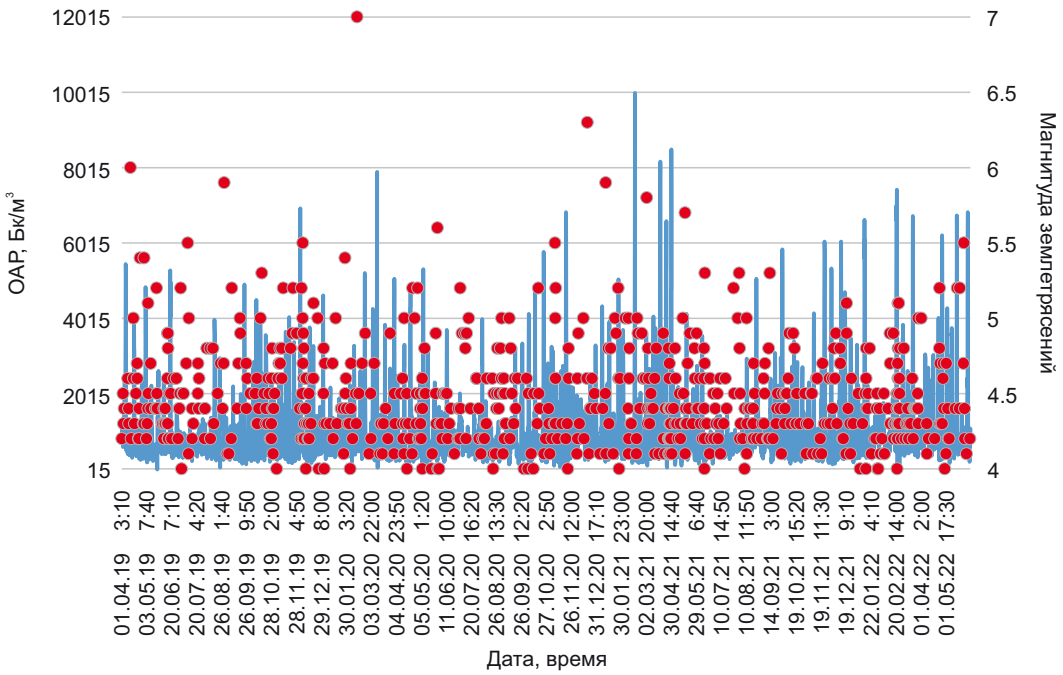

Рис. 1. Фрагмент вариации ОАР и анализируемые землетрясения за период наблюдений с 2019 по 2023 г. Моменты землетрясений показаны точками.

Fig. 1. The RVA variation fragment and earthquakes analyzed over the observation period from 2019 to 2023. The moments of earthquakes are shown by dots.

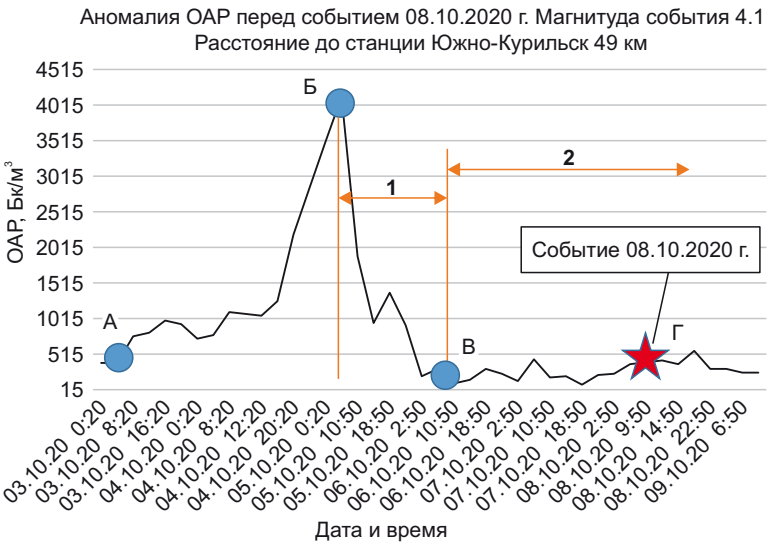

Рис. 2. Пример отражения события «ближней» зоны и определяемые параметры по кривой вариации ОАР. 1 – область отражения событий «дальней» зоны; 2 – область отражения событий «ближней» зоны.

Fig. 2. An example of the "near" zone event reflection and the parameters determined by the variation curve of RVA. 1 – the reflection area of the "far" zone events; 2 – the reflection area of the "near" zone events.

максимума до события (БГ) и время от конца аномалии до события (ВГ).

На основе деформационной модели И.П. Добровольским [Dobrovolsky, 1991] была выполнена оценка радиуса зоны проявления предвестников и применен геодинамический критерий (K) ≥2.5: отношение магнитуды землетрясения (M) к логарифму расстояния от станции мониторинга до события (R). Данный критерий экспериментально подтвержден для нескольких геофизических методов, основанных на вариациях проницаемости и пористости горных пород, таких как измерение уровня столба жидкости в скважинах (колодцах) и температуры в скважинах стационарно установленными датчиками [Demezhko et al., 2012; Pulinets et al., 2012; Rulenko, Kuz'min, 2015; Tikhonov, 2012; King et al., 1999]. В силу того, что процесс подготовки землетрясений, которым соответствует геодинамический критерий K<2, практически не отмечался в аномалиях ОАР, рассматривались только события с геодинамическим критерием K≥2.

При выполнении данной работы проанализированы результаты измерения объемной активности радона, полученные с применением адвективного способа доставки радона к детектору за более чем четырехлетний период со станций мониторинга на территории Южно-Курильского полигона. Результаты сопоставлены с сейсмическими событиями (M≥4.0), произошедшими в пределах 500 км от станции мониторинга в г. Южно-Курильске за соответствующий период.

Радиус охвата сейсмических событий относительно станции наблюдения выбирался, исходя из теоретических расчетов проявления деформаций по модели [Dobrovolsky, 1991]. За период с 2019 по 2023 г. максимальная магнитуда землетрясений, происходивших в Южно-Курильском регионе, не превышала 7, поэтому эпицентральное расстояние выбрано меньше 500 км.

Установлено, что 119 событиям из 123 с геодинамическим критерием от 2.0 предшествовали аномалии ОАР (что составляет 96 %) (рис. 3).

При интерпретации вариаций ОАР в качестве точки начала отсчета взят момент окончания аномалии (рис. 4). Момент окончания аномалии соответствует точке В (см. рис. 2). Положительные значения соответствуют землетрясениям, которые проявились после выхода предшествующей аномалии ОАР на фоновые значения (см. рис. 2, участок ВГ). Отрицательные значения соответствуют землетрясениям, которые проявились после максимума предшествующей радоновой аномалии до ее выхода на фоновые значения (см. рис. 2, участок БВ) (рис. 4).

На основе полученного выше распределения подтверждены определенные ранее количественные значения радиусов «ближней» и «дальней» зоны, которые составляют менее 130 и более 180 км соответственно (рис. 4).

Граница «ближней» и «промежуточной» зоны проведена по последним событиям, которые отражались как во временном интервале между экстремумом и окончанием аномалии, так и в интервале после окончания аномалии и выхода на фоновые значения. Аналогично проведена граница «промежуточной» и «дальней» зоны.

Интервал времени проявления дальних событий составляет не более шести суток после максимума предшествующей аномалии ОАР. Для абсолютного большинства ближних событий аналогичный интервал не превышает 28 сут (рис. 4). В обоих случаях интервалы совпадают с результатами, полученными по наблюдениям за 2011–2018 гг. [Kozlova et al., 2021].

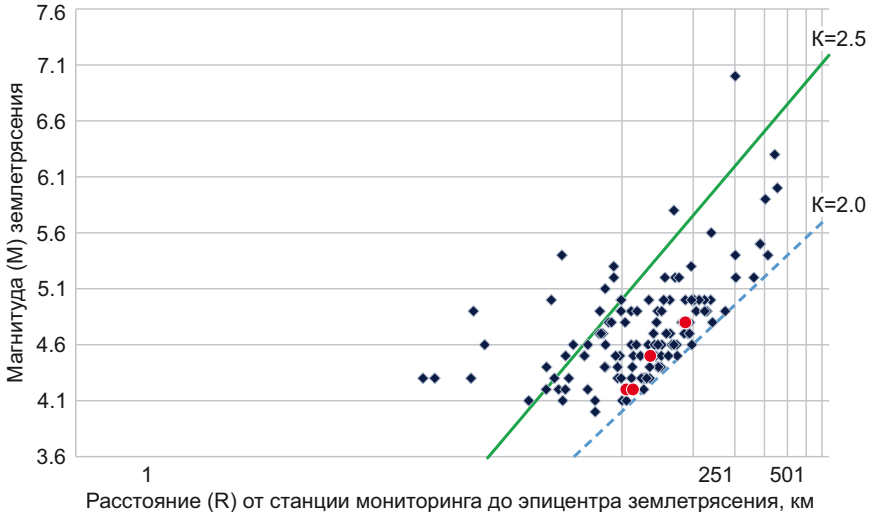

Рис. 3. Землетрясения в поле значений ОАР по наблюдениям за 2019–2023 гг.
Синий ромб – землетрясение отразилось в поле наблюдений ОАР. Красная точка – землетрясение не отразилось в поле наблюдений ОАР. Линиями обозначены границы геодинамических критериев K.

Fig. 3. Earthquakes in the RVA value field according to observations for the period 2019–2023.
Blue rhombus stands for the earthquake that was reflected in the RVA value field. The red dot stands for the earthquake that was not reflected in the RVA value field. Lines show the boundaries of geodynamic criteria K.

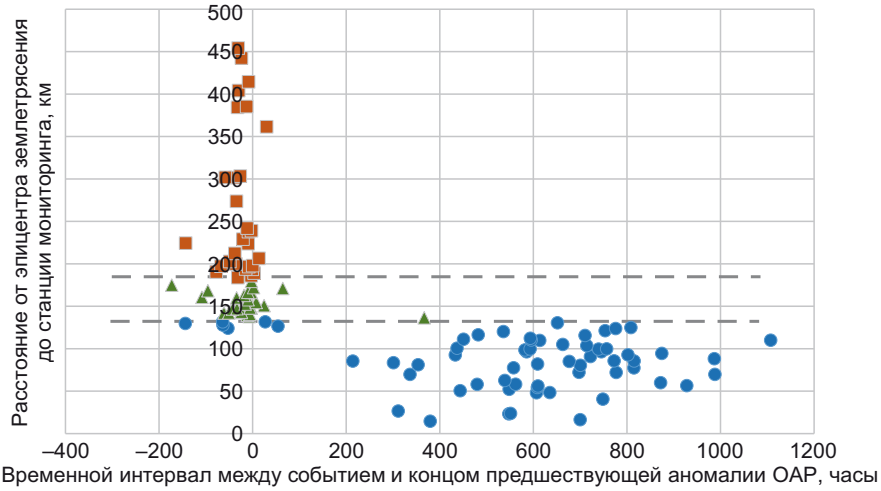

Рис. 4. Зависимость расстояния между станцией мониторинга и эпицентром события от интервала между окончанием аномалии радона и землетрясением по наблюдениям за 2019–2023 г.
Синий круг – события «ближней» зоны, красный квадрат – события «дальней» зоны, зеленый треугольник – события «промежуточной» зоны.

Fig. 4. The dependence of the distance between the monitoring station and the earthquake epicenter on the interval between the end of radon anomaly and the earthquake according to observations for the period 2019–2023.
The blue circle stands for the "near" zone events, the red square stands for the "far" zone events, and the green triangle – for the "intermediate" zone events.

В период март – апрель 2023 г. полученные наблюдения охватили процесс подготовки событий, произошедших 28 марта и 3 апреля 2023 г. В ряду вариаций ОАР с 3 по 30 марта 2023 г. отчетливо выделились две аномалии – 24 и 27 марта (рис. 5).

По этим данным был выполнен реальный краткосрочный прогноз землетрясения 3 апреля 2023 г. вблизи г. Петропавловска-Камчатского. Фрагмент записи ОАР за март 2023 г. был получен и обработан 30 марта. На основе этих данных был дан краткосрочный прогноз «дальнего» землетрясения. Прогноз был передан 31 марта 2023 г. на сейсмостанцию в г. Южно-Курильске.

Интерпретация наблюдений по разработанной методике [Kozlova et al., 2021] показала, что первая зарегистрированная высокоамплитудная аномалия 24 марта могла быть связана с подготовкой землетрясения 28 марта на Хоккайдо с магнитудой 6.2 на расстоянии

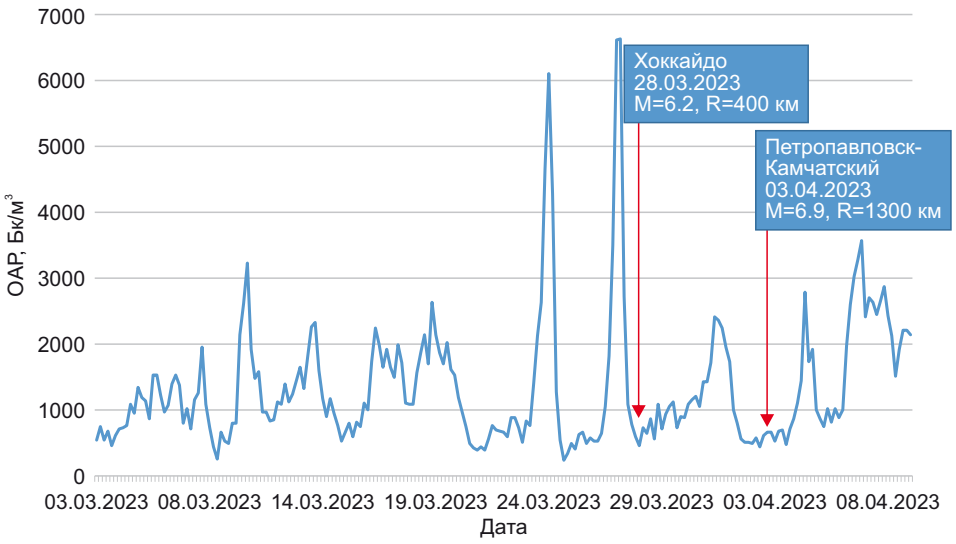

Рис. 5. Фрагмент записи кривой ОАР на станции «Южно-Курильск» в марте 2023 г. Стрелками показаны землетрясения.

Fig. 5. A fragment of the RVA record curve obtained at the Yuzhno-Kurilsk station in March 2023. The earthquakes are showed by arrows.

около 400 км («дальняя зона», геодинамический критерий события около 2.5). Дальние события на кривой ОАР отмечаются, начиная от максимума аномалии, а абсолютное большинство – в интервале 5–6 сут после нее. Но землетрясение 28 марта произошло через сутки и после максимума второй аномалии ОАР, т.е. эту аномалию тоже можно было связать с событием на Хоккайдо 28 марта или с другим землетрясением, которое на момент интерпретации еще не произошло. Отличительной особенностью аномалии 27 марта было то, что она по амплитуде превышала предыдущую. Обычно последующая аномалия всегда меньше по амплитуде, так как радон не успевает накопиться в поровом пространстве, если прошло менее 20 дней с момента предыдущей аномалии [Kozlova, Yurkov, 2016]. Наличие двух близких аномалий на кривой ОАР затруднило их интерпретацию, с учетом того, что мониторинг проводился только на одной станции. Некоторую помощь оказал тот факт, что на протяжении всего периода мониторинговых наблюдений с 2011 по 2023 г. не наблюдались две высокоамплитудные аномалии ОАР подряд перед одним событием, поэтому, вероятнее всего, вторая аномалия была связана с подготовкой другого события. Это могло быть дальнее событие, которое должно произойти не позже первых чисел апреля, исходя из установленной задержки до шести суток, либо, если дальнего события не будет, связано с ближним, для района расположения наблюдательной станции. 3 апреля недалеко от г. Петропавловска-Камчатского произошло землетрясение с магнитудой 6.9 («дальняя зона», геодинамический критерий события 2.2). С процессом подготовки этого события, наиболее вероятно, связана аномалия ОАР 27 марта. Как показал последующий анализ событий по сейсмологическому каталогу, событий с магнитудой более 5 в радиусе 130 км от станции мониторинга в течение месяца после окончания аномалии 27 марта не произошло. Это явилось окончательным подтверждением того, что отмеченная 27 марта аномалия ОАР была вызвана подготовкой землетрясения 3 апреля вблизи г. Петропавловска-Камчатского. Вопрос вызывало слишком большое расстояние до события – около 1300 км. В соответствии с критерием И.П. Добровольского, распространение деформации от очага землетрясения с такой магнитудой не должно превышать 500 км, если брать соотношение магнитуды и логарифма расстояния (геодинамический критерий) равным 2.5 [Dobrovolsky, 1991]. Но ранее авторами было установлено, что в аномалиях ОАР отражаются и события с отношением магнитуды к логарифму расстояния от 2.0 [Kozlova et al., 2021]. В этом случае Петропавловск-Камчатское землетрясение попадает в зону чувствительности станции в г. Южно-Курильске. Вопрос, почему вторая аномалия ОАР оказалась сравнимой по амплитуде с первой, остается пока открытым.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная обработка результатов радонового мониторинга за 2019–2023 гг. подтвердила ранее полученные оценки радиусов «ближней» и «дальней» зоны и по времени отражения землетрясений. Возможное отражение землетрясения на Камчатке в кривой ОАР, на расстоянии 1300 км, может свидетельствовать об обоснованности использования геодинамического критерия больше 2.0 для условий Южных Курил. Наличие только одной радоновой станции не позволяет однозначно связывать аномалии ОАР с определенными событиями, поэтому актуальной становится задача изучения отражения процесса подготовки землетрясений в вариациях объемной активности радона на нескольких разнесенных друг от друга станциях.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность начальнику сейсмической станции «Южно-Курильск» В.Г. Корсунцеву за многолетнюю помощь в организации измерений и передаче данных радонового и температурного мониторинга.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

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

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

7. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

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

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

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Bulashevich Yu.P., Utkin V.I., Yurkov A.K., Nikolaev V.N., 1996. Radon Concentration as a Function of Rock Bursts in Deep Mines. Doklady Earth Sciences 346 (1), 111–114.

Demezhko D.Yu., Yurkov A.K., Outkin V.I., Shchapov V.A., 2012. Temperature Changes in the KUN-1 Borehole, Kunashir Island, Induced by the Tohoku Earthquake (March 11, 2011, M=9.0). Doklady Earth Sciences 445, 883–887. https://doi.org/10.1134/S1028334X12070124.

Dobrovolsky I.P., 1991. Theory of Tectonic Earthquake Preparedness. Institute of Physics of the Earth of the USSR Academy of Science, Moscow, 217 p. (in Russian) [Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 217 с.].

Fengming Z., Ge W., 1975. Prediction of the Haicheng Earthquake and Measures Taken for Disaster Prevention. Seismological Bureau Liaoning Province, Liaoning, China, 18 p.

Giuliani G., Giuliani R., Totani G., Eusani G., Totani F., 2009. Radon Observations by Gamma Detectors PM-4 and PM-2 during the Seismic Period (January – April 2009) in L'Aquila Basin. In: AGU Fall Meeting (December 14–18, 2009, San Francisco). AGU, U14A-03.

He A., Singh R.P., 2019.Coseismic Groundwater Temperature Response Associated with the Wenchuan Earthquake. Pure and Applied Geophysics 177, 109–120. https://doi.org/10.1007/s00024-019-02097-4.

King C.-Y., Azuma S., Igarashi G., Ohno M., Saito H., Wakita H., 1999. Earthquake-Related Water-Level Changes at 16 Closely Clustered Wells in Tono, Central Japan. Journal of Geophysical Research 104 (B6), 13073–13082. https://doi.org/10.1029/1999JB900080.

Kozlova I.A., Biryulin S.V., Yurkov A.K., 2021. Occurrence of Anomalies in Soil Radon Volume Activity before Tectonic Earthquakes. Lithosphere 21 (5), 724–733 (in Russian) [Козлова И.А., Бирюлин С.В., Юрков А.К. Поведение аномалий объемной активности почвенного радона во время подготовки тектонических землетрясений // Литосфера. 2021. Т. 21. № 5. С. 724–733]. https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-724-733.

Kozlova I.A., Yurkov A.K., 2005. The Methodic Problems of Concentration of Radon-222 Measuring in Soil Air during Monitoring Organisation. Ural Geophysical Bulletin 1 (7), 30–34 (in Russian) [Козлова И.А., Юрков А.К. Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях // Уральский геофизический вестник. 2005. № 1 (7). С. 30–34].

Kozlova I.A., Yurkov A.K., 2016. Reflection Consecutive Seismic Events in the Field of Radon Volume Activity. Ural Geophysical Bulletin 1 (27), 35–39 (in Russian) [Козлова И.А., Юрков А.К. Отражение последовательных сейсмических событий в поле объемной активности радона // Уральский геофизический вестник. 2016. № 1 (27). С. 35–39].

Panteleev I.A., Naimark O.B., 2017. Current Trends in the Field of Mechanics of Tectonic Earthquakes. In: V.P. Matveenko, Etudes on Mechanics. UB RAS, Ekaterinburg, p. 99–116 (in Russian) [Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений // Этюды о механике / Ред. В.П. Матвеенко. Екатеринбург: УрО РАН, 2017. С. 99–116].

Pulinets S.A., Davidenko D.V., Linkov A.D., Tarasenko T.E., 2012. A Problem of Multiparametric Analysis of the Predictive Seismomonitoring Data and Its Solution. Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction 12 (7), 57–65 (in Russian) [Пулинец С.А., Давиденко Д.В., Линьков А.Д., Тарасенко Т.Е. Проблема многопараметрического анализа данных прогнозного сейсмомониторинга и пути ее решения. Спутниковым технологиям нет альтернативы // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2012. Т. 12. № 7. С. 57–65].

Rulenko O.P., Kuz'min Y.D., 2015. Increased Radon and Thoron in the Verkhne–Paratunka Hydrothermal System, Southern Kamchatka Prior to the Catastrophic Japanese Earthquake of March 11, 2011. Journal of Volcanology and Seismology 9, 319–325. https://doi.org/10.1134/S0742046315050061.

Tikhonov I.N., 2012. Silence Pauses before the Great Earthquakes of the Kuril-Kamchatka Zone. Pacific Geology 31 (1), 88–95 (in Russian) [Тихонов И.Н. Паузы молчания перед сильными землетрясениями Курило-Камчатской зоны // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 1. С. 88–95].