УДК 550.3 DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-5-724-733

Поведение аномалий объемной активности почвенного радона во время подготовки тектонических землетрясений

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

Институт геофизики УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, e-mail: serrega2009@gmail.com

Поступила в редакцию 18.03.2021 г., принята к печати 07.06.2021 г.

Объект исследований. Среди многочисленных возможных предвестников землетрясений существуют несколько наиболее физически обоснованных, к которым можно отнести аномалии объемной активности радона. Цель работы заключалась в сопоставлении наблюдаемых аномалий почвенного радона с зафиксированными сейсмическими событиями и поиске закономерностей между ними. Районом исследования являются острова Курильской гряды. *Материалы и методы.* На Южно-Курильском геофизическом стационаре Института морской геологии и геофизики ДВО РАН был организован мониторинг объемной активности почвенного радона (ОАР). Измерения проводились в адвективном режиме (почвенный воздух с глубины 70 см принудительно доставлялся к детектору с помощью насоса). Для ретроспективного анализа брались зарегистрированные сейсмические события с магнитудой больше 4, произошедшие в радиусе 500 км от станции мониторинга в Южно-Курильске за 2011–2018 гг. Статистическая обработка данных осуществлялась с применением программ Microsoft Excel, Statistica. *Результаты.* С помощью методики сопоставления радоновых аномалий и землетрясений установлено, что можно использовать геодинамический критерий ≥2 (отношение магнитуды землетрясения к логарифму расстояния от эпицентра события до станции мониторинга в километрах). Из рассмотренных 166 тектонических землетрясений, удовлетворяющих геодинамическому критерию ≥2, 148 событиям предшествовали аномалии ОАР. Удалось определить положение землетрясений относительно экстремума предшествующих аномальных значений радона на временном интервале. Каждое из рассмотренных землетрясений, удовлетворяющее геодинамическому критерию ≥2, которому предшествовала радоновая аномалия, произошло после экстремума аномалии либо совпало с ним по времени. *Выводы.* Проявление тектонических землетрясений в аномалиях объемной активности радона после прохождения экстремума можно рассматривать в качестве краткосрочного прогностического критерия и использовать для разделения событий на ближние и дальние.

Ключевые слова: *землетрясение, почвенный радон, объемная активность радона, радоновая аномалия, радоновый мониторинг, магнитуда, Курильские острова*

Occurrence of anomalies in soil radon volume activity before tectonic earthquakes

Irina A. Kozlova, Sergey V. Biryulin, Anatoly K. Yurkov

Institute of Geophysics Urals Branch of RAS, 100 Amundsena st., Ekaterinburg 620110, Russia, e-mail: serrega2009@gmail.com

Received 18.03.2021, accepted 07.06.2021

Research subject. Earthquakes are a global problem for the entire world population. Therefore, a search for ways to predict and prevent tectonic events is a highly relevant task. Despite the existence of controversial opinions on the possibility of predicting tectonic earthquakes, research in this direction continues. Among numerous possible precursors of earthquakes, anomalies in the volume radon activity (VRA) are the most physically justified ones. The aim of this research was to compare the observed anomalies of soil radon with the recorded seismic events in order to find common patterns. The research area was the Kuril Islands. VRA monitoring was conducted at the South Kuril Geophysical Station of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. *Methods and materials.* Measurements were carried out in the advective mode: soil air from a depth of 70 cm was forcibly delivered to the detector using a pump. For a retrospective analysis, we took registered seismic events with a magnitude greater than 4 that occurred within a radius of 500 km from the monitoring station in Yuzhno-Kurilsk during 2011–2018. Statistical data were processed using Microsoft Excel, Statistica software. *Results.* A method for comparing radon anomalies and earthquakes was developed. Using the developed methodology, it was found that the geodynamic

Для цитирования: Козлова И.А., Бирюлин С.В., Юрков А.К. (2021) Поведение аномалий объемной активности почвенного радона во время подготовки тектонических землетрясений. *Литосфера*, **21**(5), 724-733. https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-724-733

For citation: Kozlova I.A., Biryulin S.V., Yurkov A.K. (2021) Occurrence of anomalies in soil radon volume activity before tectonic earthquakes. *Lithosphere (Russia)*, **21**(5), 724-733. (In Russ.) https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-724-733

© И.А. Козлова, С.В. Бирюлин, А.К. Юрков, 2021

criterion of ≥2 (the ratio of earthquake magnitude to logarithm of distance from event epicenter to the monitoring station in km) can be used when comparing VRA anomalies with tectonic earthquakes. Out of the 166 considered tectonic earthquakes meeting the geodynamic criterion of ≥2.148, the events were preceded by VRA anomalies. The position of the earthquakes was determined relative to the extremum of previous anomalous radon values in the time interval. Each of the considered earthquakes meeting the geodynamic criterion ≥2, which had been preceded by a radon anomaly, occurred either after its extremum or coincided with it in time. *Conclusions*. The manifestation of tectonic earthquakes in VRA anomalies after passing the extremum can be considered as a short-term prognostic criterion and be used for distinguishing between "near" and "far" events.

Keywords: *earthquake, soil radon, volume radon activity, radon anomaly, radon monitoring, magnitude, Kuril islands*

ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения как в глобальном, так и в локальном масштабе являются значительной проблемой. Они оказывают существенное негативное влияние на многие аспекты жизни человека. Поэтому предупреждение подобных явлений, направленное на снижение их последствий, представляется чрезвычайно важным.

Несмотря на разные точки зрения на возможность прогнозирования землетрясений, в мире не прекращаются работы по поиску решения данной проблемы. Как известно, прогноз состоит из определения трех составляющих: времени, места и магнитуды. Их определение представляет собой чрезвычайно сложную задачу, решение которой с учетом современного уровня развития прогностических методов даже не просматривается и вряд ли имеет перспективу в ближайшем будущем. Это понятно хотя бы из того, что для определения гипоцентра готовящегося события необходимо создать густую сеть наблюдательных станций, применяющих известные прогностические методы, что вряд ли осуществимо и экономически целесообразно для больших сейсмоопасных территорий.

Для прогноза магнитуды событий в настоящее время отсутствуют какие-либо реальные физические предпосылки. Определение времени будущего землетрясения представляет собой, на первый взгляд, более простую задачу, которая может быть разрешена несколькими геофизическими методами, отражающими процесс подготовки сейсмического события. Поэтому в настоящей работе мы сделали акцент на этой составляющей прогноза.

Землетрясение представляет собой разгрузку напряженно-деформированного состояния горных пород и смещение их определенных объемов по образовавшимся трещинам, т. е. при землетрясении происходит развитие геологических процессов во времени, которые можно наблюдать по сопутствующем им физическим явлениям. Из большого количества методов, в той или иной степени пригодных для прогнозирования процесса подготовки тектонических землетрясений, широко используются немногие, имеющие, с одной стороны, физическое обоснование, с другой – возможность практической реализации в естественных условиях. К их числу относится и применение вариаций радиоактивных изотопов радона, в основном радона-222.

Начиная с конца 60-х гг. прошлого столетия в работах, выполненных в СССР, Китае, Японии и США (Уломов, Мавашев, 1967; Wakita et al., 1980), отмечалось, что концентрации радонового газа в земле изменялись до возникновения землетрясений (Lomnitz, 1994). Это давало надежду на его использование в качестве прогностического критерия, учитывая его физические особенности и простоту регистрации.

Существует множество теоретических решений, описывающих реакцию горных пород на изменения геодинамических условий геологической среды (King, 1978; Atkinson, 1980; Martinelli, 1992; Lay et al., 1998). Модель И.П. Добровольского (1991) получила хорошее подтверждение по натурным наблюдениям. Она описывает процесс деформационных изменений при подготовке тектонического события и их отражение в гидрогеологических факторах, учитывая размеры зоны проявления предвестников по деформациям. На основе модели И.П. Добровольского получена простая оценка для радиуса зоны проявления предвестников. В качестве основного был принят геодинамический критерий отношения магнитуды события к логарифму расстояния от станции мониторинга до эпицентра ≥2.5.

Экспериментальное подтверждение полученного соотношения нашло отражение в работах по изучению изменений уровня воды в скважинах Центральной Японии (King et al., 1999); радоновых вариаций в Индии (Пулинец и др., 2012), на Камчатке (Руленко, Кузьмин, 2015), в Курило-Камчатском регионе (Тихонов, 2012); вариаций температуры в скважине на о-ве Кунашир (Демежко и др., 2012).

Реакция радона, вариации уровня столба жидкости и температуры в скважинах, связанные с изменениями структуры порового пространства, за-

висят от расстояния до эпицентра и магнитуды события. Если изменения уровня столба жидкости и температуры по скважинам в зависимости от расстояния до события и его магнитуды исследовались рядом авторов (Демежко и др., 2012; Копылова, Болдина, 2019), то работ, в которых детально оценивалось поведение радона, сравнительно мало. К настоящему времени нет ясности относительно времени возникновения аномалии ОАР перед тектоническим событием. Опубликованные данные по времени проявления аномалии радона перед событием, продолжительности аномалии противоречивы и не дают ответа на вопрос, к какой категории предвестников относятся аномалии радона.

В качестве физического механизма образования аномалий почвенного радона взято изменение проницаемости верхней части геологического разреза за счет изменения его напряженно-деформированного состояния при подготовке тектонического события, с предположением чередования зон сжатия и растяжения в пространстве.

Согласно существующим представлениям о механизмах выделения аномального количества радона, аномалии могут быть связаны с изменением пористости и проницаемости вмещающих горных пород в области расположения измерительного прибора (детектора) вследствие трансформации напряженно-деформированного состояния геологической среды. Подготовка тектонических землетрясений вызывает упругие напряжения деформируемого блока земной коры. После разгрузки (снятия напряжения) геологическая среда может вернуться в исходное состояние и готова снова накапливать напряжение, если не произошло необратимых разрушений.

Возникновение радоновых аномалий перед землетрясением варьирует в большом временном диапазоне – от первых суток до нескольких месяцев (Giulianietal., 2009; Oh, Kim, 2015). Исследования разных авторов показывают, что в ряде случаев не всегда ясно, предваряет ли аномалия радона тектоническое событие либо является его результатом. В литературе практически не встречаются примеры длительного мониторинга ОАР в сейсмически активном районе. Калифорнийский эксперимент (King et al., 1996), продолжавшийся около 7 лет, не полностью выполнил задачу из-за примененной аппаратуры, не позволившей получить необходимую частоту измерений.

Для ответа на поставленные вопросы и поиска вероятных закономерностей отражения сейсмических событий в кривых ОАР возникла потребность в анализе результатов длительных мониторинговых наблюдений с частотой опробования в пределах нескольких часов.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН проводит радоновые исследования, направленные на изучение связи ОАР с изменениями напряженно-деформированного состояния геологической среды на протяжении нескольких десятков лет. Ю.П. Булашевич, В.И. Уткин, А.К. Юрков, В.В. Николаев в 1990–1993 гг. проводили исследования на Североуральском бокситовом руднике. В результате удалось выявить, что перед горными ударами происходили изменения концентрации радона в наблюдаемых скважинах, связанные с изменением напряженного состояния горных пород. Кроме того, удалось выделить зоны взаимного расположения точек мониторинга и эпицентра горного удара. На основе интерпретации результатов авторы высказали предположение о накоплении упругой энергии за счет деформации изгиба (или кручения) массива горных пород (Булашевич и др., 1996). При изгибовых деформациях возникают зоны сжатия, растяжения и переходная зона, в которой отсутствуют деформации сжатия и растяжения. Наличие таких зон объясняет различную форму аномалий ОАР, в том числе отсутствие в ряде случаев каких-либо изменений перед тектоническими событиями (Уткин, Юрков, 2009). Деформации изгиба широко проявляются при различных тектонических условиях, реализованных в геологических средах верхней части земной коры. Одним из доказательств успешного использования распределения деформаций при условии изгибовых движений в земной коре являются результаты переинтерпретации данных, полученных во время Калифорнийского эксперимента (King et al., 1996). Результатом данной работы был вывод о целесообразности использования при интерпретации данных радонового мониторинга наличия изгибовых деформаций, сопровождающихся возникновением зон сжатия, растяжения и переходной зоны. Поведение Rn в этих зонах принципиально различается, что необходимо учитывать при анализе наблюдаемых вариаций ОАР.

Подходящим районом для проведения мониторинга (ОАР) оказались острова Курильской гряды, где землетрясения происходят достаточно часто. На основе длительных наблюдений за вариациями ОАР на станции в Южно-Курильске выполнен анализ зависимости проявления в вариациях ОАР сейсмических событий начиная с 2011 г. (Бирюлин и др., 2019) (рис. 1).

Условия измерения ОАР на станции Южно-Курильск практически исключают влияние метеоусловий, позволяют получать представительные данные и обеспечивают техническую стабильность работы аппаратуры. Точка измерения находится в подвальном помещении сейсмостанции, га-

Рис. 1. Расположение станции радонового мониторинга.

Fig. 1. Radon monitoring station location.

рантирующем исключение влияния атмосферных осадков. Измерительный зонд заглублен на 70 см на контакт рыхлых отложений с лавовым потоком, представленным эффузивными породами андезитового состава. Лавовый поток представляет собой протяженное монолитное тело на восточном берегу о-ва Кунашир с рыхлыми образованиями в основании. Возможно, этим обусловлена повышенная чувствительность измеряемой ОАР к изменениям напряженно-деформированного состояния. Реализованная схема измерений достаточно близко совпадает с измерениями ОАР, выполненными нами ранее в шахтах СУБРа. Условия измерений сохранялись постоянными для всего анализируемого семилетнего периода наблюдений.

Для мониторинга объемной активности радона использовалась серийно выпускаемая аппаратура РГА-04, SIRADMR106 и RADEXMR107. Измерения выполнялись в режиме вынужденной конвекции (адвективный режим) (Козлова, Юрков, 2005). В отличие от адвективного диффузионный режим малоэффективен для мониторинговых наблюдений ОАР в целях изучения изменения напряженно-деформированного состояния земной коры в силу того, что при установке детектора нарушается существующее поле напряжений, а из-за малой скорости диффузии и времени жизни радона (5.5 сут) получаем информацию из очень ограниченной области. Адвективный режим не искажает поле напряжений и позволяет расширить эффективный объем горных пород до первых метров и даже десятков метров по радиусу от точки забора почвенного воздуха.

Доставка почвенного воздуха из шпуров глубиной 70 см обеспечивалась непрерывно работающим мембранным насосом с производительностью 1–2 л/мин.

Цикл измерения длился 4 ч. Частота опроса детектора определяется несколькими условиями. В качестве основной реперной точки в аномалии ОАР выступает точка максимума. От нее идет прогноз времени предстоящего события. Поэтому нужно точно определить положение максимума аномалии по временной шкале. Кроме того, следует учитывать, как было отмечено ранее, что среднее время жизни атомов радона – 5.5 сут. На вариации ОАР влияют суточные лунно-солнечные приливные явления. Для их учета при необходимости частота измерений должна быть не менее 1 ч. Используемая в эксперименте аппаратура позволяла проводить непрерывные измерения с 4-часовым интервалом, этого оказалось достаточно, чтобы выявить существующие закономерности. Именно редкое опробование (например, раз в сутки), которое используют многие исследователи, не дает возможности провести корректную интерпретацию получаемых результатов.

Объемная активность радона непрерывно регистрировалась детекторами и ежемесячно передавались для обработки в Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург. Сейсмические события для ретроспективного анализа брались из сейсмических каталогов USGS (Геологическая служба США).

Количество зарегистрированных сейсмических событий зависит от радиуса охвата относительно станции наблюдения. В данном случае он выбирался по теоретическим расчетам проявления деформаций по модели И.П. Добровольского, в основе которой лежит отношение магнитуды к логарифму расстояния или равному 2.5 или больше (Добро-

вольский, 1991). За период с 2011 по 2018 г. максимальная магнитуда землетрясений, происходивших в Южно-Курильском регионе, не превышала 7.0. Поэтому эпицентральное расстояние было выбрано меньше 500 км.

Для ретроспективного сопоставительного анализа выбирались сейсмические события с магнитудой более 4.0 за период с 30 сентября 2011 г. по 18 октября 2018 г. в радиусе 500 км от станции мониторинга ОАР. На основе сейсмических каталогов USGS для каждого землетрясения вычислялись расстояния до соответствующей станции мониторинга ОАР. По полученным значениям расстояний до эпицентров рассматриваемых сейсмических событий вычислялось отношение магнитуды к логарифму расстояния M/lgR.

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 4 ч) как минимум в 2 раза превышали фоновый уровень перед началом повышения объемной активности радона. Фоновый уровень ОАР определялся перед каждым землетрясением, так как он зависит от нескольких факторов (температуры, влажности, приливных воздействий и ряда других).

Главной проблемой при интерпретации кривых ОАР является определение аномалий, связанных с готовящимся тектоническим событием. Отбраковка ложных аномалий представляет собой сложную задачу, поскольку они могут быть связаны с изменением условий регистрации ОАР (изменением влажности, температуры, электромагнитными помехами, работой насоса). Помимо этого, аномалии могут коррелировать с событиями малой магнитуды, не включенными в регистрационный каталог сейсмических событий. Кроме того, некоторые события, следующие друг за другом с временным промежутком, недостаточным для установления равновесия в ряду радий–радон, также могут отражаться незначительными аномалиями (Козлова, Юрков, 2016).

В ходе исследования выяснено, что не всегда наблюдаемая аномалия ОАР соответствует процессу подготовки события, которое следует непосредственно после аномалии. Методика сопоставления аномалий ОАР и землетрясений вырабатывалась и уточнялась на основе анализа всех полученных данных. Одним из критериев было то, что близкие события должны происходить после выхода аномалии на фоновый уровень. Это обусловлено тем, что при сжатии горных пород происходит вытеснение радона из порового пространства вплоть до закрытия пор, т. е. прекращения выделения радона. Однако процесс сжатия продолжается вплоть до достижения предела прочности горных пород, что наблюдается спустя некоторое время после окончания аномалии ОАР.

На рис. 2 приведен пример применения методики. Существенными характеристиками землетрясений в данном случае являются отношение магнитуды к логарифму расстояния и само расстояние от эпицентра до станции мониторинга ОАР. График отображает две ярко выраженные радоновые аномалии и четыре последующих события. Характеристики событий: 1) 2.43 (отношение магнитуды к логарифму расстояния) и 353 (само расстояние от эпицентра до станции мониторинга), 2) 2.31 и 109, 3) 2.28 и 86, 4) 2.63 и 80. Очевидно, что первое из событий произошло гораздо дальше трех остальных. 18 ноября 2011 г. наблюдалось значительное повышение регистрируемой концентрации почвенного радона, затем проявился экстремум аномалии – 19 ноября, после чего 22 ноября аномалия вернулась к фоновым значениям. Для данной аномалии характерен широкий “коридор” повышенных относительно фоновых значений ОАР. В период с 16 по 22 ноября 2011 г. землетрясений с M/lgR ≥ 2 не происходило. После этого сразу отмечается еще одна аномалия почвенного радона (выделена синим цветом). Практически сразу после экстремума 24 ноября зафиксировано далекое землетрясение. Далее уже на фоновых значениях отмечены три ближних землетрясения, процесс подготовки которых отразился на предыдущей продолжительной аномалии (выделена оранжевым цветом).

Аналогичным образом проводилось выделение аномалий почвенного радона и их сопоставление с зафиксированными землетрясениями на всем выбранном временном интервале с 2011 по 2018 г.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Эффективность отражения событий в изменениях ОАР для землетрясений с соотношениями магнитуды к логарифму расстояния больше 2, больше 2.5

Всем рассмотренным сейсмическим событиям, соответствующим геодинамическому критерию M/lgR ≥ 2.5, предшествовали радоновые аномалии.

Однако при использовании отношения магнитуды события к логарифму расстояний ≥2.5, несмотря на то что оно выполняется для двух прогностических методов – уровня и температуры, не рассматривается существенное количество произошедших сейсмических событий, хотя им соответствуют аномалии ОАР. Общее количество сейсмических событий за проанализированный период, удовлетворяющих отношению магнитуды к логарифму расстояния ≥2, составило 166, из которых 148 предшествовали наблюдаемые аномалии Rn (89%). Количество событий, которым отвечает соотноше-

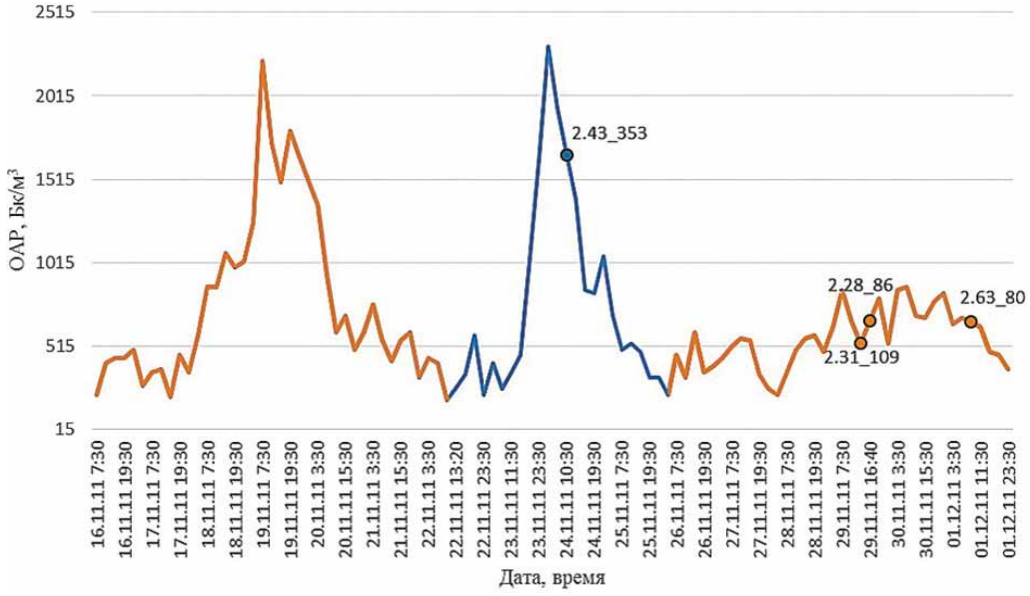

Рис. 2. Наблюдаемые значения ОАР и произошедшие землетрясения (показаны точками).

Подписи точек: первое число – отношение магнитуды землетрясения к логарифму расстояния от эпицентра до станции мониторинга, второе число – расстояние от эпицентра до станции мониторинга. Остальные пояснения см. в тексте.

Fig. 2. Volume radon activity (VRA) data and earthquakes (shown by dots).

Point captions: first value – ratio of earthquake magnitude and logarithm of distance from epicenter to monitoring station, second value – distance from epicenter to monitoring station. Other explanations see in Text.

ние M/lgR ≥ 2.5, составило только 36 (рис. 3). Поэтому для получения статистически более обоснованных закономерностей использовались аномалии ОАР, связанные со всеми проанализированными землетрясениями, удовлетворяющими критерию M/lgR ≥ 2.

Связь момента проявления тектонического события и точки экстремума предшествующей аномалии ОАР

Для определения времени проявления землетрясения по кривой изменения объемной активности радона необходимо отталкиваться от характерных точек. Единственной точкой, которая хорошо отмечается на кривой и имеет физическую природу, является точка максимума ОАР (рис. 4).Она выделяет момент полного прекращения поступления дополнительного радона, вызывающего аномалию, или превышения количества распадающегося имеющегося радона над поступлением дополнительного. Согласно механизму сжатия (King, 1978), который вызывает землетрясения, аномальная концентрация радона может быть связана с увеличением сжатия коры, при котором почвенный газ выдавливается в атмосферу. При достижении максимального сжатия поступление дополнительного количества радона в поровое пространство прекращается.

Далее рассмотрены тектонические события, удовлетворяющие критерию M/lgR ≥ 2относительно точки экстремума соответствующей аномалии ОАР (рис. 5). Для каждого из изученных тектонических событий определялась разница между временем землетрясения и временем максимума радоновой аномалии, предшествующей этому событию. Таким образом, удалось установить положение произошедшего землетрясения относительно экстремума аномальных значений на временном интервале. За точку начала координат по оси абсцисс принималась точка экстремума аномалии. Соответственно, для событий, которые происходили уже после проявления максимума предшествовавшей радоновой аномалии, в результате получены положительные значения по разнице двух рассмотренных параметров. В том случае, если событие отразилось до экстремума, ему соответствовал отрицательный временной интервал.

Исходя из анализа полученного графика (см. рис. 5), можно сделать вывод, что все исследованные события, удовлетворяющие критерию ≥2, которым предшествовала аномалия радона, произошли уже после экстремума либо совпали с ним по времени.

Таким образом, установленной закономерностью для рассмотренных сейсмических событий выступает их приуроченность к нисходящей ветви аномалии ОАР (при использовании для регистра-

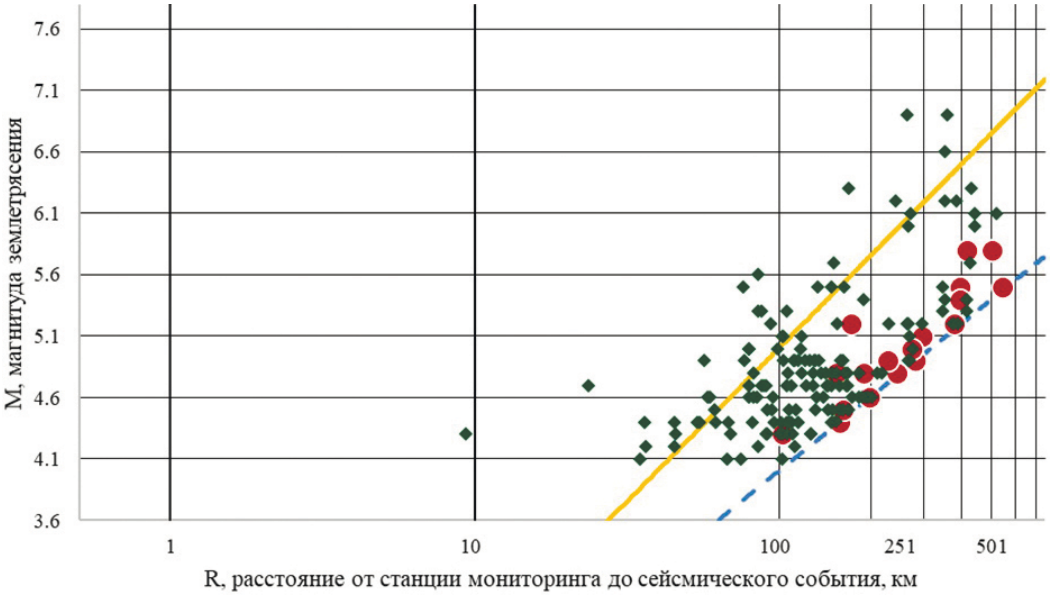

Рис. 3. Тектонические землетрясения в поле значений ОАР.

Кругами обозначены события, не отразившиеся в кривых аномалий ОАР, ромбами – события, отраженные в кривых аномалий ОАР. Желтая прямая линия соответствует соотношению M/lgR = 2.5, голубая прерывистая – M/lgR = 2.

Fig. 3. Tectonic earthquakes in VRA field.

Circle – events that are not reflected in VRA anomalies, rhombuses – events that reflected in VRA anomalies. Yellow straight line corresponds to the ratio M/lgR = 2.5, blue broken line – to the ratio M/lgR = 2.

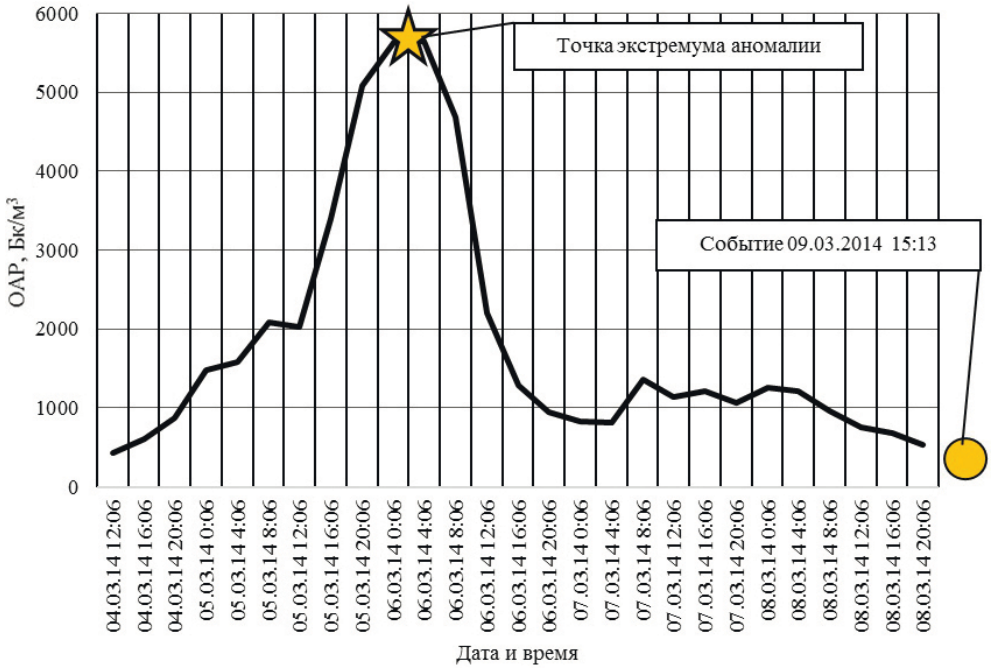

Рис. 4. Аномалия ОАР перед событием 09.03.2014 г. Магнитуда события – 4.9. Расстояние до станции Южно-Курильск – 77 км.

Выбор характерных точек на кривой ОАР.

Fig. 4. OAR anomaly before the event on 03/09/2014. The magnitude of the event is 4.9. Distance to station Yuzhno-Kurilsk – 77 km.

Characteristic points selectionon VRA curve.

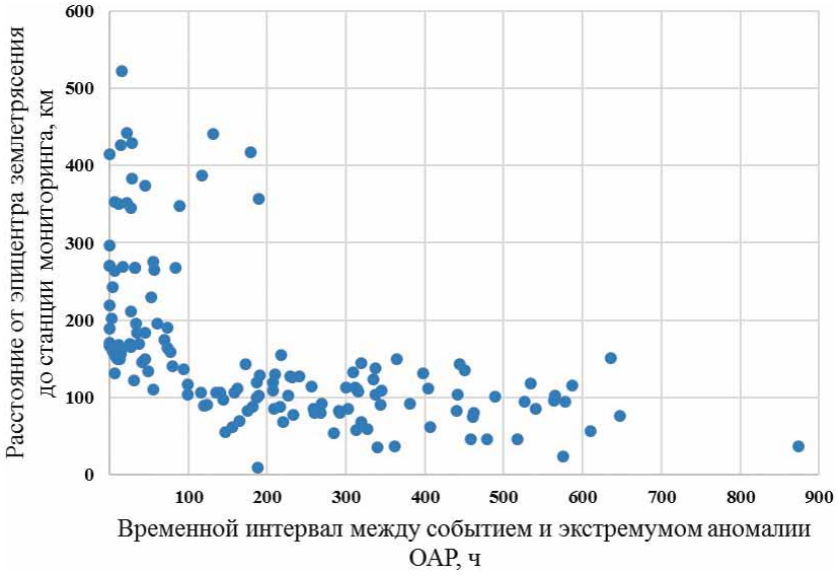

Рис. 5. График времени проявления событий с M/lgR ≥ 2 относительно экстремума предшествующей аномалии.

Fig. 5. Graph of Earth quakes with M/lgR ≥ 2 occurrence time relative to extremum of previous anomaly.

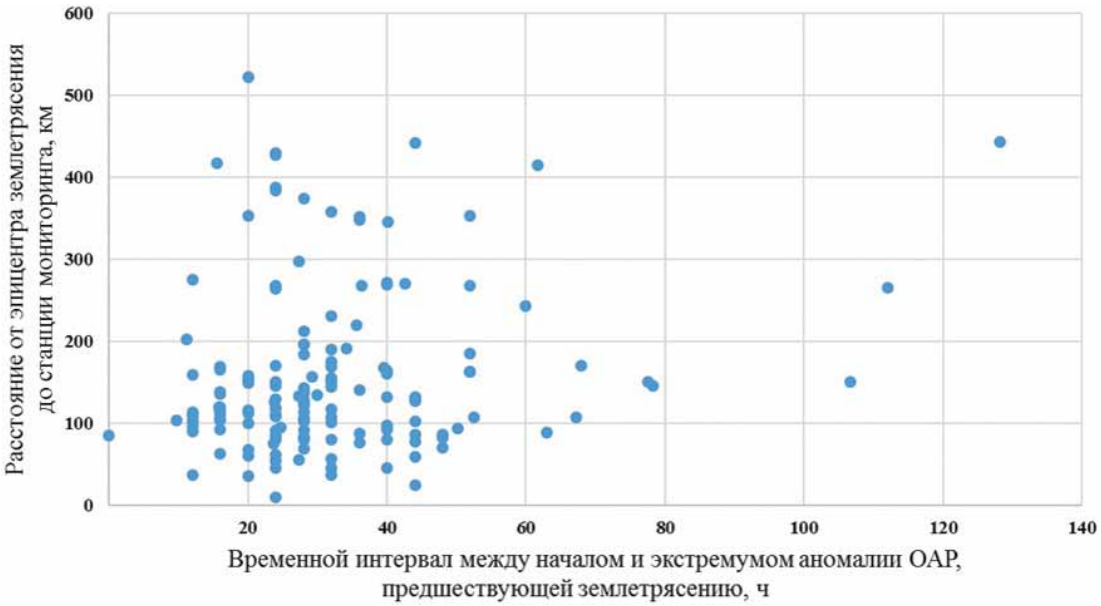

Рис. 6. Продолжительность временного интервала от начала аномалий до экстремума аномалий ОАР, предшествующих землетрясениям с геодинамическим критерием M/lgR ≥ 2.

Fig. 6. Duration of time interval from beginning to extremum of VRA anomaly preceding earthquake with the geodynamic criterion M/lgR ≥ 2.

ции способа вынужденной конвекции – адвекции) (Козлова, Юрков, 2005). Тектонические события проявляются на аномалиях начиная с точки экстремума и далее на фоновых значениях после окончания аномалии. В большинстве случаев нисходящая ветвь аномалии аппроксимируется кривой распада радона, что может свидетельствовать о прекращении поступления радона в поровое пространство горных пород в окрестности точки измерения, как было отмечено ранее.

Еще одной важной характеристикой служит время от начала радоновой аномалии (3 точки с двукратным превышением фона) до ее экстремума (рис. 6). За точку начала отсчета по оси аб-

сцисс принята точка начала аномалии. По построенному графику видно, что рассмотренный временной интервал для подавляющего большинства зафиксированных событий с M/lgR ≥ 2 не превышает 80 ч.

Совокупный анализ рис. 5 и 6 показывает, что время между землетрясением и началом предшествующей аномалии ОАР не превышает 680 ч. В рамках существующих представлений о временной градации проявления предвестников радоновые аномалии можно отнести к краткосрочным предвестникам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение аномалий почвенного радона как вероятных предвестников землетрясений представляет особый интерес. Разработка эффективной методики наблюдения и интерпретации радоновых аномалий в перспективе позволит повысить вероятность успешного прогноза землетрясений в совокупности с другими методами. Это также может быть полезно для Уральского региона с учетом возросшей сейсмической активности за последние годы (Сабикское землетрясение 2015 г., Катав-Ивановское землетрясение 2018 г.).

В ходе исследования установлено, что тектонические землетрясения, зафиксированные в радиусе 500 км от станции мониторинга ОАР в Южно-Курильске за период с 2011 по 2018 г., которым соответствует отношение магнитуды к логарифму расстояния до эпицентра ≥2, отмечаются в аномалиях объемной активности радона после прохождения экстремума, что можно рассматривать в качестве прогностического критерия.

Аномалия объемной активности радона наблюдается не более чем за 28 дней для близких событий и 8 дней для дальних. Установленные закономерности проявления землетрясений в кривых ОАР дают основание отнести вариации ОАР к краткосрочным предвестникам при применении адвективного режима доставки радона к детектору.

Разработанная методика сопоставления радоновых аномалий с произошедшими тектоническими землетрясениями обеспечивает высокую долю отражения при выполнении ретроспективного анализа.

Отражение близких и далеких тектонических землетрясений на различных участках кривой ОАР позволяют ориентировочно оценивать расстояние до эпицентра будущего события.

Продолжительность аномалий ОАР от начала до экстремума не превышает 80 ч при адвективном способе доставке почвенного радона к детектору. Указанный временной промежуток регламентирует необходимую частоту измерений ОАР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бирюлин С.В., Козлова И.А., Юрков А.К. (2019) Исследование информативности объемной активности почвенного радона при подготовке и реализации тектонических землетрясений на примере Южно-Курильского региона. *Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле*, **44**(4), 73-83. DOI: 10.31431/1816-5524-2019-4-44-73-83

Булашевич Ю.П., Уткин В.И., Юрков А.К., Николаев В.Н. (1996) Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах. *Докл. АН*, **345**(2), 245-248.

Демежко Д.Ю., Юрков А.К., Уткин В.И., Щапов В.А. (2012) Температурные изменения в скважине KUN-1 (о. Кунашир), вызванные землетрясением Тохоку (11.03.2011 г., M = 9.0). *Докл. АН*, **445**(2), 883-887.

Добровольский И.П. (1991) Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ОИФЗ АН СССР, 217 с.

Козлова И.А., Юрков А.К. (2005) Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях. *Уральский геофиз. вестн.*, **1**, 30-34.

Козлова И.А., Юрков А.К. (2016) Отражение последовательных сейсмических событий в поле объемной активности радона. *Уральский геофиз. вестн.*, **1**, 35-39.

Копылова Г.Н., Болдина С.В. (2019) Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977–2017 гг. *Вулканология и сейсмология*, **2**, 3-20. DOI: 10.31857/S0203-0306201923-20

Пулинец С.А., Давиденко Д.В., Линьков А.Д., Тарасенко Т.Е. (2012) Проблема многопараметрического анализа данных прогнозного сейсмомониторинга и пути ее решения. Спутниковым технологиям нет альтернативы. *Мат-лы Междунар. науч.-техн. конф. “Фундаменнтальные проблемы радиоэлектронного приборостроения”*. М.: УГТУ МИРЭА, 57-65.

Руленко О.П., Кузьмин Ю.Д. (2015) Увеличение радона и торона в районе Верхне-Паратунской гидротермальной системы Южной Камчатки перед катастрофическим землетрясением в Японии 11 марта 2011 г. *Вулканология и сейсмология*, **5**, 36-42.

Тихонов И.Н. (2012) Паузы молчания перед сильными землетрясениями Курило-Камчатской зоны. *Тихоокеан. геол.*, **31**(1), 88-95.

Уломов В.И., Мавашев Б.З. (1967) О предвестнике сильного тектонического землетрясения. *Докл. АН СССР*, **176**(2), 319-323.

Уткин В.И., Юрков А.К. (2009) Радон как “детерминированный” индикатор природных и техногенных геодинамических процессов. *Докл. АН*, **426**(6), 816-820.

Atkinson B.K. (1980) Stress corrosion and the rate-dependent tensile failure of a fine-grained quartz rock. *Tectonophysics*, **65**(3–4), 281-290.

Giuliani G.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. *AGU Fall Meet.* V. 1. San-Francisco, 3.

King C.Y. (1978) Radon emanation on San-Andreas Fault. *Nature*, **5645**, 516-519.

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. *J. Geophys. Res*., **104**(B6), 13073-13082.

King C.Y., King B.S., Evans W.S., Zhang W. (1996) Spatial radon anomalies on active faults in California. *Appl. Geochem.*, **11**, 497-510.

Lay T., Williams Q., Garnero E.J. (1998) The core-mantle boundary layer and deep Earth dynamics. *Nature*, **392**, 461-468.

Lomnitz C. (1994) Fundamentals of earthquake prediction. N. Y., John Wiley & Sons, 326 p.

Martinelli G. (1992) Fluidodynamical and chemical features of radon-222 related to total gases: implications on earthquakes prediction topics. *IAEA-TECDOC-726 Isotopic and geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruptions.* Proc. Advisory Group Meet. held. Vienna, 48-62.

Oh Y., Kim G. (2015) A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor. *Sci. Rep.*, **5**, 13084. DOI: 10.1038/srep13084

Wakita H., Nakamura Y., Notsu K., Noguchi M., Asada T. (1980) Radon anomaly: a possible precursor of the 1978 Izu-Oshimakinkai earthquake. *Sci.*, **207**, 882-883.

REFERENCES

Atkinson B.K. (1980) Stress corrosion and the rate-dependent tensile failure of a fine-grained quartz rock. *Tectonophysics*, **65**(3-4), 281-290.

Biryulin S.V., Kozlova I.A., Yurkov A.K. (2019) Investigation of informative value of volume radon activity in soil during both the stress build up and tectonic earthquakes in the south Kuril region. *Vestn. KRAUNTs. Nauki o Zemle*, **44**(4), 73-83. (In Russ.) DOI: 10.31431/1816-5524-2019-4-44-73-83

Bulashevich Yu.P., Utkin V.I., Yurkov A.K., Nikolaev V.N. (1996) Radon concentration changes and mining impacts in deep mines. *Dokl. Akad. Nauk*, **345**(2), 245-248. (In Russ.)

Demezhko D.Yu., Yurkov A.K., Utkin 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). *Dokl. Akad. Nauk*, **445**(2), 883-887. (In Russ.)

Dobrovol'skii I.P. (1991) Theory of tectonic earthquake preparation. Moscow, OIFZ AN SSSR, 217 p. (In Russ.)

Giuliani G.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. *AGU Fall Meet.* December 14–18, 2009. V. 1. San-Francisco, 3.

King C.Y. (1978) Radon emanation on San-Andreas Fault. *Nature*, **5645**, 516-519.

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. *J. Geophys. Res*., **104**(B6), 13073-13082.

King C.Y., King B.S., Evans W.S., Zhang W. (1996) Spatial radon anomalies on active faults in California. *Appl. Geochem.*, **11**, 497-510.

Kopylova G.N., Boldina S.V. (2019) Hydrogeoseismological research on Kamchatka in 1977–2017 year: history and results. *Vulkanol. Seismol.*, **2**, 3-20. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0203-0306201923-20

Kozlova I.A., Yurkov A.K. (2005) The methodic problems of concentration of radon-222 measuring in soil air during monitoring organisation. *Ural. Geofiz. Vestn.*, **1**, 30-34. (In Russ.)

Kozlova I.A., Yurkov A.K. (2016) Reflection consecutive seismic events in the field of radon volume activity. *Ural. Geofiz. Vestn.*, **1**, 35-39. (In Russ.)

Lay T., Williams Q., Garnero E.J. (1998) The core-mantle boundary layer and deep Earth dynamics. *Nature*, **392**, 461-468.

Lomnitz C. (1994) Fundamentals of earthquake prediction. N. Y., John Wiley & Sons, 326 p.

Martinelli G. (1992) Fluidodynamical and chemical features of radon 222 related to total gases: implications on earthquakes prediction topics. *IAEA-TECDOC-726 Isotopic and geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruptions.* Proc. Advisory Group Meet. held. Vienna, 48-62.

Oh Y., Kim G. (2015) A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor. *Sci. Rep.*, **5**, 13084. DOI: 10.1038/srep13084

Pulinets S.A., Davidenko D.V., Lin'kov A.D., Tarasenko T.E. (2012) The multiparametric analysis problem of predictive seismic monitoring data and ways to solve it. There is no alternative to satellite technologies. *Mat-ly Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Base problems of radio-electronic engineering".* Moscow, IMGTU MIREA Publ., 57-65. (In Russ.)

Rulenko O.P., Kuz'min Yu.D. (2015) Increased radon and thoron in the Verkhne-Paratunka hydrothermal system, southern Kamchatka prior to the catastrophic Japanese earthquake of march 11, 2011. *Vulkanol. Seismol.*, **5**, 36-42. (In Russ.)

Tikhonov I.N. (2012) Quiescence period prior to strong earthquakes in the Kuril-Kamchatka zone. *Tikhookean. Geol.*, **31**(1), 88-95. (In Russ.)

Ulomov V.I., Mavashev B.Z. (1967) About precursor of a strong tectonic earthquake. *Dokl. AN SSSR*, **176**(2), 319-323. (In Russ.)

Utkin V.I., Yurkov A.K. (2009) Radon as a "deterministic" indicator of natural and industrial geodynamic processes. *Dokl. Akad. Nauk*, **426**(6), 816-820. (In Russ.)

Wakita H., Nakamura Y., Notsu K., Noguchi M., Asada T. (1980) Radon anomaly: a possible precursor of the 1978 Izu-Oshimakinkai earthquake. *Sci.*, **207**, 882-883.