

ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 550.3

DOI: [10.46698/VNC.2022.53.28.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.53.28.003)

Оригинальная статья

Закономерности проявления аномалий объёмной активности радона перед землетрясениями в различных сейсмоактивных регионах

В. Б. Заалишвили¹, С. В. Бирюлин², И. А. Козлова²,
Д. А. Мельков¹, А. К. Юрков²

¹Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: vzaal@mail.ru;

²Институт геофизики УрО РАН, Россия, 620016, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100, e-mail: akuyurkov@mail.ru

Статья поступила: 11.02.2022, доработана: 01.03.2022, одобрена в печать: 09.03.2022

Резюме: Актуальность работы. Интерес к прогнозу землетрясений по-прежнему актуален и исследования в этом направлении продолжаются. Изучено большое количество природных явлений, предвещающих или вызываемых землетрясениями. В настоящее время таких явлений насчитывается около двухсот. К наиболее чётко проявляющимся и достаточно хорошо исследованным относятся явления, связанные с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород. Известны примеры успешного использования гидрогеодинамических, сейсмологических и радоновых признаков предвестников при краткосрочном прогнозе сейсмических событий. Несмотря на широкий спектр проведенных радоновых исследований, не были выявлены надежные признаки поведения объёмной активности радона, связанные с процессом подготовки сейсмического события. **Цель исследования.** Целью работы является изучение возможности применения особенностей изменения радонового поля (поля объёмной активности почвенного радона) при подготовке тектонического землетрясения в сейсмически активных регионах с отличающейся геодинамической обстановкой. **Методы работы.** Мониторинг радона выполнялся на геофизических полигонах в Южно-Курильском и Кавказском регионах. Измерения выполнялись при принудительной доставке почвенного воздуха к детектору (адвективный режим). **Результаты работы.** Результаты радонового мониторинга на станции Кармадон показывают, что поведение кривой ОАР перед землетрясениями ближней зоны не противоречит закономерностям, установленным для Южно-Курильского региона.

Ключевые слова: землетрясение, краткосрочный прогноз, радоновый мониторинг, магнитуда, Курильские острова, Северный Кавказ.

Для цитирования: 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. 12 (1): 35–50. DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003.

[DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.53.28.003)

Original paper

Anomalies of radon volumetric activity before earthquakes in various seismically active regions

V. B. Zaalishvili¹, S. V. Biryulin², I. A. Kozlova²,
D. A. Melkov¹, A. K. Yurkov²

¹Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: vzaal@mail.ru;

²Institute of Geophysics Ural Branch of RAS, 100 Amundsena Str., Ekaterinburg 620016, Russian Federation, e-mail: akyurkov@mail.ru

Received: 11.02.2022, revised: 01.03.2022, accepted: 09.03.2022

Abstract: Relevance. Interest in earthquake prediction is still relevant and research in this direction continues. A large number of natural phenomena that precede or are caused by earthquakes have been studied. Currently, there are about two hundred such phenomena. The phenomena associated with changes in the stress-strain state of rocks are among the most clearly manifested and fairly well studied. There are examples of successful use of hydrogeodynamic, seismological and radon signs of precursors in the short-term prediction of seismic events. Despite the wide range of radon studies conducted, reliable signs of the behavior of volumeradonactivity associated with the process of preparing a seismic event have not been identified. **Aim.** The aim of the work is to study the possibility of applying the features of the radon field change (the field of volumesoilradon activity) in the preparation of a tectonic earthquake in seismically active regions with different geodynamic conditions. **Methods.** Radon monitoring was carried out at geophysical landfills in the South Kuril and Caucasus regions. Measurements were performed with forced delivery of soil air to the detector (advective mode). **Results.** The results of radon monitoring at the Karmadon station show that the behavior of the VRA curve before earthquakes in the near zone does not contradict the patterns established for the South Kuril region.

Keywords: earthquake, short-term forecast, radon monitoring, magnitude, Kuril Islands, North Caucasus.

For citation: 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 i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (1): 35–50. DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003.

Введение

Интерес к изучению землетрясений носит волнообразный характер. Интенсивность исследований активизируется и соответственно количество публикаций возрастает после очередного катастрофического события, повлекшего за собой человеческие жертвы и материальные потери. Спустя несколько лет или месяцев все успокаивается, проблема отходит на второй план до следующего события. Такая ситуация, в целом оправдана. На протяжении уже почти ста лет проблема прогноза землетрясений, несмотря на усилия большого количества ученых из разных стран, до сих пор не решена. Отсюда скептицизм научного сообщества по поводу возможного решения этого вопроса. Тем не менее, проблема по-прежнему актуальна и ис-

следования в этом направлении продолжают [Toader et al., 2016; Yakut et al., 2017; Fu, Lee, 2018; Fu et al., 2021; Ambrosino et al., 2018; Przylibski et al., 2020; Kawabata et al., 2020; Kumar et al., 2020; Sabbarese et al., 2020; Zhao et al., 2021; Chowdhury et al., 2022], в том числе на основе современных методов машинного обучения [Zmazek et al., 2005; Singh et al., 2017; Tareen et al., 2019; Ambrosino et al., 2020; Rafique et al., 2020; Sahoo, 2020; Haideretal., 2021; Miretal., 2022].

Изучено большое количество природных явлений, предваряющих или вызываемых землетрясениями. В настоящее время таких явлений насчитывается около двухсот. К наиболее чётко проявляющимся и достаточно хорошо исследованным относятся явления, связанные с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород. Известны примеры успешного использования таких предвестников при краткосрочном прогнозе сейсмических событий. Успешно спрогнозировано Хайченское землетрясение 1975 года по совокупности гидрогеодинамических, сейсмологических и радоновых признаков [Fu, Tatsuoka, 1984]. Следует отметить, документально зарегистрированный, среднесрочный прогноз землетрясения Тохоку в 2011 году по анализу слабой сейсмичности [Любушин, 2011], прогноз землетрясения 6 апреля 2009 года в городе Л'Акуила по данным радонового мониторинга [Giuliani et al., 2009].

Наиболее вероятно, что прогноз землетрясения может быть осуществлен только на основании комплексного анализа регистрируемых явлений при мониторинговых наблюдениях. Практически все известные случаи успешного прогноза основывались на результатах сейсмологических, гидрогеодинамических, радоновых исследований и дополнялись результатами ряда других наблюдений. Связь сейсмологических наблюдений с процессом подготовки землетрясений очевидна. С их помощью осуществляется долгосрочный прогноз сейсмической опасности территорий. Разработано и используется довольно много методик применения сейсмологических наблюдений для среднесрочного и краткосрочного прогнозирования землетрясений. В частности, уже упоминавшийся, прогноз землетрясения Тохоку [Любушин, 2013] выполнен на основе оригинальной методики по анализу слабой сейсмичности. Гидрогеодинамический мониторинг непосредственно связан с вариациями уровня столба жидкости в скважинах и колодцах, вызываемыми изменением напряженно-деформированного состояния горных пород в области подготовки землетрясения. Следует отметить вариант гидрогеодинамического мониторинга, разработанного в Институте геофизики УрО РАН на основе измерений движения жидкости по стволу скважины по изменениям температуры в стационарных информативных точках [Юрков и др., 2011]. Эта модификация гидрогеодинамического способа существенно расширила его возможности.

Целью работы является изучение возможности применения особенностей изменения радонового поля (поля объемной активности почвенного радона) при подготовке тектонического землетрясения в сейсмически активных регионах с отличающейся геодинамической обстановкой.

Применение радона в качестве предвестника землетрясений обусловлено тем, что он, являясь промежуточным продуктом распада в урановом ряду, распространен во всех горных породах. За счёт короткого периода полураспада ^{222}Rn (3,82 дня) он не накапливается в поровом пространстве горных пород, что позволяет регистрировать его небольшие вариации, вызываемые изменениями напряженно-деформированного состояния верхней части геологического разреза. Газообразный

радон, образующийся в горных породах, частично остается в кристаллической решетке, частично переходит в поровые жидкости и мигрирует через взаимосвязанные поры посредством диффузии [Ghosh et al., 2009]. Разработанная в Институте геофизики УрО РАН методика проведения мониторинговых наблюдений позволила снизить влияние метеоусловий, увеличить информативный объем горных пород и устранить влияние детектора радона на напряженно-деформированное состояние горных пород в измеряемой точке. Разработанная методика была апробирована при исследовании горных ударов на шахтах СУБРа [Булашевич и др., 1996].

Несмотря на широкий спектр проведенных радоновых исследований, не были выявлены надежные признаки поведения объемной активности радона, связанные с процессом подготовки сейсмического события [Conti et al., 2021]. Это может быть обусловлено также тем, что существуют и радоновые аномалии нетектонического происхождения, которые могут быть поразительно похожи на тектонические, таким образом, по-видимому, только часть всех зарегистрированных предвестников радона реальна в том смысле, что они физически связаны с процессом подготовки надвигающегося землетрясения [Woith, 2015]. Приведенный ниже обзор радоновых исследований освещает существующие точки зрения на информативность радонового предвестника.

В 1988 году Назаров и Неро измеряли концентрации ^{222}Rn в подземных водах, и установили связь концентраций с изменениями напряжения земной коры или повышением напряжения в сейсмически активных зонах. Долгосрочные измерения радона в воде и газе необходимы для понимания изменений концентрации радона в зависимости от сейсмичности. Интерпретация различных параметров, связанных с землетрясениями, является сложной задачей, поскольку землетрясения происходят в разных геологических и тектонических условиях, и характеристики землетрясений отличаются друг от друга. Изменение концентрации радона обусловлено не только тектонической структурой, но и изменением литологии. Перед землетрясением Тохоку в 2011 году в обсерватории Накайдзу на полуострове Идзу было зафиксировано аномальное увеличение концентрации радона. Ришон и др. обнаружили аномальное увеличение содержания почвенного газа радона за 22 дня до землетрясения в Миндоро (M 7,1) [Ye et al., 2015].

Дже Вук Ким и др. исследовали взаимосвязь между концентрацией радона в помещении и землетрясениями на первом этаже Университета Донгук в Кенджу, Республика Корея, в период с февраля 2016 года по январь 2017 года. Измерения фиксировались с помощью детектора RAD 7 каждые 30 минут. В результате выявлены сходные всплескоподобные закономерности между распределением концентрации радона в помещении и землетрясениями: внезапное увеличение концентрации радона в помещении за 1-4 дня до землетрясения, постепенное снижение перед землетрясением и внезапное падение в день землетрясения [Kim et al., 2018].

В Пайхэ Т. Куо и др. наблюдали аномалии радона подземных вод перед землетрясениями M 6,3 Цзяньсянь и M 6,4 в Мейнонге, произошедшими 4 марта 2010 года и 5 февраля 2016 года соответственно. Концентрация радона в подземных водах в обоих случаях снижалась с фонового уровня почти на 30%. Аномалии радона, наблюдаемые в известняковом источнике Пайхэ, подтвердили, что небольшой трещиноватый водоносный горизонт можно использовать в качестве эффективного средства измерения естественной деформации, применяя радон в качестве предвестника землетрясений для предупреждения о землетрясениях на юго-западе Тайваня [Kuo et al., 2018].

Сунарно и др. отслеживали аномалии концентрации радона в камере в течение периода на факультете ядерной инженерии физики, Джокьякарта, Индонезия. Они проанализировали взаимосвязь между изменениями концентрации радона и произошедшим землетрясением. Это изменение произошло за два дня до землетрясения. Наиболее значительное изменение произошло за два дня до землетрясения магнитудой 5,8 в Маланге 19 июля 2018 года. Характер изменения концентрации радона показывает, что, если землетрясение имеет значительную магнитуду и расположено ближе к положению детектора, поэтому концентрация радона объяснит гораздо более значительные изменения. Гипоцентр, эпицентр, магнитуда и расстояние землетрясения от местоположения датчика концентрации радона важны для прогнозирования землетрясений, основанного на изменениях концентрации радона [Firdaus et al., 2020].

Приведенные исследования показывают, что дальное действие радонового предвестника, и время проявления его перед землетрясением изменяются в очень больших пределах.

Объекты и методика исследований

Оба региона, в которых проводились исследования (Южные Курилы, Северный Кавказ), являются сейсмоактивными и характеризуются различными геолого-тектоническими условиями. Многолетний радоновый мониторинг параллельно с мониторингом землетрясений выполнялся в Южно-Курильске и Кармадоне.

Курило-Камчатская зона Тихого океана – один из наиболее тектонически активных районов Земли, отличающийся высокой современной сейсмической и вулканической активностью и привлекающий в связи с этим внимание специалистов разных направлений наук о Земле. Район характеризуется наличием зоны субдукции.

Выполненный ретроспективный анализ результатов непрерывного восьмилетнего мониторинга ОАР на Южно-Курильском геодинамическом полигоне, позволил получить закономерности поведения объемной активности радона при подготовке землетрясений. В результате проведенных исследований были получены ответы на некоторые вопросы. Выявлены временные границы проявления радонового предвестника перед событием, его «дальное действие», влияние особенностей геологического строения исследуемого района. Учитывались опыт и результаты радонового мониторинга при исследовании горных ударов, двухлетний мониторинг на восьми станциях Северного Тянь-Шаня. Физической основой интерпретации данных служило предположение о наличии деформаций изгиба при подготовке горных ударов и землетрясений [Уткин, Юрков, 2009]. Практически все варианты проявления тектонических движений на земной поверхности, а также в горных выработках [Уткин, Юрков, 2009], приводят к деформациям изгиба. С наличием таких деформаций связано образование зон сжатия, растяжения и нейтральной зоны. Соответственно и поведение радона (объемной активности радона – ОАР) будет различаться.

На основе разработанной методики [Козлова и др., 2021] было выделено 164 аномалии ОАР. 148 из рассмотренных аномалий предшествовали землетрясениям, произошедшим в радиусе 500 километров от станции наблюдения (рис. 1).

Эпицентральная зона проявления предвестника определялась на основании деформационной модели [Добровольский, 1991]. Согласно модели, радиус проявления деформаций связан с соотношением магнитуды землетрясения к логарифму расстояния. Если результат соотношения (K) превышает 2,5, то процесс подготовки



Рис. 1. Тектонические землетрясения в поле значений ОАР. Ромбами обозначены события, отразившиеся в кривых аномалий ОАР. Точками обозначены события, которые не отразились в кривых аномалий ОАР. Жёлтая прямая линия соответствует $K=2,5$; прерывистая прямая линия соответствует отношению $K=2$ [Козлова и др., 2021] /

Fig. 1. Tectonic earthquakes in the field of VRA values. The rhombuses indicate the events reflected in the curves of the anomalies of the VRA. The dots indicate events that were not reflected in the curves of the anomalies of the VRA. The yellow straight line corresponds to $K=2.5$; the broken straight line corresponds to the ratio $K=2$ [Kozlova et al., 2021]

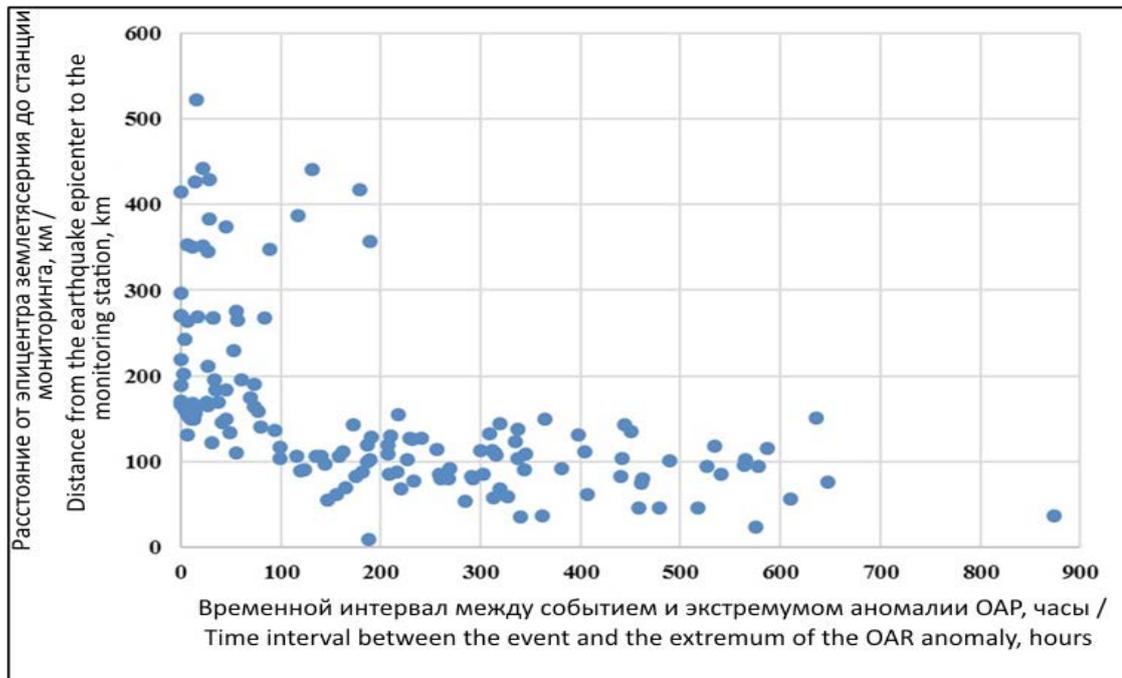


Рис. 2. График времени проявления событий с $K \geq 2$ относительно экстремума предшествующей аномалии [Бирюлин и др., 2021] /

Fig. 1. Time graph of the events occurrence with $K \geq 2$ relative to extremum of preceding anomaly [Biryulin et al., 2021]

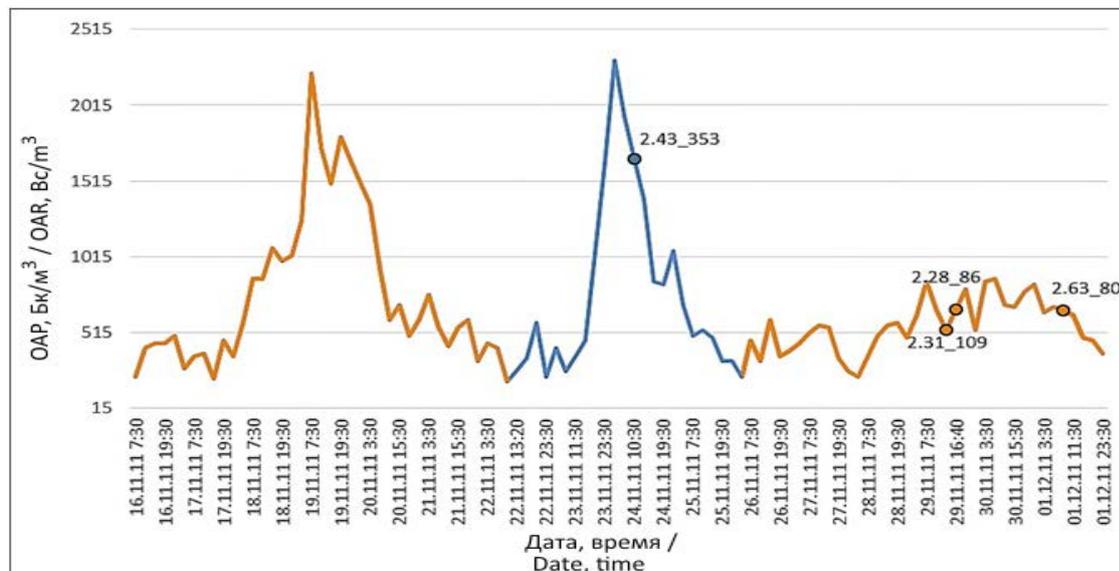


Рис. 3. Наблюдаемые значения объёмной активности радона (ОАР) и произошедшие землетрясения (показаны точками). Подписи точек: первое число – отношение магнитуды землетрясения к логарифму расстояния от эпицентра до станции мониторинга; второе число – расстояние от эпицентра до станции мониторинга [Бирюлин и др., 2021] / Fig. 3. The observed values of the volume radon activity (VRA) and the earthquakes that occurred (shown by dots). Point signatures: the first number is the ratio of earthquake magnitude to distance logarithm from epicenter to the monitoring station; the second number is the distance from the epicenter to the monitoring station [Biryulin et al., 2021]

наблюдается в точке мониторинга. Для условий Южных Курил, на основании экспериментально полученных данных, величина K может быть скорректирована до 2,0 (рис. 1).

При сравнении экспериментальных результатов и результатов сопоставления случайных выборок интервалов между аномалиями ОАР и случайных интервалов между событиями, сгенерированных по закону распределения Пуассона, установлено, что между аномалиями ОАР и землетрясениями существует причинно-следственная связь [Бирюлин и др., 2021]. На большом фактическом материале (рис. 2) показано, что аномалии ОАР предвещают землетрясения, которые происходят только после экстремума аномалии. Рисунок 2 также показывает, что радоновый предвестник относится к краткосрочным для недалеких событий, а для дальних событий его можно отнести к оперативным.

На рисунке 3 приведён пример поведения ОАР перед тектоническим землетрясением. Разработанная методика сопоставления аномалий ОАР и землетрясений показывает, что не всегда землетрясение, следующее непосредственно за аномалией, ответственно за нее.

Рисунок 3 отображает две ярко выраженные радоновые аномалии и четыре последующих события. Оранжевый участок кривой ОАР в начале графика связан с подготовкой ближних событий (на расстоянии 80, 86 и 109 километров от станции мониторинга). Синий участок кривой относится к подготовке дальнего землетрясения на расстоянии 353 километра.

События, вероятно связанные с зоной сжатия или «ближней зоной» и с зоной растяжения «дальней зоной» отражаются на разных участках кривой ОАР (рис. 4).

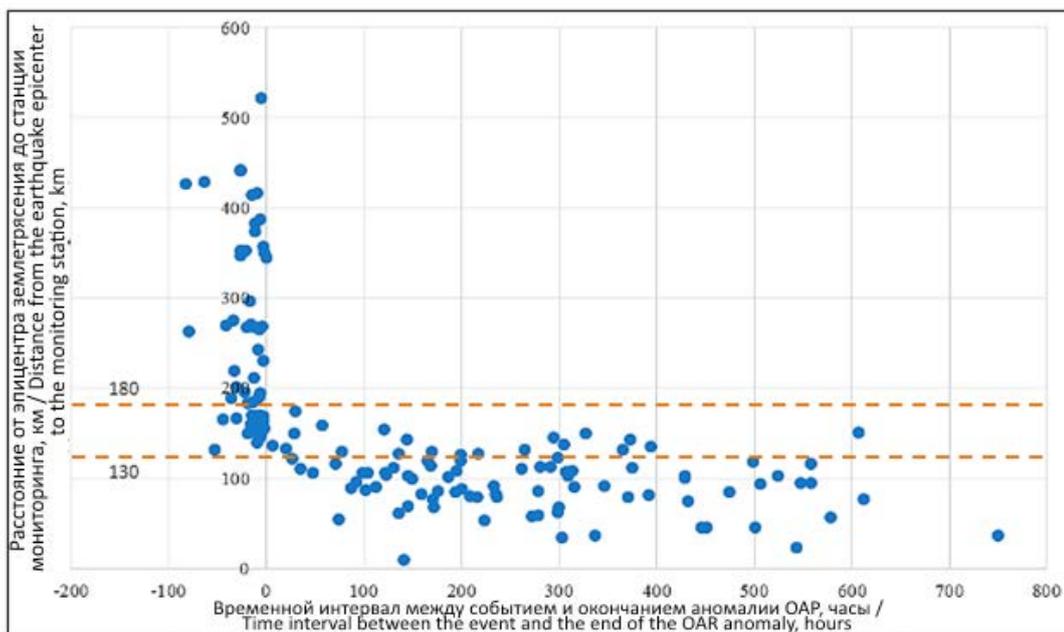


Рис. 4. Зависимость расстояния между станцией мониторинга и эпицентром события от интервала между окончанием аномалии радона и землетрясением для $K \geq 2$ [Бирюлин и др., 2021] / Fig. 4. The dependence of distance between monitoring station and event epicenter on the interval between radon anomaly end and earthquake for $K \geq 2$ [Biryulin et al., 2021]

Землетрясения дальней зоны на кривой ОАР отмечаются на нисходящей ветви аномалии ОАР. События ближней зоны отмечаются после выхода аномалии ОАР на фоновые значения. Временной интервал проявления событий дальней зоны находится в пределах 7 суток после экстремума аномалии. Время задержки событий ближней зоны составляет до 24 дней после выхода аномалии на фоновый уровень. Для условий Южных Курил размеры ближней зоны не превышают 130 километров; дальняя зона начинается с расстояния 180 километров. Между ними, по аналогии с горными ударами, находится промежуточная зона.

Исходя из орографии строения Кавказской горной системы, можно предположить ее аналогию с тектоническим положением Северного Тянь-Шаня, хребты которого надвигаются на Туранскую плиту и испытывают деформации изгиба [Уткин, 2006]. Для Северного Кавказа можно предположить наличие надвига системы хребтов на Скифскую плиту, что может приводить к возникновению изгибных деформаций. Имеющиеся геологические и геофизические данные подтверждают подвиг Скифской плиты под кристаллический массив горного сооружения [Шемпелев и др., 2015; Январев, 2020; Чотчаев и др., 2021]. Наибольшую опасность в силу своей близости к территории г. Владикавказ представляет Владикавказский разлом, сейсмический потенциал которого оценивается $M=7,1$ [Рогожин и др., 2001]. Владикавказский глубинный разлом, как единая структура 1-го порядка, выделяется по геофизическим данным [Письменный и др., 2006]. Приведенная краткая геологическая характеристика района расположения станций радонового мониторинга на Северном Кавказе не исключает наличия деформаций изгиба, что дает основание применить при интерпретации ранее установленные закономерности между аномалиями ОАР и землетрясениями, полученные для зоны субдукции.

Результаты работы и их обсуждение

Мониторинговые наблюдения в районе Северного Кавказа были организованы на станции Владикавказ на территории геофизического Института с 2017 года и на станции Кармадон с 2018 года. В процессе выполнения мониторинга установлены следующие отклонения условий измерений от идеальных. В частности, на станции Владикавказ, расположенной практически в центре города, существует высокий радоновый фон, вызываемый техногенными помехами. Высокий фон затрудняет выделение аномалий ОАР, что затрудняет интерпретацию. На станции Кармадон условия измерений позволяют получать качественные данные, но, в силу высокогорных условий только в летне-осеннее время. Поэтому анализ результатов радонового мониторинга основан на данных станции Кармадон. Для получения количественных величин по дальнодействию, времени задержки по отношению к экстремуму аномалии, данных, в силу короткого времени мониторинга и количества землетрясений, недостаточно. Рассмотрим конкретные примеры. На рисунке 5 приведен фрагмент кривой радонового мониторинга 2018 года на станции Кармадон.

На рисунке 5 чётко выделяется аномалия ОАР с экстремумом 25.10.18 и показано землетрясение на расстоянии 82 километров от станции мониторинга. К в данном случае равно 2,61. Событие отразилось после окончания аномалии, что характерно для событий ближней зоны и расстояние до эпицентра это подтверждает.

На рисунке 6 показано землетрясение с $K=2,55$, которое произошло на расстоянии 53 км от точки мониторинга (что соответствует ближней зоне). Землетрясению

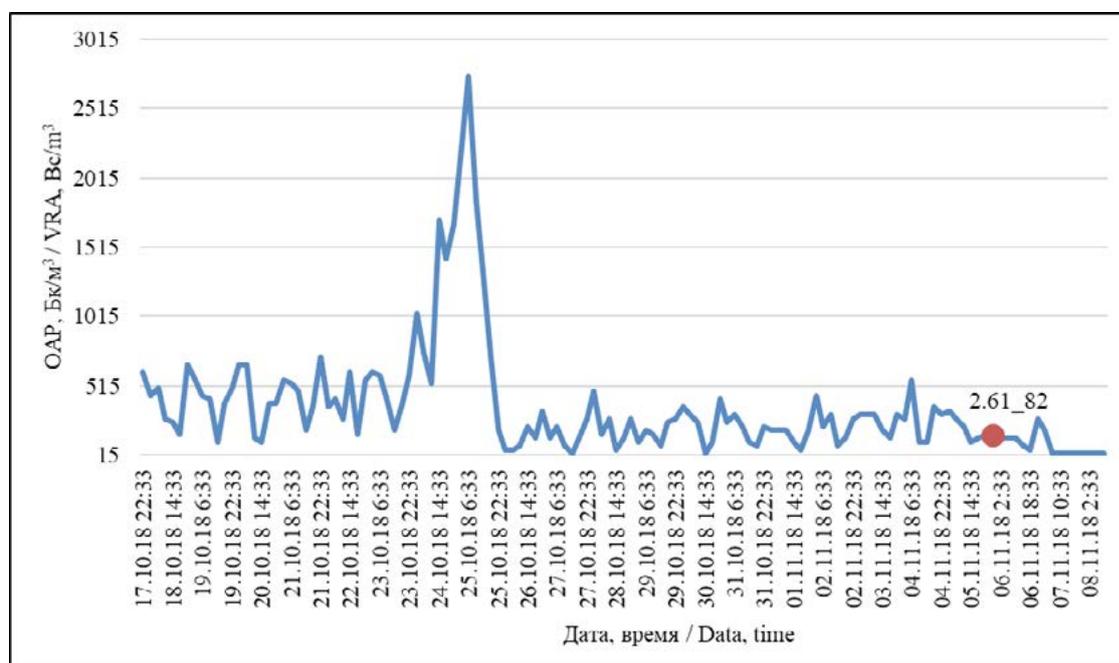


Рис. 5. Наблюдаемые значения объёмной активности радона (ОАР) и произошедшие землетрясения (показаны точками). Подписи точек: первое число – отношение магнитуды землетрясения к логарифму расстояния от эпицентра до станции мониторинга; второе число – расстояние от эпицентра до станции мониторинга /

Fig. 5. The observed values of the volume radon activity (VRA) and the earthquakes that occurred (shown by dots). Point signatures: the first number is the ratio of earthquake magnitude to distance logarithm from epicenter to the monitoring station; the second number is the distance from the epicenter to the monitoring station

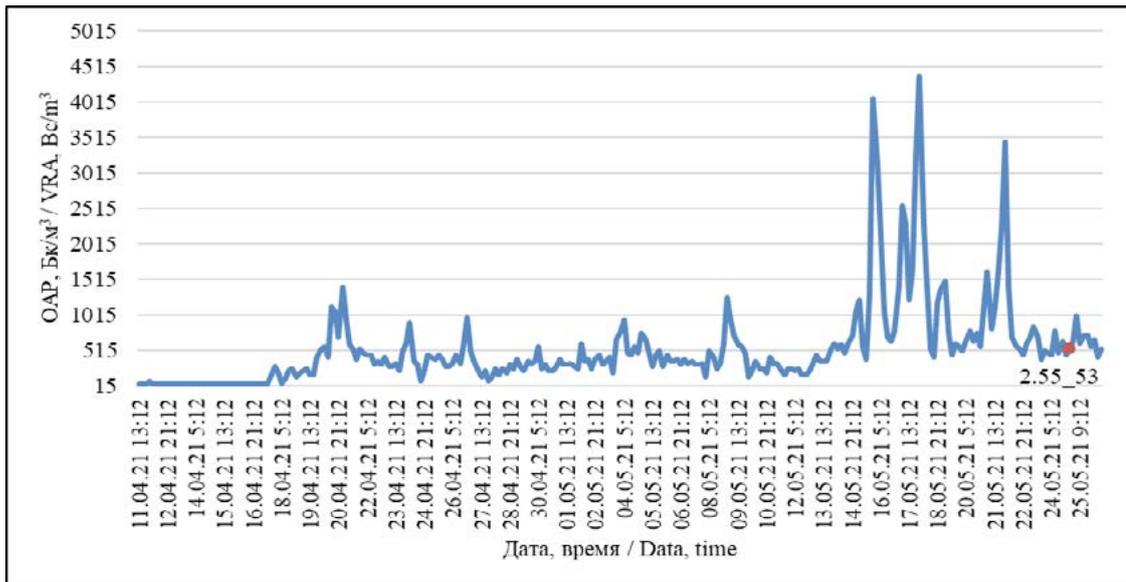


Рис. 6. Наблюдаемые значения объёмной активности радона (ОАР) и произошедшие землетрясения (показаны точками). Подписи точек: первое число – отношение магнитуды землетрясения к логарифму расстояния от эпицентра до станции мониторинга; второе число – расстояние от эпицентра до станции мониторинга /

Fig. 6. The observed values of the volume radon activity (VRA) and the earthquakes that occurred (shown by dots). Point signatures: the first number is the ratio of earthquake magnitude to distance logarithm from epicenter to the monitoring station; the second number is the distance from the epicenter to the monitoring station.

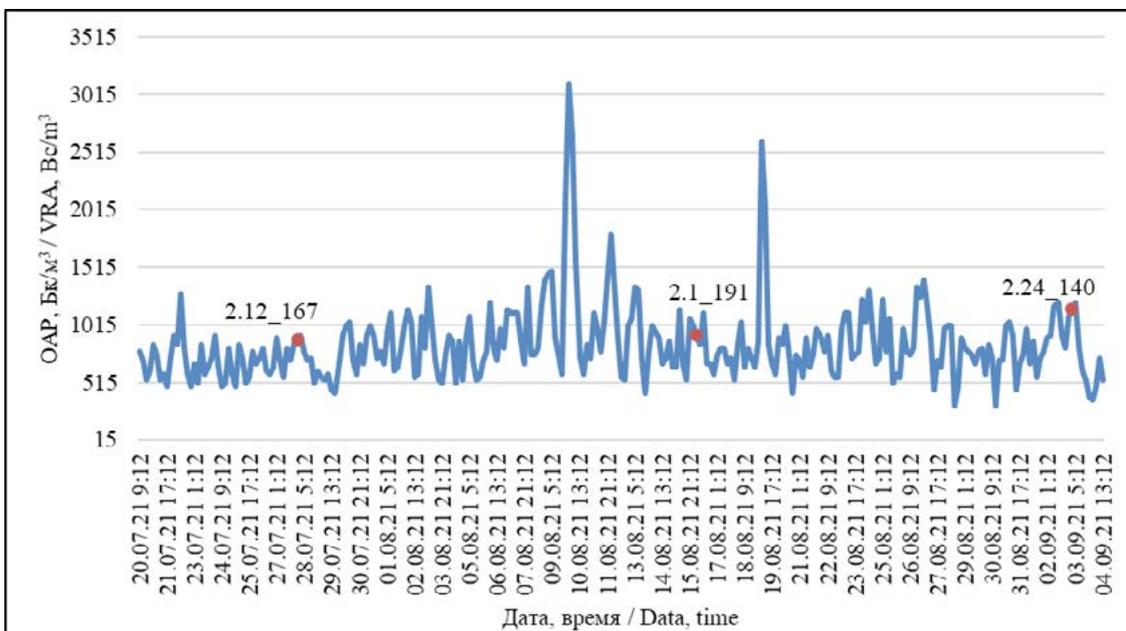


Рис. 7. Наблюдаемые значения объёмной активности радона (ОАР) и произошедшие землетрясения (показаны точками). Подписи точек: первое число – отношение магнитуды землетрясения к логарифму расстояния от эпицентра до станции мониторинга; второе число – расстояние от эпицентра до станции мониторинга /

Fig. 7. The observed values of the volume radon activity (VRA) and the earthquakes that occurred (shown by dots). Point signatures: the first number is the ratio of earthquake magnitude to distance logarithm from epicenter to the monitoring station; the second number is the distance from the epicenter to the monitoring station.

предшествовала продолжительная аномалия радона, характерной особенностью которой является наличие трёх пиковых значений, что является особенностью проявления аномалии ОАР для станции Кармадон.

На рисунке 7 две аномалии и три землетрясения. Первому землетрясению с $K=2,12$ радоновая аномалия не предшествовала. Это может быть связано с неидеальными условиями измерений, так как амплитуда аномалии не соответствует методике выделения. Процесс подготовки землетрясения с $K=2,1$ сопровождала аномалия, экстремум которой проявился 10.08.21. Данное событие появилось ближе к концу аномалии, и его можно отнести к пограничной зоне между «промежуточной» и «дальней». Землетрясению с $K=2,24$ соответствует аномалия, которая достигла максимальных значений 19.08.21. Это событие проявилось на фоновых значениях после окончания аномалии, и может относиться к пограничной зоне, между «ближней» и «промежуточной».

Каждый из рассмотренных примеров сопоставления аномалий ОАР и последующих землетрясений в условиях Северного Кавказа, показывает, что разработанная ранее методика, нашедшая успешное применение в условиях Южных Курил, может быть полезна и при иных геолого-тектонических условиях.

Выводы

Результаты радонового мониторинга на станции Кармадон показывают, что поведение кривой ОАР перед землетрясениями ближней зоны не противоречит закономерностям, установленным для Южно-Курильского региона.

За время радонового мониторинга на станции Кармадон не наблюдалось событий, чётко относимых к дальней зоне. Все отмеченные события фактически можно отнести к ближней и промежуточной зонам.

Подтверждение ранее выявленных закономерностей для событий ближней зоны может свидетельствовать о достоверности полученных характеристик поведения ОАР при подготовке землетрясений и о применимости их для интерпретации данных радонового мониторинга в регионах с геолого-тектоническими условиями отличными от Южных Курил. Отмечается меньшая продолжительность аномалий ОАР для условий Кармадона по сравнению с Южными Курилами.

Для получения количественных характеристик времени проявления землетрясений после экстремума аномалии ОАР и размеров ближней и дальней зон необходимо дальнейшее проведение мониторинга.

Литература

1. Бирюлин С. В., Козлова И. А., Юрков А. К. Связь между аномалиями объемной активности радона и процессом подготовки землетрясений (на примере Южных Курил). // Известия Уральского государственного горного университета. – 2021. – № 4 (64). – С. 62-70. DOI:10.21440/2307-2091-2021-4-62-70
2. Булашевич Ю. П., Уткин В. И., Юрков А. К., Николаев В. Н. Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах. // Доклады РАН. – 1996. – Т. 345. № 2. – С. 245-248.
3. Добровольский И. П. Теория подготовки тектонического землетрясения. – М.: ОИФЗ АН СССР, 1991. – 217 с.
4. Козлова И. А., Бирюлин С. В., Юрков А. К. Поведение аномалий объемной активности почвенного радона во время подготовки тектонических землетрясений. // Литосфера. – 2021. – № 5. – С. 724-733. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-5-724-733

5. Любушин А. А. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсам. // Геофизические процессы и биосфера. – 2011. – Т. 10. № 1. – С. 9-35.
6. Письменный А. Н., Горбачев С. А., Вертий С. Н. и др. ГДП-200 в пределах восточного сегмента зоны Главного хребта Центрального Кавказа (листы К-38-IX, XV). – Ессентуки: ФГУПП «Кавказгеолсъемка», 2006.
7. Рогожин Е. А., Рейснер Г. И., Иогансон Л. И. Оценка сейсмического потенциала Большого Кавказа и Апеннин независимыми методами. Геофизика и математика XXI. Современные математические и геологические модели в задачах прикладной геофизики. – М.: ОИФЗ РАН, 2001. – С. 279-299.
8. Уткин В. И., Мамыров Э., Кан М. В., Кривашеев С. В., Юрков А. К., Косякин И. И., Шишканов А. Н. Мониторинг радона при изучении процесса подготовки тектонического землетрясения на Северном Тянь-Шане. // Физика Земли. – 2006. – № 9. – С. 61-70.
9. Уткин В. И., Юрков А. К. Прогноз землетрясений. Есть ли выход из тупика? // Пятые научные чтения Ю. П. Булашевича. Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей. – 2009. – С. 492-499.
10. Чотчаев Х. О., Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11 (1). – С. 81-94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007.
11. Шемпелев А. Г., Кухмазов С. У., Чотчаев Х. О., Невский Л. Н. Структура Большого Кавказа – результат пологого надвига земной коры Скифской плиты на консолидированную корумикроплит Южного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2015. – Т. 5 (4). – С. 129-146. DOI: 10.23671/VNC.2015.4.55308
12. Юрков А. К., Демежко Д. Ю., Уткин В. И. Об информативности температурного мониторинга в скважинах при изучении тектонического режима. // Уральский геофизический вестник. – 2011. – № 1 (18). – С. 45-52.
13. Январёв Г. С. Новейшая структура и геодинамика Западного Предкавказья (на основе дешифрирования космоснимков). // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10 (4). – С. 30-40. DOI: 10.46698/VNC.2020.55.16.002
14. Ambrosino F., De Cesare W., Roca V., Sabbarese C., & Iop. Mathematical and geophysical methods for searching anomalies of the Radon signal related to earthquakes. // Journal of Physics Conference Series [9th young researcher meeting]. 9th Young Researcher Meeting, (2018, Jul 10-13), Univ Salerno, Salerno, Italy. – 2018.
15. Ambrosino F., Sabbarese C., Roca V., Giudicepietro F., Chiodini G. Analysis of 7-years Radon time series at Campi Flegrei area (Naples, Italy) using artificial neural network method. // Applied Radiation and Isotopes. – 2020. – Vol. 163. – Article 109239. DOI: 10.1016/j.apradiso.2020.109239
16. Chowdhury S., Deb A., Barman C., Nurujjaman M., & Bora D.K. Simultaneous monitoring of soil Rn-222 in the Eastern Himalayas and the geothermal region of eastern India: an earthquake precursor. // Natural Hazards. – 2022. DOI: 10.1007/s11069-022-05235-9
17. Conti L., Picozza P., & Sotgiu A. A Critical Review of Ground Based Observations of Earthquake Precursors. // Frontiers in Earth Science. – 2021. – No. 9. – Article 676766. DOI: 10.3389/feart.2021.676766
18. Firdaus H.L., Luckyarno Y.F., Waruwu M.M., Wijaya R. Detection system for deterministic earthquake prediction based on radon concentration changes in Indonesia. // Journal of Engineering Science and Technology. – 2020. – Vol. 15 (3). – pp. 1787-1798.
19. Fu S., Tatsuoka F. Soil liquefaction during Haicheng and Tangshan earthquakes in China: a review. // Soils and Foundations. – 1984. – pp. 11-29.
20. Fu C.C., Lee L.C. Continuous Monitoring of Fluid and Gas Geochemistry for Seismic Study in Taiwan. // Pre-Earthquake Processes: a Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies. – 2018. – Vol. 234. – pp. 199-218.

21. Fu C. C., Lai C. W., Yang T. F., Hilton D. R., Chen C. H., Walia V., Lee L. C. An Automatic System for Continuous Monitoring and Sampling of Groundwater Geochemistry in Earthquake-Prone Regions of SW Taiwan. // *Frontiers in Earth Science*. – 2021. – No. 9. – Article 635913. DOI: 10.3389/feart.2021.635913.
22. Ghosh D., Deb A., Sengupta R. Anomalous radon emission as precursor of earthquake. // *J. Appl. Geophys.* – 2009. – Vol. 69 (2). – pp. 67-81. DOI:10.1016/j.jappgeo.2009.06.001
23. Giuliani G. G., Totani G., Eusani G., Totani F., Giuliani R. Radon observations by gamma detectors PM-4 and PM-2 during the seismic period (January-April 2009) in L'Aquila Basin. // *Abstr. AGU Fall Meeting, December 14-18, 2009. – San-Francisco. – 2009. – Vol. 1. – pp. 3.*
24. Haider T., Barkat A., Hayat U., Ali A., Awais M., Alam A., Shah M.A. Identification of radon anomalies induced by earthquake activity using intelligent systems. // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2021. – Vol. 222. – Article 106709.
25. Rafique M., Tareen A.D. K., Mir A.A., Nadeem M.S. A., Asim K.M., & Kearfott K. J. Delegated Regressor, A Robust Approach for Automated Anomaly Detection in the Soil Radon Time Series Data. // *Scientific Reports*. – 2020. – Vol. 10 (1). – Article 3004. DOI: 10.1038/s41598-020-59881-9
26. Kawabata K., Sato T., Takahashi H.A., Tsunomori F., Hosono T., Takahashi M., Kitamura Y. Changes in groundwater radon concentrations caused by the 2016 Kumamoto earthquake. // *Journal of Hydrology*. – 2020. – Vol. 584. – Article 124712. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124712
27. Kim J.W., Joo H.Y., Kim R., Moon J.H. Investigation of the relationship between earthquakes and indoor radon concentrations at a building in Gyeongju, Korea. // *Nucl. Eng. Technol.* – 2018. – Vol. 50 (3). – pp. 512-518. DOI: 10.1016/j.net.2017.12.010
28. Kumar A., Walia V., Lin S.J., & Fu C.C. Real-time database for geochemical earthquake precursory research. // *Natural Hazards*. – 2020. – Vol. 104 (2). – pp. 1359-1369. DOI: 10.1007/s11069-020-04220-4
29. Kuo T., Chen W., Ho C. Anomalous decrease in groundwater radon before 2016 Mw 6.4 Meinong earthquake and its application in Taiwan. // *Appl. Radiat. Isot.* – 2018. – Vol. 136. – pp. 68-72 DOI: 10.1016/j.apradiso.2018.02.015.
30. Mir A.A., Celebi F. V., Rafique M., Hussain L., Almasoud A. S., Alajmi M., Hilal A. M. An Improved Imputation Method for Accurate Prediction of Imputed Dataset Based Radon Time Series. // *Ieee Access*. – 2022. – Vol. 10. – pp. 20590-20601. DOI: 10.1109/access.2022.3151892
31. Przylibski T.A., Kaczorowski M., Fijalkowska-Lichwa L., Kasza D., Zdunek R., & Wronowski R. Testing of Rn-222 application for recognizing tectonic events observed on water-tube tiltmeters in underground Geodynamic Laboratory of Space Research Centre at Ksiaz (the Sudetes, SW Poland). // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2020. – Vol. 163. – Article 108967. DOI: 10.1016/j.apradiso.2019.108967.
32. Sabbarese C., Ambrosino F., Chiodini G., Giudicepietro F., Macedonio G., Caliro S., Roca V. Continuous radon monitoring during seven years of volcanic unrest at Campi Flegrei caldera (Italy). // *Scientific Reports*. – 2020. – Vol. 10 (1). – Article 9551. DOI: 10.1038/s41598-020-66590-w
33. Sahoo S.K., Katlamudi M., Barman C., & Lakshmi G.U. Identification of earthquake precursors in soil radon-222 data of Kutch, Gujarat, India using empirical mode decomposition based Hilbert Huang Transform. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2020. – Vol. 222. – Article 106353. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106353
34. Singh S., Jaishi H.P., Tiwari R.P., & Tiwari R.C. Time Series Analysis of Soil Radon Data Using Multiple Linear Regression and Artificial Neural Network in Seismic Precursory Studies. // *Pure and Applied Geophysics*. – 2017. – Vol. 174 (7). – pp. 2793-2802. DOI: 10.1007/s00024-017-1556-4
35. Tareen A.D. K., Asim K.M., Kearfott K.J., Rafique M., Nadeem M.S. A., Iqbal T., Rahman S.U. Automated anomalous behaviour detection in soil radon gas prior to earthquakes using computational intelligence techniques. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2019. – Vol. 203. – pp. 48-54. DOI:10.1016/j.jenvrad.2019.03.003

36. Toader V.E., Moldovan I.A., Marmureanu A., & Ionescu C. Detection of events in a multidisciplinary network monitoring vrancea area. // *Romanian Journal of Physics*. – 2016. – Vol. 61 (7-8). – pp. 1437-1449.
37. Woith H. Radon earthquake precursor: A short review. // *European Physical Journal-Special Topics*. – 2015. – Vol. 224 (4). – pp. 611-627. DOI: 10.1140/epjst/e2015-02395-9
38. Yakut H., Tabar E., Yildirim E., Zenginerler Z., Ertugral F., & Demirci N. Soil gas radon measurement around fault lines on the western section of the North Anatolian fault zone in Turkey. // *Radiation Protection Dosimetry*. – 2017. – Vol. 173 (4). – pp. 405-413. DOI: 10.1093/rpd/ncw009.
39. Ye Q., Singh R. P., He A., Ji S., Liu C. Characteristic behavior of water radon associated with Wenchuan and Lushan earthquakes along Longmenshan fault. // *Radiat. Meas.* – 2015. – Vol. 76. – pp. 44-53. DOI: 10.1016/j. radmeas. 2015.04.001.
40. Zhao Y. X., Liu Z. F., Li Y., Hu L., Chen Z., Sun F. X., & Lu C. A case study of 10 years groundwater radon monitoring along the eastern margin of the Tibetan Plateau and in its adjacent regions: Implications for earthquake surveillance. // *Applied Geochemistry*. – 2021. – Vol. 131. – Article 105014. DOI: 10.1016/j. apgeochem. 2021.105014
41. Zmazek B., Zivcic M., Todorovski L., Dzeroski S., Vaupotic J., Kobal I. Radon in soil gas: How to identify anomalies caused by earthquakes. // *Applied Geochemistry*. – 2005. – Vol. 20 (6). – pp. 1106-1119. DOI: 10.1016/j. apgeochem. 2005.01.014

References

1. Biryulin S.V., Kozlova I.A., Yurkov A.K. relationship between anomalies of radon volume activity and the process of earthquake preparation (through the example of the Southern Kuril Islands). *News of the Ural State Mining University*. 2021. Vol. 4 (64). pp. 62-70. DOI: 10.21440/2307-2091-2021-4-62-70 (In Russ.)
2. Bulashevich Y.P., Utkin V.I., Yurkov A.K., Nikolaev V.N. Changes in radon concentration due to mining impacts in deep mines. *RAS Reports*. 1996. Vol. 345. No. 2. pp. 245-248. (In Russ.)
3. Dobrovolsky I.P. Theory of preparation of a tectonic earthquake. Moscow: OIFZ of the USSR Academy of Sciences. 1991. 217 p. (In Russ.)
4. Kozlova I.A., Biryulin S. V., Yurkov A. K. Occurrence of anomalies in soil radon volume activity before tectonic earthquakes. *Lithosphere (Russia)*. 2021. Vol. 21 (5). pp. 724-733. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-5-724-733 (In Russ.)
5. Lyubushin A.A. Seismic disaster in Japan on March 11, 2011. Long-term forecast for low-frequency microseisms. *Geophysical processes and biosphere*. 2011. Vol. 10. No. 1. pp. 9-35. (In Russ.)
6. Pismennyj A.N., Gorbachev S.A., Vertij S.N. et al. GDP200 within the eastern segment of the zone of the Main Ridge of the Central Caucasus (sheets K-38-IX, XV). Essentuki: FGUGP "Kavkazgeolsemka", 2006. (In Russ.)
7. Rogozhin E.A., Rejsner G.I., Ioganson L.I. Assessment of the seismic potential of the Greater Caucasus and the Apennines by independent methods. *Geophysics and Mathematics XXI. Modern mathematical and geological models in the problems of applied geophysics*. Moscow: OIFZ RAS, 2001. pp. 279-299. (In Russ.)
8. Utkin V.I., Mamyrov E., Kan M.V., Krivashev S.V., Yurkov A.K., Kosyakin I.I., Shishkanov A.N. Radon monitoring during the study of the preparation process of a tectonic earthquake in the Northern Tien Shan. *Earth Physics*. 2006. No. 9. pp. 61-70. (In Russ.)
9. Utkin V.I., Yurkov A. K. Earthquake forecast. Is there a way out of the impasse? The fifth scientific readings of Y.P. Bulashevich. *Geodynamics. Deep structure. The thermal field of the Earth. Interpretation of geophysical fields*. 2009. pp. 492-499. (In Russ.)
10. Chotchaev Kh. O., Burdzieva O. G., Zaalishvili V. B. Zoning of high mountainous areas by geoecological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 81-94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007. (in Russ.)
11. Shempelev A.G., S.U. Khuhmazov, H.O. Chotchaev, L.N. Nevski Structure of the

Large Caucasus – the result of the gently sloping thrust of the Scythian plate Earth's crust on the consolidated crust of the Transcaucasian micro-plates. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2015. Vol. 5. No. 4. pp. 129-146. DOI: 10.23671/VNC.2015.4.55308 (in Russ.)

12. Yurkov A.K., Demezhko D. YU., Utkin V.I. On the informativeness of temperature monitoring in wells in the study of the tectonic regime. *Ural geophysical bulletin*. 2011. Vol. 1 (18). pp. 45-52. (In Russ.)

13. Yanvarev G.S. Latest structure and geodynamics of Western Caucasus (based on decoding of satellite images). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 30-40. DOI: 10.46698/VNC.2020.55.16.002. (in Russ.)

14. Ambrosino F., De Cesare W., Roca V., Sabbarese C., & Iop. Mathematical and geophysical methods for searching anomalies of the Radon signal related to earthquakes. *Journal of Physics Conference Series* [9th young researcher meeting]. 9th Young Researcher Meeting, (2018, Jul 10-13), Univ Salerno, Salerno, Italy. 2018.

15. Ambrosino F., Sabbarese C., Roca V., Giudicepietro F., Chiodini G. Analysis of 7-years Radon time series at Campi Flegrei area (Naples, Italy) using artificial neural network method. *Applied Radiation and Isotopes*. 2020. Vol. 163. Article 109239. DOI: 10.1016/j.apradiso.2020.109239

16. Chowdhury S., Deb A., Barman C., Nurujjaman M., & Bora D.K. Simultaneous monitoring of soil Rn-222 in the Eastern Himalayas and the geothermal region of eastern India: an earthquake precursor. *Natural Hazards*. 2022. DOI: 10.1007/s11069-022-05235-9

17. Conti L., Picozza P., & Sotgiu A. A Critical Review of Ground Based Observations of Earthquake Precursors. *Frontiers in Earth Science*. 2021. No. 9. Article 676766. DOI: 10.3389/feart.2021.676766

18. Firdaus H.L., Luckyarno Y.F., Waruwu M.M., Wijaya R. Detection system for deterministic earthquake prediction based on radon concentration changes in Indonesia. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2020. Vol. 15 (3). pp. 1787-1798.

19. Fu S., Tatsuoka F. Soil liquefaction during Haicheng and Tangshan earthquakes in China: a review. *Soils and Foundations*. 1984. pp. 11-29.

20. Fu C.C., Lee L.C. Continuous Monitoring of Fluid and Gas Geochemistry for Seismic Study in Taiwan. *Pre-Earthquake Processes: a Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*. 2018. Vol. 234. – pp. 199-218.

21. Fu C.C., Lai C.W., Yang T.F., Hilton D.R., Chen C.H., Walia V., Lee L.C. An Automatic System for Continuous Monitoring and Sampling of Groundwater Geochemistry in Earthquake-Prone Regions of SW Taiwan. *Frontiers in Earth Science*. 2021. No. 9. Article 635913. DOI: 10.3389/feart.2021.635913.

22. Ghosh D., Deb A., Sengupta R. Anomalous radon emission as precursor of earthquake. *J. Appl. Geophys.* 2009. Vol. 69 (2). pp. 67-81. DOI:10.1016/j.jappgeo.2009.06.001

23. Giuliani G.G., Totani G., Eusani G., Totani F., Giuliani R. Radon observations by gamma detectors PM-4 and PM-2 during the seismic period (January-April 2009) in L'Aquila Basin. *Abstr. AGU Fall Meeting, December 14-18, 2009. San-Francisco. 2009. Vol. 1. pp. 3.*

24. Haider T., Barkat A., Hayat U., Ali A., Awais M., Alam A., Shah M.A. Identification of radon anomalies induced by earthquake activity using intelligent systems. *Journal of Geochemical Exploration*. 2021. Vol. 222. Article 106709.

25. Rafique M., Tareen A.D. K., Mir A.A., Nadeem M.S. A., Asim K.M., & Kearfott K. J. Delegated Regressor, A Robust Approach for Automated Anomaly Detection in the Soil Radon Time Series Data. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10 (1). Article 3004. DOI: 10.1038/s41598-020-59881-9

26. Kawabata K., Sato T., Takahashi H.A., Tsunomori F., Hosono T., Takahashi M., Kitamura Y. Changes in groundwater radon concentrations caused by the 2016 Kumamoto earthquake. *Journal of Hydrology*. 2020. Vol. 584. Article 124712. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124712

27. Kim J.W., Joo H.Y., Kim R., Moon J.H. Investigation of the relationship between

earthquakes and indoor radon concentrations at a building in Gyeongju, Korea. *Nucl. Eng. Technol.* 2018. Vol. 50 (3). pp. 512-518. DOI: 10.1016/j.net.2017.12.010

28. Kumar A., Walia V., Lin S.J., & Fu C.C. Real-time database for geochemical earthquake precursory research. *Natural Hazards*. 2020. Vol. 104 (2). pp. 1359-1369. DOI: 10.1007/s11069-020-04220-4

29. Kuo T., Chen W., Ho C. Anomalous decrease in groundwater radon before 2016 Mw 6.4 Meinong earthquake and its application in Taiwan. *Appl. Radiat. Isot.* 2018. Vol. 136. pp. 68-72 DOI: 10.1016/j.apradiso.2018.02.015

30. Mir A.A., Celebi F.V., Rafique M., Hussain L., Almasoud A.S., Alajmi M., Hilal A.M. An Improved Imputation Method for Accurate Prediction of Imputed Dataset Based Radon Time Series. *Ieee Access*. 2022. Vol. 10. pp. 20590-20601. DOI: 10.1109/access.2022.3151892

31. Przylibski T.A., Kaczorowski M., Fijalkowska-Lichwa L., Kasza D., Zdunek R., & Wronowski R. Testing of Rn-222 application for recognizing tectonic events observed on water-tube tiltmeters in underground Geodynamic Laboratory of Space Research Centre at Ksiaz (the Sudetes, SW Poland). *Applied Radiation and Isotopes*. 2020. Vol. 163. Article 108967. DOI: 10.1016/j.apradiso.2019.108967.

32. Sabbarese C., Ambrosino F., Chiodini G., Giudicepietro F., Macedonio G., Caliro S., Roca V. Continuous radon monitoring during seven years of volcanic unrest at Campi Flegrei caldera (Italy). *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10 (1). Article 9551. DOI: 10.1038/s41598-020-66590-w

33. Sahoo S.K., Katlamudi M., Barman C., & Lakshmi G.U. Identification of earthquake precursors in soil radon-222 data of Kutch, Gujarat, India using empirical mode decomposition based Hilbert Huang Transform. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 222. Article 106353. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106353

34. Singh S., Jaishi H.P., Tiwari R.P., & Tiwari R.C. Time Series Analysis of Soil Radon Data Using Multiple Linear Regression and Artificial Neural Network in Seismic Precursory Studies. *Pure and Applied Geophysics*. 2017. Vol. 174 (7). pp. 2793-2802. DOI: 10.1007/s00024-017-1556-4

35. Tareen A.D. K., Asim K.M., Kearfott K.J., Rafique M., Nadeem M.S. A., Iqbal T., Rahman S.U. Automated anomalous behaviour detection in soil radon gas prior to earthquakes using computational intelligence techniques. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019. Vol. 203. pp. 48-54. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2019.03.003

36. Toader V.E., Moldovan I.A., Marmureanu A., & Ionescu C. Detection of events in a multidisciplinary network monitoring vrancea area. *Romanian Journal of Physics*. 2016. Vol. 61 (7-8). pp. 1437-1449.

37. Woith H. Radon earthquake precursor: A short review. *European Physical Journal-Special Topics*. 2015. Vol. 224 (4). pp. 611-627. DOI:10.1140/epjst/e2015-02395-9

38. Yakut H., Tabar E., Yildirim E., Zenginerler Z., Ertugral F., & Demirci N. Soil gas radon measurement around fault lines on the western section of the North Anatolian fault zone in Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017. Vol. 173 (4). pp. 405-413. DOI: 10.1093/rpd/nw009.

39. Ye Q., Singh R.P., He A., Ji S., Liu C. Characteristic behavior of water radon associated with Wenchuan and Lushan earthquakes along Longmenshan fault. *Radiat. Meas.* 2015. Vol. 76. pp. 44-53. DOI: 10.1016/j.radmeas.2015.04.001.

40. Zhao Y.X., Liu Z.F., Li Y., Hu L., Chen Z., Sun F.X., & Lu C. A case study of 10 years groundwater radon monitoring along the eastern margin of the Tibetan Plateau and in its adjacent regions: Implications for earthquake surveillance. *Applied Geochemistry*. 2021. Vol. 131. Article 105014. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2021.105014

41. Zmazek B., Zivcic M., Todorovski L., Dzeroski S., Vaupotic J., Kobal I. Radon in soil gas: How to identify anomalies caused by earthquakes. *Applied Geochemistry*. 2005. Vol. 20 (6). pp. 1106-1119. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2005.01.014