

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОТОПОВ РАДОНА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВАРИАЦИЙ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПРОГНОЗЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2023 А.К. Юрков, И.А. Козлова, С.В. Бирюлин

Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия, 620016; e-mail: akjurkov@mail.ru

Поступила в редакцию 06.03.2023 г.; после доработки 06.06.2023 г.; принята в печать 26.06.2023 г.

Приведены результаты интерпретации мониторинговых наблюдений радона-220 (торона) и радона-222, выполненных в 2002–2004 гг. на Северном Тянь-Шане. Показаны прогностические возможности торона, как краткосрочного предвестника землетрясений. Отмечено, что аномалии торона являются более контрастными по сравнению с аномалиями радона-222. Недостаточная контрастность аномалий радона-222 объясняется методическими ошибками при проведении наблюдений сейсмическими радоновыми станциями. Поведение торона во время процесса подготовки землетрясений согласуется с ранее установленными пространственно-временными закономерностями для радона-222. При использовании газов, входящих в состав подземной атмосферы, для мониторинговых наблюдений за процессом подготовки землетрясений наиболее пригодны изотопы радона. Перспектива применения других газов ограничена отсутствием источников их постоянной генерации, наличием накопительного эффекта, сложностью регистрации. Перечисленное также относится и к применению для прогностических целей вариаций содержаний химических соединений, растворенных в подземных водах.

Ключевые слова: радон, торон, краткосрочный прогноз, землетрясение, накопительный эффект, адвекция.

ВВЕДЕНИЕ

Отношение к прогнозу землетрясений неоднозначное. За последние 60–70 лет реально спрогнозировано считанное количество землетрясений, при том, что примерно раз в две недели на планете происходит сильное землетрясение с жертвами и разрушениями (Пантелеев, Наймарк, 2017). Большинство исследователей отрицательно относятся к возможности прогноза из-за большого количества сложно учитываемых факторов, сопровождающих подготовку землетрясений (Завьялов, 2006). Тем не менее, с появлением новых методик и расширением аппаратных возможностей, исследования в этом направлении продолжают продолжаться. Полный прогноз подразумевает определение места, силы и времени предстоящего события. Определение всех составляющих прогноза предстоящего события, как показали многолетние исследования, представляет чрезвычайно сложную задачу. Ее можно упростить, если ограничиться только

определением времени землетрясения. Такое допущение применимо, если за основу взять защиту конкретного объекта и рассматривать только события, представляющие для него опасность. Прогноз времени события разделяют на долгосрочный, среднесрочный, краткосрочный и оперативный (Завьялов, 2006). Результаты долгосрочного прогноза реализованы в сейсмическом районировании территорий и его данные учитываются при проектировании жилых и промышленных зданий, сооружений. Среднесрочный прогноз необходим для организации или развертывания системы краткосрочного и оперативного прогнозов, которые являются основой для практических действий. По данным этих прогнозов (разработке которых, на наш взгляд, уделяется недостаточно внимания исследователями, работающими в этой области) органами МЧС и территориальными властями принимаются решения, связанные с обеспечением безопасности населения и работы промышленных предприятий.

Реализация краткосрочного и оперативного прогнозов должна базироваться на физических явлениях, сопровождающих подготовку землетрясений и проявляющихся за несколько часов-суток перед событием. Это требование существенно сужает круг рассматриваемых предвестников. Среди наиболее физически обоснованных предвестников выделяются: изменения уровня воды в скважинах и колодцах, изменения относительной скорости продольных и поперечных волн, наклонов земной поверхности, фиксация сейсмического затишья, возмущения ионосферы, изменение минерализации пластовых вод, аномалии радона (Завьялов, 2006). Исходя из того, что процесс подготовки землетрясения и само событие — это изменение напряженно-деформированного состояния горных пород, приводящее к их механическому разрушению, необходимо рассматривать явления, которые эти процессы инициируют и сопровождают. По нашему мнению, наиболее важными являются изменение объема порового пространства и трещинообразование, поэтому методам, которые отслеживают эти изменения, следует, уделять первоочередное внимание. Процесс трещинообразования сопровождается генерацией упругих колебаний, которые надежно регистрируются сейсмическими методами. Сейсмологические исследования являются одними из основополагающих, при реализации краткосрочного и оперативного прогнозов. Следствием изменения объема порового пространства, и, соответственно, проницаемости являются изменения в подземной гидросфере и почвенной атмосфере. Изменения объема порового пространства начинаются раньше образования трещин и захватывают большой объем горных пород, обладающих упругими свойствами. Регистрация изменений проницаемости горных пород и объема порового пространства служит основой для прогностических методов, основанных на наблюдении уровня столба жидкости в скважинах и колодцах и вариаций объемной активности почвенного радона (ОАР) и торона (ОАТ). Применение изотопов почвенного радона для изучения вариаций напряженно-деформированного состояния горных пород при подготовке землетрясений обусловлено рядом их особенностей. Это присутствие, практически во всех горных породах, радиоактивных элементов, генерирующих изотопы радона; простота регистрации содержания радона и, пожалуй, самое важное — постоянная генерация изотопов радона, позволяющая проводить непрерывный мониторинговый контроль изменений проницаемости горных пород. Согласно нашим представлениям, последнее обстоятельство обуславливает бесперспективность применения

других газов почвенной атмосферы для контроля изменений проницаемости горных пород при изучении процесса подготовки землетрясений.

Существует ряд других физических явлений, (например, изменение электрического сопротивления горных пород, вариации магнитного поля) связанных и вызываемых изменением напряженного состояния горных пород, но именно изменение проницаемости и трещинообразование сопровождают процесс подготовки землетрясения на заключительных стадиях, вплоть до самого события. Известные по литературным публикациям сведения об успешных прогнозах землетрясений (Любушин, 2012; Fengming, Ge, 1975; Giuliani et al., 2009), свидетельствуют, что они базировались на явлениях, так или иначе связанных с изменением объема порового пространства, проницаемости и трещинообразованием. К успешным прогнозам можно отнести выполненный на основе анализа согласованной слабой сейсмичности среднесрочный прогноз землетрясения Тохоку (Любушин, 2012). По вариациям уровня столба жидкости в скважинах и аномалиям радона был осуществлен реальный оперативный прогноз Хайченского землетрясения в Китае 04.02.1975 (Fengming, Ge, 1975). Особенности поведения ОАР легли в основу краткосрочного прогноза землетрясения в Л'Аквиле (Италия) (Giuliani et al., 2009). Тем не менее, несмотря на единичные случаи успешного прогноза, надежных критериев, указывающих на возможное, близкое по времени, сейсмическое событие, до сих пор не найдено.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Шагом вперед можно считать полученные закономерности поведения ОАР перед землетрясениями в результате обработки данных восьмилетнего непрерывного мониторинга на Южных Курилах (рис. 1) при применении адвективного способа доставки почвенного радона к детектору (Козлова и др., 2021).

В рамках применения модели существования зон сжатия и растяжения трещиновато-пористой среды (Уткин и др., 2006) показано, что поведение объемной активности радона-222 в этих зонах существенно различается. Установлено, что землетрясения отмечаются только на максимуме кривых ОАР, на их нисходящей ветви или на фоновых значениях после завершения аномалии радона.

События, возникающие в ближней зоне (зоне сжатия), относительно точки наблюдения, на кривой ОАР отмечается после выхода аномалии на фоновый уровень (рис. 2). Возникновение аномалии ОАР связано с «выдавливанием» порового воздуха в процессе закрытия трещин.

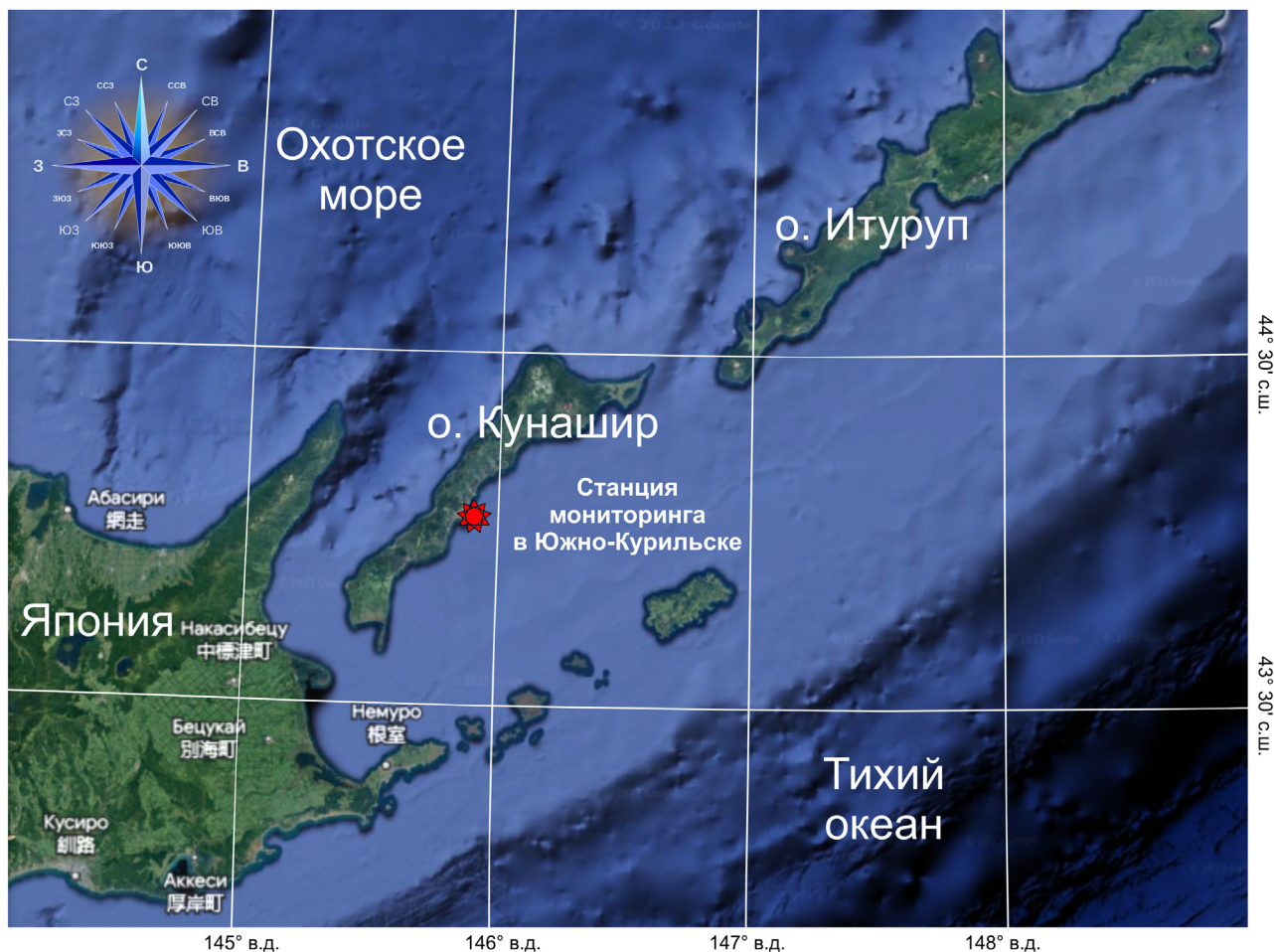


Рис. 1. Расположение станции мониторинга на Южных Курилах.

Fig. 1. Location of the monitoring stations in the Southern Kurils.

Землетрясения в дальней зоне (зоне растяжения), отмечаются на кривых ОАР, начиная с максимума до выхода аномалии ОАР на фоновый уровень (рис. 2). Аномалии ОАР образуются, либо за счет увеличения проницаемости горных пород, либо за счет смыкания трещин, при снятии растягивающих напряжений из-за процессов, происходящих в зоне очага. В этом случае также происходит «выдавливание» радона, приводящее к образованию аномалий. Продолжительность аномалий ОАР, при адвективном способе доставки почвенного радона к детектору, как в ближней зоне, так и в дальней составляет несколько суток. Образование зон растяжения и сжатия — взаимосвязанные следствия проявления геодинамических процессов в земной коре. Отражение землетрясения в точке максимума (событие дальней зоны) соответствующей радоновой аномалии, может свидетельствовать о том, что в этот момент в зоне сжатия произошло землетрясение.

В случае отражения дальнего землетрясения, на нисходящей ветви аномалий ОАР визуально не отмечается каких-либо особен-

ностей конфигурации кривой, позволяющих связать их с процессом трещинообразования перед магистральным разрывом в очаге. Нисходящая ветвь, в большинстве случаев, аппроксимируется кривой распада радона-222. За счет относительно большого периода полураспада радона-222 (3.82 суток), по сравнению с временем существования аномалии, может сказываться накопительный эффект, нивелирующий некоторые особенности вариаций ОАР для событий дальней зоны, непосредственно перед землетрясением. Наличие таких особенностей на кривых ОАР не исключено, и они могут быть связаны с многостадийностью процесса подготовки магистрального разрыва. Это часто отмечается при изучении сейсмоакустической эмиссии и визуальных наблюдениях на образцах (Беликов и др., 2013). В рамках выполненных лабораторных исследований, перед разрушением образца, фиксировалось несколько интенсивных проявлений акустической эмиссии, связанных с визуально наблюдаемыми, образованиями крупных трещин (Беликов и др., 2017). В этой связи, более детальные наблюдения аномалий



Рис. 2. Области отражения процесса подготовки ближних и дальних землетрясений в кривых аномалий ОАР, полученных на станции наблюдения Южно-Курильск. 1 — Область отражения событий «дальней зоны». 2 — Область отражения событий «ближней зоны».

Fig. 2. Areas of reflection of the process of preparation of near- and far earthquakes in the VRA anomalies obtained at the Southern Kuril monitoring station. 1 — Reflection area of of the «far zone» events. 2 — Reflection area of of the «near zone» events.

ОАР (по сравнению с 4-х часовыми) позволят уточнить характер ее связи с моментом образования магистрального разрыва, что, возможно, позволит выделить дополнительные критерии для оперативного прогноза.

Поскольку накопительный эффект, при измерениях радона-222 невозможно устранить, то для детализации аномалий перед землетрясением можно использовать изотоп радона — радон-220 (торон), который образуется в радиоактивном ряду тория-232. Период полураспада радона-220 около 56 секунд, что практически исключает возникновение накопительного эффекта (Новиков, Капков 1965). Кроме того, в ряде случаев, в горных породах, может присутствовать большое количество тория (среднее соотношение тория к урану в земной коре ~3.5) (Новиков, Капков, 1965). Поэтому измерение торона имеет самостоятельное значение, в случае малых содержаний урана-238 в горных породах.

Сведения по измерениям изотопа радона-220 (торона) и об изучении его прогностических возможностях при отражении процесса подготовки землетрясений в публикациях немногочисленны. По результатам, полученным при одновременных измерениях радона и торона в почвенном газе в сейсмоактивных регионах (Уткин и др., 2006; Fengming, Ge, 1975; Giuliani et al., 2009), отмечено увеличение перед землетрясением объемной активности обеих эманаций.

В исследованиях, проведенных в южнокорейской известняковой пещере (Fu, Tatsuoka, 1984; Oh, Kim, 2011, 2015), показано, что изменения концентрации короткоживущего изотопа радона — торона могут сигнализировать о предстоящем землетрясении. Крупные выбросы торона наблюдались в феврале 2011 г. перед

землетрясением Тохоку-Оки (M=9.0). Всплески радона наблюдались в феврале и летом 2011 г. (Oh, Kim, 2011). По мнению авторов рассмотренной работы (Oh, Kim, 2011), аномальные пики радона и торона, наблюдавшиеся в феврале 2011 г., были предвестниками, связанными с землетрясением Тохоку-Оки.

Активность почвенных газов радона и торона непрерывно измерялась на двух независимых станциях мониторинга в период вулканической активности на о. Эль-Йерро, Канарские острова (Padilla et al., 2013). Значительное увеличение активности радон-222 в почве и соотношения радон-222/радон-220 наблюдалось на обеих станциях перед подводным извержением 2011–2012 гг. у побережья Эль-Йерро. Максимумы аномалий наблюдались перед извержением и сопутствующим землетрясением M=4.6. Статистический анализ показал, что долгосрочный временной тренд полученных данных по активности радона соответствует динамике выброса сейсмической энергии во время вулканической активности. Наблюдаемые увеличения радиоактивных газов связаны с разрушением горных пород и увеличением магматического оттока CO₂ (Padilla et al., 2013).

Непрерывные измерения содержания радона и торона в почвенных газах проводились с интервалом 15 дней в разломе Мат в Мизораме (Индия) с марта 2012 г. по февраль 2013 г. (Jaishi et al., 2014). Была выявлена обратная корреляция между концентрацией радона/торона и метеорологическими параметрами, за исключением пары торон/относительная влажность, где была получена слабая положительная корреляция. Полученные данные соотносились с сейсмической активностью в зоне измерения и была обнаружена положительная корреляция между

данными по радону/торону и землетрясениями. (Jaishi et al., 2014).

Повышенная частота измерений объемной активности торона, практически полное отсутствие накопительного эффекта, и в ряде случаев более высокие концентрации, дают, по нашему мнению, все основания для использования торона в сочетании с радоном-222 в качестве предвестника землетрясений. Однако существующие сложности с измерением торона, связанные с его коротким временем жизни, существенно ограничивают его применение. Из известных методов определения торона для мониторинговых наблюдений подходит только его определение «в струе» (Новиков, 1965). Измерения почвенного газа с диффузионным способом доставки воздуха к детектору не применимы к торону, так как он полностью распадается за время пути.

Разработанный в Институте геофизики УрО РАН адвективный способ доставки почвенного воздуха к детектору (Уткин, Юрков, 2010), успешно применяемый для измерений радона-222, соответствует условиям измерений «в струе». Впервые адвективный способ одновременных измерений радона-222 и торона был реализован в сейсмической радоновой станции, разработанной в Московском инженерно-физическом институте (Уткин, 2006). Через станцию, помещенную в скважину, почвенный воздух прокачивается насосом через

измерительную камеру со спектрометрическим полупроводниковым детектором. Раздельное измерение производится по альфа-излучению полония-218 для радона-222 и полония-216 для торона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нами выполнен анализ результатов наблюдений, полученных на Северном Тянь-Шане, с точки зрения возможности торона, как индикатора процесса подготовки землетрясения и соответствия его поведения установленным закономерностям, полученным для радона-222.

При реализации проекта Международного научно-технологического центра в 2002–2004 гг. на Северном Тянь-Шане были установлены четыре сейсмические радоновые станции для проведения мониторинговых наблюдений (рис. 3).

Получить полностью непрерывные ряды наблюдений не удалось из-за труднодоступности расположения станций и частого отсутствия электрического питания, поэтому данные носят фрагментарный характер.

Выбранным условием отражения землетрясений в кривых ОАТ, как и для ОАР, является геодинамический критерий (К) — отношение магнитуды события к логарифму расстояний от точки наблюдения до эпицентра события (Козлова и др., 2021).



Рис. 3. Область расположения сейсмических радоновых станций на Северном Тянь-Шане: 1 — станция «Ала-Арча»; 2 — станция «Иссык-Ата»; 3 — станция «Боом»; 4 — станция «Ананьево».

Fig. 3. Area of seismic radon stations in the Northern Tien-Shan: 1 — Ala-Arch station; 2 — Issyk-Ata station; 3 — Boom station; 4 — Ananyevo station.

Рассмотрим выделенные аномалии торона с точки зрения закономерностей, полученных для радона-222 (рис. 4, 5). События, возникающие в ближней зоне, относительно точки наблюдения, на кривой ОАР отмечается после выхода аномалии на фоновый уровень, землетрясения дальней зоны отражаются в интервале от максимума аномалии до ее выхода на фоновый уровень.

Аномалии $1a$ соответствует событие $3z$, произошедшее 20.12.2003 г., с магнитудой 3.7, на расстоянии 93 км от эпицентра землетрясения до станции мониторинга (геодинамический критерий $K=1.27$) (рис. 4). Магнитуды определялись по зависимости, установленной для Северного Тянь-Шаня (Мамыров, 2013). Землетрясение произошло через трое суток, после выхода аномалии на фоновый уровень. С точки зрения расстояния от эпицентра до станции мониторинга — это событие ближней зоны, что подтверждает его положение на кривой ОАТ. Событие $4z$ магнитудой 3.6 (24.12.2003 г.) произошло на расстоянии 169 км ($K=1.03$). Данное событие отразилось на кривой ОАТ на максимуме аномалии $2a$, что характерно для событий дальней зоны. Аномалия $3a$ связана с подготовкой землетрясения $5z$ с магнитудой 4, произошедшего

на расстоянии 32 км ($K=2.4$). Землетрясение $5z$ произошло 31 декабря 2003 г., отразилось через четверо суток после выхода аномалии на фоновый уровень, что по расстоянию и по расположению на кривой ОАТ соответствует ближней зоне. Перед событиями $1z$ и $2z$ аномалии ОАТ не наблюдались, что может быть связано с их удаленностью от точки мониторинга (> 300 км).

Показано, что аномалия объемной активности радона (с 01.12.2002 по 08.12.2002) более растянутая и слабоконтрастная, в отличие от аномалии объемной активности торона. Рассмотрим поведение кривых ОАР и ОАТ относительно произошедших землетрясений.

Землетрясение $1z$, произошедшее 30.11.2002, на кривой ОАТ отразилось как землетрясение дальней зоны, что подтверждается его расстоянием от эпицентра до станции мониторинга. В аномалиях ОАР процесс подготовки события $1z$ практически не отразился (рис. 5). В начале декабря 2002 г. произошло три землетрясения ($2z$, $3z$, $4z$) с магнитудой 4.1 на расстоянии 57 км (геодинамический критерий 2.4), магнитудой 3.8 на расстоянии 115 км, (геодинамический критерий 1.8) и магнитудой 3.9 на расстоянии 10 км (геодинамический критерий 3.9). Событие $4z$

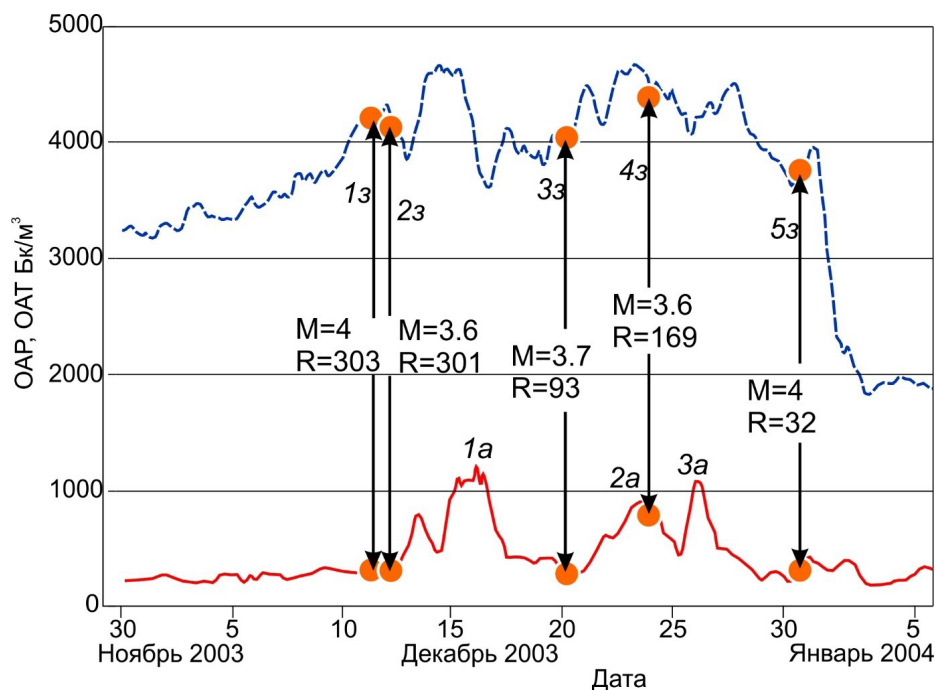


Рис. 4. Фрагмент записи ОАР и ОАТ на станции «Ананьево» (Кыргызстан). Пунктирной линией обозначен график изменения ОАР. Сплошной линией — ОАТ. М — магнитуда землетрясения, R — расстояние между станцией мониторинга и эпицентром землетрясения, км; $1z$ — обозначение землетрясения; $1a$ — обозначение аномалий торона. Кружками обозначены произошедшие землетрясения. Местоположение станции приведено на рис. 3.

Fig. 4. Fragment of VRA and VTA records at Ananyevo station (Kyrgyzstan). The dotted line indicates the graph of changes in the VRA. The solid line is the VTA. M is earthquake magnitude, R is the distance between a monitoring station and the epicenter earthquake, km; $1z$ is the earthquake designation; $1a$ is thoron anomalies designation. Circles denote earthquakes. Location of the station is shown on Fig. 3.

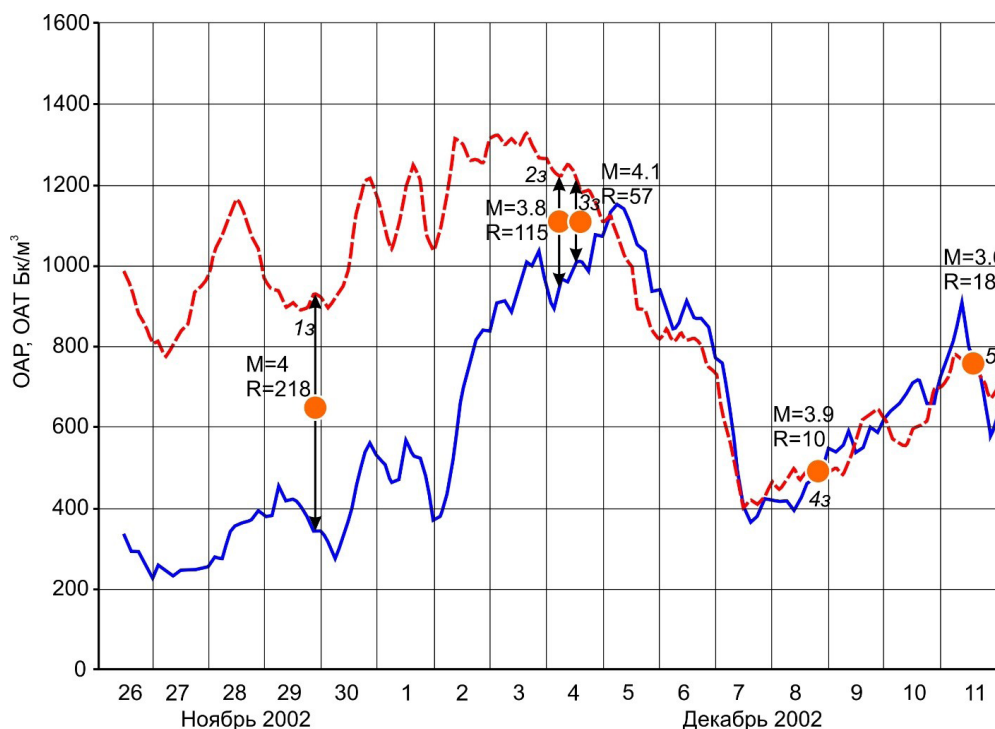


Рис. 5. Фрагмент записи ОАР и ОАТ на станции «Ала-Арча» (Кыргызстан). Пунктирной линией обозначен график изменения ОАР. Сплошной линией — ОАТ. М — магнитуда землетрясения, R — расстояние между станцией мониторинга и эпицентром землетрясения, км; I_з — обозначение землетрясения. Местоположение станции приведено на рис. 3.

Fig. 5. The VRA and VTA recording fragment from the «Ala-Archa» station (Kyrgyzstan). The dotted line indicates a graph of changes in the ZRA. A solid line is a thoron. M — the earthquake magnitude, R — the distance between the monitoring station and the epicenter earthquake, km; I_z — is the earthquake designation. Station location on fig. 3.

относится к ближним (10 км), и оно произошло после выхода аномалий ОАР и ОАТ на фоновый уровень, что соответствует ранее установленным закономерностям отражения землетрясений в ближней зоне. Землетрясения 2з и 3з также относятся к ближним событиям, но они отразились на максимуме кривых ОАР и ОАТ, что характерно для землетрясений дальней зоны. Это можно объяснить наложением процессов подготовки трех событий, причем событие 4з существенно ближе к точке мониторинга, и поэтому его влияние на поведение ОАР и ОАТ более сильное.

Исходя из полученных результатов, вариации ОАР и ОАТ перед землетрясениями для условий Северного Тянь-Шаня, в целом, учитывая небольшой объем данных, соответствуют ранее установленным закономерностям поведения радона для Южно-Курильского региона (Козлова и др., 2021).

Но существует ряд моментов, требующих дополнительного изучения. Зафиксированные изменения ОАР на Северном Тянь-Шане не соответствуют критериям выделения аномалий по методике, разработанной для Южных Курил (Козлова и др., 2021). Аномалии ОАР слабо-контрастные и растянутые. Причиной такого поведения наблюдаемых вариаций ОАР

могли быть условия измерений. По техническим условиям сейсмические радоновые станции, как было отмечено, полностью помещались в пробуренные скважины. Забор воздуха производился в нижней точке скважинного пространства и пропускался по корпусу через полупроводниковый детектор. Выход прокачиваемого почвенного воздуха производился в пространство скважины. Фактически станция находилась в атмосфере, ранее доставленного, почвенного воздуха. Реализация адвективного режима измерений, подразумевает прокачку почвенного воздуха из шпура, с последующим его выходом в атмосферу. Подтверждением высказанному предположению могут служить результаты (Руленко и др., 2019), полученные для условий Камчатки (рис. 6). Измерения также выполнялись с помощью сейсмической радоновой станции. Видно, что аномалии торона существенно контрастнее, по сравнению с растянутой аномалией радона-222. Что, вероятнее всего, связано с упомянутыми ранее, методическими ошибками при измерениях, выполняемых с помощью данной станции. Для устранения указанной методической ошибки, сейсмическую радоновую станцию необходимо помещать вне скважины, и удалять прокачиваемый воздух за ее пределы. В отличие

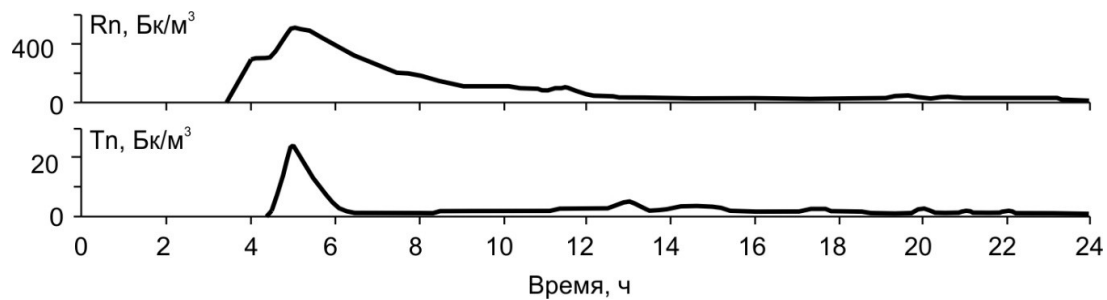


Рис. 6. Вариации ОАР и ОАТ (Руленко и др., 2019).

Fig. 6. VRA and VTA variations (Rulenko et al. 2019).

от радона-222, торон имеет короткое время жизни, и успевал распадаться при прохождении через станцию, то есть отсутствует накопительный эффект. В результате тороновые аномалии оказались достаточно контрастными и соответствуют условию выделения аномалий в рамках разработанной методики.

Еще одной особенностью интерпретации данных на Тянь-Шане стала небольшая величина геодинамического критерия. Для условий Южных Курил 97% землетрясений отразилось в поле радона с геодинамическим критерием $K \geq 2$. Возможно, для геологических условий Тянь-Шаня геодинамический критерий может быть другим. Но для подтверждения этого на данный момент недостаточно статистически значимых данных.

ВЫВОДЫ

Выполненный анализ результатов измерений объемной активности торона и радона-222 на Северном Тянь-Шане показал, что поведение торона согласуется с критериями выделения ближних и дальних событий, установленных для радона-222, по наблюдениям на Южных Курилах. Торон и радон обладают сходными прогностическими возможностями. Аномалии ОАТ, полученные на станциях «Ананьево» и «Ала-Арча» более контрастны по сравнению с аномалиями радона-222, что связано с условиями проводимых измерений. Для получения качественных результатов по ОАТ при измерениях сейсмической радоновой станцией, необходимо изменить условия измерений. Необходимо размещать станцию вне точки измерений (скважины) и почвенный воздух забирать с помощью зонда. Увеличение частоты измерений позволит получить более информативную картину вариаций кривой ОАТ. По мнению авторов, метод комбинированных пар изотопов радон-222/радон-220 может предоставить новые возможности для прогнозирования землетрясений при использовании в сетях мониторинга по всему миру.

Список литературы [References]

- Беликов В.Т., Козлова И.А., Рывкин Д.Г., Юрков А.К. Особенности развития процесса разрушения образца гранита при медленном изменении нагрузки. // Уральский геофизический вестник. 2017. № 2. С. 22–33 [Belikov V.T., Kozlova I.A., Ryvkin D.G., Yurkov A.K. Features of the development of the process of destruction // *Uralskiy geofizicheskiy vestnik*. 2017. № 2. P. 22–33 (in Russian)].
- Беликов В.Т., Уткин В.И., Козлова И.А. и др. Экспериментальное и теоретическое исследование процессов выделения радона при разрушении образцов горных пород // Доклады РАН. 2013. Т. 450. № 2. С. 222–223 [Belikov V.T., Utkin V.I., Kozlova I.A. et al. Experimental and theoretical study of radon release processes during the destruction of rock samples // *Doklady Earth Sciences*. 2013. V. 450. № 2. P. 222–223 (in Russian)].
- Уткин В.И., Юрков А.К. Радон как индикатор геодинамических процессов. // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 2. С. 277–286 [Utkin V.I., Yurkov A.K. Radon as a tracer of tectonic movements // *Geology and Geophysics*. 2010. V. 51. № 2. P. 277–286 (in Russian)].
- Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений. Основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 242 с. [Zavyalov A.D. Medium-term earthquake forecast. Fundamentals, methodology, implementation. Moscow: Nauka, 2006. 242 p. (in Russian)].
- Козлова И.А., Бирюлин С.В., Юрков А.К. Поведение аномалий объемной активности почвенного радона во время подготовки тектонических землетрясений // Литосфера. 2021. № 21(5). С. 724–733 [Kozlova I.A., Biryulin S.V., Yurkov A.K. Occurrence of anomalies in soil radon volume activity before tectonic earthquakes // *Lithosphere (Russia)*. 2021. № 21(5). P. 724–733. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-724-733>].
- Любушин А.А. Прогноз Великого Японского землетрясения // Природа. 2012. № 8. С. 23–33 [Lyubushin A.A. Forecast of the Great Japanese Earthquake // *Priroda*. 2012. № 8. P. 23–33 (in Russian)].
- Мамыров Э.М. Обоснование взаимосвязи магнитуды по объемным волнам с сейсмическим моментом землетрясений // Вестник Института сейсмологии НАН Киргизской Республики. 2013. №1(1). С. 50–58 [Mamyrov E.M. Substantiation of the relationship of magnitude by volume waves with the seismic moment of earthquakes // *Bulletin of the Institute of Seismology of the National Academy of*

- Sciences of the Kyrgyz Republic. 2013. № 1(1). P. 50–58 (in Russian)].
- Новиков Г.Ф., Карков Ю.Н.* Радиоактивные методы разведки. Л.: Недра, 1965. 760 с. [Novikov G.F., Karikov Y.N. Radioactive methods of exploration. Leningrad: Nedra, 1965. 760 p. (in Russian)].
- Пантелеев И.А., Наймарк О.В.* Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений. «Этюды о механике». Екатеринбург. РИО УрО РАН, 2017. 193 с. [Panteleev I.A., Naimark O.V. Modern trends in the mechanics of tectonic earthquakes. «Studies on mechanics». Yekaterinburg. RIO Ural Branch of RAS, 2017. 193 p. (in Russian)].
- Руленик О.П., Марапалец Ю.В., Кузьмин Ю.Д., Солодчук А.А.* Совместное возмущение геоакустической эмиссии, радона, торона и атмосферного электрического поля по данным наблюдений на Камчатке // Физика Земли. 2019. № 5. С. 76–86. <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019576-86> [Rulenko O.P., Marapulets Y.V., Kuz'min Y.D., Solodchuk A.A. Joint perturbation in geoacoustic emission, radon, thoron, and atmospheric electric field based on observations in Kamchatka // Fizika Zemli. 2019. № 5. P. 76–86 (in Russian)].
- Уткин В.И., Мамыров Э., Кан М.В. и др.* Мониторинг радона при изучении процесса подготовки тектонического землетрясения на Северно Тянь-Шане // Физика Земли. 2006. № 9. С. 61–70 [Utkin V.I., Yurkov A.K., Kosyakin I.I. et al. Radon monitoring in the study of the preparation process of a tectonic earthquake in the Northern Tien-Shan // Physics of the Earth. 2006. № 9. P. 61–70 (in Russian)].
- Fengming Z., Ge W.* Prediction of the Haicheng earthquake and measures taken for disaster prevention // Seismological Bureau Liaoning Province, Liaoning, China. 1975. P. 18.
- Fu S., Tatsuoka F.* Soil liquefaction during Haicheng and Tangshan earthquakes in China: a review // Soils and Foundations. 1984. P. 11–29.
- Giuliani G.G., Giuliani R., Totani G. et al.* Radon observations by gamma detectors PM-4 and PM-2 during the seismic period (January–April 2009) in L'Aquila Basin // Abstract AGU Fall Meeting, December 14–18, San-Francisco 1. 2009. P. 3.
- Jaishi H.P., Singh S., Tiwari R.P.* Temporal variation of soil radon and thoron concentrations in Mizoram (India), associated with earthquakes // Nat Hazards. 2014. № 72. P. 443–454. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-1020-4>
- Oh Y., Kim G.* A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor // Scientific Reports. 2015. V. 5. № 13084. <https://doi.org/10.1038/srep13084>
- Oh Y., Kim G.* Factors controlling the air ventilation of a limestone cave revealed by ^{222}Rn and ^{220}Rn tracers // Geosciences Journal. 2011. № 15. P. 115–119. <https://doi.org/10.1007/s12303-011-0010-3>
- Padilla G., Hernández D., Pedro A. et al.* Soil gas radon emissions and volcanic activity at El Hierro (Canary Islands): The 2011–2012 submarine eruption // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2013. V. 14. Iss. 2. P. 432–447.

APPLICATION OF RADON ISOTOPES TO STUDY ROCKS STRESS STATE VARIATIONS IN EARTHQUAKE PREDICTION

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

Institute of Geophysics, Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia, 620016

Received March 06, 2023; revised June 06, 2023; accepted June 26, 2023

The results of interpretation of monitoring observations of radon-220 (thoron) and radon-222 monitoring observations, carried out in 2002–2004 on the Northern Tien-Shan, are presented. Prognostic capabilities of thoron as a short-term earthquakes precursor are shown. It is noted that the anomalies of thoron are more contrast in comparison with anomalies of radon-222. Insufficient contrast of radon-222 anomalies is explained by methodological in observations by seismic radon stations. The behavior of thoron during the earthquake preparation agrees with the previously established spatial-temporal patterns for radon-222 (Kozlova et al., 2021). Radon isotopes are most suitable for monitoring observations of the earthquake preparation process using gases that are part of the underground atmosphere. The prospect of using other gases is limited by the absence of their continuous generation, by the presence of a cumulative effect, and by the difficulty of registration. The above also applies to the use for prognostic purposes of variations in the content of chemical compounds dissolved in groundwater.

Keywords: radon, thoron, short-term prediction, earthquake, advection.