ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геология*

Возможности радонового мониторинга в краткосрочном прогнозе землетрясений

И.А.Козлова✉, С.В.Бирюлин, А.К.Юрков
Институт геофизики им. Ю.П.Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Как цитировать эту статью: Козлова И.А., Бирюлин С.В., Юрков А.К. Возможности радонового мониторинга в краткосрочном прогнозе землетрясений // Записки Горного института. 2026. Т. 280. С. 122-130. EDN WQKTLN

Аннотация
Анализ результатов тринадцатилетних радоновых исследований на Южных Курилах позволил установить наличие надежной взаимосвязи между тектоническими событиями и аномальными содержаниями наблюдаемого радона (ОАР), извлекаемого из приповерхностного слоя. Аномалии радона сопоставлены с землетрясениями магнитудой выше 4 из каталога Геологической службы США (USGS), произошедшими в радиусе 500 км от пункта наблюдения. Удалось разделить эпицентры тектонических событий на группы, различающиеся по расстоянию относительно точки мониторинга. Землетрясения всегда происходят после максимума предшествующей радоновой аномалии. События первой группы относятся к ближней зоне и находятся в радиусе менее 130 км от точки радонового мониторинга. События второй группы относятся к дальней зоне и находятся на расстоянии более 180 км от точки радонового мониторинга. Предложенный способ определения времени и места тектонического события является результатом проведенных исследований. Основа предложенного способа – измерение концентрации почвенного радона на четырех пространственно-разнесенных точках в углах квадрата с расстоянием между соседними точками 180 км, что соответствует расстоянию дальней зоны. Если аномальная концентрация объемной активности радона фиксируется на одной из станций наблюдения, выполняется проверка наличия радоновых аномалий на других пунктах. При фиксировании аномалии радона как минимум на одном из остальных пунктов наблюдения тектоническое событие ожидается в пределах шести суток с момента максимума радоновой аномалии в пространственных пределах, ограниченных 130 км относительно пункта наблюдения, на котором была зафиксирована первая аномалия ОАР. Предложенный способ применим при защите конкретных объектов в условиях повышенной сейсмической активности. Эффективность способа обуславливается выполнением положений разработанной методики измерений.

Ключевые слова
мониторинг; радон; землетрясение; предвестники; краткосрочный прогноз

Финансирование
Работа выполнена по Государственному заданию ИГФ УрО РАН № 125032604464-7.

Поступила: 24.02.2026 ***Принята: 25.06.2026*** ***Онлайн: 02.09.2026*** ***Опубликована: 10.09.2026***

Введение

В настоящее время наблюдается тенденция отказа от прогноза землетрясений, так как только точное определение места (метры), времени (минуты) и магнитуды (баллы) можно считать прогнозом. В ряде случаев исследователи не отказались от прогноза полностью, но сместили акценты на оценку вероятности события [1, 2]. В России отмечается тенденция развития сейсмической безопасности, включающей сейсмическое районирование, внедрение инновационных технологий сейсмостойкого строительства и системы раннего оповещения.

Тем не менее, научный интерес к прогнозу и поиску предвестников землетрясений остается актуальным [3-5]. Сегодня особенно важной задачей является краткосрочный прогноз [6-8], позволяющий принимать оперативные меры реагирования для снижения человеческих и экономических потерь.

Изменение напряженно-деформированного состояния горных пород при подготовке землетрясений относится к наиболее реальному физическому механизму, на основе которого возможен

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

краткосрочный прогноз [9-11]. Подземная атмосфера и гидросфера подвержены изменениям напряженно-деформированного состояния геологической среды.

Состояние подземной атмосферы в массиве горных пород можно контролировать изотопами радона. Они имеют непрерывный источник генерации, достаточно легко регистрируются, у них отсутствует накопительный эффект, что повышает чувствительность измерений. Предпочтительнее использовать изотоп Rn-222, потому что он имеет источник генерации, содержащийся практически во всех горных породах.

Многие исследователи указывают на возможные важные взаимосвязи между изменениями концентраций радона в почве, грунтовых водах, атмосфере и землетрясениями [12-14]. Проведено множество исследований по измерению радона перед землетрясениями в почве [15-17], воздухе [18-20] и воде [21-23].

С.Окабе провел первые исследования радонового газа и сейсмической активности в 1956 г. [24]. Он обнаружил положительную взаимосвязь между изменениями концентрации радона в атмосфере у поверхности Земли и региональной сейсмической активностью в Японии. Таким образом, он указал на радон как на новый индикатор землетрясений.

В работе, выполненной В.И.Уломовым [25], были отмечены значительные изменения концентрации радона в скважинной воде перед Ташкентским землетрясением 26 апреля 1966 г. Это впервые показало, что радоновые аномалии в скважинных водах могут служить индикатором землетрясений.

В ряде работ показано, что концентрация радона в почве, воде и атмосфере меняется в зависимости от движений в земной коре. Например, в Коринфском заливе (Греция) уровень радона в атмосфере резко снизился перед землетрясением [26]. В случае землетрясения Идзу-Осима-Кинкай (14 января 1978 г.) концентрация радона в подземных водах начала снижаться за три месяца до события и резко упала за пять дней до него. Перед землетрясением в Кобе (1995 г.) концентрация радона в подземных водах, наоборот, возросла и достигла пика за девять дней до катастрофы [27].

Ученые из Иркутска анализировали наблюдаемые вариации подпочвенного радона и временные вариации атмосферного давления. Измерения проводились в рыхлых отложениях на трех станциях в Прибайкалье [28]. В период наблюдений зафиксировано три значительных землетрясения. Проведенный эманационный мониторинг позволил установить влияние изменений атмосферного давления на выделение подпочвенного радона [28].

С 1997 по 2016 гг. на п-ове Камчатка выполнялись измерения подпочвенного радона и выявление его вероятных взаимосвязей с тектоническими событиями [29]. Исследователи выделили среднесрочные признаки подготовки сильного землетрясения в Камчатской сейсмогенной зоне [30].

Мониторинговые измерения в подземной атмосфере и гидросфере, в частности почвенного радона, вносят значительный вклад в понимание физических процессов, связанных с подготовкой землетрясений.

Цель исследования состоит в создании нового метода определения времени и места землетрясения на основе отслеживания изменений напряженно-деформированного состояния горных пород по измерениям почвенного радона в подземной атмосфере. Для реализации поставленной цели выполнялись следующие задачи: разработка методики измерений; разработка методики выделения аномалий объемной активности радона (ОАР); сопоставление аномалий ОАР с последующими землетрясениями; изучение особенностей поведения ОАР на различных эпицентральных расстояниях от станции мониторинга.

Методы

В 2011-2024 гг. на о-ве Кунашир проводился радоновый мониторинг в режиме принудительной доставки (вынужденной конвекции [31]) почвенного воздуха к детектору. В геодинамическом отношении выбранный район для исследований относится к зоне субдукции. С точки зрения тектоники плит, он расположен в зоне сочленения Тихоокеанской и Охотоморской плит. Скорость пододвигания Тихоокеанской плиты под Охотоморскую порядка 8 см в год. Станция мониторинга находится на расстоянии 150-200 км к западу от океанического желоба. Отмеченное обстоятельство ограничивает регистрацию слабых землетрясений в вариациях объемной активности радона, что

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

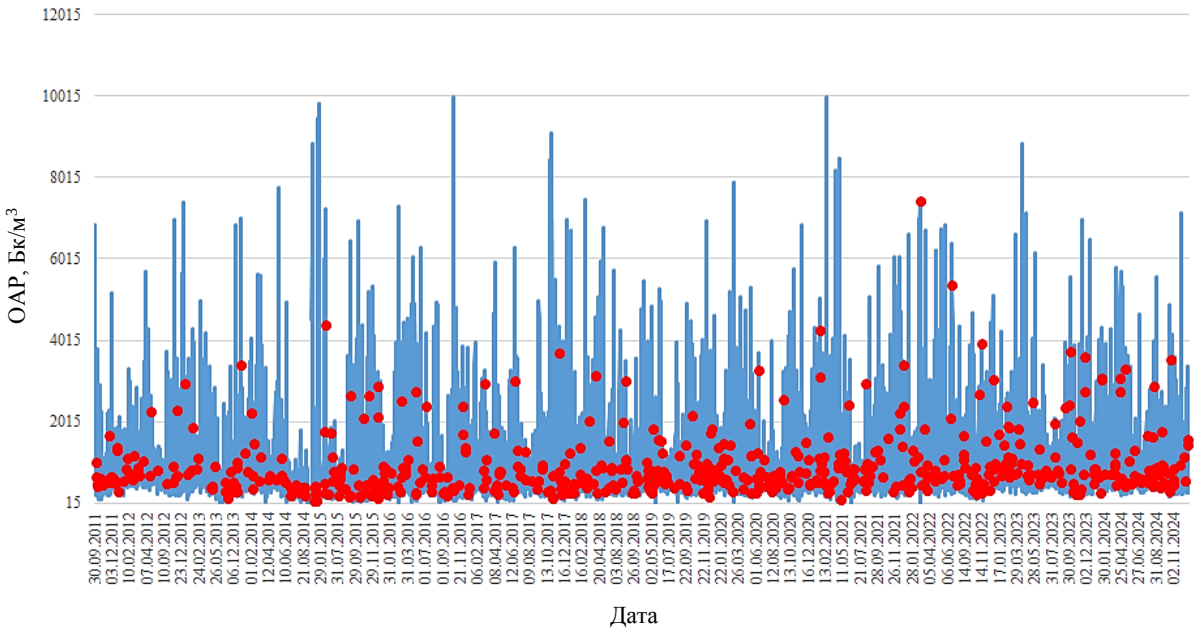


Рис.1. Вариации объемной активности радона и сейсмические события за 2011-2024 гг.

упрощает идентификацию аномалий и событий. В геологическом плане станция расположена на древнем лавовом потоке андезито-базальтового состава, образовавшегося после одного из извержений вулкана Менделеева. Породы этого состава обладают упругими свойствами, что является условием получения информативных данных о вариациях объемной активности почвенного радона. Измерения на этой станции оптимальны по количеству наблюдаемых землетрясений. Если в регионе наблюдения происходит небольшое число землетрясений, то невозможно получить статистически надежные закономерности. Слишком большое число затрудняет сопоставление аномалий и событий. Измеренные скорости перемещения реперов спутникового позиционирования изменились после Симуширских землетрясений 2006-2007 гг. Средние острова Курильской гряды перемещаются со скоростью 1,4 см в год, южные до 3,3 см. Такая ситуация может свидетельствовать о том, что в средней части гряды отсутствует зацепление плит, а в южной части накапливаются напряжения, что возможно приведет к землетрясениям. Тем более, что событий с магнитудой более 8 в районе Южных Курил не было более 30 лет при среднем интервале между землетрясениями с магнитудой более 8 порядка 10 лет [32].

На рис.1 представлен многолетний ряд объемной активности радона и сейсмические события из каталогов Геологической службы США (USGS). Как видно из рис.1, данные не пригодны для обработки, анализа и интерпретации по методике, разработанной авторами. При таком масштабе невозможно выделить аномалии и сопоставить их с последующими землетрясениями. Авторами разработана методика выделения аномалий объемной активности радона и сопоставления их с вызывающими землетрясениями [31].

И.П.Добровольским предложена деформационная модель проявления предвестников тектонических землетрясений [33]. По указанной модели выполнена оценка зоны проявления предвестников для Южных Курил. Использовалось соотношение магнитуды землетрясения M к логарифму расстояния от станции мониторинга до эпицентра тектонического события $R \geq 2{,}5$. Соотношение применимо к оценке зоны проявления предвестниковых эффектов, связанных с вариациями пористости и проницаемости геологической среды. Отношение магнитуды землетрясения к логарифму расстояния от станции мониторинга до события предложено условно назвать геодинамическим критерием. За период наблюдений максимальная магнитуда составила 7. По этому значению рассчитывался радиус проявления предвестниковых эффектов, который составил 500 км (расстояние от точки мониторинга на о-ве Кунашир до эпицентров тектонических событий) [31]. Выполнялся ретроспективный анализ землетрясений с магнитудой больше 4 с геодинамическим критерием K больше 2,5 (рис.2, 3). Большое число землетрясений не соответствовало $K \geq 2{,}5$, но отразились

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

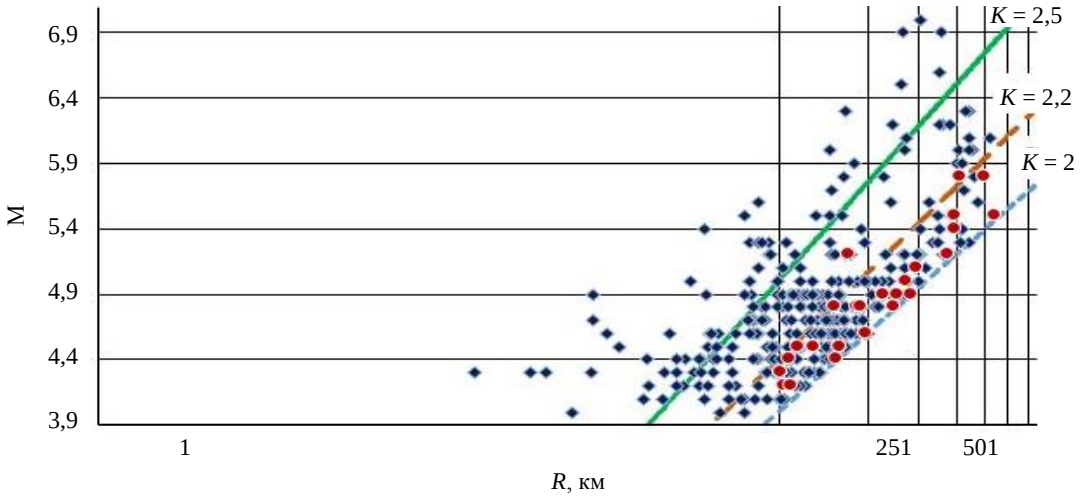


Рис.2. Отражение землетрясений в поле ОАР с 2011 по 2024 гг. Ромбами обозначены события, которым предшествовала аномалия ОАР, кружками – события, которые не отразились в кривых аномалий ОАР. Линии соответствуют различному соотношению M/log*R*

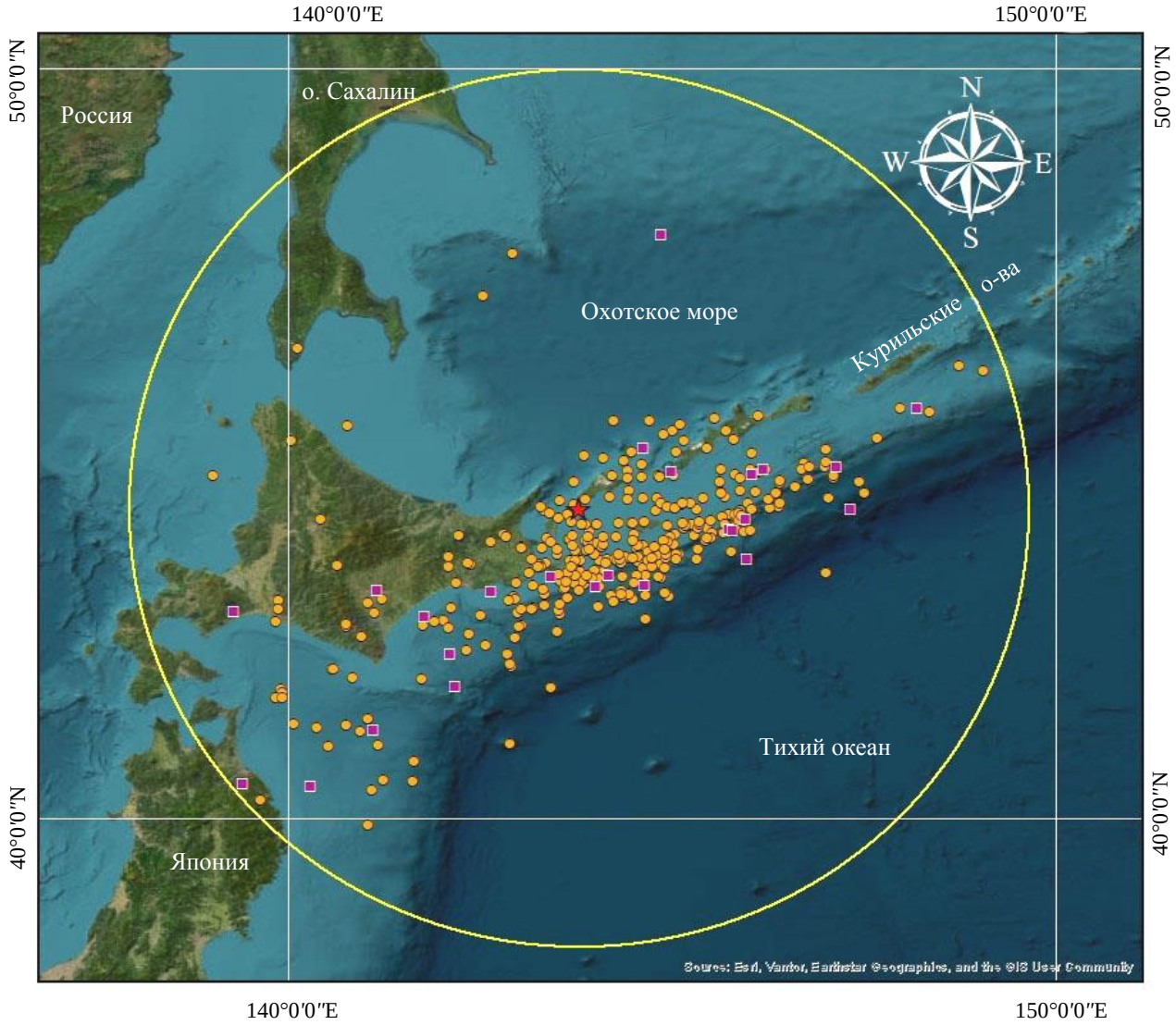


Рис.3. Карта землетрясений в поле ОАР за период наблюдений с 2011 по 2024 гг. Звездой обозначена станция наблюдения. Оранжевыми кругами – события, которым предшествовала аномалия ОАР; фиолетовыми квадратами – события, которые не отразились в кривых аномалий ОАР. Окружность соответствует радиусу 500 км от станции мониторинга

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

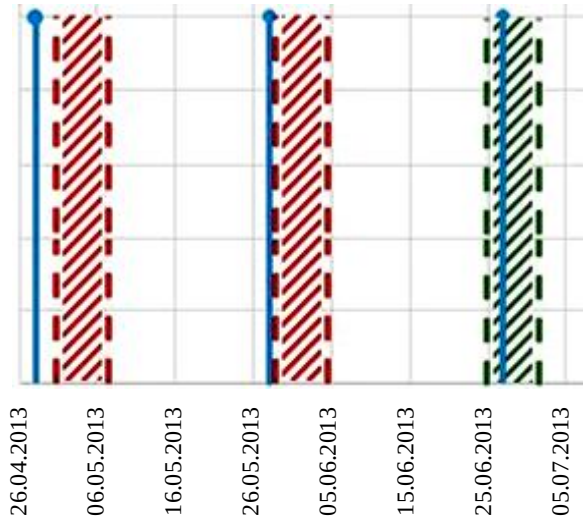


Рис.4. Пример сопоставления сгенерированных случайным образом землетрясений и семисуточных окон аномалий почвенного радона. Линией с точкой наверху показан сгенерированный момент землетрясения, заштрихованным столбцом – сгенерированный промежуток времени, в который длилась аномалия

в поле объемной активности радона. Для учета всех аномалий почвенного радона и рассмотренных тектонических событий было принято решение применять геодинамический критерий больше 2 для геолого-тектонических условий Южных Курил. Всего за указанный период произошло 344 землетрясения с магнитудой более 4, и 319 из них отразились в кривых ОАР (рис.2, 3).

Важным вопросом является проверка наличия причинно-следственной связи между предвестником и землетрясением. С этой целью выполнена статистическая обработка выделенных аномалий ОАР и последующих землетрясений.

Сгенерированы случайные последовательности землетрясений за девятилетний период, соответствующие закону распределения Пуассона. За основу взяты реальные параметры последовательных землетрясений (математическое ожидание) из каталога за аналогичный период. Все сгенерированные сейсмические события находились в радиусе 500 км от станции мониторинга и предполагалось, что их магнитуда больше или равна 4. Рассматривались последовательности землетрясений с $K \geq 2$, $K \geq 2{,}2$.

Также сгенерированы случайные последовательности аномалий по закону распределения Пуассона. За основу взято математическое ожидание интервалов между выделенными аномалиями ОАР за девятилетний период. За окно аномалии взято среднее значение среди всех выделенных значений между максимумом аномалии и ее концом – 7 сут. (рис.4). Рассматривались последовательности аномалий, выделенные перед землетрясениями с критерием $K \geq 2$, $K \geq 2{,}2$.

Выполнялось сопоставление сгенерированных случайных последовательностей землетрясений и аномалий. Если землетрясение попадало в семисуточное окно аномалии, то считалось, что ему предшествовала аномалия почвенного радона.

В результате расчетов экспериментальная вероятность для землетрясений с $K \geq 2$ равна 0,89, теоретическая – 0,35. Для землетрясений с $K \geq 2{,}2$ экспериментальная вероятность составляет 0,98, а теоретическая – 0,20. Как для $K \geq 2$, так и для $K \geq 2{,}2$ теоретическая вероятность не соответствует экспериментально полученным значениям. Для землетрясений с $K \geq 2$, $K \geq 2{,}2$ и радоновых аномалий теоретическая вероятность меньше экспериментальной вероятности в 3 и 5 раз соответственно. Это может свидетельствовать о причинно-следственной связи между аномалиями объемной активности радона и землетрясениями.

Обсуждение результатов

Установлено, что сейсмические события происходят после максимума аномалии объемной активности почвенного радона, а ближние и дальние землетрясения (относительно точки наблюдения) отражаются на разных участках кривой ОАР. В интервале времени от максимума радоновой аномалии до шести суток проявляются тектонические землетрясения дальней зоны. Для геолого-тектонических условий Южно-Курильского геодинамического полигона радиус дальней зоны (зона растяжения) составил более 180 км. В интервале времени от конца радоновой аномалии до 28 сут. проявляются события ближней зоны. Ближние события отражаются на кривой ОАР после выхода аномалии на фоновый уровень в интервале времени до 28 сут. Для условий Южно-Курильского геодинамического полигона (зона субдукции) радиус ближней зоны (зона сжатия) составил менее 130 км [34].

Характер поведения трещинно-порового пространства при изменении напряженного состояния массива непосредственно в точке мониторинга является физической основой отражения процесса подготовки землетрясений в поведении почвенного радона, с учетом того, что наблюдаемые

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

радоновые аномалии непродолжительны и высокоамплитудны [35]. В ближней зоне аномалии радона образуются за счет сжатия, при котором из-за уменьшения объема свободного пространства происходит выдавливание радона до полного закрытия трещин и пор вплоть до возникновения магистрального разрыва. Для аномалий дальней зоны предлагается иной механизм образования. Геологическая среда после начала разрушения в эпицентре события возвращается в первоначальное состояние, трещины и поры сужаются, в результате чего частично выделяется радон.

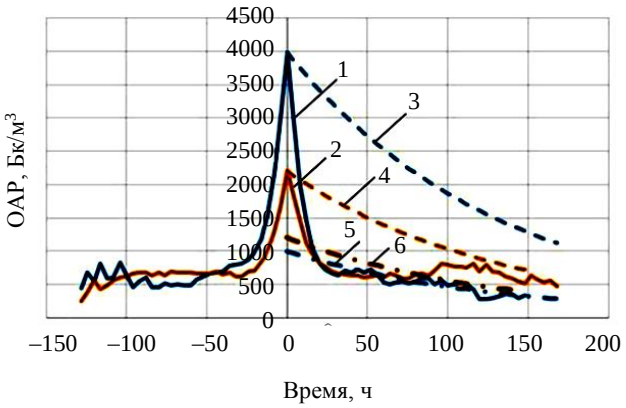


Рис.5. Усредненные аномалии ОАР в зоне сжатия, растяжения и кривые распада радона. Сплошные линии – усредненные значения аномалий ОАР перед событиями ближней (1) и дальней (2) зон; пунктирные линии – кривые распада радона для максимума ближней (3) и дальней (4) зон; штрихпунктирные линии – аппроксимация значений ОАР после завершения аномалии, кривой распада радона для ближней (5) и дальней (6) зон

На рис.5 приведены усредненные аномалии объемной активности радона за период измерений 2011-2024 гг. При изучении распада Rn отмечена закономерность между начальным и конечным количеством исходного вещества, аппроксимирующаяся экспоненциальным законом. Пропорциональная связь лежит в основе закона радиоактивного распада. За точку начала отсчета взят усредненный максимум радоновой аномалии для каждой зоны. По каждой точке измерений рассчитывалось среднее значение по всем аномалиям, отдельно для аномалий, предшествовавших землетрясениям ближней (линия 1, рис.5) и дальней (линия 2, рис.5) зон. На усредненные аномалии объемной активности почвенного радона для ближней и дальней зон нанесены кривые распада радона (кривые 3, 4, рис.5). Кривые 5, 6 на рис.5 являются аппроксимацией кривых ОАР после окончания аномалии кривой распада радона.

Снижение аномальной величины объемной активности почвенного радона как для ближней зоны (линия 1, рис.5), так и для дальней (линия 2, рис.5) происходит не только за счет распада радона, который выделился. Прекращается поступление почвенного радона из порового пространства. Как в первом, так и во втором случае кривая радона (линии 1, 2, рис.5) не согласуется с законом радиоактивного распада, начиная от максимального значения концентрации радона (кривые 3, 4, рис.5). В случае ближней зоны кривая ОАР аппроксимируется кривой распада радона (кривая 5, рис.5) после конца аномалии радона на выходе на фоновые значения. В случае дальней зоны кривая ОАР после конца аномалии возвращается к исходным значениям до повышения и не аппроксимируется кривой распада (кривая 6, рис.5). Это связано с тем, что радон продолжает выдавливаться из пор и трещин. Таким образом обосновывается описанный механизм формирования радоновых аномалий.

На основе описанного механизма образования аномалий радона сформулирован способ краткосрочного прогноза времени и места землетрясений. Ключевой составляющей предложенного способа является изменение пористости и проницаемости горных пород под влиянием растягивающих и сжимающих напряжений. Растяжение в одной области приводит к сжатию в другой. Соответственно снятие сжимающих напряжений при деструктивных процессах в очаге в момент землетрясения или незадолго до него вызовет снятие (на какое-то время) растягивающих напряжений за пределами очага (в дальней зоне). Это приведет к восстановлению проницаемости до прежнего уровня, т.е. объем пор снизится и радон вытеснится в примыкающие области порового пространства. При мониторинге в дальней зоне (зона растяжения) тектоническое событие отражается на кривой ОАР в интервале времени после максимума аномалии до шести суток. Возникшая в дальней зоне радоновая аномалия обусловлена процессом разрушения в очаге землетрясения. Мониторинг вариаций радона в дальней зоне, при учете того, что деструктивный процесс в очаге тектонического события приводит к возникновению аномалии, позволит прогнозировать землетрясение после максимума аномалии радона [36].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

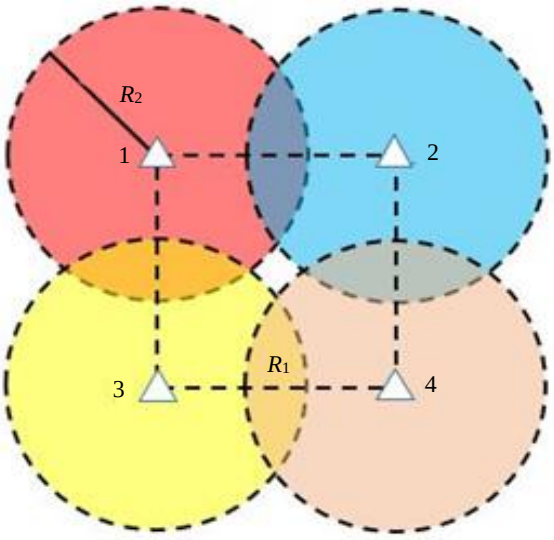


Рис.6. Схема расположения пунктов наблюдения объемной активности радона

Предлагаемый способ заключается в контроле объемной активности почвенного радона в режиме принудительной доставки почвенного воздуха к детектору, не менее чем в четырех пунктах мониторинга в окрестностях контролируемого объекта при расстоянии между соседними пунктами, равным радиусу дальней зоны R_1 (рис.6). Если аномалия фиксируется на одном из пунктов наблюдения, выполняется контроль аномалий на остальных станциях. При фиксировании аномалии радона как минимум на одном из остальных пунктов наблюдения ожидается тектоническое событие в пределах шести суток с момента максимума радоновой аномалии в пространственных пределах, ограниченных радиусом ближней зоны R_2 относительно пункта наблюдения, на котором зафиксирована первая аномалия ОАР [36].

Для практической реализации предложенного способа необходимо создание сети пунктов наблюдений для мониторинга почвенного радона в сейсмоактивных районах, например на Северном Кавказе и в Крыму. Эти регионы имеют важное народно-хозяйственное значение и высокую плотность населения. На сегодняшний день пункты наблюдения радонового мониторинга расположены в различных регионах с разной геодинамической активностью – Курильские о-ва, о-в Сахалин, Восточные Саяны (Республика Тыва), Урал, Республика Казахстан, Кыргызская Республика. Результаты мониторинга подтверждают закономерности отражения землетрясений в поле радона, полученные для зоны субдукции. Проведенные исследования показывают, что для получения кондиционных данных необходимо строгое соблюдение режима измерений почвенного радона с учетом геолого-тектонических условий.

Заключение

Несмотря на скептическое отношение к прогнозу тектонических событий, каждое новое катастрофическое землетрясение снова делает проблему актуальной. Для изучения процесса подготовки землетрясений необходимы новые подходы на основе способов, имеющих реальное физическое обоснование. Мониторинг почвенного радона соответствует этому условию и обеспечивает возможность получения статистически значимых рядов наблюдений. Предложенный способ определения времени и места землетрясения позволяет оценивать количественные характеристики времени ожидаемого землетрясения относительно характерных зон проявления на кривой радона и определять положение области эпицентра тектонического события в пространстве. После успешного применения в реальных условиях предложенный способ с высокой вероятностью обеспечит предупреждение тектонических событий на контролируемых объектах в регионах с повышенной сейсмической опасностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Neely J.S., Salditch L., Spencer B.D., Stein S.* A More Realistic Earthquake Probability Model Using Long-Term Fault Memory // Bulletin of the Seismological Society of America. 2023. Vol. 113. № 2. P. 843-855. DOI: 10.1785/0120220083

2. *Zhonghu Jiao, Xinjian Shan.* A Bayesian Approach for Forecasting the Probability of Large Earthquakes Using Thermal Anomalies from Satellite Observations // Remote Sensing. 2024. Vol. 16. Iss. 9. № 1542. DOI: 10.3390/rs16091542

3. *Szakács A.* Precursor-Based Earthquake Prediction Research: Proposal for a Paradigm-Shifting Strategy // Frontiers in Earth Science. 2021. Vol. 8. № 548398. DOI: 10.3389/feart.2020.548398

4. *Smits G.* Review of *Predicting Disasters: Earthquakes, Scientists, and Uncertainty in Modern Japan*, by Kerry Smith // Monumenta Nipponica. 2024. Vol. 79. № 2. P. 310-315. DOI: 10.1353/mni.2024.a952790

5. *Singh R., Roy B.* Scalable earthquake magnitude prediction using spatio-temporal data and model versioning // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. № 19265. DOI: 10.1038/s41598-025-00804-x

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

6. *Nandan S., Kamer Y., Ouillon G. et al.* Global models for short-term earthquake forecasting and predictive skill assessment // The European Physical Journal Special Topics. 2021. Vol. 230. Iss. 1. P. 425-449. DOI: 10.1140/epjst/e2020-000259-3

7. *Fujinawa Y., Noda Y., Miyagawa M. et al.* A Practical Method for Short-term Earthquake Prediction Using Multiple High-frequency Tremor Events // Asian Journal of Physical and Chemical Sciences. 2022. Vol. 10. Iss. 3. P. 15-24. DOI: 10.9734/ajopacs/2022/v10i3182

8. *Huaizhong Yu, Rui Yan, Shiguang Deng et al.* Improved medium-to-short-term earthquake predictions in China in 2022 // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2024. Vol. 15. Iss. 1. № 2350482. DOI: 10.1080/19475705.2024.2350482

9. *Verma U.P., Sinha M.N., Dutta P.K., Mullick S.* Stress-Strain Relationship: Postulated Concept to Understand Genetic Mechanism Associated with a Seismic Event // Computational Optimization Techniques and Applications. IntechOpen, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.97377

10. *Guofu Luo, Fenghe Ding, Yingcai Xu et al.* Strain fields of *Ms* > 6.0 earthquakes in Menyuan, Qinghai, China // Frontiers in Earth Science. 2023. Vol. 11. № 1152348. DOI: 10.3389/feart.2023.1152348

11. *Orlecka-Sikora B., Ciechowska H., Zhenyu Zhang, Zhiming Liang*. Seismic Strain Metrics for Tracking Fault Damage Evolution and Rupture Potential in Anthropogenic Seismicity // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2025. Vol. 58. Iss. 9. P. 11061-11082. DOI: 10.1007/s00603-025-04688-1

12. *Tarakçi M., Harmanşah C., Saç M.M., İçhedef M.* Investigation of the relationships between seismic activities and radon level in Western Turkey // Applied Radiation and Isotopes. 2014. Vol. 83. Part A. P. 12-17. DOI: 10.1016/j.apradiso.2013.10.008

13. *Petraki E., Nikolopoulos D., Panagiotaras D. et al.* Radon-222: A Potential Short-Term Earthquake Precursor // Journal of Earth Science & Climatic Change. 2015. Vol. 6. Iss. 6. № 282. DOI: 10.4172/2157-7617.1000282

14. *Khan M.A., Khattak N.U., Hanif M.* Radon emission along faults: a case study from district Karak, Sub-Himalayas, Pakistan // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2022. Vol. 331. Iss. 5. P. 1995-2003. DOI: 10.1007/s10967-022-08283-4

15. *Ghosh D., Deb A., Sengupta R.* Anomalous radon emission as precursor of earthquake // Journal of Applied Geophysics. 2009. Vol. 69. Iss. 2. P. 67-81. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2009.06.001

16. *Stoulos S., Papadimitriou E., Karakostas V. et al.* Radon signals in soil gas associated with earthquake occurrence in Greece: review and perspective // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2024. Vol. 333. Iss. 12. P. 6107-6120. DOI: 10.1007/s10967-024-09710-4

17. *İçhedef M., Günay O., Yalçın C. et al.* Assessment of soil gas radon variations in terms of seismicity in Yalova, Türkiye // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2025. Vol. 334. Iss. 9. P. 6829-6836. DOI: 10.1007/s10967-025-10169-0

18. *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 // Nuclear Engineering and Technology. 2018. Vol. 50. Iss. 3. P. 512-518. DOI: 10.1016/j.net.2017.12.010

19. *Tsuchiya M., Nagahama H., Muto J. et al.* Detection of atmospheric radon concentration anomalies and their potential for earthquake prediction using Random Forest analysis // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. № 11626. DOI: 10.1038/s41598-024-61887-6

20. *Sahoo B.K., Sapra B.K., Khan A. et al.* A persistent radon anomaly signal preceding the destructive 7.7 M_w earthquake in Myanmar on March 28, 2025 // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. № 25447. DOI: 10.1038/s41598-025-10632-8

21. *Tsunomori F., Tanaka H.* Anomalous change of groundwater radon concentration monitored at Nakaizu well in 2011 // Radiation Measurements. 2014. Vol. 60. P. 35-41. DOI: 10.1016/j.radmeas.2013.11.006

22. *Abbas S.Q., Khan J., Riaz M.T. et al.* Radon concentration in spring water as an indicator of seismic activity: a case study of the Muzaffarabad Fault in Pakistan // Environmental Monitoring and Assessment. 2024. Vol. 196. Iss. 1. № 41. DOI: 10.1007/s10661-023-12235-0

23. *Kim J., Kim H., Kaown D, Lee K.-K.* Thoron, radon and microbial community as supportive indicators of seismic activity in groundwater // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. № 25955. DOI: 10.1038/s41598-024-77011-7

24. *Okabe S.* Time variation of the atmospheric Radon-content near the ground surface with relation to some geophysical phenomena // Memoirs of the College of Science, University of Kyoto, Series A. 1956. Vol. 28. № 2. P. 99-115.

25. *Уломов В.И.* На пути к прогнозу землетрясений // Земля и Вселенная. 1968. № 3. С. 23-30.

26. *Karastathis V.K., Eleftheriou G., Kafatos M. et al.* Observations on the stress related variations of soil radon concentration in the Gulf of Corinth, Greece // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. № 5442. DOI: 10.1038/s41598-022-09441-0

27. *Wakita H., Nakamura Y., Notsu K. et al.* Radon Anomaly: A Possible Precursor of the 1978 Izu-Oshima-kinkai Earthquake // Science. 1980. Vol. 207. Iss. 4433. P. 882-883. DOI: 10.1126/science.207.4433.882

28. *Семинский К.Ж., Бобров А.А.* Нарушение взаимосвязи вариаций объемной активности радона и атмосферного давления в периоды сейсмических активизаций (на примере Прибайкалья) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 510. № 1. С. 86-91. DOI: 10.31857/S2686739723600169

29. *Фирстов П.П., Макаров Е.О., Глухова И.П. и др.* Поиск предвестниковых аномалий сильных землетрясений по данным мониторинга подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2. № 1. С. 16-32. DOI: 10.30730/2541-8912.2018.2.1.016-032

30. *Фирстов П.П., Копылова Г.Н., Соломатин А.В., Серафимова Ю.К.* О прогнозировании сильного землетрясения в районе полуострова Камчатка // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2016. Вып. 32. № 4. С. 106-114.

31. *Козлова И.А., Бирюлин С.В., Юрков А.К.* Поведение аномалий объемной активности почвенного радона во время подготовки тектонических землетрясений // Литосфера. 2021. Т. 21. № 5. С. 724-733. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-5-724-733

32. *Прытков А.С., Василенко Н.Ф., Фролов Д.И.* Современная геодинамика Курильской зоны субдукции // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36. № 1. С. 23-28.

33. *Добровольский И.П.* Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: Физматлит, 2009. 240 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

34. *Козлова И.А., Юрков А.К., Бирюлин С.В.* Применение вариаций объемной активности почвенного радона при изучении геодинамических процессов // Геология и геофизика. 2025. Т. 66. № 6. С. 734-743. DOI: 10.15372/GiG2024185

35. *Уткин В.И.* Радон и проблема тектонических землетрясений // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 12. С. 64-70.

36. *Козлова И.А., Бирюлин С.В., Юрков А.К.* Патент № 2839307 РФ. Способ определения времени и места землетрясения. Опубл. 26.05.2025. Бюл. № 15.

***Авторы*: Ирина Анатольевна Козлова,** *канд. геол.-минерал. наук, директор* (*Институт геофизики им. Ю.П.Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия*), *ikozlova75@mail.ru*, *https://orcid.org/0000-0002-0281-9218*, **Сергей Викторович Бирюлин,** *канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник* (*Институт геофизики им. Ю.П.Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-4811-9185*, **Анатолий Константинович Юрков,** *канд. геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник* (*Институт геофизики им. Ю.П.Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-6790-0340*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0