

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ  
ПРОЦЕССЫ

УДК 550.3

ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВЕННОГО РАДОНА  
И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВАРИАЦИИ В СКВАЖИНЕ  
ВО ВРЕМЯ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

© 2021 г. И. А. Козлова<sup>1,\*</sup>, С. В. Бирюлин<sup>1,\*\*</sup>, А. К. Юрков<sup>1,\*\*\*</sup>, Д. Ю. Демежко<sup>1,\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Институт геофизики УрО РАН,  
ул. Амундсена, д. 100, Екатеринбург, 620016 Россия

\*E-mail: [ikozlova75@mail.ru](mailto:ikozlova75@mail.ru)

\*\*E-mail: [serrega2009@gmail.com](mailto:serrega2009@gmail.com)

\*\*\*E-mail: [akyurkov@mail.ru](mailto:akyurkov@mail.ru)

\*\*\*\*E-mail: [ddem54@inbox.ru](mailto:ddem54@inbox.ru)

Поступила в редакцию 12.07.2021 г.

После доработки 12.09.2021 г.

Принята к публикации 25.09.2021 г.

Землетрясения — это явления, представляющие опасность для человека, инженерных сооружений и инфраструктуры. Возможность прогноза землетрясений подвергается сомнению, но это не останавливает исследования, проводимые в этом направлении. К наиболее физически обоснованным вероятным предвестникам землетрясений относятся изменения объемной активности радона и изменение температуры жидкости в скважинах, обусловленных изменением напряженно-деформированного состояния горных пород. На Южно-Курильском геофизическом стационаре ИМГГ ДВО РАН (о. Кунашир) в 2011–2018 гг. выполнялся мониторинг объемной активности почвенного радона (ОАР) и температурные измерения в скважине Куп-1. Выполнен анализ полученных данных и их сопоставление с землетрясениями, произошедшими за соответствующий период, с целью поиска закономерностей. За основу взята модель И.П. Добровольского, позволяющая оценивать радиус проявления предвестников явлений. Согласно модели, предвестник может проявиться в точке наблюдений, если отношение магнитуды землетрясения к расстоянию до эпицентра (в км) больше или равно 2.5. Показано успешное применение разработанных методик наблюдения и интерпретации радоновых и температурных аномалий, которое в перспективе позволит повысить вероятность успешного прогноза землетрясений в комплексе с другими методами.

**Ключевые слова:** землетрясение, краткосрочный прогноз, почвенный радон, радоновый мониторинг, температура, температурный мониторинг, магнитуда, Курильские острова

**DOI:** 10.31857/S0869780921060059

## ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасной жизнедеятельности населения представляет собой одну из самых важных задач геоэкологии. Из всего многообразия вопросов, относящихся к этой проблеме, отдельно можно выделить природные катастрофические явления. Число жертв стихийных природных явлений и экономический ущерб от них во всем мире неуклонно растут.

Одно из первых мест в списке опасных природных явлений занимают землетрясения и их последствия — цунами, оползни. Например — катастрофическое землетрясение в марте 2011 г. в Японии. Возникшая после него волна цунами разрушила атомную электростанцию в Фукусиме и погубила около 16 тыс. человек. Отсутствие надежных методов прогноза, неоднозначность ин-

терпретации существующих, традиционных методов мониторинга подрывают доверие к ним со стороны населения и лиц, принимающих решения.

Среди примерно 200 возможных предвестников землетрясений следует отметить несколько наиболее физически обоснованных. Это предвестники, связанные с изменением проницаемости и объема деформируемого порового пространства. Изменение проницаемости горных пород влияет на поток почвенных газов, стремящийся к поверхности. Наиболее чувствительным индикатором изменений такого потока являются вариации объемной активности почвенного радона (ОАР). В ряде случаев удавалось делать успешный прогноз при наблюдениях за вариациями ОАР [13, 16].

Учитывая, что поровое пространство верхней части геологического разреза почти повсеместно

заполнено практически несжимаемой жидкостью — водой, то в результате изменения объема порового пространства изменяется внутриводяное давление, и возникают компенсационные перетоки. Компенсационные перетоки могут вызвать в скважине изменения уровня столба жидкости. На этом эффекте основан широко распространенный в мире гидрогеодинамический способ прогноза землетрясений. Данный способ также имеет положительные примеры при прогнозировании процесса подготовки землетрясений. Но отмечаются случаи, когда землетрясения не сопровождаются изменениями уровня воды в скважине. Причинами, кроме отсутствия гидравлической связи скважины с деформируемым объемом горных пород, может быть наличие в разрезе нескольких водоносных горизонтов. В этом случае, возникающее в одном из них избыточное давление жидкости может компенсироваться ее перетоком в другой горизонт, и уровень столба жидкости может не измениться. Для расширения возможностей гидрогеодинамического способа прогноза процесса подготовки землетрясений в ИГФ УрО РАН разработана методика измерения движения жидкости по стволу скважины с помощью стационарно установленного скважинного термометра.

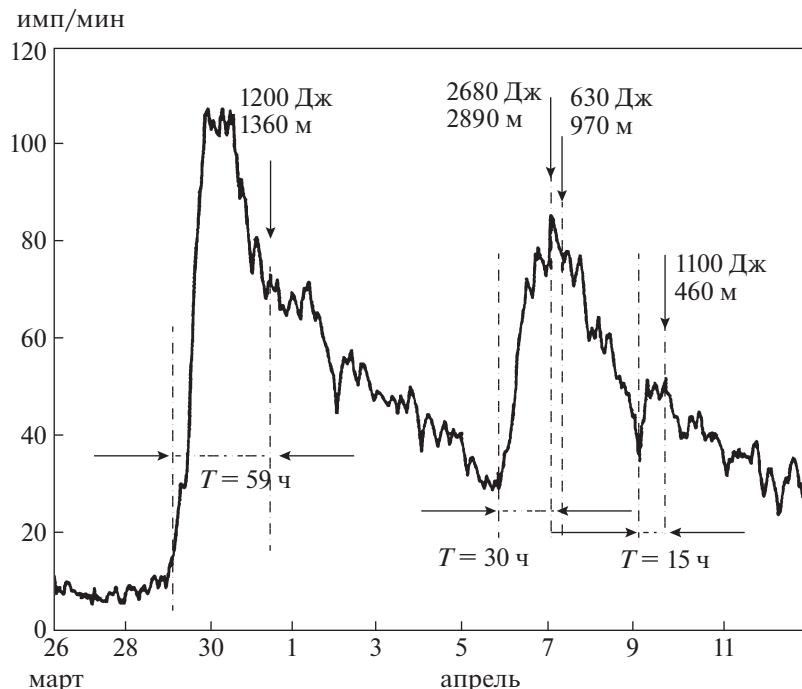
Цель данной работы заключалась в поиске закономерных связей наблюдаемых вариаций почвенного радона и температуры в скважинах с процессом подготовки произошедших сейсмических событий.

Район исследования — острова Южной группы Большой Курильской гряды. На Южно-Курильском геофизическом стационаре Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (о. Кунашир) был организован мониторинг объемной активности почвенного радона (ОАР) и температурные измерения в скважине Kup-1. Анализировались результаты мониторинговых наблюдений за 2011–2018 гг.

Большой объем исследований по изучению прогностических возможностей измерения уровня столба жидкости по скважинам был выполнен в Южно-Курильском регионе [8]. Если для уровня столба жидкости и температуры по скважинам рядом авторов [4, 7] были исследованы закономерности их изменения в зависимости от расстояния и магнитуды события, то для радона сравнительно мало работ, в которых детально исследовалось его поведение. К настоящему времени нет определенной ясности относительно времени возникновения аномалии ОАР перед тектоническим событием. Имеющиеся опубликованные данные по времени проявления аномалии радона перед событием и продолжительности аномалии довольно противоречивы и не дают ответа на вопрос — к какой категории предвестников относятся аномалии радона?

Булашевич и др. в 1990–1993 гг. проводили исследование на Северо-Уральском бокситовом руднике (рис. 1) [1]. Удалось установить, что перед горными ударами в наблюдательных скважинах происходили изменения концентрации радона, связанные с изменением напряженного состояния горных пород. При этом существуют различия в изменениях ОАР в ближней и дальней (в масштабах размеров блоков, вовлеченных в подготовку горного удара) зонах (см. рис. 1). Событие дальней зоны возникает на экстремуме или на спаде аномалии. События ближней зоны происходят после окончания аномалии, на фоновых значениях кривой ОАР. Анализ полученных результатов позволил авторам высказать предположение о накоплении упругой энергии за счет деформации изгиба (или кручения) массива горных пород [1]. При изгибных деформациях возникают зоны сжатия, растяжения и переходная зона, в которой отсутствуют деформации сжатия и растяжения. Следствием наличия зон сжатия и растяжения является изменение объема порового пространства и проницаемости горных пород. Наличие таких зон объясняет различную форму аномалий ОАР, в том числе и отсутствие в ряде случаев каких-либо изменений перед тектоническими событиями [12]. Возникновение радоновых аномалий перед землетрясением происходит в большом временном диапазоне, начиная от первых суток до нескольких месяцев [13, 15]. В литературе практически не встречаются примеры длительного мониторинга ОАР в сейсмически активном районе. Семилетний Калифорнийский эксперимент [14] не полностью выполнил свою задачу по ряду причин.

Для установления вероятных закономерностей отражения подготовки сейсмических событий в кривых ОАР был выполнен анализ результатов длительных мониторинговых наблюдений, полученных нами в 2011–2018 гг. на о. Кунашир. Измерения объемной активности радона проводились в адвективном режиме (почвенный воздух с глубины 70 см принудительно доставлялся к детектору с помощью насоса). Для анализа брались сейсмические события с магнитудой больше 4 в радиусе 500 км от станции мониторинга в Южно-Курильске. Радиус был выбран на основе расчетов И.П. Добровольского [5] с учетом того, что максимальная магнитуда землетрясений, произошедших за это время в исследуемом районе не превышала 7. Экспериментальное подтверждение соотношения, полученного И.П. Добровольским, приведено в работах по изучению: изменений уровня воды в скважинах Центральной Японии [15], радоновых вариаций в Индии [9], на Камчатке [10], в Курило-Камчатском регионе [11], вариаций температуры в скважине на о. Кунашир [4].



**Рис. 1.** Поведение объемной активности радона при подготовке горных ударов в шахте Северо-Уральского бокситового рудника [1]. Объемная активность радона приведена в относительных единицах имп/мин.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

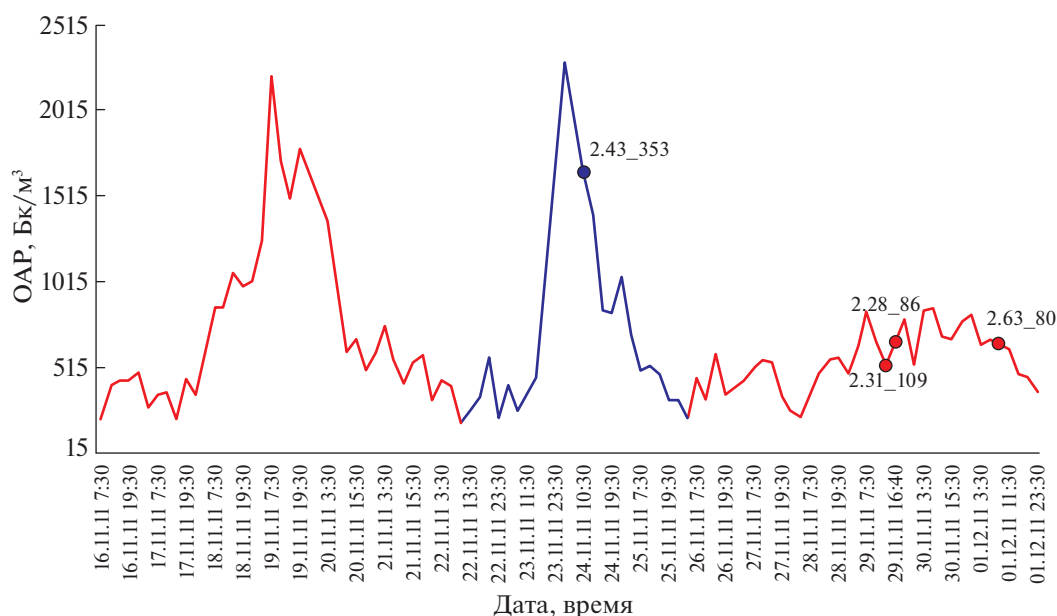
В качестве аномалии на кривой ОАР рассматривался участок, на котором не менее трех значений ОАР (при измерениях каждые 4 ч) как минимум в два раза превышали фоновый уровень перед началом повышения объемной активности радона. Фоновый уровень ОАР определялся перед каждой выделяемой аномалией.

Главной проблемой при интерпретации кривых ОАР является определение аномалий, связанных с готовящимся тектоническим событием. Аномалии могут быть связаны с событиями малой магнитуды, не включенными в регистрационный каталог сейсмических событий. Кроме того, некоторые события, следующие друг за другом, также могут отражаться незначительными аномалиями [6]. Была разработана методика сопоставления радоновых аномалий и землетрясений. Было установлено, что для правильной интерпретации зафиксированных аномалий необходимо учитывать их положение относительно ближней и дальней зоны. Наиболее важным представляется выявление аномалий, связанных с событиями ближней зоны, представляющими наибольшую опасность. В случае появления аномалии ОАР и следующего за этой аномалией землетрясения, необходимо по сейсмологическим данным оценить расстояние до произошедшего землетрясения по отношению к ближней и дальней зонам. В случае отнесения произошедшего

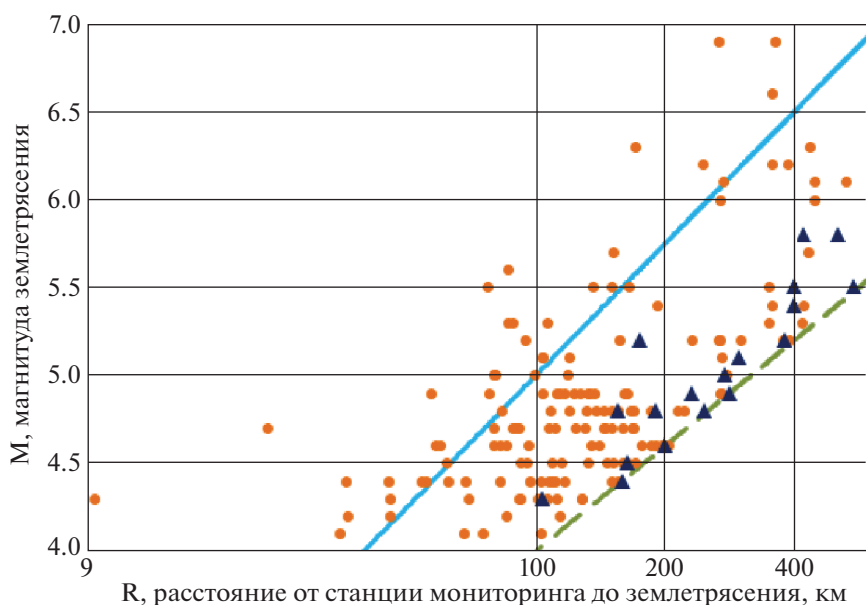
события к дальней зоне опасность, связанная с возникновением землетрясения в ближней зоне, уменьшается. Таким образом для правильной интерпретации аномалий ОАР необходимо учитывать сейсмологические данные.

Рассмотрим конкретный пример применения разработанной методики. На рис. 2 приведены две ярко выраженные радоновые аномалии и четыре последующих события.

Характеристики событий –  $K = M/\lg R$  и  $R$ , где  $M$  – магнитуда землетрясения,  $R$  – расстояние от эпицентра до станции мониторинга в км. Для первого события  $K = 2.43$ ,  $R = 353$  км, для второго  $K = 2.31$ ,  $R = 109$ , для третьего  $K = 2.28$ ,  $R = 86$ , для четвертого  $K = 2.63$ ,  $R = 80$ . Первое из событий произошло гораздо дальше трех остальных относительно станции мониторинга. Значительное повышение ОАР наблюдалось 18.11.11, затем проявился экстремум аномалии 19.11.11, к фоновым значениям вернулась ОАР 22.11.11. Для данной аномалии характерен достаточно широкий “коридор” повышенных (относительно фоновых) значений ОАР. С 16.11.11 по 22.11.11 землетрясений с  $K \geq 2$  не происходило. Позже наблюдалась еще одна аномалия почвенного радона с экстремальным значением 23.11.11 (см. рис. 2, выделена синим цветом), 24.11.11 зафиксировано далекое землетрясение. В последствие уже при фоновых значениях ОАР зафиксировано три ближних землетрясения, процесс подготовки которых отра-



**Рис. 2.** Значения объемной активности радона (ОАР) и землетрясения (показаны точками). Подписи точек: первое число – отношение магнитуды землетрясения к логарифму расстояния (в км) от эпицентра до станции мониторинга; второе число – расстояние от эпицентра до станции мониторинга.



**Рис. 3.** Тектонические землетрясения в поле значений ОАР. Точками обозначены события, отразившиеся в кривых аномалий ОАР. Треугольниками обозначены события, которые не отразились изменениями ОАР. Голубая прямая линия соответствует соотношению  $K = 2.5$ ; зеленая пунктирная линия соответствует соотношению  $K = 2$ .

зился на предыдущей продолжительной аномалии (см. рис. 2, выделена красным цветом). Так проводилось выделение аномалий объемной активности радона и их сопоставление с зафиксированными землетрясениями на всем исследуемом временном интервале. При использовании

$K \geq 2.5$  не учитывается большое количество произошедших сейсмических событий, хотя им предшествуют аномалии ОАР. Количество событий с  $K \geq 2.5$  составило только 36. Исходя из этого были рассмотрены события с соотношением  $K \geq 2$  (рис. 3).

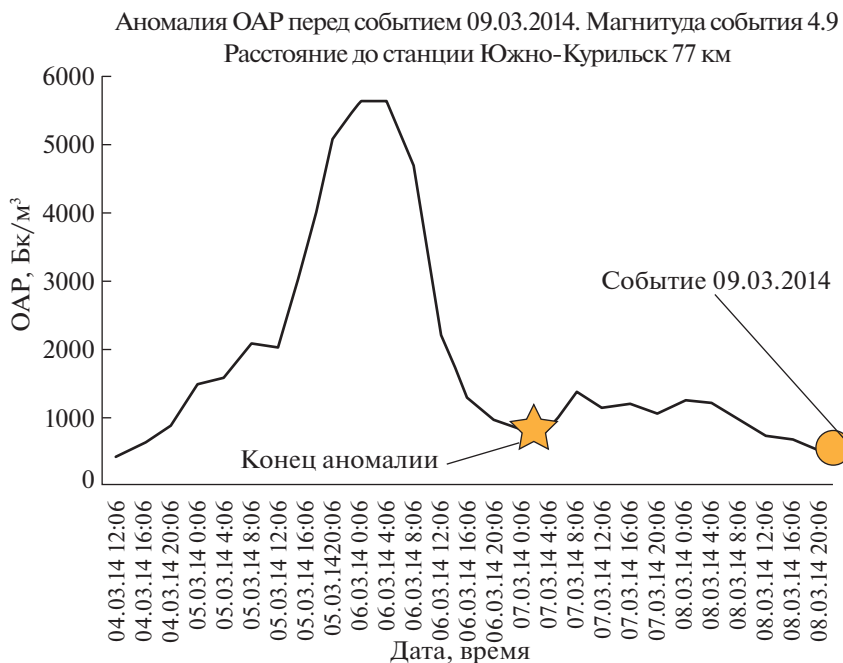


Рис. 4. Характерные точки для разделения событий на зоны проявления: ближнюю и дальнюю.

Общее количество землетрясений за рассмотренный период с  $K \geq 2$  составило 166, при этом радоновые аномалии Rn (89%) предшествовали 148-ми из них. Для получения статистически более обоснованных результатов во внимание брались все наблюдаемые аномалии ОАР, связанные со всеми проанализированными землетрясениями с  $K \geq 2$ . Удалось определить положение землетрясений относительно экстремума предшествующих аномальных значений ОАЗ на временном интервале. Каждое землетрясение из рассмотренных с  $K \geq 2$ , которому предшествовала радоновая аномалия, произошло уже после экстремума аномалии, либо совпало с ним по времени, т.е. регистрацию аномалий ОАР можно рассматривать в качестве краткосрочного прогностического критерия проявления тектонических землетрясений после прохождения ее экстремума.

Исходя из того, что угрозу несут в основном землетрясения ближней зоны, одной из приоритетных задач является разделение тектонических событий по зонам возникновения. Для решения данной задачи необходимо рассматривать два параметра: время проявления землетрясения и время окончания предшествующей радоновой аномалии (рис. 4).

На рис. 5 приведено распределение землетрясений от времени окончания аномалии. За точку начала отсчета по оси абсцисс взят момент окончания аномалии.

Отрицательные значения соответствуют землетрясению, произошедшему во временном ин-

тервале между экстремумом и окончанием аномалии. Положительные значения соответствуют событию во временном интервале после окончания аномалии и выходу на фоновые значения. Для событий, проявившихся после окончания аномалии, расстояние до станции мониторинга в пределах 130 км. А для землетрясений, проявившихся в интервале между экстремумом и окончанием аномалии ОАР, расстояние превышает 180 км.



Рис. 5. Зависимость расстояния между станцией мониторинга и событием от времени между окончанием аномалии радона и землетрясением для  $M/IgR \geq 2$ .

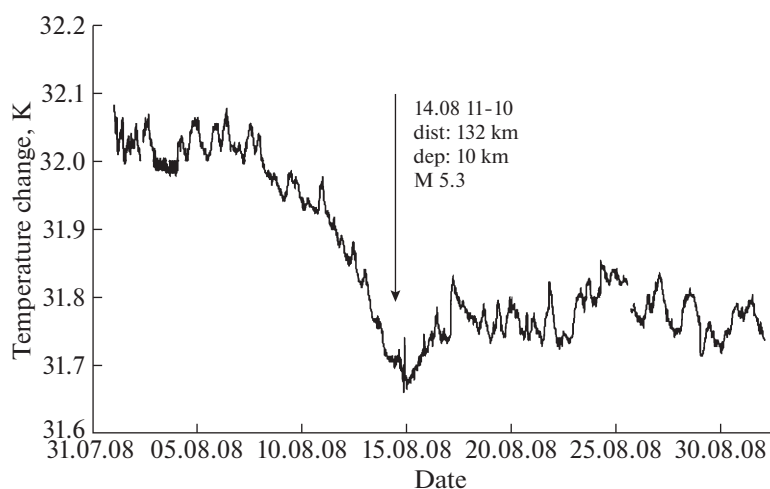


Рис. 6. Вариации температуры на глубине 240 м в скважине Kun-1 [2].

Таким образом, можно считать, что радиус ближней зоны находится в пределах 130 км для геодинамических условий Южно-Курильского региона. Интервал 130–180 км относится к промежуточной зоне, т.е. зоне между сжатием и растяжением, по аналогии с горными ударами [11]. Дальняя зона начинается с расстояний более 180 км.

Исходя из статистического анализа зарегистрированных событий, время задержки события ближней зоны относительно экстремума зафиксированной аномалии ОАР не превышает 28 сут. Указанная задержка времени реализации события после экстремума кривой ОАР может объясняться разным временем накопления упругих напряжений.

Изменение объема порового пространства при вариациях напряженно-деформированного состояния также инициирует движения жидкости по стволу скважины или межпластовые перетоки в заколонном пространстве. В условиях положительного вертикального температурного градиента такие движения отражаются изменениями температуры на заданной глубине [4].

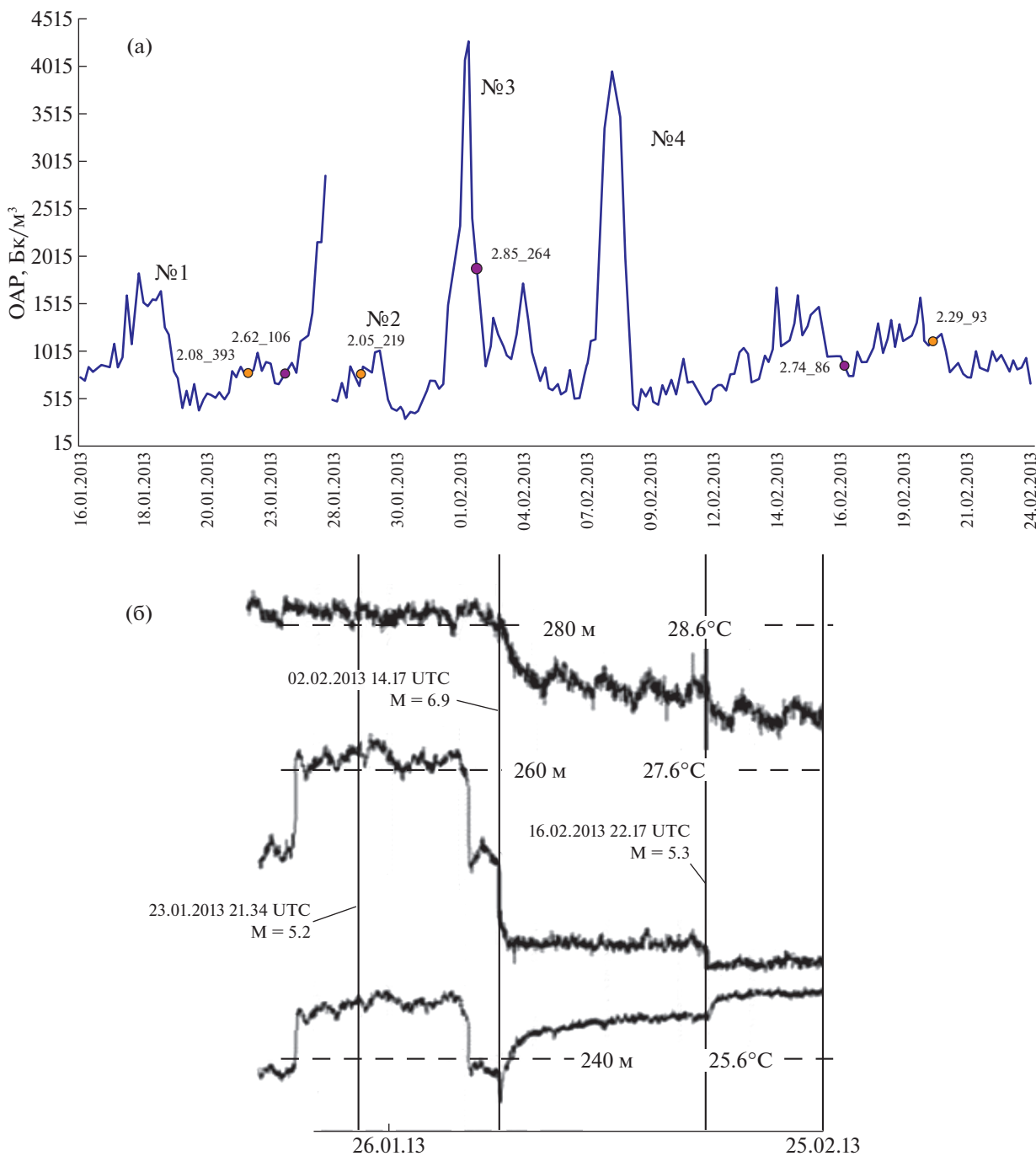
На рис. 6 приведен пример приблизительно недельного снижения температуры на глубине 240 м перед землетрясением с  $M = 5.3$ , произошедшим в 132 км ( $K = 2.5$ ) от станции мониторинга (скважина Kun-1, о. Кунашир) [2].

Снижение температуры свидетельствует о нисходящем потоке жидкости по заколонному пространству и деформации растяжения. Реализация землетрясения привела к смене растяжения на сжатие и частичному восстановлению температур. В других случаях происходило полное восстановление. Так, при подготовке катастрофического землетрясения Тохоку (11.03.2011,  $M = 9.0$ ,

$R = 700$  км,  $K = 3.2$ ) снижение температуры в скважине Kun-1 происходило минимум полгода, а восстановление – в течение двух суток [2, 3]. Анализ большой выборки данных температурного мониторинга подтвердил устойчивую косейсмическую температурную реакцию в скважине Kun-1 на события с  $K \geq 2.5$ . Однако далеко не всегда они предвараются закономерными предсейсмическими изменениями [2].

Рассмотрим подробно отражение процесса подготовки событий в вариациях ОАР (рис. 7а) и температуры (рис. 7б) с 16 января по 24 февраля 2013 г. На рис. 7а показаны 4 аномалии ОАР, выделенные по разработанной методике. Аномалия № 1 связана с подготовкой события 23.01.2013 г. На это указывают  $K = 2.62$  и  $R = 106$  км (ближняя зона). В температурных изменениях подготовка данного землетрясения не отразилась. Аномалия № 2 связана с землетрясением 29.01.2013 г. с  $K = 2.05$  и  $R = 219$  км (дальняя зона). В температурных вариациях она также не отразилась. Аномалия ОАР № 3 соответствует событию 02.02.2013 г. с  $K = 2.85$  и  $R = 264$  км, отразившемуся на спаде аномалии ОАР, что характерно для дальней зоны. В вариациях температуры данное событие отразилось снижением температуры на двух горизонтах. Это соответствует полученной закономерности отражения событий с  $K \geq 2.5$  в температурных кривых. Следующая аномалия № 4 связана с событием 16.02.2013 г. с  $K = 2.74$  и  $R = 86$  км. Оно отразилось после выхода аномалии ОАР на фоновые значения (ближняя зона). Повышение величины ОАР 14.02.2013 г. и 20.02.2013 г. не попадают под критерий выделения аномалий и не рассматриваются.

Таким образом проведенный сопоставительный анализ отражения процесса подготовки землетрясений в кривых ОАР и температурных ва-



**Рис. 7.** Наблюдаемые значения объемной активности радона (OAP) и произошедшие землетрясения (показаны точками с величиной критерия (K) и расстояния (R)) (а). Вариации температуры на глубине 240 м в скважине Kup-1, январь-февраль 2013 г. [3] (б).

риациях показал, что изменения этих величины могут быть связаны с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород. В вариациях OAP отражаются события с меньшим K ( $K \geq 2$ ) по сравнению с температурными изменениями, которые вызываются событиями с  $K \geq 2.5$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение аномалий почвенного радона и вариаций температуры как вероятных предвестников землетрясений, представляет особый интерес, так как они, как показали результаты мониторинговых наблюдений, вызываются изменением напряженно-деформированного состояния горных

пород. Применение разработанных методик наблюдения и интерпретации радоновых и температурных аномалий в перспективе позволит повысить вероятность успешного прогноза землетрясений в комплексе с другими методами.

В ходе исследования установлено, что тектонические землетрясения, зафиксированные в радиусе 500 км от станции мониторинга ОАР в Южно-Курильске за период 2011–2018 гг., которым соответствует отношение магнитуды к логарифму расстояния до эпицентра больше или равно 2, отмечаются в аномалиях ОАР. Время возникновения аномалий объемной активности радона перед землетрясениями не превышает 28 сут для ближних событий и 8 сут для дальних. Установленные закономерности проявления землетрясений в кривых ОАР дают основание отнести вариации ОАР к краткосрочным предвестникам, при применении адвективного режима доставки почвенного радона к детектору.

Разработанная методика сопоставления радоновых аномалий с произошедшими тектоническими землетрясениями обеспечивает высокий процент их отражения при выполнении ретроспективного анализа. Отражение близких и далеких тектонических землетрясений на различных участках кривой ОАР позволяют ориентировочно, с учетом сейсмологической обстановки, оценивать расстояние до эпицентра будущего события и рекомендовать принятие необходимых мер по уменьшению негативных последствий от землетрясений. Вариации температурного поля перед землетрясением также можно отнести к краткосрочным предвестникам процесса подготовки землетрясений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Демежко Д.Ю., Юрков А.К., Уткин В.И., Климишин А.В. О природе температурных вариаций в скважине Кун-1 (о. Кунашир) // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 3. С. 406–414.
3. Демежко Д.Ю., Юрков А.К. О причинах квазипериодических температурных колебаний в скважине Кун-1 (о. Кунашир) // Геофизические процессы и биосфера. 2017. Т. 16. № 1. С. 75–86.
4. Демежко Д.Ю., Юрков А.К., Уткин В.И., Шапов В.А. Температурные изменения в скважине KUN-1 (о. Кунашир), вызванные землетрясением Тохоку (11.03.2011 г.,  $M = 9.0$ ) // Доклады Академии наук. 2012. Т. 445. № 2. С. 883–887.
5. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ОИФЗ АН СССР, 1991. 217 с.
6. Козлова И.А., Юрков А.К. Отражение последовательных сейсмических событий в поле объемной активности радона // Уральский геофизический вестник. 2016. № 1. С. 35–39.
7. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977–2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3–20. <https://doi.org/10.31857/S0203-0306201923-20>
8. Садовский М.А., Монахов Ф.И., Семенов А.Н. Гидрогеодинамические предвестники Южно-Курильских землетрясений // Докл. АН СССР. 1977. № 236. С. 50–53.
9. Пулинец С.А., Давиденко Д.В., Линьков А.Д., Тарасенко Т.Е. Проблема многопараметрического анализа данных прогнозного сейсмомониторинга и пути ее решения. Спутниковым технологиям нет альтернативы // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2012. Т. 12. № 7. С. 57–65.
10. Руленко О.П., Кузьмин Ю.Д. Увеличение радона и торона в районе Верхне-Паратунской гидротермальной системы Южной Камчатки перед катастрофическим землетрясением в Японии 11 марта 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2015. № 5. С. 36–42.
11. Уткин В.И., Юрков А.К. Динамика выделения радона из массива горных пород как краткосрочный предвестник землетрясения // Доклады Академии наук. 1998. Т. 358. № 5. С. 675–680.
12. 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”. Екатеринбург: Ин-т геофизики УрО РАН, 2009. С. 492–499.
13. Giuliani G.G., Giuliani R., Totani G., Eusani G., Totani F. 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. V. 1. P. 3.
14. King C. Y., King B. S., Evans W. S., Zhang W. Spatial radon anomalies on active faults in California // Applied Geochemistry. 1996. V. 11. P. 497–510.
15. King C.Y., Azuma S., Igarashi G., Ohno M., Saito H., Wakita H. Earthquake-related water-level changes at 16 closely clustered wells in Tono, central Japan // Journal of Geophysical Research. 1999. V. 104. B6. P. 13073–13082.
16. Oh Y., Kim G. A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor // Sci. Rep. 2015. № 5. 13084. <https://doi.org/10.1038/srep13084>



## VOLUME RADON ACTIVITY CHANGES AND THERMAL VARIATIONS IN THE WELL DURING EARTHQUAKE PREPARATION

I. A. Kozlova<sup>a,#</sup>, S. V. Biryulin<sup>a,##</sup>, A. K. Yurkov<sup>a,###</sup>, and D. Yu. Demezhko<sup>a,####</sup>

<sup>a</sup> Institute of Geophysics, Ural Branch of RAS,  
ul. Amundsena 100, Yekaterinburg, 620016 Russia

<sup>#</sup> E-mail: [ikozlova75@mail.ru](mailto:ikozlova75@mail.ru)

<sup>##</sup> E-mail: [serrega2009@gmail.com](mailto:serrega2009@gmail.com)

<sup>###</sup> E-mail: [akyurkov@mail.ru](mailto:akyurkov@mail.ru)

<sup>####</sup> E-mail: [ddem54@inbox.ru](mailto:ddem54@inbox.ru)

Earthquakes are the phenomena that pose a danger to humans, engineering structures and infrastructure. The possibility of predicting earthquakes is doubted, but this does not stop the research conducted in this direction. The most physically justified probable precursors of earthquakes include changes in the volume radon activity and in temperature in well liquid caused by changes in the stress-strain state of rocks. From 2011 to 2018, the monitoring of radon volume activity (VRA) and temperature measurements in the Kun-1 well were carried out at the Yuzhno-Kurilsk (Kunashir Island) geophysical station of the IMG FEB RAS. To find regularities, the data obtained were analyzed and compared with the earthquakes that occurred during the corresponding period. The Dobrovolsky model is taken as a basis, which allows us to estimate the radius of phenomena precursor manifestation. According to the model, the precursor appears before an earthquake with a ratio of magnitude to the logarithm of the distance from the event – K to the monitoring station greater than or equal to 2.5. The paper shows the successful application of the developed methods for observing and interpreting radon and temperature anomalies, which in combination with other methods will increase the probability of successful earthquake prediction in the future. It is shown that VRA anomalies can be caused by earthquakes with  $K \geq 2$ .

**Keywords:** earthquake, short-term forecast, soil radon, radon monitoring, temperature, temperature monitoring, magnitude, Kuril Islands

### REFERENCES

1. Bulashevich, Yu.P. Utkin, V.I., Yurkov, A.K., Nikolaev, V.N. *Izmenenie kontsentratsii radona v svyazi s gornymi udarami v glubokikh shakhtakh* [Radon concentration changes and mining impacts in deep mines]. *Doklady RAN*, 1996, vol. 345, no. 2, pp. 245–248. (in Russian)
2. Demezhko, D.Yu., Yurkov, A.K., Utkin, V.I., Klimshin, A.V. *O prirode temperaturnykh variatsii v skvazhine Kun-1 (o. Kunashir)* [On the nature of temperature variations in Kun-1 borehole (Kunashir Island)]. *Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, issue 3, pp. 406–414. DOI: 10.1016/j.rgg.2012.02.008. (in Russian)
3. Demezhko, D.Yu., Yurkov, A.K. On the origin of quasi-periodic temperature variations in Kun-1 well (Kunashir Island). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, vol. 53, no. 8, pp. 804–812.
4. Demezhko, D.Yu., Yurkov, A.K., Utkin, V.I., Shchapov, V.A. *Temperaturnye izmeneniya v skvazhine KUN-1 (o. Kunashir), vyzvannye zemletryaseniem Tohoku (11.03.2011 g., M = 9.0)* [Temperature changes in the KUN-1 borehole, Kunashir island, induced by the Tohoku earthquake (March 11, 2011, m = 9.0)] *Doklady Akademii Nauk*, 2012, vol. 445, no. 2, pp. 883–887. (in Russian)
5. Dobrovolskii, I.P. *Teoriya podgotovki tektonicheskogo zemletryaseniya* [Theory of tectonic earthquake preparation]. Moscow, OIFZ AN SSSR, 1991, 217 p. (in Russian)
6. Kozlova, I.A., Yurkov, A.K. *Otrazhenie posledovatel'nykh seismicheskikh sobytii v pole ob'emnoi aktivnosti radona* [Reflection consecutive seismic events in the field of radon volume activity]. *Ural'skii geofizicheskii vestnik*, 2016, no. 1, pp. 35–39. (in Russian)
7. Kopylova, G.N., Boldina, S.V. *Gidrogeoseismologicheskie issledovaniya na Kamchatke: 1977–2017 gg.* [Hydrogeoseismological research on Kamchatka in 1977–2017 year: history and results]. *Vulkanologiya i seismologiya*, 2019, no. 2, pp. 3–20. <https://doi.org/10.31857/S0203-0306201923-20>. (in Russian)
8. Sadovskii, M.A., Monakhov, F.I., Semenov, A.N. *Gidrogeodinamicheskie predvestniki Yuzhno-Kuril'skikh zemletryaseni* [Hydrogeodynamic precursors of the South Kuril earthquakes]. *Dokl. AN SSSR*, 1977, no. 236, pp. 50–53. (in Russian)
9. Pulinec, S.A., Davidenko, D.V., Lin'kov, A.D., Tarasenko, T.E. *Problema mnogoparametricheskogo analiza dannykh prognoznogo seismomonitoringa i puti ee resheniya. Sputnikovym tekhnologiyam net al'ternativy* [The multiparametric analysis problem of predictive seismic monitoring data and ways to solve it. There is no alternative to satellite technologies]. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya*, 2012, pp. 57–65. (in Russian)

10. Rulenko, O.P., Kuz'min, Yu.D. *Uvelichenie radona i torona v raione Verkhne-Paratunskoi gidrotermal'noi sistemy Yuzhnoi Kamchatki pered katastroficheskim zemletryaseniem v Yaponii 11 marta 2011 g.* [Increased radon and thoron in the Verkhne-Paratunka hydrothermal system, southern Kamchatka prior to the catastrophic Japanese earthquake of March 11, 2011]. *Vulkanologiya i seismologiya*, 2015, no. 5, pp. 36–42.
11. Utkin, V.I., Yurkov, A.K. *Dinamika vydeleniya radona iz massiva gornykh porod kak kratkosrochnyi predvestnik zemletryaseniya* [Dynamics of radon release from rock mass as a short-term earthquake precursor]. *Doklady RAN*, 1998, vol. 358, no. 5, pp. 675–680. (in Russian)
12. Utkin, V.I., Yurkov A.K. *Prognoz zemletryaseni. Est' li vykhod iz tupika?* [Earthquake forecast. Is there a way out of the impasse?]. *Pyatye nauchnye chteniya Yu.P. Bulashevicha. Geodinamika. Glubinnoe stroenie. Teplovoe pole Zemli. Interpretatsiya geofizicheskikh polei* [The 5th Sci. Conf. named after Yu.P. Bulashevich. Geodynamics, deep structure, thermal field of the Earth. Interpretation of geophysical fields]. 2009, pp. 492–499. (in Russian)
13. Giuliani, G.G., Giuliani, R., Totani, G., Eusani, G., Totani, F. 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. P. 3.
14. King, C. Y. King, B. S., Evans, W. S., Zhang, W. Spatial radon anomalies on active faults in California. *Applied Geochemistry*, 1996, vol. 11, pp. 497–510.
15. King, C.Y., Azuma, S., Igarashi, G., Ohno, M., Saito, H., Wakita, H. Earthquake-related water-level changes at 16 closely clustered wells in Tono, Central Japan. *Journal of Geophysical Research*, 1999, vol. 104, B6, pp. 13073–13082.
16. Oh, Y., Kim, G. A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor. *Sci. Rep.*, 2015, no. 5, 13084. <https://doi.org/10.1038/srep13084>.