УДК 550.3 DOI: 10.31431/1816-5524-2019-4-44-73-83

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВЕННОГО РАДОНА ПРИ ПОДГОТОВКЕ И РЕАЛИЗАЦИИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ЮЖНО-КУРИЛЬСКОГО РЕГИОНА

© 2019 С.В. Бирюлин, И.А. Козлова, А.К. Юрков

ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, 620016; e-mail: akyurkov@mail.ru

Выполнен анализ мониторинговых наблюдений объемной активности радона (ОАР) на станциях Южно-Курильск и Курильск с 2011 г. По полученным данным определен характер зависимости проявления в вариациях ОАР сейсмических событий. При анализе использовались только события, удовлетворяющие величине отношения магнитуды к логарифму расстояния больше 2.5. Для характеристики положения момента сейсмического события на кривой ОАР были определены: продолжительность аномалии, время от начала аномалии до тектонического события, время от экстремума до события и время от конца аномалии до события. Установлено, что характерные вариации объемной активности почвенного радона для условий Южно-Курильского региона начинаются за несколько дней до вызвавшего их события, т.е. относятся к краткосрочным предвестниковым эффектам; тектонические события на кривой изменения ОАР не наблюдаются на восходящей ветви аномалии; тектонические события разной удаленности от регистрирующей станции отмечаются на разных частях кривой ОАР; радиус ближней зоны составляет 50–70 км.

Ключевые слова: объемная активность радона, землетрясение, магнитуда, предвестники, Курильские острова.

ВВЕДЕНИЕ

Принципиальная возможность предсказания землетрясений основывается на факте, что это событие не является внезапным, а готовится продолжительное время и этот процесс раскрывает себя в различных физических явлениях, которые в ряде случаев могут быть предвестниками землетрясений. Важной прикладной задачей является качественное и количественное описание проявления предвестников землетрясений. Предвестники определяются как аномальное поведение каких-либо параметров геофизических полей в период, предшествующий землетрясению. Обычно они фиксируются на поверхности Земли или верхней части геологического разреза. Зона проявления предвестников землетрясения определяется как часть дневной поверхности, содержащая эпицентр будущего землетрясения и ограниченная линией, на которой «предвестниковые» возмущения сравниваются с фоновыми вариациями. Также предвестники имеют ограниченные дальнодействие и продолжительность времени их проявления, зависящие от магнитуды готовящегося землетрясения.

Создано достаточно большое количество физико-математических моделей подготовки землетрясений, в которых оценены радиус распространения «предвестникового» явления, время и продолжительность его проявления, связь с энергией готовящегося события (Боброва, Пережогин, 2012; Пантелеев, Наймарк, 2014; Ребецкий, 2007; Собисевич, 2002; Соболев, Пономарев, 2003). Напряженное состояние горных пород сказывается на структуре порового пространства, то есть пористости и проницаемости. Предполагаем, что процесс подготовки землетрясения связан с изменениями напряженного состояния горных пород. Эти изменения должны отразиться в вариациях состава подземной атмосферы и гидросферы. На наш взгляд, достаточно адекватно описывают процесс деформационных изменений при подготовке тектонического события и их отражение в гидрогеологических факторах модель

И.П. Добровольского (1991), учитывающая размеры зоны проявления предвестников по деформациям. На основе модели получена простая оценка для радиуса зоны проявления предвестников. Расстояния (R), на которых обнаруживаются деформации и наклоны определяются по следующим формулам, соответственно:

$$R_1 = \begin{cases} 10^{0.5M} \text{ км}, M < 5 \\ 10^{0.433M} \text{ км}, M \geq 5 \end{cases},$$

где M — магнитуда землетрясения;

$$R_2 = 10^{0.413M} \text{ км}.$$

Исходя из того, что $\lg e = 0.434$, где e — основание натуральных логарифмов, радиус зоны проявления предвестников предполагается оценивать выражением:

$$R = e^M \text{ км}. \quad (1)$$

Прологарифмировав обе части выражения (1) получим:

$$\lg R = \lg e^M;$$

$$\lg R = M \times \lg e;$$

$$1/\lg e = M/\lg R.$$

Округлив значение отношения $1/\lg e$ до одного знака после запятой получим, что для приведенной оценки радиуса зоны проявления предвестников справедливо выражение (Добровольский, 1991):

$$M/\lg R = 2.5 \quad (2)$$

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

Изменения в структуре порового пространства могут отражаться на миграции почвенных газов. В качестве индикатора таких изменений наиболее удобно применять радон, который достаточно широко используется для прогностических целей во всем мире (Уткин, Юрков, 1998; Фирстов, Макаров, 2018; Фирстов и др., 2017а, 2017б; Aumento, 2011; Chang, Lin, 1979; Dubinchuk, 1991; Hatuda, 1953; Kasahara, 1979; King et al., 1996; Teng, 1980).

Радон радиоактивный газ, который входит в радиоактивный ряд урана-238. Период полураспада радона равен 3.825 суток. Использование радона в качестве прогностического критерия обусловлено рядом факторов.

Во-первых, он непрерывно генерируется в горных породах в процессе радиоактивного распада радия. Радон присутствует практически во всех горных породах и уменьшение его концентрации как за счет распада, так и за счет миграции из массива в воздух постоянно компенсируется новой генерацией этого газа. Поэтому среднее содержание радона в массиве всегда постоянно (Новиков, Капков, 1965).

Во-вторых, миграция радона в горном массиве и его выделение с поверхности почвы определяются макроскопическим коэффициентом диффузии, который зависит в большей степени от пористости, проницаемости и трещиноватости массива. В ряде случаев, при значительной проницаемости верхней части геологического разреза и восходящих газовых потоков конвекционный перенос радона с газовыми струями может осуществляться с глубин до 200 м (Уткин, Юрков, 1998).

В-третьих, несмотря на то что содержание радона в восходящих газовых потоках составляет ничтожные доли, не возникает проблем с его регистрацией ввиду его радиоактивности. Например, радон надежно регистрируется при наличии приблизительно 30–50 распадов в секунду в одном кубическом метре, то есть активность радона составляет 30–50 Бк/м^3 (ОАР). Это значит, что в одном кубическом метре содержится 10^7 атомов радона, или его концентрация в газовой смеси составляет около 10^{-16} объемных % (Уткин, Юрков, 1998). Поэтому содержание радона измеряется количеством распадов в одном кубическом метре.

Проницаемость массива, наличие в нем связанных пор и трещин, заметно зависит от напряженно-деформированного состояния массива. Очевидно, что при сжатии массива проницаемость его снижается, а при растяжении увеличивается. Соответственно изменяется кажущийся коэффициент диффузии. Следовательно, изменения концентрации радона в приповерхностном слое почвы будут отражать динамические изменения напряженно-деформированного состояния горного массива в значительном объеме. Указанные факторы и служат основой для исследования поля вариаций радона, как индикатора изменений напряженно-деформированного состояния геологической среды и предвестника сейсмических событий.

Использование радона, как индикатор изменений напряженного состояния горных пород, приводящих к тектоническим землетрясениям широко используется во всем мире (Уткин, Юрков, 1998; Фирстов, Макаров, 2018; Фирстов и др., 2017а, 2017б; Aumento, 2011; Chang, Lin, 1979; Dubinchuk, 1991; Hatuda, 1953; Kasahara, 1979; King et al., 1996; Teng, 1980). Имеются примеры удач-

ного прогнозирования сейсмических событий. В частности, это относится к работам китайских ученых, успешно предсказавших землетрясение с магнитудой 7.3 в Хайчэн 4 февраля 1975 (Fu, Tatsuoka, 1984), итальянских (Aumento, 2011) и российских ученых (Макаров, 2017; Фирстов, Макаров, 2018). В тоже время, к сожалению, имеется и достаточно много неудачных применений вариаций ОАР прогнозирования землетрясений, в частности, в масштабном калифорнийском проекте. Геологической службой США в 1976–1985 гг. в центральной Калифорнии был проведен уникальный эксперимент по регистрации выделения радона трековыми детекторами из массива горных пород. Регистрацию проводили в 60 наблюдательных точках, расположенных вдоль известных своей сейсмичностью разломов земной коры: Сан-Андреас, Хейвард, Калаверас. Наличие большого объема данных по исследуемой площади вдоль разлома Сан-Андреас позволило построить карты ретроспективного анализа (изучаемого уже после свершения события) динамических изменений концентрации радона перед сейсмическими событиями (Уткин, Юрков, 1998). Но получить какие-либо закономерные изменения ОАР при подготовке тектонических событий в результате этого эксперимента не удалось. Неудачные результаты калифорнийского и ряда других экспериментов с одной стороны говорят о сложном процессе образования радоновых аномалий при процессах подготовки тектонических событий, а с другой о несовершенстве применяемых методик и аппаратуры.

Реакция радона, вариации уровня столба жидкости и температуры в скважинах, связанные с изменениями структуры порового пространства, зависят от расстояния до эпицентра и магнитуды события. Если для изменений уровня столба жидкости и температуры по скважинам, рядом авторов (Демежко и др., 2012; Копылова, Болдина, 2019) были исследованы закономерности их поведения, в зависимости от расстояния и магнитуды события, то для радона сравнительно мало работ, в которых бы детально исследовалось его поведение. К настоящему времени нет определенной ясности относительно времени проявления вариаций ОАР перед тектоническим событием и положения произошедшего землетрясения на кривой ОАР в зависимости от расстояния до эпицентра. Определение положения землетрясения на кривой ОАР позволит разделить события на «ближние» и «дальние» по аналогии с горными ударами (Уткин, Юрков 1998), что является важным при принятии решений по предупредительным мерам защиты от возможных землетрясений. Так как события, произошедшие в «ближней» зоне, представляют наибольшую опасность для населения, то важно знать промежуток времени от экстремума и времени выхода на фоновые значения до момента сейсмического события.

В настоящей работе на основе наблюдений за вариациями ОАР на станциях Южно-Курильск и Курильск выполнен анализ зависимости проявления в вариациях ОАР сейсмических событий, начиная с 2011 г.

Количество зарегистрированных сейсмических событий зависит от радиуса охвата относительно станции наблюдения. В нашем случае он выбирался, исходя из теоретических расчетов проявления деформаций по модели И.П. Добровольского (1991). За период с 2011 по 2018 гг. максимальная магнитуда землетрясений, происходивших в Южно-Курильском регионе, не превышала 7. Поэтому эпицентральное расстояние выбрано меньше 500 км.

В данной работе мы не рассматривали зависимость величины аномалии объемной активности радона от характеристик сейсмических событий. Основанием для этого служило то обстоятельство, что на аномалии ОАР оказывают влияние предыдущие события.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАДОНОВОГО МОНИТОРИНГА

Курильский архипелаг представляет собой дугообразно изогнутую цепь островов. Протягиваясь от южной оконечности Камчатки к Хоккайдо, он как бы соединяет в одно целое эти удаленные друг от друга, но геологически близкие области. Вместе с Камчаткой и северо-восточной частью Хоккайдо Курильские острова образуют сложную тектоническую структуру, состоящую из двух параллельных антиклинальных поднятий. Восточное поднятие обычно называют внешней дугой, оно соответствует Малой Курильской гряде; Западное поднятие, называемое внутренней дугой, соответствует Большой Курильской гряде. Курильская островная дуга представляет область повышенной сейсмической опасности, сейсмичность одна из самых высоких на Земле, немногим меньше, чем в северо-восточной Японии. Данная область характеризуется повышенной вулканической активностью, сформированной более 85 наземными и подводными вулканами, в совокупности их более 200 (Сидоренко, 1964).

Для мониторинга объемной активности радона нами использовалась серийно выпускаемая аппаратура РГА-04, SIRAD MR106 и RADEX MR107. Измерения выполнялись в режиме вынужденной конвекции (Козлова, Юрков, 2005). Доставка почвенного воздуха из

шпуров глубиной 70 см выполнялась мембранным насосом, с производительностью 1–2 литра в минуту. Цикл измерения длился четыре часа. Данные непрерывно записывались вышеупомянутыми приборами и ежемесячно передавались для обработки в Екатеринбург. Сейсмические события для ретроспективного анализа брались из сейсмических каталогов USGS (Геологическая служба США).

Измерения объемной активности радона выполнялись на двух станциях. Одна из них расположена в Южно-Курильске (о. Кунашир), вторая в Курильске (о. Итуруп).

Для анализа выбирались сейсмические события с магнитудой более 4.0 за период с 30.09.2011 по 18.10.2018 в радиусе 500 километров от каждой из станций мониторинга ОАР. На основе сейсмических каталогов USGS для каждого землетрясения проводились вычисления расстояния (S) до соответствующей станции мониторинга ОАР (3), а также вычислялся азимут (A) (4) (Кузьмин, Герасимов, 1973).

$$S = R \times \arccos(\sin(\varphi_1) \times \sin(\varphi_2) + \cos(\varphi_1) \times \cos(\varphi_2) \times \cos(\lambda_1 - \lambda_2), \quad (3)$$

где:

R — радиус Земли;

φ_1, λ_1 — широта и долгота станции мониторинга ОАР;

φ_2, λ_2 — широта и долгота землетрясения.

$$A = \arctan2(\cos(\varphi_1) \times \sin(\varphi_2) - \sin(\varphi_1) \times \cos(\varphi_2) \times \cos(\lambda_2 - \lambda_1); \sin(\lambda_2 - \lambda_1) \times \cos(\varphi_2)) \quad (4)$$

По полученным значениям расстояний до эпицентров рассматриваемых сейсмических событий вычислялось отношение магнитуды к логарифму расстояния.

ВЫДЕЛЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ УЧАСТКОВ ИЗМЕНЕНИЯ ОАР

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

При обработке результатов долговременного мониторинга ОАР на станциях Южно-Курильского полигона, принцип выделения аномалий был следующий: в качестве аномалии на кривой ОАР рассматривался участок, на котором не менее трех значений ОАР (при измерениях каждые четыре часа) как минимум в два раза превышали фоновый уровень перед началом повышения объемной активности радона. Фоновый уровень ОАР определялся перед каждым конкретным землетрясением, так как он зависит от нескольких факторов (температура, влажность, приливные воздействия и ряд других). Всего было выделено 600 аномалий. Эффективность отражения тектонических событий в выделенных аномалиях ОАР составила 72% по каждой станции мониторинга. То есть процент ложных аномалий, не связанных с проявлением процесса подготовки тектонического землетрясения для выбранного эпицентрального расстояния при регистрации существующими станциями на Южно-Курильском полигоне не превышает 28%.

Для характеристики положения момента сейсмического события на кривой ОАР были определены (рис. 1): продолжительность аномалии (АВ), время от начала аномалии до тектонического события (АГ), время от экстремума до события (БГ) и время от конца аномалии до события (ВГ). Последняя величина является важной в плане определения «ближней» и «дальней» зон подготовки сейсмического события. На рис. 1 и рис. 2 приведены примеры отражения событий «ближней» и «дальней» зонах.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТРАЖЕНИЯ СОБЫТИЙ В ИЗМЕНЕНИЯХ ОАР ДЛЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С СООТНОШЕНИЕМ МАГНИТУДЫ К ЛОГАРИФМУ РАССТОЯНИЯ БОЛЬШЕ 2.5

Общее количество сейсмических событий, удовлетворяющих отношению магнитуды к логарифму расстояния ⩾2.5 составило 74. Среди них оказалось 39 землетрясений, перед которыми на станциях наблюдения отразились аномальные изменения ОАР, что составляет 65% от общего количества землетрясений попадающих под критерий ⩾2.5. Несовпадение процента аномалий ОАР, связанных с тектоническими событиями при учете землетрясений, удовлетворяющих отношению магнитуды к логарифму расстояния ⩾2.5 и при учете всех аномалий ОАР, возможно говорит о том, что мы имеем дело с проявлением разных механизмов образования аномалий. Но так как критерий отношения магнитуды события к логарифму расстояний ⩾2.5 выпол-

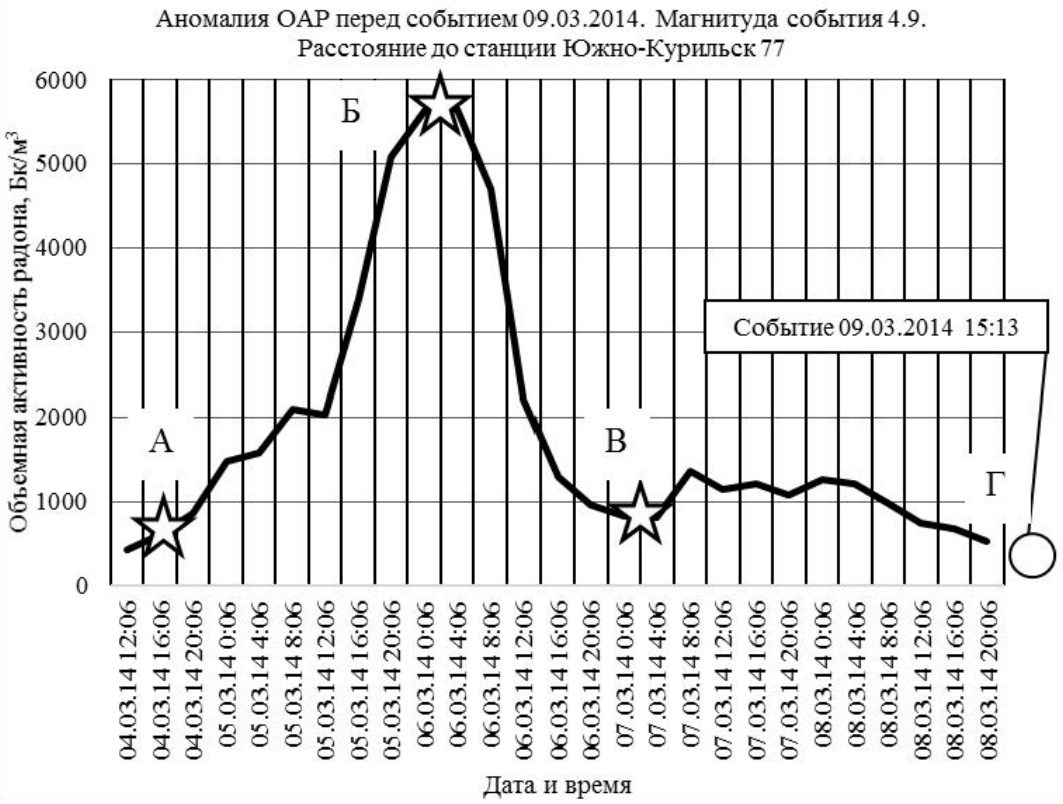

Рис. 1. Пример отражения события «ближней» зоны и определяемые параметры по кривой вариации ОАР.

Fig. 1. An example of the reflection of the events in the "near" zone and determined parameters on the VRA variation curve.

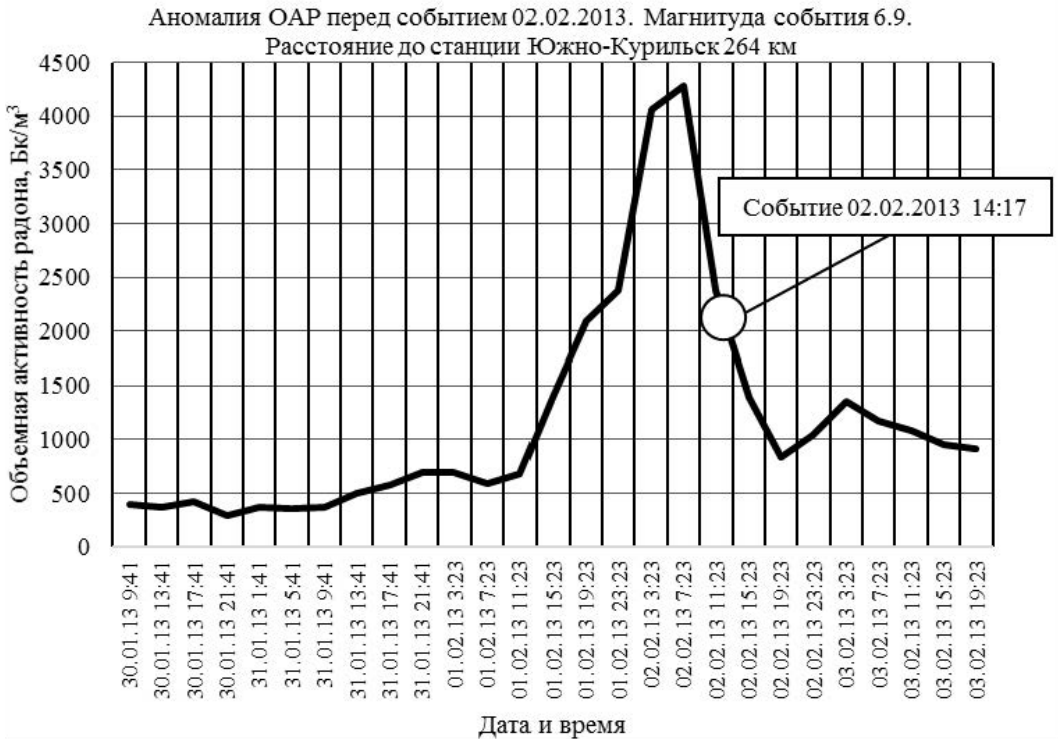

Рис. 2. Пример отражения события «дальней» зоны.

Fig. 2. An example of the reflection of the event in the «far» zone.

няется для двух прогностических методов — уровень и температура, то при анализе мы использовали только аномалии ОАР, связанные с землетрясениями, удовлетворяющими критерию ⩾2.5.

Установленной закономерностью для рассмотренных сейсмических событий является их приуроченность к нисходящей ветви аномалии ОАР, (при использовании для регистрации способа вынужденной конвекции) (Юрков, Козлова, 2005). Сейсмические события проявляются на аномалиях, начиная с точки экстремума и далее на выходе аномалии на фоновые значения. В большинстве случаев нисходящая ветвь аномалии аппроксимируется кривой распада радона. Что может свидетельствовать о прекращении поступления аномального радона в поровое пространство.

Определение времени начала проявления «предвестниковой» аномалии важно с точки зрения оценки прогностической информативности изменений ОАР (табл. 1). Анализ 39 событий с отношением магнитуды к логарифму расстояния больше, либо равно 2.5 показал, что в 28% случаев характерно событие проявляется 1–2 суток после начала аномалии. Для 31% случаев временной интервал с начала аномалии ОАР составил 2–3 суток, для 18% — 3–4 суток. То есть для 77% событий интервал времени от начала проявления аномалии ОАР до самого землетрясения укладывается в пределы четырех суток. При этом для всех событий интервал от начала аномалии до самого события не превышает 8 суток.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что аномалии ОАР могут рассматриваться, как краткосрочный предвестник сейсмического события.

Еще одним важным показателем, которому уделяется внимание в данной работе, является продолжительность выделенных аномалий объемной активности радона, которая считалась от начала аномалии до ее завершения (табл. 2).

Таблица 1. Распределение временных интервалов от начала аномалий ОАР до сейсмических событий с отношением магнитуды к логарифму расстояния больше или равном 2.5.

Table 1. Distribution of time intervals from the beginning of VRA anomalies to seismic events with the ratio of magnitude to the logarithm of distance greater than or equal to 2.5.

Период, сутки	Количество событий	Процент от общего количества
0.5–1	2	5
1–2	11	28
2–3	12	31
3–4	7	18
4–5	2	5
5–8	5	13

49% всех аномалий укладывается в интервал 1–2 суток, 31% укладывается в интервал 2–3 суток, 7% укладывается в интервал 3–4 суток. То есть 87% от всех рассмотренных аномалий длятся не более четырех суток. При этом все аномалии укладываются в период 6 суток.

Таким образом, и по продолжительности аномалий вариации ОАР можно рассматривать как краткосрочный предвестник землетрясения.

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ПРОЯВЛЕНИЯ СОБЫТИЯ («БЛИЖНЯЯ», «ДАЛЬНЯЯ» ЗОНЫ)

Для определения времени проявления землетрясения по кривой изменения ОАР необходимо отталкиваться от характерных точек. Единственной точкой, которая хорошо отмечается на кривой и имеет физическую природу является точка максимума ОАР. Практически все события происходят после прохождения точки максимума. Причем далекие события отмечаются на нисходящей ветви в основном до выхода аномалии на фоновые значения. Ближние события происходят преимущественно после выхода аномалии на фоновые значения. Граница зон определяется концом аномалии. Отдельно построены зависимости для каждой станции наблюдения. Зависимость для станции Курильск представлена на рис. 3, а для станции Южно-Курильск — на рис. 4.

Линии трендов на рис. 3 и 4 показывают разграничение проявившихся событий по их расстоянию до станции мониторинга ОАР. Землетрясения со средним расстоянием до станции мониторинга порядка 70 км проявлялись либо практически сразу после аномалии, либо в течение нескольких суток после нее. Более далекие события относительно станции мониторинга ОАР, в среднем 150–250 км, проявились во временном интервале между экстремумом аномалии и точкой конца аномалии ОАР.

Для станции Южно-Курильск получена картина, практически идентичная станции

Таблица 2. Распределение продолжительностей аномалий ОАР перед сейсмическими событиями с отношением магнитуды к логарифму расстояния больше или равном 2.5.

Table 2. The distribution of the durations of the VRA anomalies prior to seismic events with relation of magnitude to the logarithm of the distance greater than or equal to 2.5.

Период, сутки	Количество событий	Процент от общего количества
1–2	19	49
2–3	12	31
3–4	3	7
4–6	5	13

Рис. 3. Зависимость расстояния между станцией мониторинга и событием от интервала между окончанием аномалии радона и землетрясением для станции Курильск.

Fig. 3. Dependence of the distance between the monitoring station and the event on the interval between the end of the radon anomaly and the earthquake for the Kurilsk station.

Рис. 4. Зависимость расстояния между станцией мониторинга и событием от интервала между окончанием аномалии радона и землетрясением для станции Южно-Курильск.

Fig. 4. Dependence of the distance between the monitoring station and the event on the interval between the end of the radon anomaly and the earthquake for the Yuzno-Kurilsk station.

Курильск. За точку отсчета по оси абсцисс взят момент окончания аномалии. Для землетрясений, проявивших после окончания аномалии характерно среднее расстояние до станции мониторинга в 70 км. А для землетрясений, проявившихся в интервале между экстремумом и окончанием аномалии ОАР, среднее расстояние составило 100–150 км. Таким образом, можно считать, что характерный радиус «ближней зоны» находится в пределах 50–70 км для геодинамических условий Южно-Курильского региона. Промежуток между 50–70 км и 100–150 км относится к «промежуточной зоне» т.е. зоне между сжатием и растяжением, по аналогии с горными ударами (Уткин, Юрков, 1998). «Дальняя зона» начинается с расстояний 100–150 км.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОГО ВЛИЯНИЯ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОЧАГОВ НА ОТРАЖЕНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В КРИВЫХ ОАР

Исходя из предположения, что вулканические очаги могут затруднить передачу упругих деформаций, была сделана попытка оценить возможное влияние на отражение землетрясений в кривых ОАР. На о. Итуруп недалеко от станции мониторинга ОАР в Курильске располагаются 10 наземных вулканов: Дракон (23 — расстояние в км до станции мониторинга ОАР; 179 — азимут в градусах относительно станции мониторинга ОАР), Баранского (17; 142), Кудрявый (76; 76), Меньший брат (73; 76), Богдан Хмельницкий (13; 13), Чирип (17; 8), Атсонупури (75; 128), Стокап (60; 135), Берутарубе (112; 138), Иван Грозный (24; 178) (рис. 5).

На о. Кунашир, где также расположена станция радонового мониторинга располагаются четыре наземных вулкана: Руруй (12; 125), Тятя (34; 123), Менделеева (53; 25), Головина (63; 55) (рис. 5).

На рис. 6 схематично изображен азимутальный план всех землетрясений за период с 30.09.2011 г. по 18.10.2018 г. в радиусе 500 км от станции Курильск. Окружность поделена на четыре крупных сектора: от 0° до 90° (восточная сторона света), от 90° до 180° (восточная сторона света); от 0° до 90° (западная сторона света), от 90° до 180° (западная сторона света). Каждый крупный сектор поделен на три части (средний сектор) по 30о каждая. Каждый средний сектор, в зону которого приходятся наземные вулканы поделен на секторы по 10° (малый сектор). На рис. 7 изображен аналогичный план для станции Южно-Курильск.

Анализируя азимутальную схему для станции Курильск (рис. 6) можно выделить секторы 0°–30° и 90°–120°. Для них характерно существенно

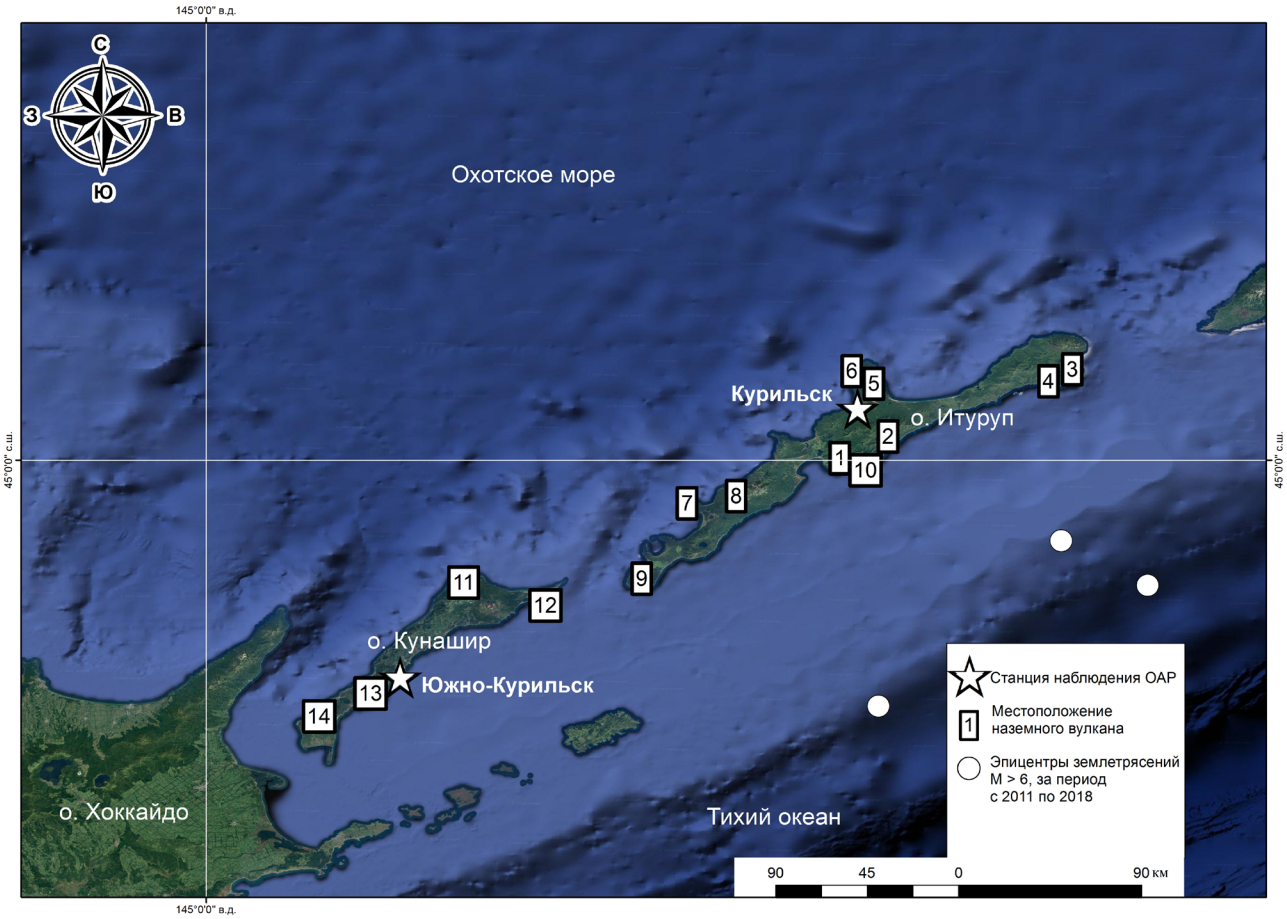

Рис. 5. Расположение станций наблюдения ОАР и наземных вулканов. Вулканы: 1 — Дракон; 2 — Баранского; 3 — Кудрявый; 4 — Меньший брат; 5 — Богдан Хмельницкий; 6 — Чирип; 7 — Атсонупури; 8 — Стокап; 9 — Берутарубе; 10 — Иван Грозный; 11 — Руруй; 12 — Тятя; 13 — Менделеева; 14 — Головнина.

Fig. 5. Location of VRA observation stations and terrestrial volcanoes. Volcanoes: 1 — Drakon; 2 — Baransky; 3 — Kudryavy; 4 — Menyshy Brat; 5 — Bogdan Hmelnitsky; 6 — Chirip; 7 — Atsonupuri; 8 — Stokap; 9 — Berutarube; 10 — Ivan Grozny; 11 — Ruruy; 12 — Tyatya; 13 — Mendeleev; 14 — Golovnin.

меньшее количество сейсмических событий, отразившихся в кривых ОАР, относительно соседних секторов. Количество сейсмических событий, отразившихся в кривых ОАР в секторе 0°–30° составляет 5, что более чем в четыре раза меньше, по сравнению с соседним сектором 30°–60°. Аналогично для сектора 90°–120°, количество отразившихся событий почти в 10 раз меньше, по сравнению с соседним сектором 120°–150°. Существует вероятность, что вулканы Дракон и Баранского могут оказывать влияние на отражение сейсмических событий в кривых ОАР в секторе 0°–30°. Аналогично вулканы Атсонупури, Стокап, Берутарубе могут оказывать влияние на отражение сейсмических событий в кривых ОАР в секторе 90°–120°. Однако также стоит отметить, что влияние других вулканов на остальные соответствующие секторы четко не проявляется.

Наблюдающееся в ряде случаев несоответствие по секторам, в которые попадают вулканы, могут объясняться несколько иным, по сравнению с наземной вулканической постройкой, пространственным расположением питающих магматических очагов.

По азимутальной схеме для станции Южно-Курильск можно выделить два сектора 0°–30° и 90°–120° (рис. 7). В секторе 0°–0° в кривых ОАР отразилось почти в три раза меньше землетрясений, чем в соседнем секторе 30°–60°. В секторе 90°–120° в кривых ОАР отразилось более чем в 4.5 раза меньше сейсмических событий, чем в соседнем секторе 120°–50°. Существует вероятность влияния вулканов Руруй, Тятя на отражение сейсмических событий в секторе 0°–30° и влияние вулканов Менделеева, Головина на отражение сейсмических событий в секторе 90°–120°.

Выполненный анализ не исключает влияние вулканических очагов, на отражение сейсмических событий на станциях мониторинга в кривых ОАР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ мониторинговых наблюдений объемной активности почвенного

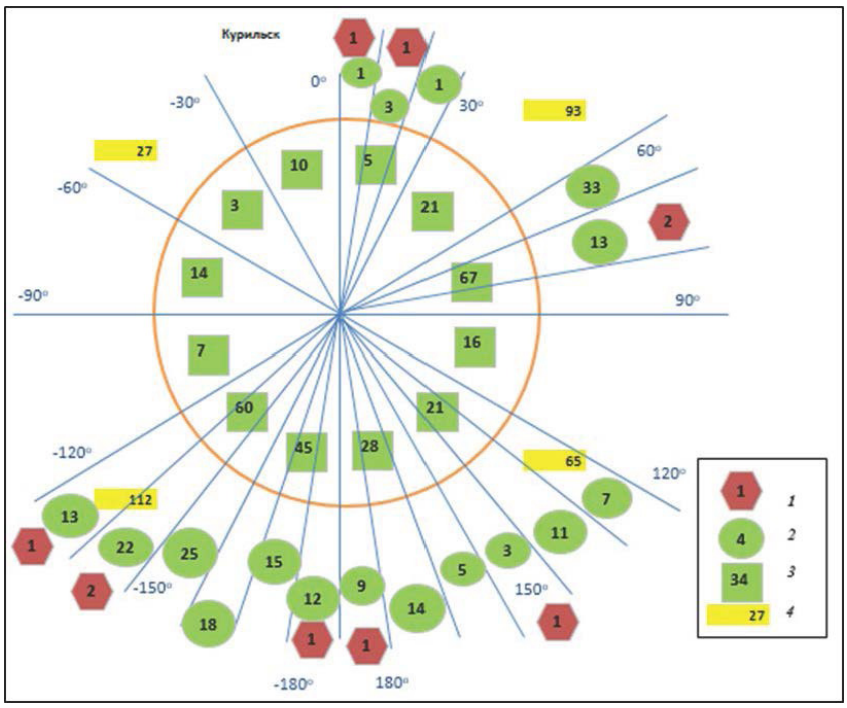

Рис. 6. Азимутальная схема расположения землетрясений, которые отразились в кривых ОАР, и вулканов относительно станции мониторинга Курильск. *1* — наземные вулканы и их количество в пределах соответствующего сектора; *2* — количество сейсмических событий, приходящихся на малый сектор; *3* — количество сейсмических событий, приходящихся на средний сектор; *4* — количество сейсмических событий, приходящихся на крупный сектор.

Fig. 6. Azimuthal layout of earthquakes that were reflected in the VRA curves and volcanoes in relation to the monitoring station Kurilsk. *1* — terrestrial volcanoes and their number within the corresponding sector; *2* — the number of seismic events occurring in a small sector; *3* — the number of seismic events occurring in the middle sector; *4* — the number of seismic events occurring in a large sector.

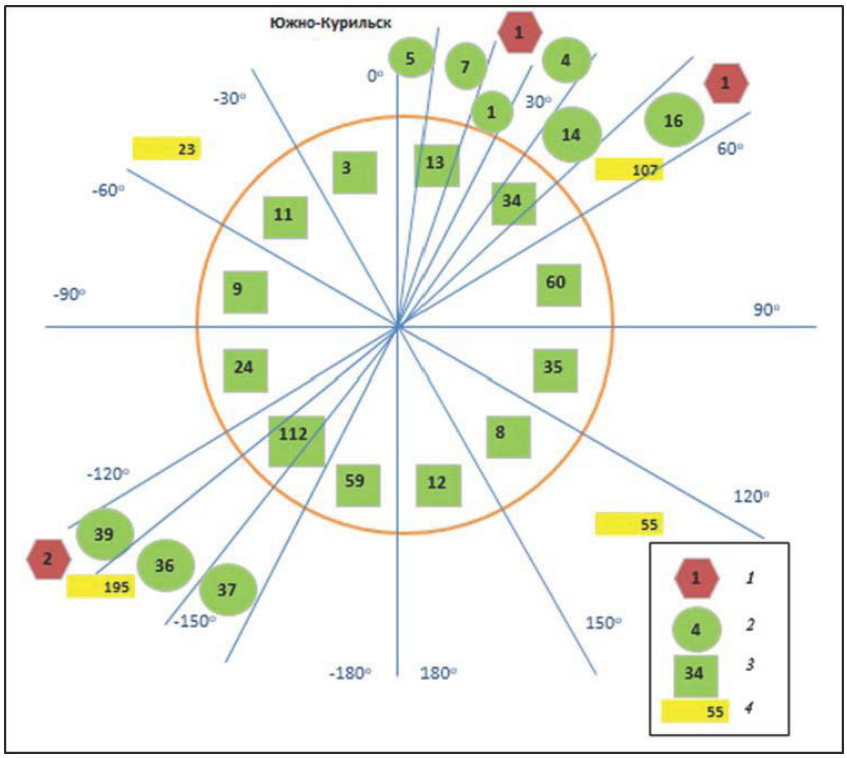

Рис. 7. Азимутальная схема расположения землетрясений, которые отразились в кривых ОАР, и вулканов относительно станции мониторинга Южно-Курильск. *1* — наземные вулканы и их количество в пределах соответствующего сектора; *2* — количество сейсмических событий, приходящихся на малый сектор; *3* — количество сейсмических событий, приходящихся на средний сектор; *4* — количество сейсмических событий, приходящихся на крупный сектор.

Fig. 7. Azimuthal layout of earthquakes that were reflected in the VRA curves and volcanoes in relation to the monitoring station Yuzno-Kurilsk. *1* — terrestrial volcanoes and their number within the corresponding sector; *2* — the number of seismic events occurring in a small sector; *3* — the number of seismic events occurring in the middle sector; *4* — the number of seismic events occurring in a large sector.

радона за период с 2011 по 2018 гг. на станциях Курильск и Южно-Курильск показал:

1. Характерные вариации объемной активности почвенного радона для условий Южно-Курильского региона начинаются за несколько дней до вызвавшего их события, т.е. относятся к краткосрочным предвестниковым эффектам.

2. Землетрясения на кривой изменения ОАР не наблюдаются на восходящей ветви аномалии.

3. В зависимости от эпицентрального расстояния до регистрирующей станции землетрясения отражаются на разных участках кривых ОАР.

4. Радиус ближней зоны составляет 50–70 километров как для Южнокурильской, так и для Курильской станции мониторинга ОАР. Критерием отнесения регистрируемого события к ближним является выход аномалии ОАР на фоновый уровень.

Список литературы [References]

Боброва М.Е., Пережогин А.С. Моделирование области подготовки Японского землетрясения 11 марта 2011 года // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2012. № 2. С. 18–22 [*Bobrova M.E., Perezhogin A.S.* Stress field modeling of Japanese earthquake 11.09.2011 // Vestnik KRAUNTS. Fiz.-mat. nauki. 2012. № 2. P. 18–22 (in Russian)].

Демежко Д.Ю., Юрков А.К., Уткин В.И., Щапов В.А. Температурные изменения в скважине KUN-1 (о. Кунашир), вызванные землетрясением Тохоку (11.03.2011 г., M = 9.0) // ДАН. 2012. Т. 445. № 2. С. 883–887 [*Demezhko D.Yu., Yurkov A.K., Outkin V.I., Shchapov V.A.* Temperature changes in the KUN-1 borehole, Kunashir Island, induced by the Tohoku earthquake (March 11, 2011, M = 9.0) // Doklady Earth Sciences. 2012. V. 445. № 1. P. 883–887. https://doi.org/10.1134/S1028334X12070124].

Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ОИФЗ АН СССР. 1991. 217 с. [*Dobrovolsky I.P.* Theory of tectonic earthquake preparation. M.: OIFE SA USSR. 1991. 217 p. (in Russian)].

Козлова И.А., Юрков А.К. Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях // Уральский геофизический вестник. 2005. № 1. С. 30–34 [*Kozlova I.A., Yurkov A.K.* The methodic problems of concentration of radon-222 measuring in soil air during monitoring organization // Uralskiy geofizicheskiy vestnik. 2005. № 1. P. 30–34 (in Russian)].

Козлова И.А., Юрков А.К. Отражение последовательных сейсмических событий в поле объемной активности радона // Уральский геофизический вестник. 2016. № 1. С. 35–39 [*Kozlova I.A., Yurkov A.K.* Reflection consecutive seismic events in the field of radon volume activity. 2016. № 1. P. 35–39 (in Russian)].

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 [*Kopylova G.N., Boldina S.V.* Hydrogeoseismological Research in Kamchatka: 1977–2017 // Volcanology and seismology. 2019. Iss. 2. P. 71–84 https://doi.org/10.1134/S0742046319020040].

Кузьмин Б.С., Герасимов В.М. Краткий топографо-геодезический словарь-справочник. М.: Недра, 1973. 280 с. [*Kuzmin B.S., Gerasimov V.M.* Kratkiy torografo-geodezicheskiy slovar-spravochnik. Moscow: Nedra, 1973. 280 p. (in Russian)].

Макаров Е.О. Отклик в динамике подпочвенного радона на подготовку сильных землетрясений Камчатки северо-западной окраины Тихого океана. Дисс. канд. физ. мат. наук. 2017. 143 с. [*Makarov E.O.* Response in the dynamics of subsurface radon to the preparation of strong earthquakes of Kamchatka in the North-Western margin of the Pacific Ocean. The dissertation for competition on scientific degree. 2017. 143 p. (in Russian)].

Новиков Г.Ф., Капков Ю.Н. Радиоактивные методы разведки. Л.: Недра. 1965. 759 с. [*Novikov G.F., Kapkov Y.N.* Exploration radioactive methods. 1965. 759 p. (in Russian)].

Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений // Вестник Пермского научного центра. 2014. № 3. С. 44–62. [*Panteleev I.A., Naimark O.B.* Modern trends in mechanics of tectonic earthquakes // Vestnik permskogo nauchnogo centra. 2014. № 3. P. 44–62 (in Russian)].

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 // Материалы международной научно-технической конференции. 2012. С. 57–65 [*Pulinets S.A., Davydenko D.V., Linkov A. D., Tarasenko T.E.* The Problem of multiparameter analysis of predictive seismic monitoring data and its solutions. There is no alternative to satellite technologies // Proceedings of the international scientific and technical conference. 2012. P. 57–65 (in Russian)].

Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. М.: «Академкнига». 2007. 406 с. [*Rebetsky Yu.L.* Tectonic stresses and strength of natural massifs. Moscow: «Akademkniga». 2007. 406 p. (in Russian)].

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 [*Rulenko O.P., Kuzmin Yu.D.* Increased radon and thoron in the Verkhne–Paratunka hydrothermal system, southern Kamchatka prior to the catastrophic japanese earthquake of march 11, 2011// Journal of Volcanology and Seismology. 2015. V. 9. № 5. P. 319–325. https://doi.org/10.1134/S074204631505006].

Сидоренко А.В. Геология СССР. Камчатка, Курильские и Командорские острова. Ч. 1. Геологическое описание. Т. 31. М.: Недра, 1964. 743 с. [*Sidorenko A.V.* Geology of the USSR. Kamchatka, Kuril and Komandorsk Islands. Pt. 1. Geological description. V. 31. M.: Nedra, 1964, 733 p. (in Russian)].

Собисевич А.Л. Математические модели волновых процессов в неоднородных геологических структурах. Дисс. док. физ.-мат. наук. 2002. 331 с. [*Sobisevich A.L.* Mathematical models of wave processes in heterogeneous geological structures. The dissertation for competition on scientific degree. 2002. 331 p. (in Russian)].

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с. [*Sobolev G.A., Ponomarev A.V.* Physics of earthquakes and precursors. M.: Nauka. 2003. 270 p. (in Russian)].

Тихонов И.Н. Паузы молчания перед сильными землетрясениями Курило-Камчатской зоны // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 1. С. 88–95. [*Tikhonov I.N.* Quiescence period prior to strong earthquakes in the Kuril-Kamchatka zone // Pacific geology. 2012. V. 6. № 1. P. 78–55].

Уткин В.И., Юрков А.К. Динамика выделения радона из массива горных пород как краткосрочный предвестник землетрясения // ДАН. 1998. Т. 358.

№ 5. С. 675–680. [*Utkin V.I., Yurkov A.K.* Radon emanation dynamics out of natural rock as earthquake precursor // Doklady Earth Sciences. 1998. V. 358. № 5. P. 675–680 (in Russian)].

Фирстов П.П., Макаров Е.О. Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения. 2018. 148 с. [*Firstov P.P., Makarov E.O.* Dynamics of the subsoil radon on Kamchatka, a strong earthquake. 2018. 148 p. (in Russian)].

Фирстов П.П., Макаров Е.О., Глухова И.П. Особенности вариаций параметров поля подпочвенного радона на Петропавловск-Камчатском полигоне в пункте «Паратунка» (2011-2016 гг.). // Сейсмические приборы. 2017а. Т. 53. № 2. С. 5–22. https://doi.org/10.21455/si2017.2-1 [*Firstov P.P., Makarov E.O., Glukhova I.P.* Features of parameter variations in subsurface radon field at «Paratunka» station of Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamical test site in 2011-2016. 2017a. V. 53. № 2. P. 5–22 (in Russian)].

Фирстов П.П., Макаров Е.О., Глухова И.П. Особенности динамики подпочвенных газов перед Жупановским землетрясением 30.01.2016 г. с M = 7.2 (Камчатка) // ДАН. 2017б Т. 472. № 4. С. 462–465. https://doi.org/10.7868/S0869565217040144 [*Firstov P.P., Makarov E.O., Glukhova I.P.* Peculiarities of subsoil gas dynamics before the M 7.2 Zhupanovo earthquake of January 30, 2016, Kamchatka. Doklady Earth Sciences. 2017b. V. 472. № 2. P. 196–199. https://doi.org/10.1134/S1028334X17020015].

Юрков А.К., Козлова И.А., Бирюлин С.В. Сейсмическое событие 19.10.2015 года на Среднем Урале в поле объемной активности радона // Материалы конференции «Девятые научные чтения памяти Ю.П.Булашевича». 2017. С. 480-483 [*Yurkov A.K., Kozlova I.A., Biryulin S.V.* Seismic event 19.10.2015 year in the Middle Urals in the field of volumetric activity of radon. // Conference materials « Ninth scientific readings in memory of Y. P. Bulashevich». 2017. P. 480–483 (in Russian)].

Aumento F. Radon in neotectonics and earthquake prediction. Modelação de sistemas geológicos: livro de homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho. 2011. 211. P. 13–27. https://doi.org/10.14195/978-989-26-1009-2_1.

Chang Wei, Lin Y.-Y. Preliminary study on the application of hydrogeochemistry of earthquake prediction // Contrib. Pap. Intern. Symp. on earthquake prediction. UNESCO: Conf. 801. Col. 14/111-8, Paris, 2–6 Apr. 1979. Paris. 1979. P. 1–14.

Dubinchuk V.T. Radon as a precursor of earthquakes// Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption: Proceedings of an Advisory Group Meeting held in Vienna, Vienna, 9–12 Sept. 1991. Vienna, 1991. P. 6–22.

Fu S., Tatsuoka F. Soil liquefaction during Haicheng and Tangshan earthquakes in China: a review // Soils and Foundations. 1984. P. 11–29

Hatuda Z. Radon content and its change in soil air near the ground surface//Mem. Col. Sci. Univ. Kyoto. 1953. Ser. B. V. 20. P. 285-306.

Kasahara K. Migration of crustal deformation // Tectonophysics. 1979. V. 52. № 1–4. P. 329–341.

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.

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 // JGR. 1999. V. 104. P. 3073–13082.

Teng Ta-Liang. Some recent studies on groundwater radon content as an earthquake precursor // Journ. Geophys. Res. 1980. V. 6. № 85. P. 3089–3099.

INVESTIGATION OF INFORMATIVE VALUE OF VOLUME RADON ACTIVITY IN SOIL DURING BOTH THE STRESS BUILD UP AND TECTONIC EARTHQUAKES IN THE SOUTH KURIL REGION

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

Institute of Geophysics UB RAS, Yekaterinburg, Russia; e-mail: serrega2009@gmail.com, akyurkov@mail.ru

The authors analyzed monitoring data of VRA (volume radon activity) from the stations Yuzhno-Kurilsk and Kurilsk collected since 2011. The data allowed us to analyze the dependence of seismic events in the variations of the VRA. In the analysis we used only events that answer the relationship between earthquake magnitude and the logarithm of the distances greater than 2.5. In order to characterize the position of the moment of the seismic event on the VRA curve, the duration of the anomaly, the time from the beginning of the anomaly to the tectonic event, the time from the extremum to the event, and the time from the end of the anomaly to the event were determined. The analysis showed that the distinctive variations in the volume activity of soil radon for the setting of the South Kuril region begin a few days prior to the event that causes them, i.e. relate to the short-term precursor effects; tectonic events on the curve of the change of the VRA are not observed on the ascending branch of the anomaly; tectonic events with different distances from a recording station are observed on different parts of the VRA curve; the radius of the near field is 50-70 kilometres.

Keywords: volume radon activity, earthquake, magnitude, precursors, Kuril Islands.