

УДК 550.8.04+550.343.62

## ОТРАЖЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ОБРАМЛЕНИЯ ТИХОГО ОКЕАНА В ДИНАМИКЕ ПОДПОЧВЕННОГО РАДОНА И В ГАЗОВОМ СОСТАВЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ МУТНОВСКОЙ ГеоЭС

© 2015 г. П. П. Фирстов<sup>1</sup>, Е. О. Макаров<sup>1</sup>, А. П. Максимов<sup>2</sup>, И. И. Чернев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Камчатский филиал Геофизической службы РАН

683006 Петропавловск-Камчатский, б-р Пуйна, 9, e-mail: firstov@emsd.ru

<sup>2</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

683006 Петропавловск-Камчатский, б-р Пуйна, 9, e-mail: maximov@kscnet.ru

<sup>3</sup>ОАО "ГЕОТЕРМ"

683980 Петропавловск-Камчатский, Академика Королева, 60,

e-mail: ChernevII@geotherm.rushydro.ru

Поступила в редакцию 10.03.2015 г.

Приводятся сведения об особенностях поведения временного ряда объемной активности радона за период 2000–2015 гг. в зоне влагонасыщения в районе Паратунского геотермального месторождения и временного ряда объемной доли молекулярного водорода газа теплоносителя скв. 016 Мутновского месторождения и их связи с сейсмичностью северо-западного обрамления Тихого океана. Сделан вывод, что длительные тренды в динамике объемной активности радона и высокая объемная доля молекулярного водорода в 2014 г. обусловлены изменением поля напряжений в зоне субдукции северо-западного фланга Тихого океана. Сделано предположение о возможности землетрясения с  $M > 7.5$  в ближайшее 1.5 года. По данным академика С.А. Федотова, наиболее вероятный район этого события – от полуострова Шипунский до острова Шиашкотан (Средние Курилы).

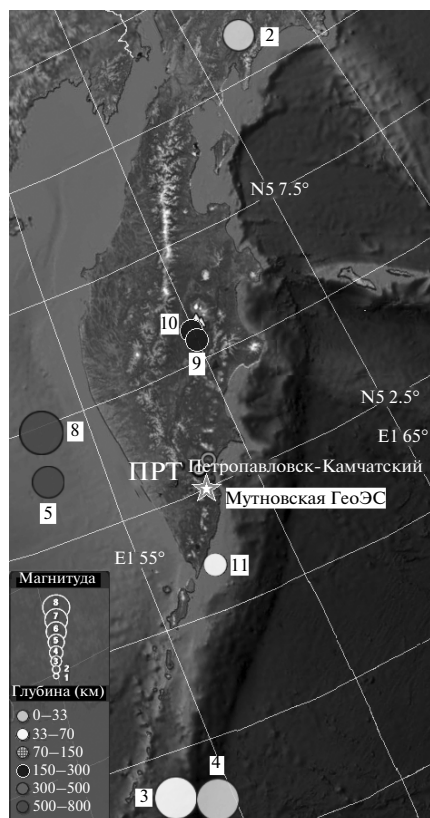
DOI: 10.7868/S0203030615050041

### ВВЕДЕНИЕ

Процессы дегазации Земли, протекающие неравномерно как в пространстве, так и во времени, в значительной степени контролируются распределением и величиной напряжений в различных зонах земной коры различной иерархии. Миграция газов в верхней толще земной коры определяется диффузионными и фильтрационными свойствами горных пород, зависящих от их проницаемости, пористости и трещиноватости. В то же время на фильтрационные свойства геосреды и выделение радиоактивных газов из пород оказывают влияние вариации поля напряжений [Рудаков, 1992]. Поэтому изменения напряженно-деформированного состояния геосреды на последней стадии подготовки сильных землетрясений должны находить отражение в динамике подпочвенных газов [Рудаков, 1992; Войтов, 2002]. Наиболее технологичным методом в геохимических исследованиях с целью прогноза землетрясений является регистрация радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) в подпочвенном воздухе. Перспективность сейсмоманометрического метода с целью мониторинга геодинамических процессов, в частности, прогноза землетрясений и горных ударов, показана во многих работах [Авдуалиев и др., 1986; Рудаков, 1992; Ут-

кин, Юрков, 1997; Фирстов, Рудаков, 2003; Спивак и др., 2008; Фирстов и др., 2011; Макаров и др., 2012; Steinitz et al., 2003; Firstov et al., 2007].

Как известно, на протяжении всей геологической истории Земли из ее недр непрерывно выделяются потоки водно-газового флюида, которые заметно изменяются во времени и неравномерно распределены по поверхности нашей планеты, отражая ее геодинамический режим и блоковую структуру [Летников, 2000]. В последнее десятилетие получены неоспоримые данные, указывающие на значительную роль водорода в строении Земли и взаимодействии геосфер [Ларин 2005, Сывороткин, 2002]. Наблюдения за вариациями концентрации молекулярного водорода ( $\text{H}_2$ ) в различных геоструктурных зонах Земли, свидетельствуют о перспективности таких наблюдений для решения различных задач геодинамики. Так, в 1998–2000 гг. вблизи от пунктов наблюдений на территории Дагестана произошло два землетрясения с магнитудой  $M > 6$ . За 5 и 2.5 месяца до этих событий начинался устойчивый рост концентрации  $\text{H}_2$  с относительным увеличением до 300% [Войтов, 2002].



**Рис. 1.** Карта эпицентров сильных землетрясений северо-западного обрамления Тихого океана за последние 15 лет и схема расположения пунктов регистрации.

Отличительной чертой поведения  $H_2$  от других газов является его высокая подвижность, особенно при повышенных температурах. Изучение динамики молекулярного водорода в подпочвенном газе на Паратунском геотермальном месторождении показало, что на фоне слабо меняющегося фона концентрации подпочвенного  $H_2$  в период 1999–2003 гг. регистрировались импульсные всплески большой интенсивности, совпадающие по времени с усилением сейсмичности в Курило-Камчатском регионе [Фирстов, Широков, 2005].

В работе [Гуфельд, Новоселов, 2014] показано, что значительную, если не основную, роль в непрерывных и разномасштабных вариациях параметров геосреды от поверхностного слоя до границы Мохо играют процессы взаимодействия восходящих потоков  $H_2$  с твердой фазой, влияющие на геологическую среду в межблоковых зонах и на объемно-напряженное состояние среды, связанное с процессом подготовки ее разрушения. Водородная дегазация геосреды оказывает влияние на разрывные внутриблоковые, межблоковые структуры и границы плит, контролируя их сверхпластичное движение, относительно друг друга [Гуфельд, Новоселов, 2014].

В [Фирстов, 2014] указывалось на появление и развитие долгосрочного предвестника сильного землетрясения в поле подпочвенного радона ( $Rn$ ). В данной работе рассмотрено дальнейшее развитие тренда в подпочвенном  $Rn$  и динамика поведения объемной доли  $H_2$  в газовом составе теплоносителя скв. 016 Мутновского термального месторождения, подтверждающие нарушение флюидного режима в недрах полуострова Камчатка, что указывает на интенсивные геодинамические процессы в литосфере.

#### КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АППАРАТУРЕ И МЕТОДИКАХ НАБЛЮДЕНИЙ

На Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне с целью поиска предвестников сильных землетрясений, начиная с октября 1997 г., непрерывно работает сеть пунктов регистрации  $Rn$  в подпочвенном воздухе рыхлых отложений [Фирстов, 1998]. В настоящее время датчиками на всех пунктах являются газоразрядные счетчики типа СБМ-19, позволяющие вести пассивную регистрацию концентрации  $Rn$  по  $\beta$ -излучению его дочерних короткоживущих продуктов распада [Фирстов, Рудаков, 2003]. Пункты мониторинга оснащены автоматизированными комплексами регистрации концентрации почвенных газов (РКПГ), созданными на базе серийных регистраторов ALMEMO и дополнительных устройств, разработанных авторами [Макаров и др., 2012]. РКПГ позволяет регистрировать одновременно количество импульсов со счетчиков СБМ-19 и другие параметры (концентрация  $H_2$ ,  $CO_2$  и метеорологические величины). Переход от концентрации к объемной активности  $Rn$  ( $OA Rn$ ) осуществляется по эмпирической формуле  $OA Rn$  ( $Бк/м^3$ ) =  $9 \cdot N$  (имп/мин).

Пункты сети расположены в различных структурных элементах побережья Авачинского залива и, кроме того, каждый пункт имеет свои особенности строения элювиально-делювиальных отложений зоны аэрации, где размещаются газоразрядные счетчики, что определяет индивидуальную передаточную функцию изменений напряженно-деформированного состояния среды –  $OA Rn$  (тензочувствительность). Подробное описание применяемой аппаратуры и пунктов регистрации дано в статьях [Макаров и др., 2012; Фирстов и др., 2015].

В данной работе рассмотрены особенности поведения временного ряда  $OA Rn$  за период 2000–2015 гг. в пункте “Паратунка” (ПРТ), для датчика, расположенного в зоне влагонасыщения (ЗВ) на глубине 3.5 м от дневной поверхности и временного ряда объемной доли  $H_2$  газа теплоносителя скв. 016 Мутновского месторождения (рис. 1). Пункт ПРТ установлен на речной террасе ручья Коркина, трассирующего субширотный разлом в пределах Паратунского грабена, к которому при-

урочена геотермальная система. Ниже по течению ручья в 700 м от ПРТ находятся выходы термальных вод с содержанием растворенного Rn  $\sim 1.5$  кБк/м<sup>3</sup>.

Ежемесячный мониторинг состава газа теплоносителя скважин Мутновского месторождения, задействованных на работу геотермальной электростанции (ГеоЭС) осуществляется с 2004 г. Мутновское месторождение расположено у подножия одноименного вулкана в 76 км к северу от г. Петропавловска-Камчатского (см. рис. 1). Месторождение находится в зоне пересечения нескольких систем трещин, часть из которых, вероятно, имеет продолжение под Мутновский вулкан. Питание геотермального резервуара происходит как за счет метеорных вод, поступающих из области кратера вулкана Мутновского, так и эндогенной составляющей.

Состав газа рассчитывался по методике, описанной в работах [Никитина и др., 1989; Максимов и др., 2011]. Так как в паровой фазе теплоносителя суммарное содержание всех газов, кроме водяного пара, составляет десятые доли процента, а концентрации отдельных компонентов газовой смеси еще меньше, то для удобства и большей наглядности концентрации рассчитывались в объемных и массовых процентах компонентов “сухого” газа, т.е. газовой смеси за вычетом воды.

#### ВАРИАЦИИ ОА Rn В ПОДПОЧВЕННОМ ГАЗЕ И ОБЪЕМНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДОРОДА В ГАЗОВОМ СОСТАВЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ МУТНОВСКОЙ ГеоЭС В ПОСЛЕДНЕЕ ДЕСЯТИЛЕТИЕ

Непрерывные кондиционные временные ряды концентрации подпочвенного Rn с частотой дискретизации 10–30 минут были получены после установки цифровых радиометров в октябре 2000 г. Пример исходных данных за 2007 г. показан на рис. 2. Данные за 15-летний период подвергались барокомпенсации и усреднению в полусуточном окне, а затем сглаживанию скользящим средним по пяти точкам с целью фильтрации “высокочастотной” составляющей [Фирстов, 2014].

Как видно на рис. 2, в динамике ОА Rn уверенно выделяется годовая составляющая, обусловленная сезонным изменением температуры гелиотермозоны рыхлых отложений и уровнем грунтовых вод (УГВ). В осенне-зимний период происходит промерзание гелиотермозоны и уменьшение ее проницаемости, приводящей к увеличению ОА Rn в ЗВ. Весной, когда температура воздуха принимает плюсовые значения, за счет инфильтрации талых вод наблюдается подъем УГВ, который приводит к уменьшению ОА Rn на 20–25%. Последующее понижение УГВ сопровождается увеличением столба подпочвенной атмосферы в рыхлых отложениях и уменьшением ОА Rn в ЗВ. На Камчатке хорошо

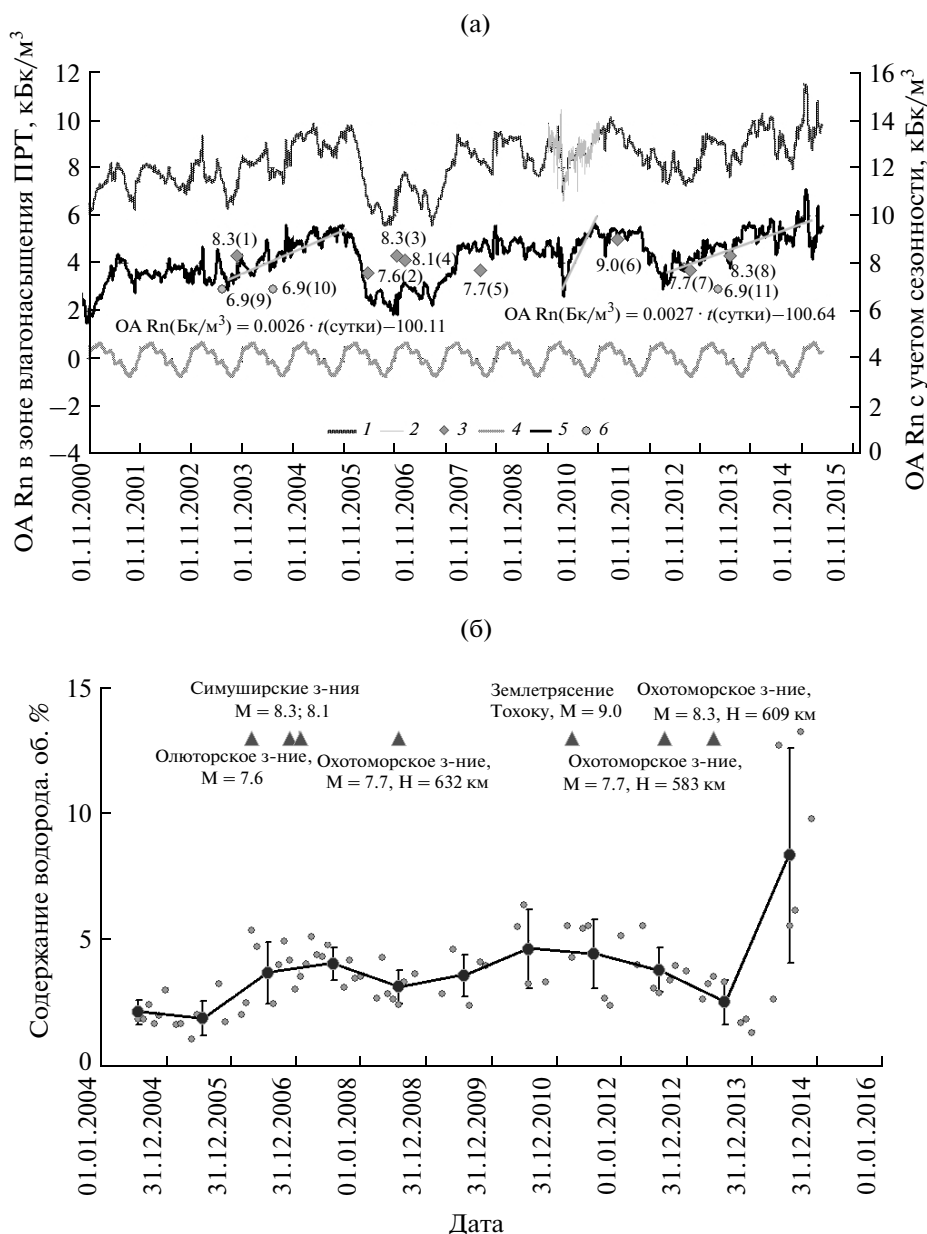
**Таблица 1.** Среднее за месяц содержание H<sub>2</sub>, об. %, растворенного в теплоносителе скв. 016 Мутновского месторождения

Год	<i>N</i>	<i>m</i>	$\sigma$
2004	6	2.18	0.49
2005	7	1.92	0.68
2006	9	3.74	1.22
2007	10	4.09	0.64
2008	7	3.17	0.66
2009	6	3.62	0.82
2010	4	4.66	1.56
2011	7	4.47	1.37
2012	7	3.85	0.88
2013	7	2.56	0.89
2014	6	8.37	4.24

Примечание. *N* – число измерений за год, *m* – математическое ожидание,  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение.

выражены два периода подъема УГВ – весенний и осенний [Фирстов, Рудаков, 2003]. С целью исследования длиннопериодных вариаций из временного ряда ОА Rn ЗВ вычиталась сезонная компонента по аддитивной модели [Бокс, Дженкинс, 1974].

В работе [Геотермические..., 1986] показано, что Мутновское месторождение характеризуется повышенным содержанием H<sub>2</sub> в теплоносителе по сравнению с другими Камчатскими месторождениями парогидротерм. По своему генезису H<sub>2</sub> является газом глубинного происхождения и поэтому его вариации в растворенном газе теплоносителя отражают не только процессы, происходящие в геотермальном резервуаре, но и геодинамическую обстановку региона. В газах, растворенных в теплоносителе всех скважин Мутновского месторождения, наблюдаются значительные вариации объемной доли H<sub>2</sub>. Особенно это характерно для скв. 016, которая является одной из самых продуктивных с расходом пароводяной смеси 13.4 кг/с и паросодержанием 97%. Начиная с 2004 г. на этой скважине регулярно проводится отбор газа один раз в месяц. Рассчитывались среднее значение и среднеквадратичное отклонение объемной доли H<sub>2</sub> в годовых интервалах (табл. 1). В 2004–2005 гг.  $\bar{H}_2 \approx 2\%$ , а в последующие два года увеличивается до 4%. После спада в 2010 г. объемная доля  $\bar{H}_2$  увеличилась до 4.5% с последующим падением в 2013 г. до почти первоначального значения (2004 г.). Тем более неожиданным оказался резкий всплеск в 2014 г., когда  $\bar{H}_2 = 8.4\%$ .



**Рис. 2.** Временной ряд OA Rn в зоне влагонасыщения (глубина 3.5 м) пункта ПРТ, осредненный скользящим средним в пятисуточном окне, аддитивная сезонная модель и кривая за вычетом сезонной составляющей (а), вариации объемной доли H<sub>2</sub> в скв. 016 Мутновского месторождения геотерм (б).

1 – осредненные данные, 2 – исходные данные, 3 – землетрясения северо-западного обрамления Тихого океана с  $M > 7.5$ , 4 – аддитивная сезонная модель, 5 – кривая OA Rn за вычетом сезонной составляющей, 6 – землетрясения района полуострова Камчатка с  $M > 6.5$ .

### СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ОБРАМЛЕНИЯ ТИХОГО ОКЕАНА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 15 ЛЕТ

Сейсмичность зоны субдукции района полуострова Камчатка определяется взаимодействием Евразийской и Тихоокеанской плит, когда эпицентры наиболее сильных землетрясений располагаются на дне Тихого океана и значительном расстоянии от пунктов регистрации. Как следует

из работ [Макаров, 2011; Фирстов и др., 2011], перед 65% землетрясений с  $M > 5.5$  с эпицентрами в зоне субдукции района Авачинского залива, в поле почвенного Rn наблюдались бухтообразные предвестники со временем упреждения 1–8 суток. В то же время на длительном временном ряде (15 лет), можно выделить многолетние тренды, коррелирующиеся с геодинамическими процессами в зоне субдукции северо-западного обрамления Тихого океана [Фирстов, 2014].

**Таблица 2.** Основные параметры землетрясений с  $M > 7.5$  северо-западного обрамления Тихого океана и землетрясения сейсмофокальной зоны с  $M > 6.5$  района полуострова Камчатка

M > 7.5							
№ п/п	дата	время, чч:мм:сс	координаты		Н, км	M	область эпицентра землетрясения
			φ	λ			
1	25.09.2003	19:50:06	41.83	143.83	33	8.3	Токачи-Оки, Япония
2	20.04.2006	23:52:02	60.94	167.14	22	7.6	Олюторское, север Камчатки
3	15.11.2006	11:14:13	46.58	153.27	39	8.3	Средние Курилы, о. Симушир
4	13.01.2007	04:23:21	46.23	154.55	10	8.1	
5	05.07.2008	02:12:04	53.88	152.89	632	7.7	Охотоморское землетрясение
6	11.03.2011	05:46:24	38.10	142.85	24	9.0	Землетрясение Тохоку, Япония
7	14.08.2012	02:59:38	49.80	145.07	583	7.7	Охотоморское землетрясение
8	24.05.2013	05:44:48	54.89	153.22	609	8.3	Охотоморское землетрясение
M > 6.5							
9	16.06.2003	22:08:02	55.49	159.99	175	6.9	Район полуострова Камчатка
10	10.06.2004	15:19:57	55.68	160.0	189	6.9	
11	28.02.2013	14:05:50	50.94	157.34	41	6.9	

Примечание. φ – широта, гр. с.ш.; λ – долгота, гр. в.д.; M – магнитуда по данным NEIC (National Earthquake Information Center); Н – глубина очага землетрясения.

Из каталога NEIC были выбраны сильные землетрясения с  $M > 7.5$  северо-западного обрамления Тихого океана с глубиной очага от 0 до 700 км в широтной полосе  $38^\circ$ – $61^\circ$  с.ш., включающей районы: Япония, Курильские острова, Камчатка, Охотское море за период с 1.11.2000 по 1.04.2015. В этом интервале времени произошло 8 землетрясений, три из которых (охотоморские) с глубиной очага более 550 км. Кроме того, брались землетрясения сейсмофокальной зоны района полуострова Камчатка с  $M > 6.5$ . За рассматриваемый период произошло три события, два из которых с глубиной больше 170 км (табл. 2).

В период апрель 2006 г.–январь 2007 г. произошло три землетрясения с  $M > 7.5$  одно на севере Камчатке (см. табл. 2, № 2 – Олюторское,  $M = 7.6$ ) и два на средних Курилах (см. табл. 2, № 3, 4 – Симуширские,  $M = 8.3, 8.1$ ). Их можно рассматривать как цепочку последовательности событий, подобную тем, которые выделяются для сильных землетрясений Курило-Камчатской зоны в период 1914–1982 гг. [Соболев, 1994]. За 2.5 года перед Олюторским землетрясением начался тренд возрастания  $OA R_n$ , сменившийся резким падением значений  $OA R_n$  на ~30% в течение трех месяцев непосредственно перед сейсмическим событием. Следует отметить, что начало тренда по времени совпало с землетрясением Токачи-Оки (Япония) с  $M = 8.3$  (см. табл. 2, № 1). Низкий уровень  $OA R_n$  сохранялся почти полтора года (см. рис. 2).

После Охотоморского землетрясения с  $M = 7.7$  в июле 2008 г. (см. табл. 2, № 5) на расстоянии

2100 км от пункта регистрации 11.03.2011 произошло мегаземлетрясение Тохоку в Японии с  $M = 9.0$  (см. табл. 2, № 6). Перед ним также наблюдался тренд роста значений  $OA R_n$ , который начался в марте 2010 г. и продолжался 8 месяцев, до ноября 2010 г. (см. рис. 2а).

С начала 2012 г. по настоящее время наблюдается тренд увеличения  $OA R_n$ , на фоне которого произошли два глубоких Охотоморских землетрясения в августе 2012 г. с  $M = 7.7$  и в мае 2013 г. с  $M = 8.3$ . Линейные зависимости, аппроксимирующие тенденцию роста временных отрезков  $OA R_n$  для первого случая и в настоящее время, весьма близки:  $OA R_n(\text{Бк/м}^3) = 0.0026 \cdot t(\text{сутки}) - 100.11$  (перед Олюторским);  $OA R_n(\text{Бк/м}^3) = 0.0027 \cdot t(\text{сутки}) - 100.64$  (в настоящее время). Три землетрясения с  $M = 6.9$ , произошедшие в районе полуострова Камчатка, отражения в длиннопериодных вариациях  $OA R_n$  не нашли.

В вариациях объемной доли  $\bar{N}_2$  скв. 016 Мутновского месторождения, в первом приближении прослеживается связь с сильными землетрясениями северо-западного обрамления Тихого океана. Наибольшие значения  $\bar{N}_2$  приурочены к годам, когда происходили сильные землетрясения с  $M > 8$  (Симуширские и Тохоку). Моменты глубоких Охотоморских землетрясений совпадают с понижением значений  $\bar{N}_2$  (см. рис. 2б).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно классическому представлению [Новиков, 1989; Рудаков, 1992], а также современным представлениям о большой роли миграции подпочвенных газов за счет всплытия микропузырей (теория “геогаза”) в ЗВ, на процесс миграции Rn основное влияние оказывает проницаемость, зависящая от свойств и строения грунта, а также наличие водоносного горизонта. Основным механизмом транспорта Rn к дневной поверхности в ЗВ, является поток газов в форме микропузырьков [Varhegyi et al., 1986; Иванова, 1999; Етиопе, Martinelli, 2002]. На глубинах в несколько тысяч метров, согласно современным исследованиям, пузырьки газов-транспортеров ( $H_2$ ,  $CO_2$  и  $CH_4$ ) диаметром  $10^{-2}$ – $10^{-10}$  мм обеспечивают основной процесс миграции тяжелых инертных газов (He, Rn).

Пункт ПРТ находится в зоне динамического влияния разлома, границы которой хорошо выделяются по геофизическим данным. Эта зона может рассматриваться как флюидонасыщенный коллектор, являющийся местом разгрузки подземных водоносных горизонтов. По результатам сейсморазведочных работ в пункте ПРТ выделены 2 слоя с разными физико-литологическими свойствами: почвенно-пирокластический чехол  $h = 1.8$ – $2.7$  м и слой песчано-глинистых отложений аллювиального происхождения мощностью  $h = 1.6$ – $9$  м. Подложкой второго слоя является крупнообломочный материал с песчаным заполнителем аллювиально-флювиогляциального происхождения fQII-III. Основной поток Rn поступает в рыхлые отложения, которые имеют очень малое содержание Ra, из более глубоких слоев за счет всплытия микропузырьков в зоне разгрузки подземных водоносных горизонтов. Гидрологические особенности района пункта ПРТ и регистрация в ЗВ дают основания предполагать, что поток Rn к дневной поверхности формируется под действием напряженно-деформированного состояния блока геосреды большого объема, включающего большую часть Паратунского геотермального месторождения [Фирстов и др., 2014].

Водород в газе теплоносителя Мутновского месторождения, также как и другие газы, реагирует на изменения напряжений в земной коре и его поведение отражает геодинамический режим района. В пользу этого свидетельствует одновременное с возрастанием концентрации  $H_2$  уменьшение отношения  $CO_2/H_2S$ . По-видимому, перестройка регионального поля напряжений находит отражение в динамике как растворенных газов в теплоносителе, так и подпочвенных газов.

Вероятно, механизм длительных трендов в динамике OA Rn обусловлен изменением поля напряжений в зоне субдукции северо-западного фланга Тихого океана, и наблюдающийся с ноября 2012 г. тренд OA Rn в пункте ПРТ дает основание говорить

о подготовке землетрясения с  $M > 7.5$ , которое может произойти в ближайшие 1.5 года. Предположительно, вероятным местом ожидаемого землетрясения может быть район от полуострова Шипунский до острова Шиашкотан (Средние Курилы), где, согласно долгосрочному прогнозу академика С.А. Федотова, на период IX 2013–VIII 2018 гг. наиболее высока вероятность землетрясения с  $M > 7.7$  [Федотов и др., 2012].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдуалиев А.К., Войтов Г.И., Рудаков В.П. Радоновый предвестник некоторых сильных землетрясений Средней Азии // ДАН СССР. 1986. Т. 291. № 4. С. 924–927.
- Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир, 1974. 406 с.
- Войтов Г.И. К проблеме водородного дыхания Земли // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ. Матер. междунар. конф. памяти академика П.Н. Кропоткина. М.: ГЕОС, 2002. С. 24–30.
- Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1986. 207 с.
- Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н. Сейсмический процесс в зоне субдукции. Мониторинг фонового режима. М.: МГУЛ, 2014. 100 с.
- Иванова Т.М. Моделирование переноса радона в горном массиве // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 25 с.
- Ларин В.Н. Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). М.: “Агар”, 2005. 244 с.
- Летников Ф.А. Флюидный режим эндогенных процессов в континентальной литосфере и проблемы металлогении // Проблемы глобальной тектоники / Отв. ред. Рундквист Д.В. М.: ГЕОС, 2000. С. 204–224.
- Макаров Е.О. Предвестниковые аномалии сильных землетрясений Авачинского залива с  $M > 5.5$  в поле почвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Геология в развивающемся мире // Сб. научных трудов по материалам Междунар. конф. студ., асп. и молодых ученых. Пермь, 20–24 апреля 2011 г. / Отв. ред. Батулин Е.Н. Пермь: Перм. гос. ун-т., 2011. С. 347–349.
- Макаров Е.О., Фирстов П.П., Волошин В.Н. Аппаратурный комплекс для регистрации концентрации подпочвенных газов с целью поиска предвестниковых аномалий сильных землетрясений Южной Камчатки // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48. № 1. С. 5–14.
- Максимов А.П., Фирстов П.П., Чернев. И.И., Шапарь В.Н. Метод оценки доли метеорной воды в теплоносителе Мутновской ГеоЭС // Матер. ежегодной конф., посвященной Дню вуканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 146–149.
- Никитина Л.П., Меняйлов И.А., Шапарь В.Н. Модифицированные методы отбора и анализа вулканических газов // Вулканология и сейсмология. 1989. № 4. С. 3–15.
- Новиков Г.Ф. Радиометрическая разведка. Л.: Наука, 1989. 407 с.
- Рудаков В.П. Динамика полей подпочвенного радона сейсмоактивных регионов СНГ // Автореф. дисс. ... докт. физ.-мат. наук. М., 1992. 37 с.
- Соболев Г.А. О связи между сильными землетрясениями Курило-Камчатской зоны // Федеральная система сей-

- смологических наблюдений и прогноза землетрясений. ИАБ. Шикотанское землетрясение 4(5).10.1994 г. Экстренный выпуск. 1994. С. 68–70.
- Спивак А.А., Сухоруков М.В., Харламов В.А. Особенности эманации радона  $^{222}\text{Rn}$  с глубиной // ДАН. 2008. Т. 420. № 6. С. 825–828.
- Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. М.: ООО “Геоинформцентр”, 2002. 245 с.
- Уткин В.И., Юрков А.К. Радон и проблема тектонических землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С. 82–94.
- Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской островной дуги на IX 2011–VIII 2016 гг.: вероятное место, время и развитие сильнейшего землетрясения Камчатки с  $M \geq 7.7$  // Вулканология и сейсмология. 2012. № 2. С. 3–26.
- Фирстов П.П. Возможности прогноза сильных землетрясений по данным радонового мониторинга на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2014. № 1. Вып. 23. С. 232–245.
- Фирстов П.П. Изменение объемной активности радона в подпочвенном газе перед Кроноцким землетрясением // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года: предвестники, особенности, последствия / Отв. ред. Гордеев Е.И., Иванов Б.В., Викулин А.В. Петропавловск-Камчатский: ИКГА, 1998. С. 170–176.
- Фирстов П.П., Рудаков В.П. Результаты регистрации подпочвенного радона в 1997–2000 гг. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Вулканология и сейсмология. 2003. № 1. С. 26–41.
- Фирстов П.П., Широков В.А. Динамика молекулярного водорода и ее связь с геодеформационными процессами на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне по данным наблюдений в 1999–2003 гг. // Геохимия. 2005. № 11. С. 1151–1160.
- Фирстов П.П., Макаров Е.О., Акбашев Р.Р. Мониторинг концентрации почвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в связи с прогнозом сильных землетрясений // Сейсмические приборы. 2015. № 1. С. 53–73.
- Фирстов П.П., Макаров Е.О., Мальшева О.П. Отражение в динамике почвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне последней стадии подготовки землетрясений с магнитудой больше 5.5 района Авачинского залива. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России // Труды Третьей научно-технической конф., Петропавловск-Камчатский, 9–15 октября 2011 г. / Отв. ред. Чебров В.Н. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 154–158.
- Фирстов П.П., Акбашев Р.Р., Макаров Е.О., Паровик Р.И. Строеие верхней части геологических разрезов в пунктах мониторинга почвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Матер. ежегодной науч. конф., посвященной Дню вулканолога “Вулканизм и связанные с ним процессы”. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 242–250.
- Firstov P.P., Yakovleva V.S., Shirokov V.A. et al. The nexus of soil radon and hydrogen dynamics and seismicity of the northern flank of the Kuril-Kamchatka subduction zone // Annals of Geophysics. 2007. V. 50. № 4. P. 546–557.
- Etioppe G., Martinelli G. Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview // Physics of The Earth and Planetary Interiors. 2002. V. 129. P. 185–204.
- Steinitz G., Begin Z.B., Gazit-Yaari N. A statistically significant relation between radon flux and weak earthquakes in the Dead Sea Rift Valley // Geology. 2003. V. 31. P. 505–508.
- Varhegyi A., Baranyi I., Somogyi G. A model for the vertical subsurface radon transport in “geogas” microbubbles // Geophys. Transactions. 1986. V. 32. № 3. P. 235–253.

## ОТРАЖЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ОБРАМЛЕНИЯ ТИХОГО ОКЕАНА В ДИНАМИКЕ ПОДПОЧВЕННОГО РАДОНА И В ГАЗОВОМ СОСТАВЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ МУТНОВСКОЙ ГЕОЭС

© 2015 г. П. П. Фирстов<sup>1</sup>, Е. О. Макаров<sup>1</sup>, А. П. Максимов<sup>2</sup>, И. И. Чернев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Камчатский филиал Геофизической службы РАН

683006 Петропавловск-Камчатский, б-р Пуйна, 9, e-mail: firstov@emsd.ru

<sup>2</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

683006 Петропавловск-Камчатский, б-р Пуйна, 9, e-mail: maximov@kscnet.ru

<sup>3</sup>ОАО “ГЕОТЕРМ”

683980 Петропавловск-Камчатский, Академика Королева, 60,

e-mail: ChernevII@geotherm.rushydro.ru

Поступила в редакцию 10.03.2015 г.

Приводятся сведения об особенностях поведения временного ряда объемной активности радона за период 2000–2015 гг. в зоне влагонасыщения в районе Паратунского геотермального месторождения и временного ряда объемной доли молекулярного водорода газа теплоносителя скв. 016 Мутновского месторождения и их связи с сейсмичностью северо-западного обрамления Тихого океана. Сделан вывод, что длительные тренды в динамике объемной активности радона и высокая объемная доля молекулярного водорода в 2014 г. обусловлены изменением поля напряжений в зоне субдукции северо-западного фланга Тихого океана. Сделано предположение о возможности землетрясения с  $M > 7.5$  в ближайшее 1.5 года. По данным академика С.А. Федотова, наиболее вероятный район этого события – от полуострова Шипунский до острова Шиашкотан (Средние Курилы).