

УДК 550.3+550.4+551.21 (571.64)

## ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВОБОДНЫХ ГАЗОВ ЮЖНО-САХАЛИНСКОГО ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА И ИХ СВЯЗЬ С РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

© 2011 г. В. В. Ершов, Р. Б. Шакиров, А. И. Обжиров

Представлено академиком В.А. Акуличевым 18.03.2011 г.

Поступило 04.04.2011 г.

Грязевые вулканы являются одним из наиболее мощных и интересных проявлений естественных выходов углеводородных флюидов на поверхность Земли. Состав и интенсивность поставки грязевулканических флюидов изменяются во времени и находятся в тесной связи с сейсмо-тектоническими процессами, протекающими в земной коре. Физический механизм этой связи представляется пока лишь в самых общих чертах. Соответственно остается открытым вопрос о возможности использования результатов режимных наблюдений за деятельностью грязевых вулканов для прогноза землетрясений. В настоящей работе представлены результаты газогеохимического мониторинга Южно-Сахалинского грязевого вулкана (о. Сахалин) и предложена их интерпретация. Цель работы – исследование вариаций изотопно-геохимического состава и происхождения газообразных флюидов грязевого вулкана.

Режимные наблюдения за газообразной фазой продуктов грязевого вулканизма и анализ их результатов на предмет связи с сейсмичностью в регионе производились ранее на грязевых вулканах России (Таманский п-ов) [1, 2], Украины (Керченский п-ов) [3], Туркменистана [4], Азербайджана [1, 5], Италии [6], Тайваня [7]. Однако указанные наблюдения выполнялись либо для какой-то одной газовой компоненты (например, радона или метана), либо для какого-то одного грифона на вулкане, либо с небольшой частотой отбора проб (реже одного раза в сутки), либо на небольшом промежутке времени (около одной или двух недель).

Нами с 11 июля по 27 сентября 2007 г. проведены ежедневные наблюдения за химическим со-

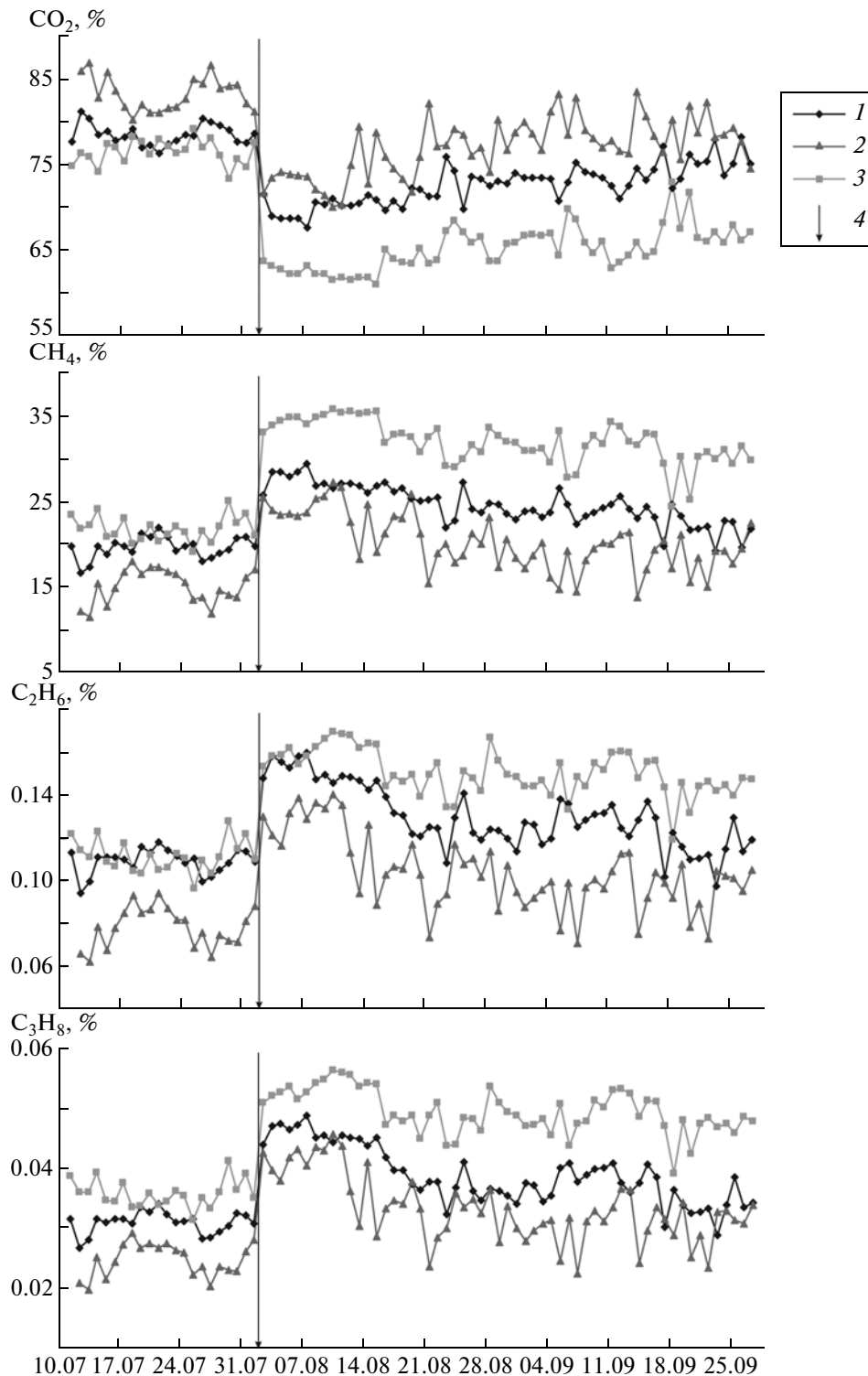
ставом свободных газов для трех грифонов Южно-Сахалинского грязевого вулкана. Для части проб определяли изотопный состав углерода метана и углекислого газа. Мониторинговые наблюдения выполнены в условиях сейсмической активизации на юге о. Сахалин – Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. Магнитуда землетрясения составила  $M_W = 6.2$ , эпицентральное расстояние до Южно-Сахалинского вулкана – около 65 км. Землетрясение привело к увеличению дебита свободных газов и аномальным изменениям температуры водогрязевой смеси в грифонах вулкана [8]. Как будет показано ниже, оно проявилось также и в динамике химического состава свободных газов.

Химический состав до землетрясения был достаточно стабильным и не имел каких-либо явно выраженных трендов (рис. 1, 2). Содержания различных компонент в составе свободных газов до землетрясения рассматривались как случайные величины с произвольным распределением. Для этих случайных величин вычислены точечные и интервальные оценки их математических ожиданий (табл. 1). Интервальная оценка построена на основе асимптотической нормальности статистики для точечной оценки.

**Таблица 1.** Оценки для средних содержаний различных компонент в составе свободных газов до Невельского землетрясения (доверительная вероятность 0.99)

Газовая компонента	Грифон F	Грифон G	Грифон H
CO <sub>2</sub> , %	78.59 ± 0.83	83.38 ± 1.37	76.56 ± 0.96
CH <sub>4</sub> , %	19.61 ± 0.84	15.08 ± 1.36	21.81 ± 0.97
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , ppm	1092 ± 39	783 ± 64	1115 ± 50
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , ppm	310 ± 12	248 ± 19	359 ± 15
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> , ppm	74.5 ± 3.2	72.3 ± 5.0	105.1 ± 4.5
<i>i</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> , ppm	65.7 ± 2.9	58.9 ± 4.7	86.4 ± 3.6
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> , ppm	12.2 ± 0.6	13.6 ± 2.5	19.1 ± 1.0
<i>i</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> , ppm	20.9 ± 1.0	20.6 ± 2.5	30.9 ± 2.4

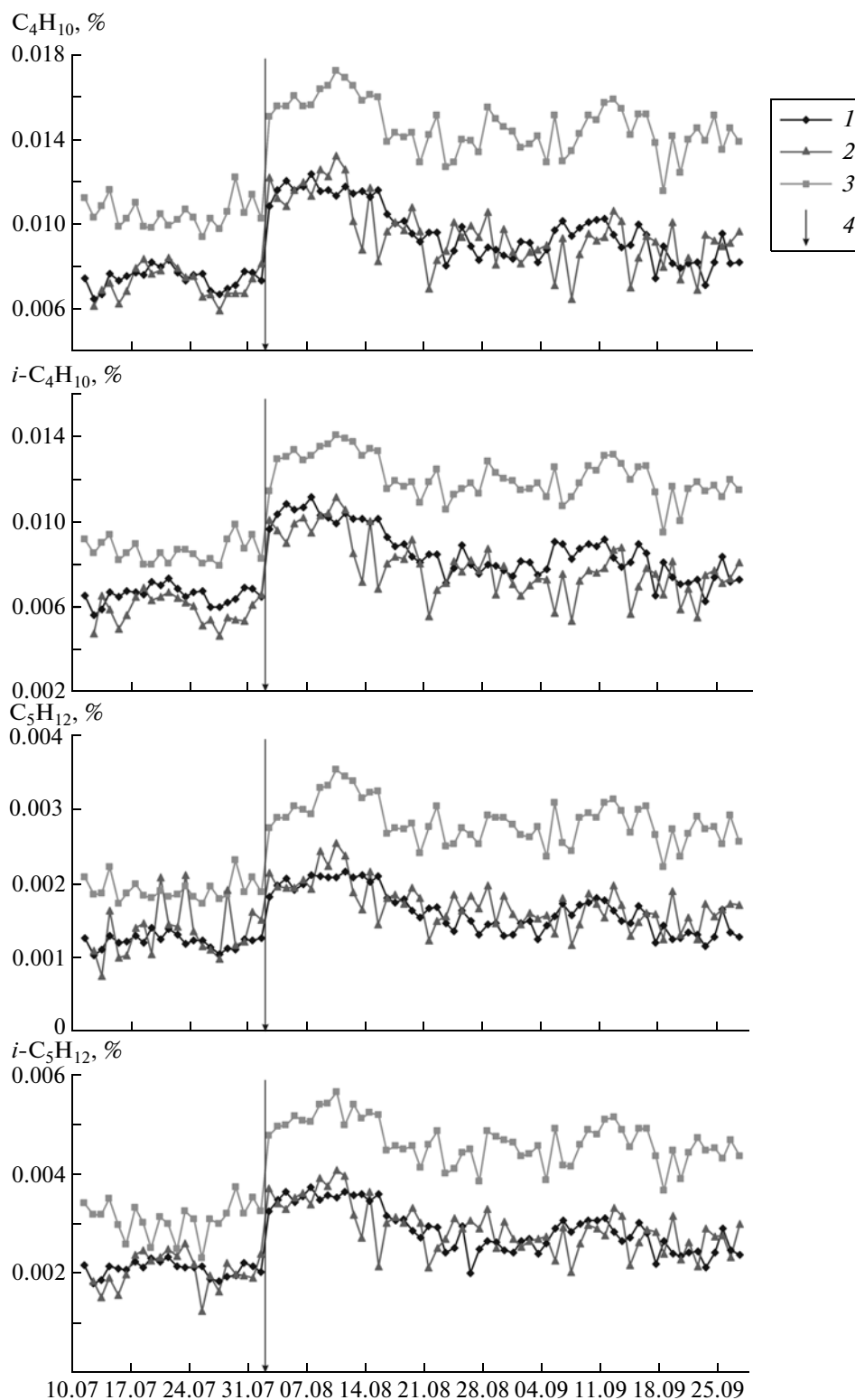
*Институт морской геологии и геофизики  
Дальневосточного отделения  
Российской Академии наук, Южно-Сахалинск  
Тихоокеанский океанологический институт  
им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения  
Российской Академии наук, Владивосток*



**Рис. 1.** Содержание углекислого газа, метана, этана и пропана в составе свободных газов в период наблюдений 2007 г. 1 – для грифона F, 2 – для грифона G, 3 – для грифона H, 4 – указатель даты Невельского землетрясения.

Видно, что ни для одной газовой компоненты нет пересечения доверительных интервалов для всех трех грифонов. Лишь в некоторых случаях имеет место пересечение доверительных интервалов для ка-

ких-либо двух грифонов. Таким образом, можно утверждать, что химический состав свободных газов в разных грифонах одного и того же грязевого вулкана статистически значимо различается.



**Рис. 2.** Содержание бутана, изобутана, пентана и изопентана в составе свободных газов в период наблюдений 2007 г. 1 – для грифона F, 2 – для грифона G, 3 – для грифона H, 4 – указатель даты Невельского землетрясения.

После землетрясения во всех грифонах изменилось соотношение между различными компонентами в составе свободных газов – уменьши-

лась доля углекислого газа и увеличилась доля углеводородных газов. Далее для всех грифонов наблюдается тенденция к возвращению в состоя-

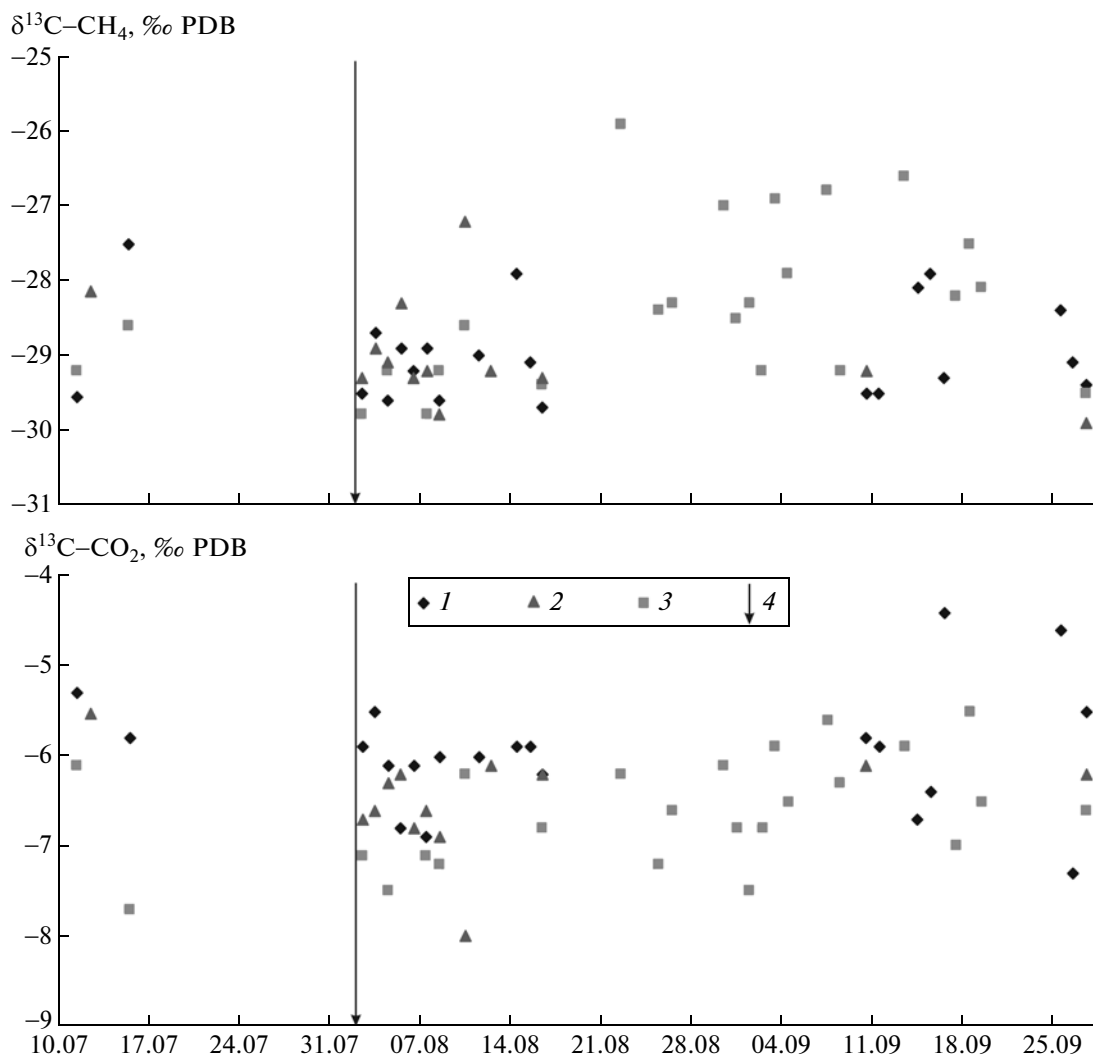


Рис. 3. Изотопный состав углерода метана и углекислого газа свободных газов в период наблюдений 2007 г. 1 – для грифона F, 2 – для грифона G, 3 – для грифона H, 4 – указатель даты Невельского землетрясения.

ние с исходным химическим составом (рис. 1, 2). Время релаксации, под которым здесь понимается интервал времени, необходимый для восстановления прежнего химического состава, составило несколько месяцев. Таким образом, землетрясение проявилось одинаковым образом для всех грифонов, что говорит о закономерности этих проявлений. Отличия между грифонами заключаются лишь в величине изменений химического состава, а также в значениях времени релаксации.

Изменения химического состава свободных газов грязевых вулканов обычно объясняют механическим смешиванием газов из нескольких различных источников (резервуаров), вскрываемых подводящими каналами вулканов [1, 9]. В работе [10] указано, что грифоны имеют свои изолированные подводящие каналы, которые связаны с различными глубинами залегания источников уг-

леродородных газов. Там же утверждается, что при активизации грязевулканической деятельности происходит вынос флюидов с более глубоких горизонтов.

Полученные нами данные об изотопном составе углерода метана и углекислого газа свободных газов не соответствуют подобным предположениям. Основной источник грязевулканических флюидов имеет, несомненно, глубинное происхождение. Однако значения  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  для всех грифонов остаются практически постоянными во время всего периода наблюдений (рис. 3). Следовательно, в нашем случае увеличение выноса глубинных флюидов не может считаться основной причиной активизации вулкана после землетрясения. Доверительные интервалы, вычисленные с доверительной вероятностью 0.99 для средних значений  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ , пере-

секаются для всех трех грифонов. Таким образом, в изотопном составе газов из разных грифонов нет статистически значимых различий, т.е. можно утверждать, что газ во все грифоны поступает из одного источника. Различия химического состава свободных газов в разных грифонах следует объяснять другими причинами.

Нами предлагается следующая интерпретация изменения химического состава свободных газов после землетрясения. Сейсмические волны от землетрясения, проходя через грязевулканическую структуру, вызывают перепад давления в подводящем канале вулкана. Водогрязевая смесь в канале содержит большое количество растворенного газа. Так, например, согласно работе [11] при температуре 40°C и давлении 15.2 МПа, что соответствует термодинамическим условиям на глубине около 900 м, в 1 кг воды может быть растворено около 29.39 л CO<sub>2</sub>, 2.55 л CH<sub>4</sub> и 1.06 л C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>. Если давление теперь уменьшить, например, на 1 МПа, то из 1 кг воды из растворенной в свободную фазу выделится около 0.27 л CO<sub>2</sub>, 0.12 л CH<sub>4</sub> и 0.01 л C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>. Кроме того, в водогрязевой смеси находится во взвешенном состоянии большое количество обломков горных пород, которые имеют различные размеры от 10<sup>-6</sup> до 10<sup>-3</sup> м. Следовательно, для водогрязевой смеси характерна высокая концентрация зародышей кавитации. Отметим также, что частоты сейсмических волн заключены в основном в диапазоне 0.1–10 Гц. На этих частотах вода имеет пониженный порог акустической кавитации [12]. Таким образом, сейсмическое воздействие на подводящий канал грязевого вулкана может вызвать акустическую кавитацию — разрыв сплошности водогрязевой смеси и появление парогазовых пузырьков. Часть растворенного газа перейдет в свободную фазу, что и приведет к наблюдавшемуся нами увеличению дебита свободных газов в грифонах. Изменение соотношения между различными компонентами в составе свободных газов обусловлено различным характером зависимости их растворимости от глубины.

Поскольку свободные газы во всех грифонах имеют схожий изотопный состав, то данные по каждому грифону можно объединить в одну общую выборку. По этой выборке вычислены точечные и интервальные оценки для средних значений  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ , которые для доверительной вероятности 0.99 составляют  $(-28.7 \pm 0.35)$  и  $(-6.3 \pm 0.26)$ .

Существует эмпирическая зависимость изотопного состава углерода метана от температуры его генерации [13]. Согласно этой зависимости среднее значение  $\delta^{13}\text{C}$  метана Южно-Сахалинского грязевого вулкана соответствует температуре образования метана около 320–340°C. Сред-

ний геотермический градиент в южной части о. Сахалин, рассчитанный по данным работы [14], составляет около 41.1°C/км. Отсюда получаем, что глубина залегания источника метана для вулкана составляет 7.8–8.3 км.

Степень разделения изотопов углерода в системе CO<sub>2</sub>–CH<sub>4</sub> зависит от температурных условий генерации этих газов. Диапазон температуры изотопного равновесия в этой системе, рассчитанный для средних значений  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  по формулам из работы [15], составляет 330–350°C. Это отвечает диапазону глубин генерации этих газов 8.0–8.5 км.

Таким образом, нами впервые в мировой практике проведены длительные мониторинговые наблюдения за химическим и изотопным составом свободных газов в нескольких грифонах грязевого вулкана. После Невельского землетрясения химический состав свободных газов в грифонах Южно-Сахалинского грязевого вулкана резко изменился. Затем отмечалась тенденция к постепенному восстановлению прежнего химического состава, время релаксации составило несколько месяцев. Можно ожидать, что в течение этого времени вулкан будет слабо чувствителен к последующим землетрясениям. Изотопный состав углерода метана и углекислого газа стабилен во времени и одинаков для всех грифонов. Оценка глубины залегания источника газа для вулкана, сделанная по изотопным геотермометрам, составляет около 8 км.

Работа выполнена при поддержке грантов ДВО РАН (№ 10–III–В–07–191 и 09–III–А–07–324), гранта Президиума РАН (№ 09–I–П17–10), ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг. (№ 02.740.11.0022), гранта НП “Глобальная Энергия” МГ-2010/04/6.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Войтов Г.И.* // Геохимия. 2001. № 4. С. 422–433.
2. *Nevinsky I., Nevinsky V., Panyushkin V., et al.* // Radiat. Meas. 2001. V. 34. P. 349–353.
3. *Гудзенко В.В.* // Геология и полез. ископаемые Мирового океана. 2008. № 2. С. 116–127.
4. *Войтов Г.И., Беликов В.М., Орлова Т.Г. и др.* // ДАН. 1988. Т. 309. № 6. С. 1330–1336.
5. *Kopf A., Delisle G., Faber E., et al.* // Intern. J. Earth Sci. 2010. V. 99. Suppl. 1. P. 227–240.
6. *Martinelli G., Ferrari G.* // Tectonophysics. 1991. V. 193. P. 397–410.
7. *Yang T.F., Fu C.C., Walia V., et al.* // Pure and Appl. Geophys. 2006. V. 163. P. 693–709.

8. *Ершов В.В., Левин Б.В., Мельников О.А., Доманский А.В.* // ДАН. 2008. Т. 423. № 4. С. 533–537.
9. *Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г., Прасолов Э.М., Каменский И.Л.* // Литология и полез. ископаемые. 1996. № 6. С. 625–647.
10. *Алиев Ад.А.* // Геология и полез. ископаемые Мирового океана. 2006. № 3. С. 35–51.
11. *Намиот А.Ю.* Растворимость газов в воде. М.: Недра, 1991. 167 с.
12. *Маргулис М.А.* Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях). М.: Высш. шк., 1984. 272 с.
13. *Прасолов Э.М.* Изотопная геохимия и происхождение природных газов. Л.: Недра, 1990. 283 с.
14. *Веселов О.В., Соинов В.В.* Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. Т. 4. С. 153–176.
15. *Horita J.* // *Geochim. et cosmochim. acta.* 2001. V. 65. P. 1907–1919.