

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ИЗВЕРЖЕНИЯ ЮЖНО-САХАЛИНСКОГО ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА В 2011 Г. ПО ДАННЫМ GPS НАБЛЮДЕНИЙ

© 2013 г. Н. Ф. Василенко, А. С. Прытков, член-корреспондент РАН Б. В. Левин

Поступило 09.04.2013 г.

DOI: 10.7868/S0869565213240237

Грязевой вулканизм – это уникальное природное явление, представляющее большой интерес для геологии и геофизики. Предполагается, что грязевые вулканы являются индикаторами геодинамики земных недр. Однако о грязевулканических процессах высказываются только некоторые общие представления [1–4]. Проблемы этого природного явления не имеют убедительного и однозначного решения. Сильные извержения грязевых вулканов вызывают смещения и деформации земной поверхности. По данным GPS-наблюдений впервые выявлены горизонтальные и вертикальные смещения земной поверхности в результате извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана в 2011 г., которые позволили смоделировать источник извержения.

На Дальнем Востоке России остров Сахалин является единственным регионом, где проявляется грязевой вулканизм. Один из известных и крупных вулканов – Южно-Сахалинский грязевой вулкан – расположен на юге острова в зоне выхода главного сместителя Центрально-Сахалинского взброса-надвига на дневную поверхность, плоскость которого круто падает на запад под углом 60–70° [4].

В 2005 г. в окрестностях грязевого вулкана построена локальная сеть из пяти пунктов наблюдений, контролирующая основные разрывные нарушения в зоне Центрально-Сахалинского взброса-надвига. GPS-измерения сети выполнены в 2005, 2006, 2008 гг. и осенью 2011 г. после достаточно мощного извержения грязевого вулкана (точная дата извержения вулкана в начале 2011 г. неизвестна).

В период, предшествующий извержению, в районе исследований наблюдалось небольшое субширотное горизонтальное сжатие со скоростью 2–

4 мм/год и опускание земной поверхности до 3 мм/год. В результате извержения в окрестности грязевого вулкана произошли значительные горизонтальные и вертикальные смещения земной поверхности (рис. 1). Они вычислены из разностей

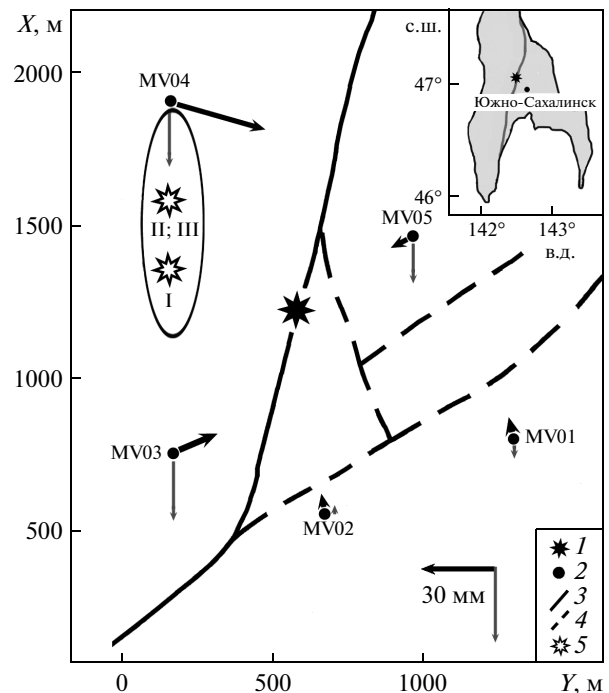


Рис. 1. Смещения земной поверхности в результате извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана в 2011 г. относительно GPS-станции Южно-Сахалинск. 1 – грязевой вулкан; 2 – пункты GPS наблюдений; разрывные нарушения в зоне Центрально-Сахалинского взброса-надвига [4]; 3 – главный сместитель; 4 – оперяющие второстепенные разломы; 5 – модельное расположение источника извержения для решений I–III, представленных в табл. 1. Эллипсом показана среднеквадратическая ошибка расположения источника из решения III. Горизонтальные смещения обозначены темными стрелками, вертикальные смещения – светлыми стрелками. Среднеквадратические ошибки горизонтальных смещений не превышают 2 мм, вертикальных – 5 мм. На схеме-врезке приведено местоположение грязевого вулкана на юге о. Сахалин.

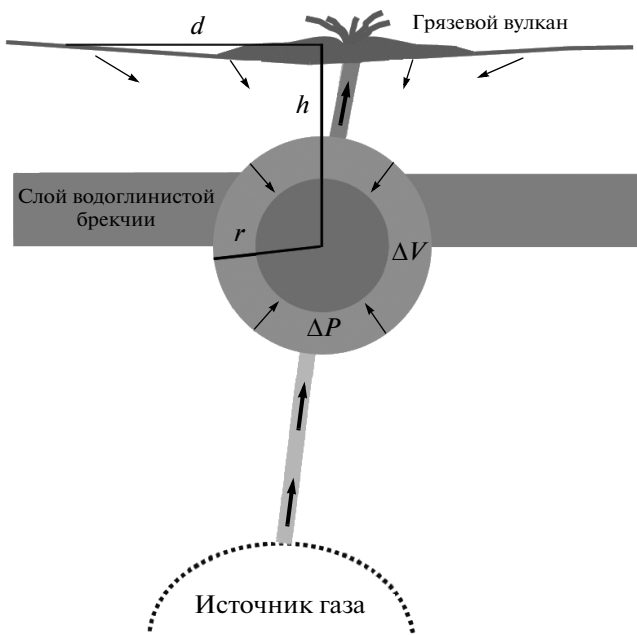


Рис. 2. Схематическая модель источника извержения грязевого вулкана.

координат пунктов, определенных в 2011 г. и результатов линейной экстраполяции изменения координат в период 2005–2008 гг. на начало 2011 г. Максимальные смещения проявились на западном крыле Центрально-Сахалинского разлома: пункты MV03, MV04 сместились в восточном направлении на 15–33 мм и опустились на 23 мм (рис. 1). Смещения восточного крыла разлома имеют значительно меньшие величины. Только на пункте MV05 опускание составило 15 мм. Зарегистрированные смещения земной поверхности использованы для моделирования источника извержения грязевого вулкана и оценки его параметров.

Таблица 1. Модельные параметры источника извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана

Координаты источника и их средне-квадратическая ошибка			$\Delta V, 10^4 \text{ м}^3$	χ^2	
X, м	Y, м	h, м			
I. Решение для вертикальных смещений					
150	$\begin{vmatrix} +300 \\ -480 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} +170 \\ -230 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 450 \\ -220 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} -8.9 \\ +3.4 \\ -7.0 \end{vmatrix}$	6.1
II. Решение для радиальных компонент горизонтальных смещений					
150	$\begin{vmatrix} +90 \\ -80 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} +220 \\ -420 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 600 \\ -100 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} -3.6 \\ +1.5 \\ -1.4 \end{vmatrix}$	3.2
III. Совместное решение					
150	$\begin{vmatrix} +120 \\ -90 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} +300 \\ -440 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 700 \\ -120 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} -5.0 \\ +1.9 \\ -2.0 \end{vmatrix}$	22.9

Процессы, приводящие к извержению грязевых вулканов о. Сахалин, в общем виде рассмотрены в работах [1, 2]. Зона тектонического разлома, выходящего на дневную поверхность, представляет трещиновато-пористой средой и образует подводящий канал вулкана, через который происходит восходящая фильтрация газа. Подводящий канал перекрывается слоем осадочных толщ водоглинистой брекчии, который препятствует дальнейшему движению газа. В процессе фильтрации газа давление в подводящем канале становится больше геостатического давления вышележащей водоглинистой толщи, что приводит к извержению вулкана. Источником деформаций земной поверхности в окрестности грязевого вулкана является область сброса давления под перекрывающей водоглинистой толщей (рис. 2).

Смещения земной поверхности в результате извержения вулкана можно смоделировать для конечного сферического источника в однородном упругом полупространстве [5]. В цилиндрической системе координат вертикальные U_z и радиальные горизонтальные U_r компоненты смещений имеют вид

$$U_z = \frac{3 \Delta V}{4 \pi} \frac{d}{(h^2 + d^2)^{3/2}}, \quad U_r = \frac{3 \Delta V}{4 \pi} \frac{h}{(h^2 + d^2)^{3/2}},$$

где $\Delta V = \frac{\pi r^3 \Delta P}{\mu}$ – изменение объема источника, d – радиальное расстояние, h – глубина, r – радиус источника, ΔP – изменение давления в источнике, μ – модуль упругости среды, вмещающий источник.

Сопоставление модельных и измеренных смещений позволяет решить обратную задачу: определить местоположение источника в пространстве и изменение его объема. Для этого необходимо минимизировать среднеквадратическую разность измеренных и модельных смещений, которая выполнена численным методом поиска минимума функции нескольких переменных:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - U_i)^2}{\sigma_i^2} \rightarrow \min,$$

где y_i – измеренные и U_i – модельные смещения, σ_i^2 – ошибка измерений, N – число исходных данных.

На начальном этапе предпринята попытка моделирования источника извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана методом инверсии векторов горизонтальных и вертикальных смещений земной поверхности, представленных на рис. 1. Однако большие разности измеренных и модельных смещений ($\chi^2 = 333$) не позволили оценить параметры этой модели для доверительного интервала 95%. Основной вклад в эту величину вносят векторы горизонтальных смещений ($\chi^2 = 312$).

Непосредственно извержению вулкана отвечают радиальные (по направлению на модельный источник) составляющие горизонтальных смещений [5]. Моделирование источника извержения на основе их инверсии дает хорошее согласование измеренных и модельных радиальных компонент ($\chi^2 = 3.2$) (табл. 1). При этом модельные параметры источника, полученные на основе раздельной инверсии вертикальных и горизонтальных радиальных компонент смещений, достаточно хорошо согласуются между собой (решения I и II).

В качестве окончательного решения приняты параметры источника извержения, полученные из совместного моделирования вертикальных и радиальных горизонтальных компонент смещений (решение III). Графики измеренных и модельных смещений для этого решения представлены на рис. 3. Параметры оптимальной модели и их оценка приведены в таблице. Во всех решениях плановые координаты источника согласуются в пределах одной среднеквадратической ошибки, глубина и изменение объема – в пределах двух среднеквадратических ошибок решения III.

Изменение объема источника составляет $5 \cdot 10^4 \text{ м}^3$. Модельный сферический источник извержения находится к западу от выхода главного сместителя Центрально-Сахалинского разлома на дневную поверхность на расстоянии около 500 м и глубине 700 м, т.е. практически в плоскости главного сместителя на западном его крыле.

Объем изверженного на поверхность материала оценен величиной $1 \cdot 10^4 \text{ м}^3$ с водонасыщением около 5–10%, тогда как свежесброшенная вулканом водоглинистая брекчия обычно состоит из двух частей сухой породы на одной части воды. Следовательно, объем газовой смеси (углекислый газ и метан) в источнике извержения на глубине 700 м составляет около $3.5 \cdot 10^4 \text{ м}^3$. Этот объем перед извержением, по аналогии с [1], находился под геостатическим давлением более 12.6 МПа. Поэтому объем выброшенной на поверхность газовой смеси превышает $50 \cdot 10^4 \text{ м}^3$.

Горизонтальные смещения земной поверхности, зафиксированные в результате извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана, являются комбинацией смещений в результате самого извержения, а также сжатия в зоне Центрально-Сахалинского разлома, произошедшего в период извержения или после него. Разности измеренных (рис. 1) и модельных радиальных горизонтальных векторов смещений (рис. 3) свидетельствуют о том, что извержение вулкана сопровождалось смещением западного крыла Центрально-Сахалинского разлома в восточном направлении. Такое смещение может быть объяснено только двумя факторами: расположением источника извержения в западном крыле главного сместителя и преобладающим напряжением субширотного сжатия

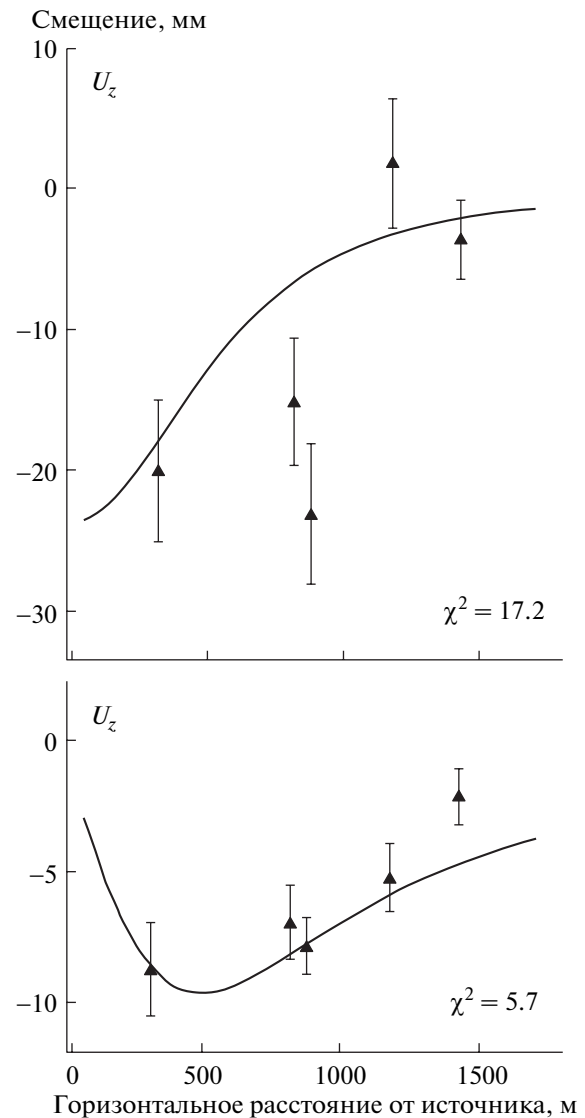


Рис. 3. Оптимальное совместное решение для измеренных вертикальных U_z и радиальных горизонтальных U_r смещений земной поверхности в результате извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана в 2011 г. Модельные смещения изображены сплошной линией, измеренные смещения с одной среднеквадратической ошибкой – треугольниками.

в недрах юга острова, выявленного комплексом различных геофизических и геодезических методов [6, 7].

В выполненном моделировании источника извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана радиус r , сброшенное давление ΔP и модуль упругости среды μ неразделимы: различные их комбинации могут создавать одинаковые деформации земной поверхности. Это не позволяет определить реальный размер сферического источника. Если модуль упругости среды, вмещающий источник, для обводненных и разрушенных глинистых отложений еще можно оценить вели-

чиной $1.4 \cdot 10^9$ Па [8, 9], то неизвестный параметр сброшенного давления имеет достаточно широкий диапазон. С одной стороны, его можно оценить величиной аномально высокого пластового давления (6–10 МПа) под глинистыми отложениями в зоне Центрально-Сахалинского глубинного разлома на юге острова [7]. При этом в процессе фильтрации газа давление в подводящем канале грязевого вулкана может достигать и больших величин. С другой стороны, среднее модельное сброшенное давление при грязевулканических извержениях составляет 0.44 МПа [10]. Из приведенных оценок радиус сферического источника извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана в 2011 г. может составлять 130–370 м. Такие размеры свидетельствуют о применимости модели сферического источника, которая ограничена

условием $\left(\frac{r}{h}\right)^5 \ll 1$ [11]. Для имеющегося количества исходных данных построенная модель наиболее приемлема по сравнению с более сложными моделями другой геометрической формы, которые характеризуются большим количеством параметров.

Авторы благодарят С.М. Сапрыгина за консультации и предоставленные сведения о величинах аномально высоких пластовых давлений в недрах юга острова Сахалин.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ, грант МК-4575.2011.5 и Президиума ДВО РАН грант 13-III-B-08-007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горкун В.Н., Сырык И.М. // Геология и геофизика. 1967. № 2. С. 30–42.
2. Доманский А.В., Еришов В.В., Левин Б.В. // ДАН. 2009. Т. 424. № 1. С. 107–110.
3. Каракин А.В., Каракин С.А. // ДАН. 2000. Т. 374. № 5. С. 684–687.
4. Мельников О.А., Еришов В.В., Ким Ч.У. и др. // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27. № 5. С. 25–41.
5. Mogi K. // Bull. Earthquake Res. Inst. 1958. V. 36. P. 99–134.
6. Василенко Н.Ф., Прытков А.С. // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31. № 1. С. 42–48.
7. Сапрыгин С.М. Тектоника плит и сейсмичность в Дальневосточном регионе. Южно-Сахалинск: Сахалин. кн. изд-во, 2005 г. 84 с.
8. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 447 с.
9. Теркот Д., Шуберт Д. Геодинамика: Геологические приложения физики сплошных сред. М.: Мир, 1985. Ч. 2. 360 с.
10. Fukushima Y., Mori J., Hashimoto M. et al. // Mar. and Petrol. Geol. 2009. V. 26. P. 1740–1750.
11. McTigue D.F. // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. № B 12. P. 12931–12940.