

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

А.С. Прытков, Н.Ф. Василенко, В.В. Еришов

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки 1Б, г. Южно-Сахалинск, 693022;
e-mail: vnf@imgg.ru

Поступила в редакцию 23 мая 2013 г.

На Дальнем Востоке России остров Сахалин является единственным регионом, где проявляется наземный грязевой вулканизм. Южно-Сахалинский грязевой вулкан расположен на юге острова в зоне Центрально-Сахалинского взброса-надвига. Впервые по данным GPS наблюдений выявлены горизонтальные и вертикальные смещения земной поверхности в результате его извержения в 2011 г. На основе инверсии измеренных смещений для однородного упругого полупространства построена модель конечного сферического источника извержения. Определены координаты, глубина и возможные размеры источника, а также оценен объем изверженной глинистой породы, воды и газа.

Ключевые слова: грязевой вулкан, извержение, смещения земной поверхности, GPS измерения, моделирование, о. Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

Грязевой вулканизм – это уникальное природное явление, представляющее большой интерес для геологии и геофизики. Предполагается, что грязевые вулканы являются индикаторами геодинамической активности земных недр. Однако о грязевулканических процессах высказываются только некоторые общие представления [2, 3, 9, 12]. Проблемы этого природного явления пока не имеют убедительного и однозначного решения. Сильные извержения грязевых вулканов вызывают смещения и деформации земной поверхности, которые могут быть выявлены современными методами спутниковой геодезии и радарной радиоинтерферометрии [20, 22]. Такие инструментальные данные позволяют моделировать глубинное строение, а также процессы подготовки и реализации извержения грязевого вулкана.

На Дальнем Востоке России о. Сахалин является единственным регионом, где проявляется наземный грязевой вулканизм. Один из наиболее известных и крупных вулканов – Южно-Сахалинский грязевой вулкан – расположен на юге острова в зоне Центрально-Сахалинского взброса-надвига. Извержения этого вулкана наблюдались в 1959, 1979, 1994, 2001 и 2011 гг. Настоящее исследование посвящено изучению смещений и деформаций земной поверхности в окрестности Южно-Саха-

линского грязевого вулкана на стадии грифонной деятельности и моделированию активной фазы его последнего извержения.

ИЗВЕРЖЕНИЯ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА

Принято выделять две фазы деятельности грязевых вулканов: сравнительно кратковременную фазу бурного извержения и гораздо более длительную грифонную фазу, которая соответствует периоду относительного затишья вулкана. Для Южно-Сахалинского грязевого вулкана считается, что его извержения происходят примерно один раз в 20 лет [11]. Этот вывод основан на том факте, что сильные извержения вулкана зафиксированы в 1959, 1979 и 2001 гг. При извержении 1959 г. выброшенная грязевулканическая брекчия покрыла площадь около $6 \cdot 10^4$ м², ее объем составил примерно $(1.5-2.0) \cdot 10^5$ м³ [17]. При извержении 1979 г. площадь и объем, соответственно, равны $5 \cdot 10^4$ м² и $(4-5) \cdot 10^4$ м³ [8]. Наконец, для извержения 2001 г. эти величины составляют $4 \cdot 10^4$ м² и $(0.8-1.0) \cdot 10^5$ м³ [11]. Однако известно и более слабое извержение Южно-Сахалинского грязевого вулкана, которое произошло ориентировочно в 1994 г. [4, 10]. Площадь новообразовавшегося грязевого поля для этого извержения оценена $6.5 \cdot 10^3$ м², объем извергнутого материала – $(1-2) \cdot 10^3$ м³. Из приведенных данных видно, что вопрос о периодичности извержений Южно-Сахалинского грязевого вулкана явля-

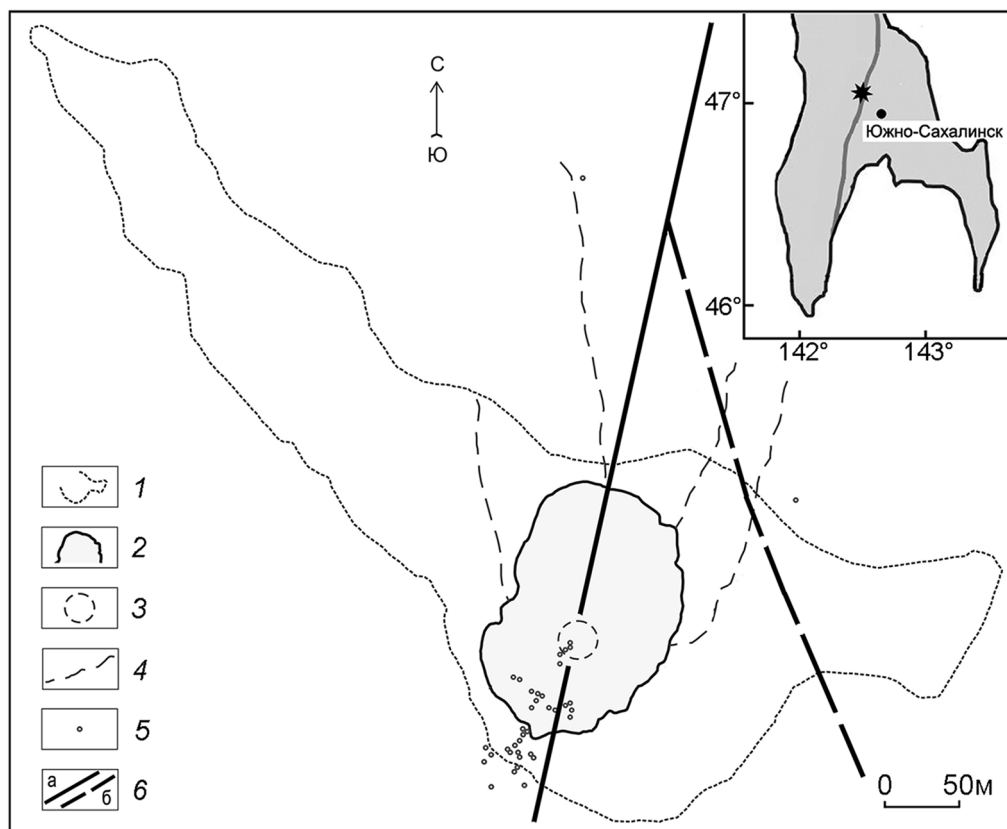


Рис. 1. Южно-Сахалинский грязевой вулкан после извержения 2011 г.

1 – грязевое поле, образовавшееся после извержения 2001 г.; 2 – грязевое поле, образовавшееся после извержения 2011 г.; 3 – эруптивный центр извержения 2011 г.; 4 – трещины на поверхности грязевого вулкана; 5 – активные грифоны; 6 – разрывные нарушения в зоне Центрально-Сахалинского разлома: а – главный сместитель; б – оперяющий второстепенный разлом. На схеме-врезке приведено местоположение грязевого вулкана в зоне Центрально-Сахалинского разлома.

ется довольно сложным. Возможно, что извержения разной силы могут иметь различную периодичность. Подобный многограновый характер периодичности предполагается для Главного Пугачевского грязевого вулкана, также расположенного в зоне Центрально-Сахалинского взброса-надвига в 130 км к северу от Южно-Сахалинского вулкана [5, 13].

В силу относительной доступности Южно-Сахалинского грязевого вулкана наблюдения за его деятельностью проводятся достаточно регулярно. Осмотр, проведенный в начале октября 2010 г., показал, что вулкан продолжал находиться в грифоновой фазе. По сравнению с предыдущими осмотрами каких-либо аномальных изменений в грифоновой деятельности не наблюдалось. Общее число грифонов, их местоположение и активность в целом оставались примерно такими же, как и в предыдущие два-три года. Наблюдения, проведенные в конце мая 2011 г., показали наличие нового грязевого поля (рис. 1). Его площадь составила $\sim 1.6 \cdot 10^4$ м², объем выброшенной брекчии – $(0.8-1.2) \cdot 10^4$ м³. Очевидно, что изверже-

ние вулкана произошло в период времени с октября 2010 г. по май 2011 г. – точную дату извержения установить невозможно. В лесу, прилегающем к грязевому вулкану, сохранились остатки снежного покрова, на котором были обнаружены следы брекчии. Можно полагать, что извержение вулкана произошло зимой 2011 г., когда основной снежный покров уже сформировался. Поверхность нового грязевого поля имела достаточно отчетливо выраженную концентрическую структуру. Это свидетельствует о том, что на заключительной стадии извержения происходило относительно спокойное истечение брекчии из эруптивного центра. На поверхности вулкана за пределами нового грязевого поля обнаружено несколько отчетливо выраженных трещин протяженностью 100–200 м, которые, вероятно, расходятся от эруптивного центра. В основном они представляли собой трещины отрыва, но иногда встречался небольшой правосторонний сдвиг. В пределах нового грязевого поля образовался ряд грифонов, активно выделяющих газ и сопочную брекчию.

Исходя из объема выброшенной брекчии и площади новообразовавшегося грязевого поля, извержение 2011 г. во многом аналогично извержению 1994 г. То есть для Южно-Сахалинского грязевого вулкана можно выделить два типа извержений – сильные и слабые. Объем выброшенной брекчии для извержений первого типа составляет порядка 10^5 м^3 , для извержений второго типа – порядка 10^4 м^3 . Вопрос о периодичности извержений разной силы остается открытым. Также пока не ясно, имеются ли какие-то другие различия для извержений разного типа. Они могут отличаться глубиной залегания источника извержения, скоростью истечения газа и брекчии при извержении и соотношением между количеством брекчии и газа, выбрасываемых при извержении на дневную поверхность. Для ответа на все эти вопросы требуется продолжение исследований.

СМЕЩЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ОКРЕСТНОСТИ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА

Для изучения смещений и деформаций земной поверхности в окрестности Южно-Сахалинского грязевого вулкана в 2005 г. построена локальная сеть из 5 пунктов наблюдений, контролирующая основные разрывные нарушения в зоне Центрально-Сахалинского разлома (рис. 2). Периодические измерения сети выполнены геодезическими двухчастотными GPS приемниками в 2005, 2006, 2008 гг. и осенью в 2011 г. после извержения грязевого вулкана. Продолжительность наблюдений на пунктах составляла 2–3 дня. Суточные файлы наблюдений формировались с 30-секундной дискретностью и маской возвышения спутников от 5° . Обработка измерений проведена с использованием специализированного пакета программного обеспечения [21]. Для всех эпох наблюдений в качестве опорной станции использовался пункт MV01. Среднеквадратические ошибки суточного определения плановых координат подвижных пунктов относительно опорной станции не превышают 2 мм, вертикальной компоненты – 3–4 мм.

Анализ деформаций земной поверхности в окрестности грязевого вулкана перед его извержением выполнен в виде скоростей смещений подвижных пунктов относительно опорной станции MV01 (рис. 2). Использование пункта MV01 в качестве опорного позволило минимизировать ошибки координат подвижных пунктов и получить надежную информацию о характере деформирования района исследований на стадии малоактивной грифонной деятельности вулкана. Скорости смещений подвижных пунктов и их среднеквадратические ошибки вычислены с использованием фильтра

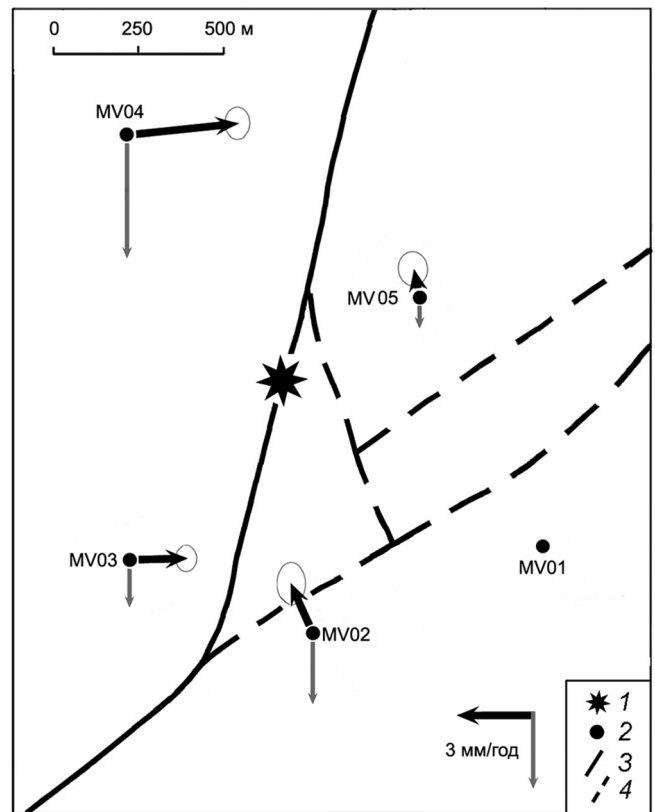


Рис. 2. Скорости горизонтальных и вертикальных смещений земной поверхности в окрестности Южно-Сахалинского грязевого вулкана за период 2005–2008 гг. относительно пункта MV01.

1 – грязевого вулкан; 2 – пункты GPS наблюдений; разрывные нарушения в зоне Центрально-Сахалинского взброса-надвига [12]: 3 – главный сместитель; 4 – оперяющие второстепенные разломы. Скорости горизонтальных смещений изображены темными стрелками, вертикальных – светлыми стрелками. Эллипсами показана одна среднеквадратическая ошибка горизонтальных скоростей, ошибки вертикальных скоростей не превышают 2.7 мм.

Калмана [23], учитывающего корреляцию ошибок наблюдений.

По данным обработки 3-х эпох GPS наблюдений в окрестности вулкана перед извержением наблюдалось небольшое горизонтальное сжатие земной поверхности в крест простирания главного сместителя Центрально-Сахалинского разлома. Скорость субширотного сжатия составляла 2–4 мм/год, что согласуется с характером современного деформирования юга о. Сахалин [1, 19]. Опускание земной поверхности ближайших окрестностей грязевого вулкана относительно опорного пункта в этот период малодостоверно (только на пункте MV04 скорость опускания сопоставима с двумя среднеквадратическими ошибками ее определения).

В результате извержения грязевого вулкана все пункты локальной сети, включая опорный пункт MV01, могли испытать смещения. Для выявления этих смещений измерения 2005–2011 гг. были обработаны относительно пункта непрерывной регистрации, расположенного в г. Южно-Сахалинск и удаленного от объекта исследований на 13 км. Смещения, непосредственно связанные с вулканическим извержением, вычислялись как разности координат пунктов, определенных в 2011 г., и линейной экстраполяции изменения координат в период 2005–2008 гг. на начало 2011 г. Все смещения пунктов, за исключением вертикальной компоненты пунктов MV01 и MV02, оказались представительными, поскольку их величины превышают две среднеквадратических ошибки (рис. 3). Пример вычисления смещений для пункта MV03 представлен на рис. 4.

В окрестности грязевого вулкана в результате извержения произошли значительные горизонталь-

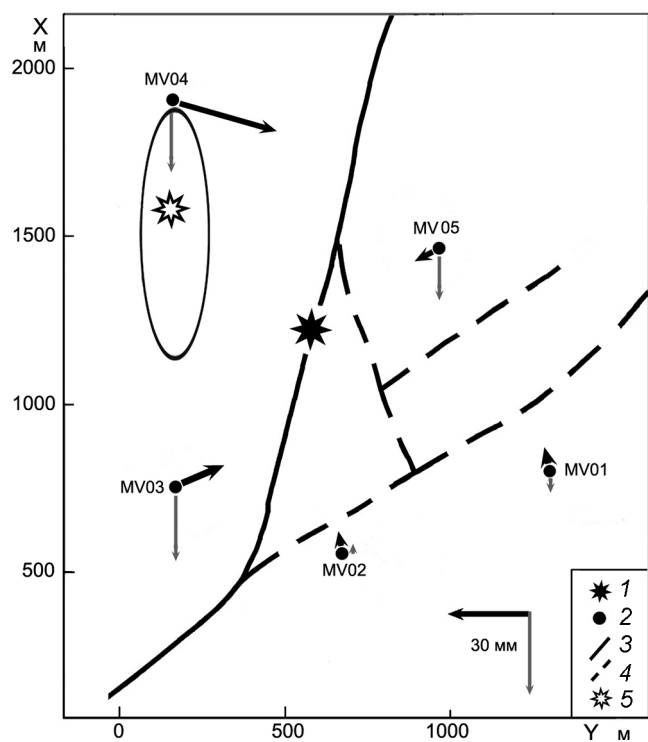


Рис. 3. Смещения земной поверхности в результате извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана в 2011 г. относительно GPS станции Южно-Сахалинск.

5 – модельное расположение источника извержения для решения III (см. табл.). Остальные условные обозначения см. рис. 2. Горизонтальные смещения обозначены темными стрелками, вертикальные – светлыми стрелками. Среднеквадратические ошибки компонент горизонтальных смещений не превышают 1.7 мм, вертикальных – 5.0 мм. Эллипсом показано среднеквадратическое отклонение расположения модельного источника.

ные и вертикальные смещения земной поверхности. Максимальные смещения проявились на западном крыле Центрально-Сахалинского разлома: пункты MV03, MV04 сместились в восточном направлении на 17 и 34 мм, соответственно, и опустились на 23 мм. Горизонтальные и вертикальные смещения пунктов восточного крыла разлома имеют меньшую величину: только на пункте MV05 вертикальное смещение составило 15 мм.

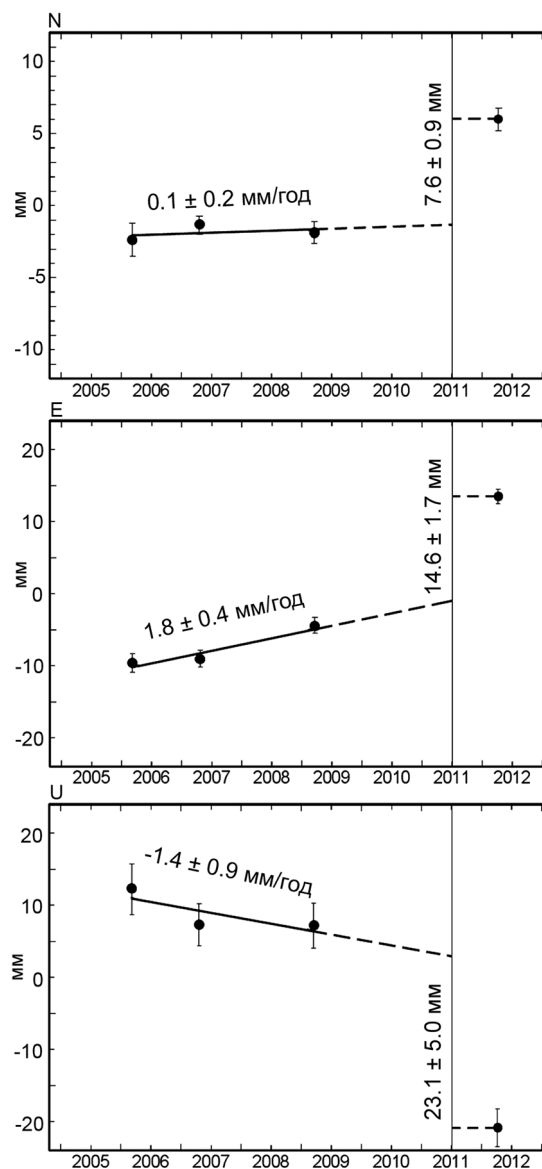


Рис. 4. График изменения координат пункта MV03 за период 2005–2011 гг. относительно GPS станции, расположенной в г. Южно-Сахалинск.

N, E, U – северная, восточная и вертикальная компоненты изменения координат. Скорость изменения координат до извержения грязевого вулкана показана сплошной линией. Смещения в результате извержения получены экстраполяцией (пунктирная линия) компонент координат на 2011 г.

Выявленные смещения земной поверхности использованы для моделирования источника извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана и оценки его параметров.

МОДЕЛЬ КОНЕЧНОГО СФЕРИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ИЗВЕРЖЕНИЯ

Процессы, приводящие к извержению грязевых вулканов Сахалина, в общем виде рассмотрены в работах [2, 3]. Зона тектонического разлома, выходящего на дневную поверхность, представляется 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 (рис. 5). Источником деформаций земной поверхности в окрестности грязевого вулкана является область сброса давления под перекрывающей водоглинистой толщей, которая может иметь любую форму. При моделировании деформаций земной поверхности обычно используются источники правильной геометрические формы: сферической, эллипсоидальной и прямоугольной, которые описываются четырьмя, восьмью и десятью параметрами, соответственно. В мировой практике при ограниченном количестве исходных данных наиболее часто используется модель конечного сферического источника К. Моги [25] в силу ее простоты [18]. Эта модель использована и для моделирования извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана в 2011 г.

В цилиндрической системе координат смещения земной поверхности для модели конечного сферического источника в однородном упругом полупространстве имеют вид:

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

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

где U_z – вертикальные, U_r – радиальные горизонтальные компоненты смещений, $\Delta V = \pi r^3 \Delta P / \mu$ – изменение объема источника, d – радиальное расстояние, h – глубина и r – радиус источника, ΔP – изменение давления в источнике, μ – модуль упругости среды, вмещающей источник.

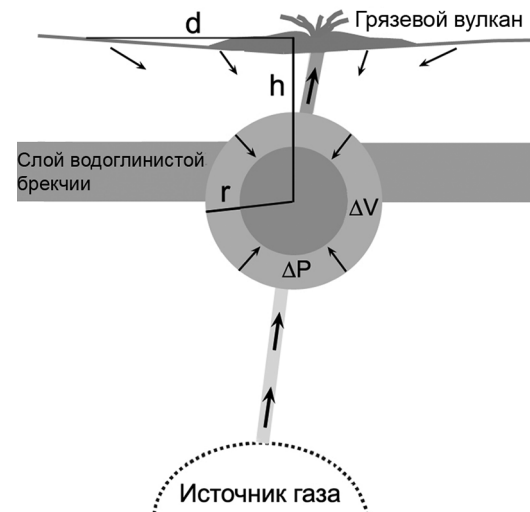


Рис. 5. Схематическая модель источника извержения грязевого вулкана.

Пояснение в тексте.

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 выполняется численными методами 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, U_i – модельные смещения, σ_i – среднеквадратическая ошибка измерений, N – число исходных данных.

Для доверительного интервала 95 % оценка параметров модели может быть выполнена по формуле [26]:

$$\chi_{95\%}^2 = \chi^2 [1 + (\frac{K}{N - K})F],$$

где K – количество неизвестных параметров модели, F – уровень значимости для чисел K и N .

Применимость модели конечного сферического источника в оригинальной работе К. Моги [25] ограничена условием $r/h \ll 1$. Последующие исследования [24] значительно расширили возможность применения этой модели для сферы, размеры которой ограничены условием $(r/h)^5 \ll 1$.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На начальном этапе предпринята попытка моделирования источника извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана методом инверсии векторов горизонтальных и вертикальных смещений земной по-

Таблица. Модельные параметры источника извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана

Параметры источника и их среднеквадратическое отклонение					χ^2	
Координаты			ΔV 10^4 м^3			
X, м	Y, м	h, м				
I. Решение для вертикальных смещений						
150	+300 -480	1360 -230	450 -220	+680 -8.9	+3.4 -7.0	6.1
II. Решение для радиальных компонент горизонтальных смещений						
150	+90 -80	1600 -420	600 -100	+450 -3.6	+1.5 -1.4	3.2
III. Совместное решение						
150	+120 -90	1600 -440	700 -120	+500 -5.0	+1.9 -2.0	22.9

верхности (рис. 3), которая осуществлялась по узлам регулярной сетки с градацией 10 м по координатам и $1 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ по объему источника. Большие разности измеренных и модельных смещений ($\chi^2=333$) не позволили оценить параметры такой модели для доверительного интервала 95 %. Основной вклад в эту величину вносят векторы горизонтальных смещений ($\chi^2=312$): модельные смещения имеют радиальную структуру, а исходные данные значительно отличаются от нее. В таком случае можно предполагать, что выявленные горизонтальные смещения земной поверхности являются отражением не только извержения вулкана, но и сопутствующего процесса деформирования земной поверхности в зоне Центрально-Сахалинского разлома в период извержения или после него.

Непосредственно извержению вулкана отвечают радиальные составляющие выявленных горизонтальных смещений. Они вычислялись как проекции векторов горизонтальных смещений по направлению на модельный источник. Моделирование источника извержения на основе их инверсии дает хорошее согласование измеренных и модельных радиальных компонент ($\chi^2=3.2$) (табл.). Модельные параметры источника, полученные на основе раздельной инверсии вертикальных (решение I) и горизонтальных радиальных (решение II) компонент смещений, хорошо согласуются между собой и свидетельствуют о том, что независимые исходные данные, использованные для этих моделей, являются следствием одного и того же про-

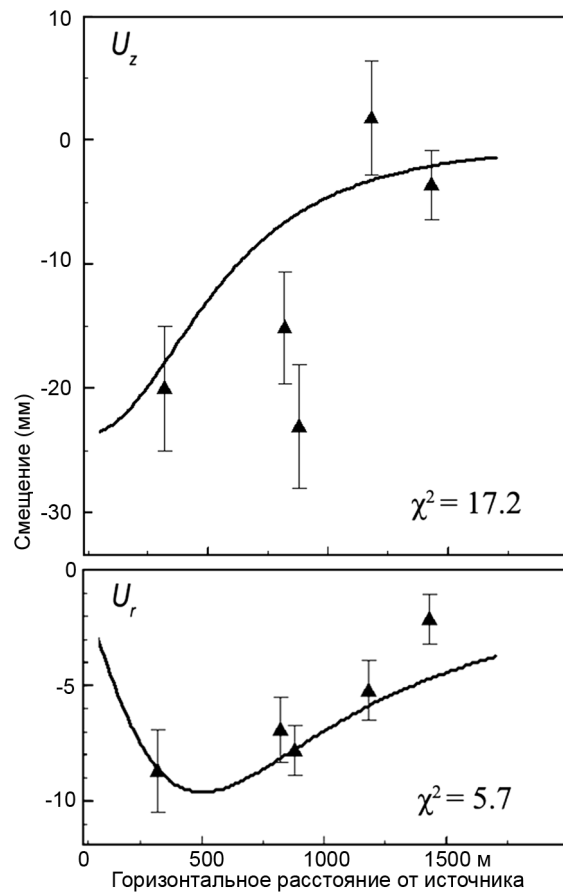


Рис. 6. Оптимальное решение для измеренных вертикальных U_z и радиальных горизонтальных U_r смещений земной поверхности в результате извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана в 2011 г.

Модельные смещения изображены сплошной линией, измеренные смещения с одной среднеквадратической ошибкой изображены треугольниками.

цесса. Поэтому окончательное решение получено на основе совместной инверсии радиальных горизонтальных и вертикальных смещений. Параметры оптимальной модели источника извержения и оценка их точности приведены в таблице (решение III). Графики измеренных и модельных смещений представлены на рис. 6. Модельный сферический источник извержения расположен на глубине 700 м относительно дневной поверхности на расстоянии около 600 м к северо-западу от эруптивного центра. Изменение объема в источнике составило $-5 \cdot 10^4 \text{ м}^3$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В районе исследований зона Центрально-Сахалинского глубинного разлома представлена главным сместителем и оперяющими его второстепенными разломами (рис. 3). Центрально-Сахалинский раз-

лом имеет взбросо-надвиговую природу, плоскость которого круто падает на запад под углом 60–70°. Эруптивный центр извержения 2011 г. расположен непосредственно в зоне выхода главного сместителя на дневную поверхность. Модельный сферический источник извержения 2011 г. находится к западу от него на расстоянии около 500 м и глубине 700 м, то есть на западном его крыле в непосредственной близости от плоскости главного сместителя.

Горизонтальные смещения земной поверхности, зафиксированные в результате извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана, являются комбинацией смещений вследствие самого извержения и сопутствующего процесса деформирования земной поверхности в зоне Центрально-Сахалинского разлома, произошедшего в период извержения или после него. Сопутствующий процесс можно оценить из разности измеренных (рис. 3) и модельных радиальных горизонтальных векторов смещений (рис. 6). Извержение вулкана сопровождалось значительным смещением западного крыла Центрально-Сахалинского разлома в восточном направлении на 15–33 мм. Такое смещение может быть объяснено только двумя факторами: расположением источника извержения в западном крыле главного сместителя и преобладающим напряжением субширотного сжатия в недрах юга острова, выявленного комплексом различных геофизических и геодезических методов [1, 15, 19].

Объем изверженного на поверхность материала оценен величиной $\sim 1.0 \cdot 10^4 \text{ м}^3$ с водонасыщением около 5–10 %, тогда как свежевыброшенная вулканическая водоглинистая брекчия обычно состоит из двух частей сухой породы на одну часть воды. Модельное изменение объема источника в результате извержения для совместного решения равно $-5.0 \cdot 10^4 \text{ м}^3$. Следовательно, объем газовой смеси (углекислый газ и метан) в источнике извержения на глубине 700 м составлял $\sim 3.5 \cdot 10^4 \text{ м}^3$. По аналогии с [2], этот объем перед извержением находился под геостатическим давлением более 12.6 МПа. Поэтому объем выброшенной на поверхность газовой смеси превышает $4 \cdot 10^6 \text{ м}^3$.

В выполненном моделировании источника извержения грязевого вулкана его радиус r , сброшенное давление ΔP и модуль упругости среды μ неразделимы: различные комбинации этих параметров могут создавать одинаковые деформации земной поверхности. Это не позволяет определить реальный размер сферического источника. Если модуль упругости среды, вмещающей источник, для обводненных и разрушенных глинистых отложений еще можно оценить величиной $1.4 \cdot 10^9 \text{ Па}$ [14, 16], то

неизвестный параметр сброшенного давления может иметь 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 [15]. При этом в процессе фильтрации газа давление в подводящем канале грязевого вулкана может достигать и больших величин. С другой стороны, сброшенное давление в источнике грязевулканического извержения по результатам моделирования может составлять 0.14–0.79 МПа [22].

Исходя из приведенных оценок для сброшенного давления, радиус источника извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана в 2011 г. может составлять 130–370 м. Такие размеры свидетельствуют об адекватном применении модели сферического источника, радиус которого может превышать половину глубины источника и ограничен условием $(r/h)^5 \ll 1$.

Следует отметить, что по изотопно-геохимическим данным глубина формирования грязевулканических флюидов существенно больше, чем вычисленная глубина модельного источника извержения 2011 г. По данным об изотопном составе углерода, метана и углекислого газа температура газогенерации для Южно-Сахалинского грязевого вулкана составляет 320–350 °С [6]. Воды Южно-Сахалинского грязевого вулкана, согласно гидрохимическим геотермометрам, формируются при температуре 60–120 °С [7]. Зная распределение температуры в грязевулканическом канале, температурные оценки можно пересчитать в глубину. Очевидно, что при любых разумных оценках геотермического градиента глубина залегания источников грязевулканических вод и газов будет значительно больше, чем 700 м. Гораздо больше и оценки глубины залегания источника газа и корней Южно-Сахалинского грязевого вулкана, полученные по данным математического моделирования [3]. Вполне возможно, что источник извержения 2011 г. представляет собой близповерхностный промежуточный резервуар, отвечающий только за слабые извержения, где в процессе миграции из нижних горизонтов накапливаются газ, вода и глинистые породы. В любом случае результаты моделирования можно рассматривать как первые сведения об источнике извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана, полученные на основе инструментальных данных.

ВЫВОДЫ

По данным GPS наблюдений выявлены смещения земной поверхности в результате извержения

Южно-Сахалинского грязевого вулкана в 2011 г. Методом инверсии измеренных горизонтальных и вертикальных смещений для однородного упругого полупространства построена модель конечного сферического источника извержения и оценены ее параметры.

Установлено, что источник извержения находился на западном крыле Центрально-Сахалинского разлома на глубине 700 м в непосредственной близости от плоскости главного сместителя. Извержение сопровождалось значительным субширотным сжатием земной поверхности, при этом максимальное смещение в восточном направлении испытало западное крыло Центрально-Сахалинского разлома.

Модельное изменение объема источника извержения составило $-5.0 \cdot 10^4$ м³. На поверхность выброшено $\sim 1.0 \cdot 10^4$ м³ глинистой породы, $\sim 0.5 \cdot 10^4$ м³ воды и более $4 \cdot 10^6$ м³ газовой смеси.

Размер источника извержения, в основном, зависит от величины сброшенного давления, значение которого неизвестно. Исходя из выполненных оценок, радиус сферического источника извержения Южно-Сахалинского грязевого вулкана может составлять 130–370 м. Для имеющегося количества исходных данных построенная модель наиболее приемлема по сравнению с более сложными моделями другой геометрической формы.

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

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ, грант МК-4575.2011.5, Президиума ДВО РАН 13-III-B-08-007 и РФФИ № 12-05-31043_мол_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василенко Н.Ф., Прытков А.С. Моделирование взаимодействия литосферных плит на о. Сахалин по данным GPS наблюдений // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 1. С. 42–48.
2. Горкун В.Н., Сырык И.М. Опыт расчета глубины залегания и объема выбрасываемого газа при извержении грязевых вулканов на Южном Сахалине // Геология и геофизика. 1967. № 2. С. 30–42.
3. Доманский А.В., Ершов В.В., Левин Б.В. Математическая модель неустановившихся течений геофлюидов при грязевулканических процессах // ДАН. 2009. Т. 424, № 1. С. 107–110.
4. Дуничев В.М., Литенко Н.Л. Извержение грязевых вулканов Сахалина в 1994 г. // Материалы XXXII научно-методической конференции преподавателей ЮСГПИ (апрель 1997 г.). Южно-Сахалинск, 1997. Ч. 2. С. 42–44.
5. Ершов В.В., Мельников О.А. О необычном извержении Главного Пугачевского газодолитокластитового («грязевого») вулкана на Сахалине зимой 2005 г. // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26, № 4. С. 69–74.
6. Ершов В.В., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И. Изотопно-геохимические характеристики свободных газов Южно-Сахалинского грязевого вулкана и их связь с региональной сейсмичностью // ДАН. 2011. Т. 440, № 2. С. 256–261.
7. Ершов В.В. Химический состав вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы Всероссийской конференции с участием иностранных ученых. Томск: Изд-во НТЛ, 2012. С. 211–213.
8. Занюков В.В., Мельников О.А., Федорченко В.И. Извержение Южно-Сахалинского грязевого вулкана // Геология и геофизика. 1982. № 2. С. 127–130.
9. Каракин А.В., Каракин С.А. Флюидодинамическая модель грязевого вулканизма внутриконтинентального типа // ДАН. 2000. Т. 374, № 5. С. 684–687.
10. Мельников О.А., Сабиров Р.Н. Новые данные о современном состоянии и былой активности Южно-Сахалинского газодолитокластитового вулкана (о. Сахалин) // Тихоокеан. геология. 1999. Т. 18, № 3. С. 37–46.
11. Мельников О.А., Сергеев К.Ф., Рыбин А.В. и др. О новом активном извержении одного из «грязевых» (газодолитокластитовых) вулканов на Сахалине и природе грязевого вулканизма // ДАН. 2005. Т. 400, № 4. С. 536–541.
12. Мельников О.А., Ершов В.В., Ким Ч.У. и др. О динамике грифонной деятельности газодолитокластитовых (грязевых) вулканов и ее связи с естественной сейсмичностью на примере Южно-Сахалинского вулкана (о. Сахалин) // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 5. С. 25–41.
13. Мельников О.А. О динамике и природе Пугачевской группы газодолитокластитовых («грязевых») вулканов на Сахалине по данным визуальных наблюдений и орографической // Вулканология и сейсмология. 2011. № 6. С. 47–59.
14. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 447 с.
15. Сапрыгин С.М. Тектоника плит и сейсмичность в Дальневосточном регионе. Южно-Сахалинск: Сахалин. кн. изд-во, 2005. 84 с.
16. Теркот Д., Шуберт Д. Геодинамика: Геологические приложения физики сплошных сред. Ч. 2. М.: Мир, 1985. 360 с.
17. Шилов В.Н., Захарова М.А., Ильев А.А. и др. Извержение Южно-Сахалинского грязевого вулкана весной 1959 г. // Тр. СахКНИИ СО АН СССР. Южно-Сахалинск, 1961. Вып. 10. С. 83–99.
18. Agustsdottir Th. On the dynamics of rhyolite dome emplacement: densities and deformation fields // Faculty of Sciences, University of Iceland. 2009. 126 p.
19. Apel E.V., Burgmann R., Steblov G. et al. Independent active microplate tectonics of Northeast Asia from GPS velocities and block modeling // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L11303, DOI: 10.1029/2006GL026077.
20. Beauducel F., Cornet F.H. Collection and three-dimensional modeling of GPS and tilt data at Merapi volcano, Java // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 725–736.
21. Dach R., Hugentobler U., Fridez P. et al. Bernese GPS Software Version 5.0. Astronomical Institute of University of Berne, 2007. 612 p.
22. Fukushima Y., Mori J., Hashimoto M. et al. Subsidence associated with the LUSI mud eruption, East Java, investigated

- by SAR interferometry // Marine and Petrol. Geol. 2009. V. 26. P. 1740–1750.
23. Herring T.A. GLOBK, Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program, Version 10.0. // Mass. Inst. Tech. 2002. 37 p.
24. McTigue D.F. Elastic stress and deformation near a finite spherical magma body; resolution of the point source paradox // J. Geophys. Res. 1987. V. 92, N. B 12. P. 12931–12940.
25. Mogi K. Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them // Bull. Earthquake Res. Inst. 1958. V. 36. P. 99–134.
26. Schmalzle G., Dixon T., Malservisi R. et al. Strain accumulation across the Carrizo segment of the San Andreas Fault, California: Impact of laterally varying crustal properties // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. B05403, DOI:10.1029/2005JB003843.

Рекомендована к печати Б.В. Левиным

A.S. Prytkov, N.F. Vasilenko, V.V. Ershov

Modeling of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano eruption in 2011 by GPS data

Sakhalin Island is a unique region of the Far East of Russia where mud volcanoes exist. The Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano is situated in the south of the island in the zone of the Central-Sakhalin thrust. Horizontal and vertical surface displacements caused by the 2011 eruption were revealed for the first time by GPS data. The model of a finite spherical eruption source in an elastic half-space was constructed using the inversion method of the surface displacements. The location of the eruption source (latitude, longitude, depth) and its possible size were determined. The erupted quantities of clay rock, water and gas were valued.

Key words: mud volcano, eruption, Earth's surface displacements, GPS measurements, modeling, Sakhalin Island.