

УДК 551.21+551.51

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СУММАРНОЙ ИЗВЕРЖЕННОЙ МАССЫ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПЕПЛА И ЕЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ВЫСОТАМ В ЭРУПТИВНОМ ОБЛАКЕ

К.Б. Моисеенко¹, Н.А. Малик²

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, 119017,
Пыжевский пер., 3; e-mail: konst.dvina@mail.ru

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН 683006
Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9

Приведен алгоритм восстановления параметров пепловых выбросов – суммарной массы и ее распределения по высотам – при эксплозивных извержениях. Решение обратной задачи строится на основе метода множественной регрессии, при минимальной априорной информации о характере эксплозивного процесса. В качестве примера, рассмотрено сильное эксплозивное событие на вулкане Безымянный 24.12.2006 г., для которого распределение массы пеплового выброса по высотам, согласно расчетам, частично контролировалось выносом пеплового материала в облаках пирокластических потоков. Данная особенность проявилась в характерном двухмодальном распределении массы выброса с максимумами на высотах средней тропосферы и нижней стратосферы.

Ключевые слова: вулканический пепел; вулкан Безымянный; атмосферный перенос; численное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Существующие методы восстановления суммарной изверженной массы пепловых выбросов (далее СИМ) при эксплозивных извержениях характеризуются значительными неопределенностями итоговых оценок, в том числе вследствие ограниченности данных полевых наблюдений по конкретным эксплозивным событиям (Bonadonna, Houghton, 2005; Pyle, 1989). В связи с этим, большую практическую значимость имеет решение проблемы повышения надежности оценок массовых параметров пепловых выбросов с использованием минимальной априорной информации о динамике эксплозивного процесса и пространственных характеристиках отложений. Основными источниками такой информации являются данные отборов площадных проб пепла в зонах пеплопадов (Гущенко, 1965; Земцов, 1986; Кирьянов, Рожков, 1989), спутниковые наблюдения пепловых колонн и шлейфов (Rubin et al., 2011), а также данные акустического и сейсмического мониторинга (Фирстов, 1988), позволяющие

проводить оценки энергетических параметров извержений.

Использование хорошо разработанного метода изопахит (Fierstein, Nathenson, 1992; Pyle, 1989), основанного на данных отбора площадных проб, позволяет получать наиболее реалистичные оценки СИМ. Возможность использования этого метода, однако, оказывается проблематичной в ситуации, когда полевыми наблюдениями охвачена лишь относительно небольшая часть зоны пеплопада (Bonadonna, Houghton, 2005). Проблема неполноты данных о пространственных характеристиках пепловых отложений для конкретных эксплозивных событий особенно актуальна для горных районов, в том числе на полуострове Камчатка, поскольку осаждение пепловых частиц в условиях сильной пространственной изменчивости полей ветра и турбулентности, свойственной горным районам, ведет к значительной неоднородности гранулометрического состава и массы пепловых отложений. Результаты экстраполяции по методу изопахит оказываются в этом случае сильно чувствительными к количеству используемых изолиний и

ошибкам при подсчетах ограничиваемой ими массы отложений.

Один из методов преодоления указанной проблемы состоит в привлечении результатов прямого численного моделирования атмосферного переноса тefры (Моисеенко, Малик, 2015; Connor, Connor, 2006). При проведении подобных расчетов, однако, в международном вулканологическом сообществе в настоящее время используются сильно упрощенные модели (например, TERPRA2 и HAZMAP) (Bonadonna et al., 2002; Macedonio et al., 2005), не применимые, строго говоря, для районов со сложной орографией и расчетов дальнего переноса пепла (>10–100 км от вулкана).

В данной работе алгоритм восстановления СИМ строится на основе прямого численного моделирования мезомасштабных метеорологических полей в окрестности вулкана (Moiseenko, Malik, 2014), что позволяет решать задачу в наиболее общей постановке, с точки зрения полноты учета факторов, определяющих условия

атмосферного переноса и отложения пеплового материала. Возможности разработанного численного алгоритма рассмотрены на примере сильного взрывного события на вулкане Безымянный 24.12.2006 г. (Малик, 2011), для которого ранее в ходе полевых работ были отобраны площадные пробы пепла в зоне пеплопада (рис. 1). Решение обратной задачи восстановления массовых параметров выброса основано на совместном использовании данных отбора проб пепла и гранулометрии, что заметно повышает статистическую обеспеченность итоговых оценок. Корректный учет атмосферного фактора и аэродинамических свойств пепловых частиц позволяет получить реалистичные оценки параметров пеплового выброса в типичных условиях, когда данные о характере распределения пепловых отложений в дальней зоне (>100 км) отсутствуют, а информация о динамике взрывного процесса сильно ограничена ввиду неблагоприятных условий визуальных наблюдений.

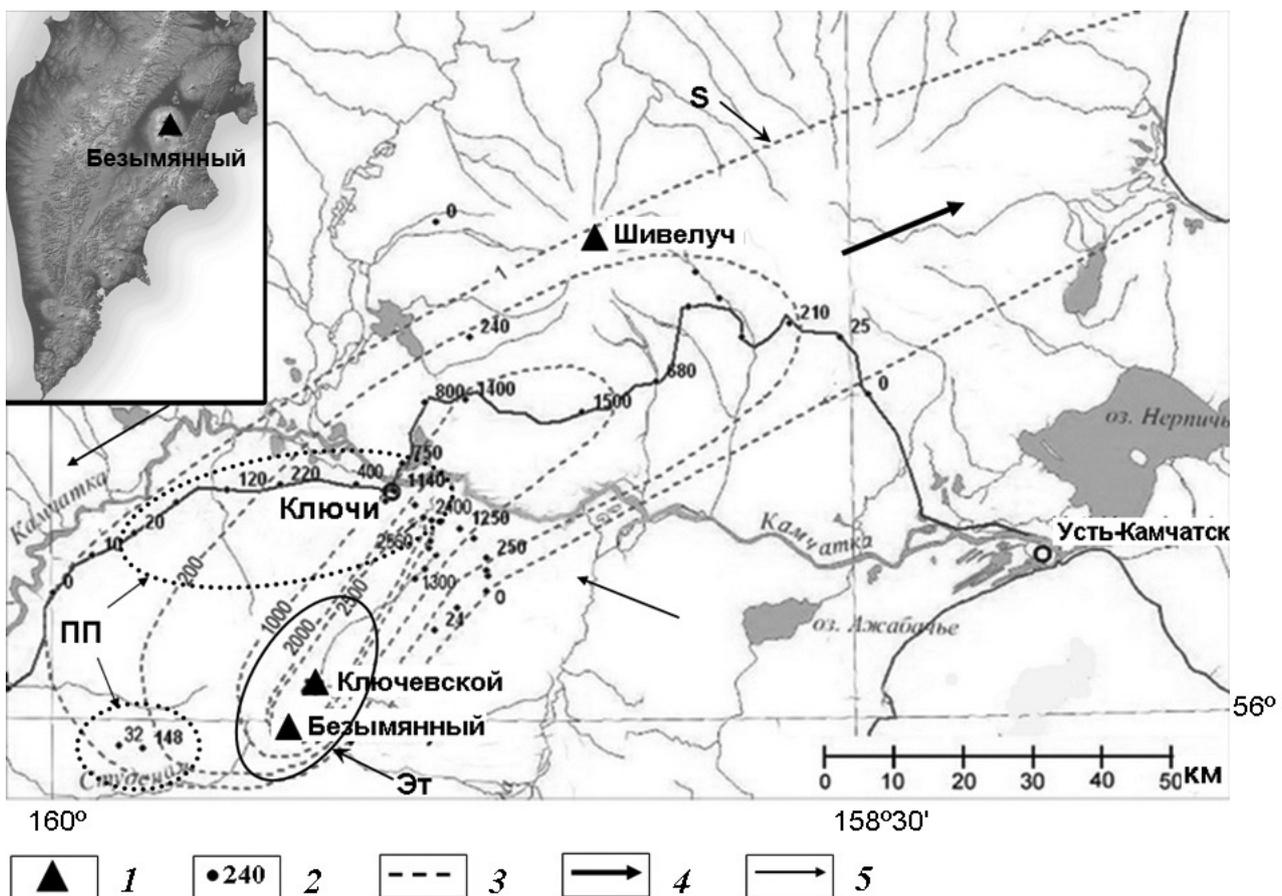


Рис. 1. Поле отложений пепла для взрывного события на вулкане Безымянный 24.12.2006 09:20–10:10 UTC: 1 – действующие вулканы; 2 – точки отбора и массы проб, г/м²; 3 – изолинии массы пепла, г/м², использованные при подсчете СИМ по методу изопахит (Fierstein and Nathenson, 1992); 4, 5 – направленные ветра вблизи тропопавзы и на высотах < 1.5 км, соответственно. Эт – схематичное положение границы эруптивной тучи, сформировавшейся в верхней части эруптивной колонны через 70 мин. после начала извержения (снимок TERRA MODIS ch20b 10:30 UTC); ПП – зона отложений пепловых выбросов с высот менее 6 км (модельные расчеты), S – граница зоны пепловых отложений по спутниковым данным NOAA (Малик, 2011).

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксплозивное событие 24.12.2006 г. 09:20–10:10 UTC (24 декабря 21:17–22:10 местного времени) явилось кульминационной фазой извержения на вулкане Безымянный в декабре 2006 г. Геологический эффект извержения выразился в отложениях пепла эруптивной тучи (высота подъема ~ 13 км н.у.м., суммарная масса отложенной тефры $TS_{DEP} > 4.04 \cdot 10^9$ кг), формировании в ЮВ секторе отложений пирокластических потоков (ПП) длиной 6.5 км и общей площадью ~ 2.04 км², сошедших, предположительно, сразу же за кульминационным взрывом, и излиянии короткого, 625×200 м, лавового потока на ЮВ склон купола (Carter et al., 2008). Объем отложений ПП составил ~ 0.006–0.009 км³ в предположении, что их средняя мощность, по аналогии с потоками предыдущих извержений, составляет 3–4 м (Малик, 2011). Полагая плотность сложения породы для заполнителя ПП (частицы < 2 мм) равной 1200–1330 (среднее 1260) кг/м³ (Гирина, 1990), получим массу отложений ПП – $TS_{PF} = 7.6–11.3 \cdot 10^9$ кг.

Согласно результатам (Bonadonna et al., 2002) при извержении 1995–1999 г. на вулкане Суфриер не менее 4–16 % от общей массы ПП было вынесено в виде пеплов в восходящих конвективных течениях, формирующихся над телом ПП в результате вовлечения окружающего

воздуха в нагретую пирокластическую массу. Данная оценка для «коэффициента выноса» K_{el} (от «elutriation») является интегральной для всех типов ПП, имевших место в ходе извержения и связанных как с обрушениями купола вулкана, так и с собственно эксплозивной деятельностью. Если предположить, на основании близости состава пород и типа извержения, что приведенный диапазон K_{el} в какой-то мере справедлив и для ПП на Безымянном, то будем иметь суммарную массу пепловых частиц, вынесенных облаками пирокластических потоков, – $TS_{ASH,PF} = K_{el} \cdot TSPF = 0.3–1.8 \cdot 10^9$ кг, что составляет 7.4–44.5 вес.% от общей оцененной массы TS_{DEP} . Хотя верхняя граница приведенного диапазона и представляется сильно завышенной, полученная оценка, наряду с приведенными далее результатами расчетов, позволяет предполагать заметный вклад пеплов облаков ПП в СИМ в ходе данного эксплозивного события.

МОДЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС RAMS/VOL-НУРАСТ

Моделирование процессов атмосферного переноса/осаждения тефры осуществляется на основе единого расчетного комплекса RAMS/VOL-НУРАСТ (рис. 2), объединяющего программные коды RAMS6.0, VOL-НУРАСТ и регрессионной модели источника пеплового выброса, реализованные в среде Fortran90.

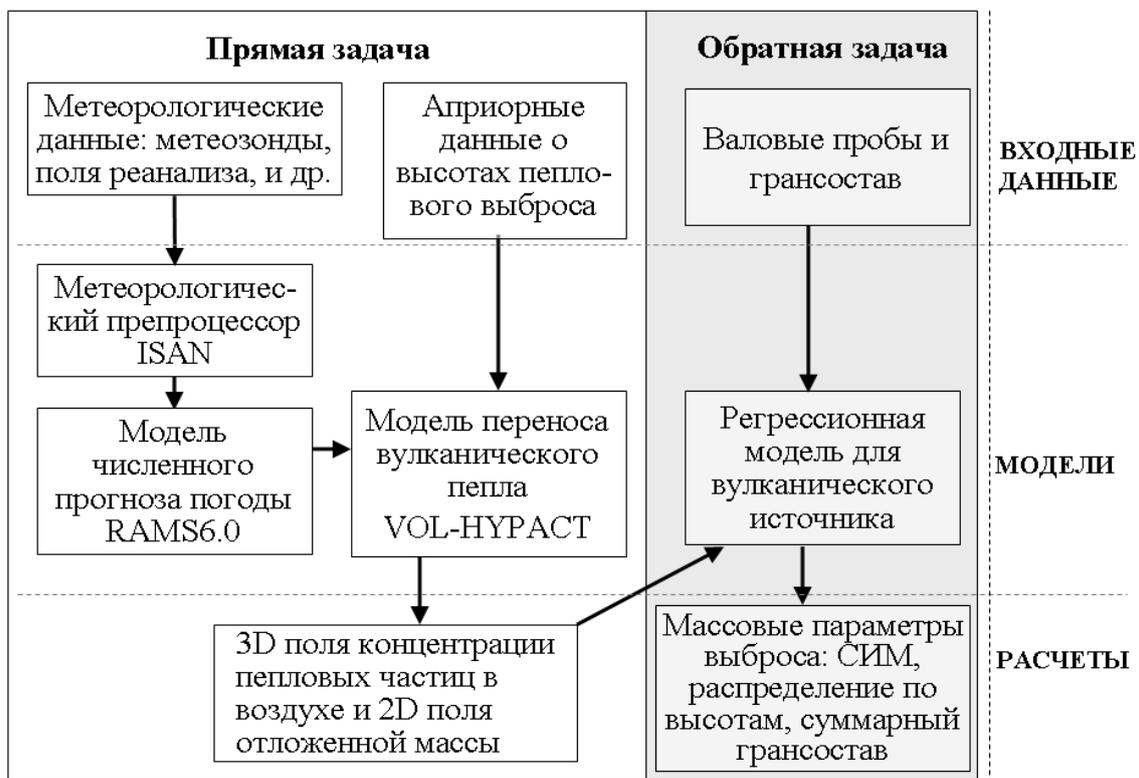


Рис. 2. Блок-схема расчетного комплекса RAMS/VOL-НУРАСТ.

Численная гидродинамическая модель прогноза погоды на ограниченной территории RAMS6.0 (Regional Atmospheric Modeling System, www.atmet.com) (Pielke et al., 1992) представляет программный комплекс, разработанный коллективами ученых из Государственного университета Колорадо и Национального Центра Атмосферных Исследований (США) и широко используемый международным научным сообществом для моделирования мезомасштабных атмосферных процессов (2-2000 км) (см. ссылки на веб-сайте поддержки модели).

Модель переноса VOL-НУРАСТ представляет модифицированный вариант исходной гибридной модели атмосферного переноса НУРАСТ (НУybrid Particle Concentration Transport Model) (Walko, Tremback, 1995), входящей в состав расчетного комплекса RAMS/НУРАСТ и адаптированной для расчетов переноса/осаждения популяций пепловых частиц в рамках стохастической лагранжевой модели атмосферной турбулентности (Mellor, Yamada, 1982; Moiseenko, Malik, 2014). Использование данного подхода к описанию атмосферного переноса позволяет корректно моделировать эволюцию пеплового выброса в широком диапазоне масштабов, характеризующих явление – от первоначального эруптивного шлейфа, распространяющегося как единое целое, до его отдельных фрагментов, образующихся при сдвиговой деформации в трехмерном поле ветра. Установившаяся скорость гравитационного осаждения частиц рассчитывалась согласно работе (Wilson, Huang, 1979).

Расчетный комплекс RAMS/VOL-НУРАСТ, позволяет решать широкий класс прямых и обратных задач в области атмосферного переноса вулканического пепла в приложении к проблемам вулканологии, качества воздуха, регионального климата и прогнозирования пепловых облаков для нужд авиации. Модельный комплекс RAMS/НУРАСТ использовался ранее в работе (Turner, Hurst, 2001) для моделирования распространения пепловых облаков при извержении новозеландского вулкана Руапеху, а его модифицированный вариант RAMS/VOL-НУРАСТ – при реконструкции зон пеплопадов для вулканов Безымянный (Moiseenko, Malik, 2014) и Кизимен (Моисеенко, Малик, 2015).

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЫБРОСА

Применительно к вулканическим извержениям, под модельным источником пеплового выброса для конкретного эксплозивного события здесь и далее понимается область простран-

ства Ω в непосредственной близости от вулкана, в пределах которой распределение пепловых частиц по высотам выброса формируется всей совокупностью процессов тепло- и массопереноса, вторичной фрагментации твердых продуктов извержения и фазовых превращений в пределах эруптивной колонны (при сильном извержении и/или слабом ветре) или струи (в случае сильного ветрового сноса). Учитывая сложный характер эксплозивной деятельности на вулкане, восстановленные параметры модельного источника выброса характеризуют, таким образом, суммарный эффект от выноса пепловых частиц в эруптивной колонне и облаках ПП. Очевидно, что конкретные особенности распределения массы выброса в таком источнике играют важную роль в дальнейшей эволюции пеплового облака в синоптическом поле ветра.

Обозначим через $\mathbf{y}_{obs} = \{y_{obs}(\mathbf{r}_i), i = 1, \dots, M_1\}$ ($M_1 \times 1$)-вектор измеренных отложенных масс в точках отбора проб с координатами \mathbf{r}_i ($M_1=40$), а через $\mathbf{y}_{obs,k} - (M_2 \times 1)$ -векторы измеренных масс частиц из размерных классов ситового гранулометрического анализа Φ_k ($M_2=16, k=-1, \dots, 4$) (частицы размером $2^{-k}-2^{-k+1}$ мм) и фракции $\Phi < 63$ мкм (частицы < 0.063 мм), для обозначения которой далее будем использовать нижний индекс $k=5$.

В рамках Лагранжева подхода к описанию атмосферного переноса (Монин, Яглом, 1965) имеет место следующее соотношение:

$$y_k(\mathbf{r}) = \int_{\mathbf{r}' \in \Omega} \int_{m_1}^{m_2} t(z) \vartheta_k(m_p) G(\mathbf{r}' \rightarrow \mathbf{r}; v_t, \mathbf{u}, \mathbf{u}', \Omega) dm_p d^3 \mathbf{r}', \quad (1a)$$

$$\equiv F_k(t; \vartheta_k, G(\mathbf{r})), \quad k = k_1, \dots, k_2, \quad (1b)$$

где $k_1=-1, k_2=5, y_k$ [г/м²] – масса частиц из фракции k в точке \mathbf{r}, t – плотность совместного распределения СИМ по высотам выброса для частиц в свободной (F) и агрегированной (A) популяциях, G – вероятность перехода частицы массой m_p из любой точки \mathbf{r}' на высоте z в пределах заданного объемного источника Ω в точку \mathbf{r}_i на поверхности земли, v_t – скорость осаждения частицы, $\vartheta(m_p)$ – плотность распределения СИМ по массам отдельных частиц, $[m_1, m_2]$ – диапазон масс частиц из данной фракции. Выражения $(\cdot; v_t, \mathbf{u}, \mathbf{u}', \Omega)$ и $(\cdot; \vartheta, G)$ используются для указания параметрической зависимости функционалов F и G от v_t , спектра масс (\mathcal{G}), полей ветра и турбулентности $(\mathbf{u}, \mathbf{u}')$ и конфигурации источника.

В рамках численного алгоритма восстановления, распределение t и функционал F заменяются соответствующими дискретными аналогами

$$\mathbf{x} = \{x_j, j = 1, \dots, N\},$$

$$\mathbf{f}_k(\mathbf{x}, \vartheta_k) = \{f_{k,i}(t; \vartheta_k, G_{clc}(\mathbf{r}_i)), i = 1, \dots, M\},$$

получаемыми усреднением правой части (1a) по

интервалам высот $[(j - \frac{1}{2})\Delta z, (j + \frac{1}{2})\Delta z]$, $\Delta z = 1$ км, и отдельным фракциям, где G_{clc} – рассчитанные по модели VOL-НУРАСТ функции Грина соответствующей краевой задачи. Определение параметров выброса сводится, таким образом, к нахождению x и ϑ_k из систем уравнений

$$y_{obs,k} = f_k(x; \vartheta_k), \quad k = k_1, \dots, k_2, \quad (2)$$

$$y_{obs} = y_{obs,k_1} + y_{obs,k_1+1} + \dots + y_{obs,k_2}, \quad (3)$$

Приближенное решение (2–3) можно получить, исходя из предположения о подобии спектров скоростей осаждения частиц в F- и A-популяциях на всех высотах выброса, что соответствует условиям равномерного перемешивания газовой взвеси в эруптивной струе (Моисеенко, Малик, 2015). Алгоритм восстановления x , ϑ_k строится в этом случае в рамках двухшагового итерационного метода:

шаг 1: $y_{obs,k}(r_i) = f_k(x^{(n)}; \vartheta_k^*)_2, \quad k = k_1, \dots, k_2, \quad (4)$

шаг 2:
 $y_{obs}(r_i) = f(x^{(n+1)}; \vartheta^*), \quad f = \sum_{k=k_1}^{k_2} f_k, \quad \vartheta^{(n+1)} = \vartheta^*. \quad (5)$

На шаге 1 решение для ϑ_k строится на основе регрессионной модели (Moiseenko, Malik, 2014), позволяющей восстановить спектр масс $\vartheta^*(m_p)$ в отдельных размерных классах, и для пепловой фракции в целом, с учетом преобладающих морфологических типов частиц. Далее на шаге 2 решается уравнение (5), представляющее дискретный аналог интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода для t , по методу, сходному с описанным в (Моисеенко, Малик, 2015). Основные отличия в численных алгоритмах связаны с использованными методами регуля-

ризации. В цитированной выше работе решение ищется в рамках оптимизационной задачи:

$$x = \arg \min_x \left\{ M^{-1} \sum_{i=1}^M (y_{obs}(r_i) - y_{clc}(r_i))^2 + \tau \cdot \|L_2 \cdot x\| \right\} \quad (6)$$

где τ – параметр регуляризации, L_2 – оператор второй производной по z . В данной работе алгоритм решения (5) строится на основе метода усеченного сингулярного разложения (TSVD) (Hansen, 1989) без использования каких бы то ни было дополнительных предположений о характере зависимости $t(z)$ и гладкости решения. Как будет показано ниже, метод TSVD приводит к реалистичным оценкам распределения массы выброса, в том числе в отдельных диапазонах высот (величины СИМ, получаемые по обоим методам, близки друг к другу), что может оказаться полезным при разделении величин вкладов тефры эруптивной колонны и пеплов облаков ПП в СИМ и формируемое поле пространственных отложений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно модельным расчетам, СИМ данного извержения составляет $4.3 \pm 0.5 \cdot 10^9$ кг, что хорошо согласуется с величиной TS_{DEP} , учитывая преобладающий вклад пепловых фракций в суммарную отложенную массу тефры на расстояниях от вулкана, превышающих размеры эруптивной тучи (>15–20 км). Восстановленное распределение массы выброса по высотам $x(z)$ и сравнение рассчитанных $y_{clc}(r_i)$ и измеренных $y_{obs}(r_i)$ масс пепловых отложений в точках отбора проб при оптимальных параметрах выброса представлены на рис. 3 и 4, соответственно.

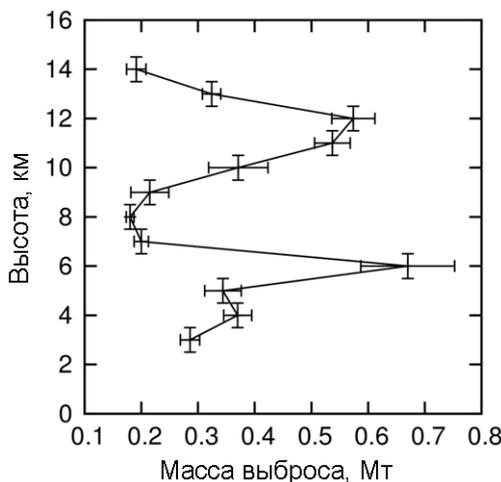


Рис. 3. Восстановленное распределение массы пеплового выброса по высотам в эруптивном облаке при извержении на вулкане Безымянный 24.12.2006. Вертикальные линии – интервалы высот выброса (шаг 1 км) для модельного источника Ω , горизонтальные линии – стандартные отклонения для восстановленных величин x_j .

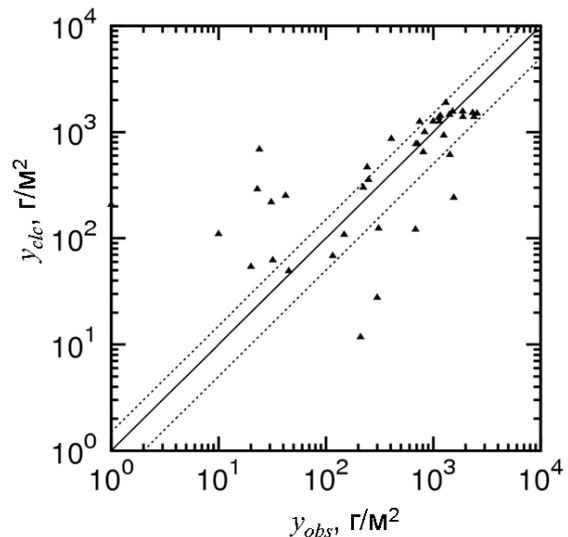


Рис. 4. Сравнение измеренной ('obs') и рассчитанной ('clc') массы отложений (частицы < 2000 мкм). Пунктирные линии соответствуют 95% доверительному интервалу для величины суммарной массы выброса.

Основная масса выброса, $2.8 \cdot 10^9$ кг, приходится на диапазон высот 7-14 км, соответствующий верхней части эруптивной колонны вблизи и выше уровня нейтральной плавучести (~ 9 км), в которой свободновосходящая конвективная струя трансформируется в гравитационное плотностное течение и далее в подветренный шлейф. Необходимо, однако, отметить, что существенная доля выброса, $1.5 \cdot 10^9$ кг, приходится высоты 2.5-6.5 км н.у.м., что значительно ниже уровня нейтральной плавучести (9.5 км н.у.м.), что отчасти можно объяснить выносом некоторой доли пеплового материала из краевых частей эруптивной колонны в сносящий ветровой поток, а также эксплозиями умеренной силы, имевшими место в пред-кульминационной фазе извержения. По нашему мнению, однако, основным источником выброса на этих высотах являются облака ПП. В пользу данного предположения свидетельствует повышенное содержание фракции $\Phi \leq 63$ (57.7-59.9 вес. %) в пробах, для которых абсолютно преобладает вклад переноса из модельных источников на высотах ниже 6 км (рис. 1, точки в областях отмеченных как ПП), по сравнению с пробами, отобранными на тех же расстояниях, но с преобладающим вкладом выбросов с больших высот (~ 51 -53 вес.%). Приведенная выше оценка максимальной высоты выноса в облаках ПП хорошо согласуется с результатами наблюдений на этом вулкане (Гирина, 1998), позволившими установить эмпирическую зависимость между высотой подъема облаков ПП от поверхности земли и шириной фронта ПП, $H_{\text{ПП}} \cong 8 \div 10 h_{\Phi}$. В рассматриваемом событии $h_{\Phi} \approx 425$ м, откуда следует $H_{\text{ПП}} \approx 4$ км над поверхностью, или 5.5-6 км по абсолютной высоте, что соответствует модельному прогнозу. Высокая вероятность такого сценария следует и из общей структуры поля ветра в окрестности вулкана. В соответствии с рис. 1, ветры на нижних уровнях дули примерно поперек главной оси пеплопада, что и обусловило снос частиц, выброшенных на высотах менее 6 км, в СЗ и З направлениях от вулкана. В пользу данного предположения выступает и хорошее согласование между приведенной в разделе «Результаты полевых исследований» оценкой суммарного выноса в облаках ПП, 0.3 - $1.8 \cdot 10^9$ кг, и величиной $1.5 \cdot 10^9$ кг, восстановленной по регрессионной модели.

Предсказываемый моделью вынос пеплов облаков ПП позволяет объяснить установленное ранее наличие в пеплах извержения вулкана Безымянный значительной доли пылеватой фракции, при отсутствии выраженной зависимости ее от расстояния (Малик, 2011).

Большая часть предсказанных по модели значений масс в пунктах отбора проб (28 из 40) укладывается в диапазон неопределенности,

задаваемый двумя стандартными отклонениями для восстановленной величины СИМ, при этом наилучшее согласование между расчетами и измерениями наблюдается для проб, отобранных вблизи оси пеплопада ($y_{\text{obs}} > 200$ -500 г/м²) (рис. 4). Наибольшие расхождения в оценках масс имеют место в краевых зонах пеплопада ($y_{\text{obs}} < 100$ -200 г/м²), где измерения масс пепла, по видимому, наименее репрезентативны ввиду возрастания роли случайного фактора, связанного с переносом пепловых частиц мелкомасштабными атмосферными вихрями, генерируемыми локальными топографическими неоднородностями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хорошее согласование между рассчитанными и измеренными величинами отложенной массы в основной зоне пеплопада, а также оценками СИМ, полученными на основе совершенно различных подходов – методом множественной регрессии и по методу изопакит – свидетельствует о корректности основных физических допущений и упрощений, использованных нами при разработке описанного выше алгоритма восстановления массовых параметров выброса. Отметим, что характерное двухмодальное распределение массы пеплового выброса по высотам, с выраженными максимумами в нижней тропосфере и в области тропопаузы, было получено нами и для ряда других эксплозивных событий на вулканах Безымянный и Кизимен, сопровождавшихся сходом мощных ПП, что указывает на достаточно общий характер представленных в данной работе результатов. Получаемые на основе регрессионной модели количественные оценки параметров выброса могут быть использованы при анализе и интерпретации данных отбора проб, а также для разработки типовых сценариев пепловых выбросов в моделях оперативного прогноза пепловых облаков и шлейфов.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 14-35-50453 и ДВО № 14-III-B-08-195. Авторы выражают благодарность сотрудникам Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН: О.А. Гирной, за полезную информацию об особенностях извержений вулкана Безымянного, а также Ю.В. Демянчуку, Т.М. Маневич, Я.Д. Муравьеву, А.А. Овсянникову, А.В. Сокоренко, С.В. Ушакову за участие в сборе фактического материала в процессе полевых работ.

Список литературы

- Гирина О.А. Пирокластические отложения извержения вулкана Безымянный в октябре 1984 г. // Вулканология и сейсмология. 1990. № 3. С. 82-91.

- Гурина О.А.* Пирокластические отложения современных извержений андезито-вых вулканов Камчатки и их инженерно-геологические особенности. Владивосток: Дальнаука, 1998. 174 с.
- Гущенко И.И.* Пеплы Северной Камчатки. М.: Наука, 1965. 144 с.
- Земцов А.Н.* Исследования твердой фазы эруптивного вулканического облака. Дисс. канд. геол.-мин. наук. Петропавловск-Камчатский. 1986. 267 с.
- Кирьянов В.Ю., Рожков Г.Ф.* Гранулометрический состав тefры крупнейших извержений вулканов Камчатки в голоцене // Вулканология и сейсмология. 1989. № 3. С. 16-29.
- Малик Н.А.* Извержение вулкана Безымянный 24 декабря 2006 г., Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2011. № 4. С. 50-59.
- Моисеенко К.Б., Малик Н.А.* К вопросу об оценках суммарных выбросов вулканического пепла с использованием моделей атмосферного переноса // Вулканология и сейсмология. 2015. № 1. С. 35-55.
- Монин А.С., Яглом А.М.* Статическая гидромеханика (Ч. 1). М.: Наука, 1965. 640 с.
- Фирстов П.П.* Особенности акустических и сейсмических волн, сопровождавших извержение вулкана Безымянный в 1983-1985 гг. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 81-97.
- Hansen P.C.* Regularization, GSVD and truncated GSVD // BIT Numerical Mathematics. 1989. V. 29. № 3 P. 491-504.
- Bonadonna C., Houghton B.F.* Total grain size distribution and volume of tephra-fall deposits // Bulletin of Volcanology. 2005. V. 67. № 5. P. 441-456.
- Bonadonna C., Macedonio G., Sparks R.S.J.* Numerical modelling of tephra fallout associated with dome collapses and Vulcanian explosions: application to hazard assessment on Montserrat. The eruption of Soufrière Hills Volcano, Montserrat, from 1995 to 1999. Eds. Druitt T.H., Kokelaar B.P., Geological Society, London, Memoir. 2002. P. 517-537.
- Carter A.J., Girina O.A., Ramsey M.S., Demyanchuk Yu.V.* ASTER and field observations of the 24 December 2006 eruption of Bezymianny Volcano, Russia // Remote Sens. Environ. 2008. V. 112. № 5. P. 2569-2577.
- Connor L.J., Connor C.B.* Inversion is the key to dispersion: understanding eruption dynamics by inverting tephra fallout // Statistics in Volcanology / Edit. Mader, H.M., Cole, S.G., Connor, C.B., Connor, L.J., Special Publications of IAVCEI. Geological Society, London, 2006. P. 231-242.
- Fierstein J., Nathenson M.* Another look at the calculation of fallout tephra volumes // Bulletin of Volcanology. 1992. V. 54. № 2. P. 156-167.
- Macedonio G., Costa A., Longo A.* A computer model for volcanic ash fallout and assessment of subsequent hazard // Computers & Geosciences. 2005. V. 31. № 7. P. 837-845.
- Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. And Space Phys. 1982. V. 20. № 4. P. 851-875.
- Moiseenko K.B., Malik N.A.* Estimates of total ash content from 2006 and 2009 explosion events at Bezymianny volcano with use of a regional atmospheric modeling system // J. of Volcanology and Geothermal Research. 2014. V. 270. № 53. P. 53-75.
- Pielke R.A., Cotton W.R., Tremback C.J., et al.* A comprehensive meteorological modeling system – RAMS // Meteorology and Atmospheric Physics. 1992. V. 49. №1-4. P. 69-91.
- Pyle D.M.* The thickness, volume and grain size of tephra fall deposits // Bulletin of Volcanology. 1989. V. 51. № 1. P. 1-15.
- Rybin A.V., Chibisova M.V., Webley P., et al.* Satellite and ground observations of the June 2009 eruption of Sarychev Peak Volcano, Matua Island, central Kuriles // Bulletin of Volcanology. 2011. V. 73. № 9. P. 1377-1392.
- Turner R., Hurst T.* Factors influencing volcanic ash dispersal from the 1995 and 1996 eruptions of Mount Ruapehu, New Zealand // Journal of Applied Meteorology 2001. V. 40. № 1. P. 56-69.
- Walko R.L., Tremback C.J.* HYPACT; the Hybrid Particle and Concentration Transport model. User's Guide. Mission Research Corporation, Ft Collins, CO. 1995. 21 p.
- Wilson L., Huang T.* The influence of shape on the atmospheric settling velocity of volcanic ash particles // Earth Planet. Sci. Lett. 1979. V. 44. № 2. P. 311-324.

МОЙСЕЕНКО, МАЛИК

NUMERICAL INVERSION OF TOTAL ERUPTED MASS OF VOLCANIC ASH PARTICLES AND ITS HEIGHT DISTRIBUTION WITHIN ERUPTION CLOUD

K.B. Moiseenko, N.A. Malik

*Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow;
Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky;*

The article provides an algorithm for recovery of parameters of ash emissions (total volume and its height distribution) during explosive eruptions. The solution for the corresponding inverse task uses a multiple regression approach with minimal a priori information on the eruption dynamics. As an example, we consider a strong explosive event at Bezymianny Volcano, Kamchatka, on 24.12.2006. The estimations showed that the mass distribution for ash emission with heights was partially controlled by the emission of ash material inside the clouds from pyroclastic flows. This peculiarity was revealed as a bimodal distribution of the emission mass with maximums at the mid tropospheric and low stratospheric heights.

Keywords: volcanic ash, Bezymianny Volcano, atmospheric transportation, numerical modeling.