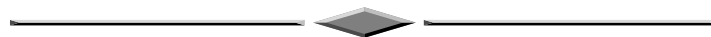


ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ



УДК 551.511.61

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ

Татьяна Владимировна Ярославцева

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: TianaVY@yandex.ru

Владимир Федотович Рапута

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

Предложена модель оценивания размеров частиц пепла на различных удалениях от источника вулканического извержения. На данных натурных исследований отложений тефры в окрестностях вулкана Чикурачки (о. Парамушир, Курильские острова) проведено численное восстановление полей характерных размеров выпавших из атмосферы частиц.

Ключевые слова: вулканическое извержение, вулканический пепел, рассеивание теплового материала, тефра.

MODELLING OF VOLCANIC ERUPTION PRODUCTS

Tatiana V. Jaroslavtseva

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, Ph. D, Junior scientific researcher, tel. (383)330-61-51, e-mail: TianaVY@yandex.ru

Vladimir F. Raputa

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, Dr., senior researcher, tel. (383)330-61-51, e-mail: raputa@sscc.ru

A model estimating the size of the particles of ash at different distances from the source of the volcanic eruption. In these field studies of tephra deposits in the vicinity of the volcano Chikurachki (Paramushir, Kuril Islands), a numerical reconstruction of fields of characteristic size of particles precipitated from the atmosphere.

Key words: volcanic eruption, volcanic ash, volcanic ash spreading, tephra.

Введение

Дифференциация выбрасываемого во время вулканических извержений материала существенно зависит от интенсивности этих извержений и определяется протекающими взрывными процессами. При сильных вулканических взрывах происходит внезапный выброс газов либо интенсивное истечение газовой струи, что обеспечивает растрескивание и измельчение вытекающих пород. Пирокластический материал, подвергаясь воздействию ветров, разносится на сотни и тысячи километров от вулкана. Мощности пепловых накоплений на расстояниях десятков километров могут достигать дециметров и метров [1].

Поведение частиц различного размера в воздушной среде далеко не одинаково, что приводит к дифференциации пирокластического материала в процессе эксплозивных вулканических извержений. Установленные закономерности его выпадений могут быть использованы для рациональной классификации обломков. В частности, баллистические исследования позволяют установить путь движения крупных обломков пород, вероятную начальную скорость движения и т. д., что важно для правильного понимания и анализа проблемы рассеивания обломочного материала вокруг вулкана. Для описания процессов распространения и выпадения пеплового материала следует привлекать модели, учитывающие высоты туч, направление и скорость господствующего ветра, данные наблюдений о рассеивании частиц [1, 2].

1. Результаты экспериментальных исследований отложений пепла в окрестностях вулкана Чикурачки (о. Парамушир, Курильские острова)

Вулкан Чикурачки (1 816 м) – третий по высоте вулкан Курильских островов и самая высокая точка о. Парамушир. Чикурачки является одним из наиболее активных вулканов Курильской дуги. Мощные плинианские извержения за исторический период происходили дважды – в 1853 и 1986 г. Максимальная абсолютная высота эруптивной колонны по спутниковым данным и наблюдениям пилотов самолетов достигала 10,5–11 км (SEAN, 1986). Спутниковые изображения показывают для этого периода извержения распространение пеплового шлейфа на расстояние до 400 км от вулкана [2].

Для получения количественных данных о динамике плинианских стадий извержений 1853 и 1986 г. были изучены их пирокластические отложения. Пирокластика плинианских стадий извержений 1853 и 1986 г. представлена преимущественно тефрой, которая, благодаря широкому распространению и большой толщине, хорошо сохранилась в разрезах почвенно-пирокластического чехла. Отложения тефры извержений 1853 и 1986 г. очень похожи. Результаты измерений размеров частиц тефры в зонах выпадений приведены на рис. 1. Гistogramмы гранулометрического состава одномодальны. Отложения хорошо сортированы. Средний размер частиц тефры и суммарная мощность слоя уменьшаются с удалением от вулкана. Тефра 1853 г. несколько грубее и лучше сортирована, чем тефра 1986 г. [2].

Изопахиты и изоплеты тефры каждого извержения образуют сильно вытянутые эллипсы: 1853 г. на СВ и 1986 г. на ЮВ (см. рис. 1). Это свидетельст-

вует о том, что во время плиннианских стадий обоих извержений ветер был сильным и его направление существенно не менялось. Последнее косвенно указывает также на то, что плиннианские стадии были непродолжительными (условно менее суток).

2. Модель оценивания размеров частиц тefры

Результаты проведенных экспедиционных исследований показали, что выпадение пепла в исследуемых зонах о. Парамушир, в основном, произошли в составе крупных фракций частиц, обладающих весьма значительными скоростями оседания в атмосфере. Данное обстоятельство дает возможность ограничиться при построении модели реконструкции полей выпадений кинематической схемой оседания частиц пепла в направлении оси x , совпадающей с горизонтальным направлением ветра. В этом случае справедливо следующее соотношение:

$$\frac{H}{w} = \frac{x}{U} . \quad (1)$$

Здесь H – эффективная высота подъема факела; w – скорость оседания в атмосфере определенной фракции частиц; x – расстояние от вулкана, на котором происходит выпадение рассматриваемой фракции на подстилающую поверхность; U – средняя скорость ветра в слое оседания.

Турбулентную диффузию частиц в поперечном к ветру направлении опишем следующим выражением [3, 4]:

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma(x)} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2(x)}} , \quad (2)$$

где $\sigma^2(x)$ – горизонтальная дисперсия частиц, характеризующая ширину облака частиц в перпендикулярном среднему ветру направлении.

Для непрерывно действующего источника в случае легкой примеси интерполяция $\sigma^2(x)$ имеет вид [4]

$$\sigma^2(x) = \frac{\overline{v^2} \cdot (x/U)^2}{1 + x/2UT_L} . \quad (3)$$

Здесь v – пульсация скорости ветра в поперечном к оси x направлении, T_L – лагранжев временной масштаб.

Из соотношения (3) вытекает, что при относительно небольших x , $\sigma^2(x) \sim x^2$. Для больших же удалений от источника $\sigma^2(x) \sim x$. При оседании облака тяжелых частиц горизонтальная дисперсия σ^2 зависит не только от расстояния до источника, но и от скоростей оседания этих частиц в атмосфере. В частности, для относительно больших x справедливо соотношение [4, 5]

$$\sigma^2 \rightarrow k x^{2\omega}, \quad (4)$$

где k – некоторый коэффициент пропорциональности, $\omega \geq 0,5$.

С использованием соотношения (1) и формулы Стокса $w = c d^2$ для скоростей оседания частиц в атмосфере [3] для диаметров d частиц пепла имеют место соотношения

$$d = \sqrt{\frac{w}{c}} = \sqrt{\frac{H U}{c x}}. \quad (5)$$

Тогда с учетом (1)–(5) размер частиц со скоростью оседания w , выпавших в точке (x, y) , можно описать с помощью соотношения

$$P(x, y, \vec{\theta}) = \theta_1 x^{\theta_2} \exp\left(-\frac{\theta_3 y^2}{x^{2\omega}}\right), \quad (6)$$

где $\theta_1 = \sqrt{\frac{k H U}{2 \pi c}}$; $\theta_2 = -\omega - 0,5$; $\theta_3 = \frac{1}{2k}$.

Оценка неизвестного вектора параметров $\vec{\theta}$ проводится с использованием метода наименьших квадратов [6]. Минимизируется следующий функционал:

$$J(\vec{\theta}) = \sum_{j=1}^M \left[D_j - P(x_j, y_j, \vec{\theta}) \right]^2 \rightarrow \min_{\vec{\theta} \in \Omega}. \quad (7)$$

Здесь D_j – наиболее характерный измеренный размер частиц, выпавших в точке (x_j, y_j) ; Ω – область допустимых значений вектора $\vec{\theta}$.

Замечание. Используя свойства функции $P(x, y, \vec{\theta})$, поиск минимума функционала (7) удобнее проводить в два этапа. Сначала по данным измерений размеров частиц по оси следа (т. е. при $y = 0$) определить параметры θ_1, θ_2 , а затем уже выполнить оценивание параметра θ_3 по точкам наблюдений, расположенных на периферии следа.

3. Численное восстановление зон выпадений частиц тефры одинакового размера от извержений вулкана Чукурачки 1853 и 1986 г.

На основе имеющихся данных наблюдений и модели (6) по ограниченному числу опорных точек была проведена реконструкция следа выпадений, представленная на рис. 1, 2.

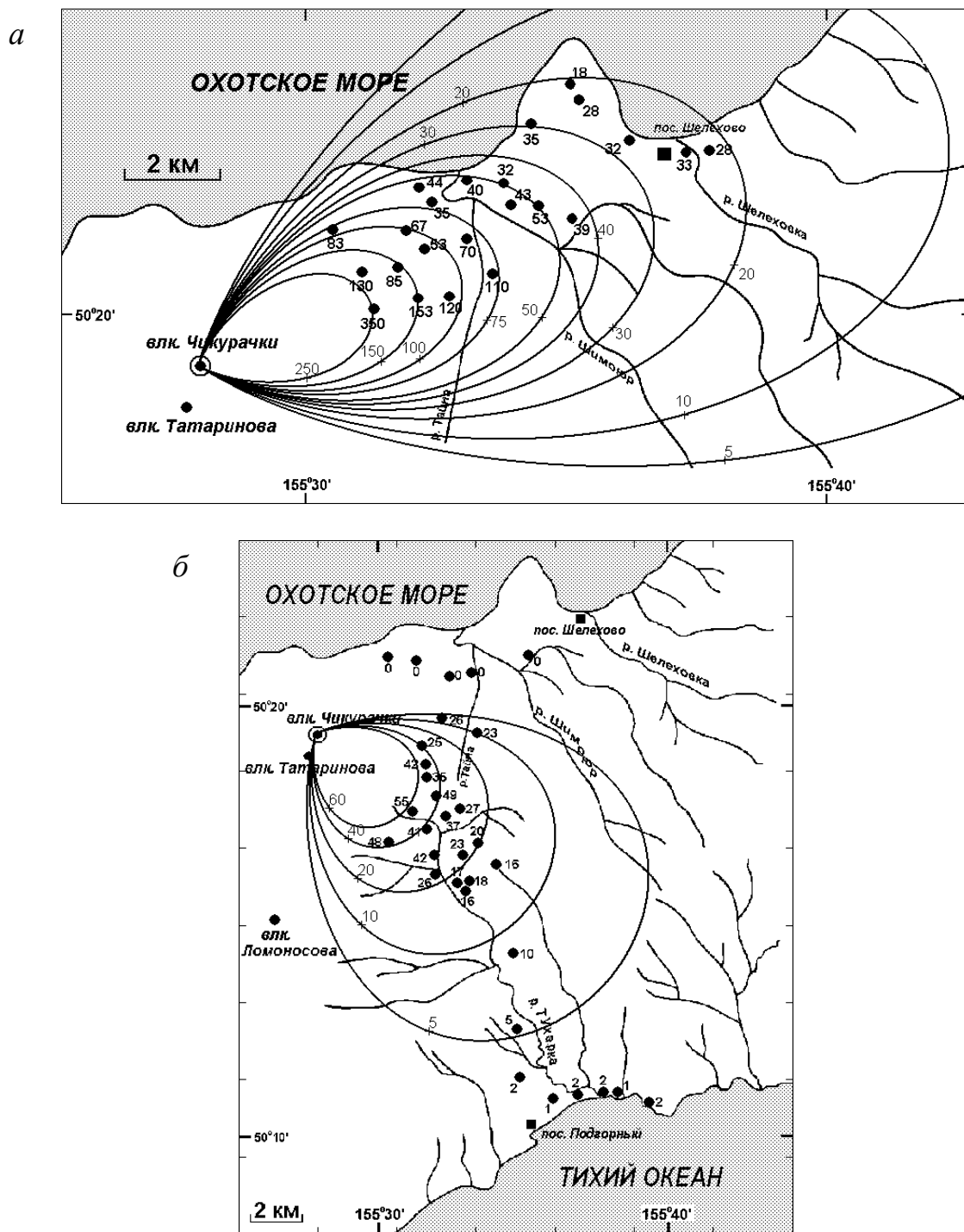


Рис. 1. Схемы отбора проб тефры в окрестностях вулкана Чикурачки: извержение 1853 г. (а), извержение 1986 г. (б). Восстановленные по модели (6) изоплеты (линии равного максимального размера частиц) тефры плиннианских стадий извержений вулкана Чукрачки; ● – точки пробоотбора, цифры рядом – размеры частиц (мм)

В соответствии с замечанием, оценивание параметров θ_1 , θ_2 с помощью модели (6) в обоих случаях проводилось по трем опорным точкам измерений,

достаточно близко расположенных к осям пеплопадов. Для оценивания параметров θ_3 также использовались по три опорные точки измерений, расположенных на различных расстояниях от осей. Оценки параметров θ_2 оказались довольно близкими для обоих извержений. Оценки же θ_3 заметно отличаются, что объясняется различием в скоростях ветра во время извержений. Соответственно это отличие проявилось в меньшей вытянутости изолиний на рис. 1, б относительно оси. Анализ рис. 2 показывает вполне удовлетворительное согласие между измеренными и численно восстановленными значениями размеров частиц тефры в точках отбора проб, прилегающих к осям пеплопада.

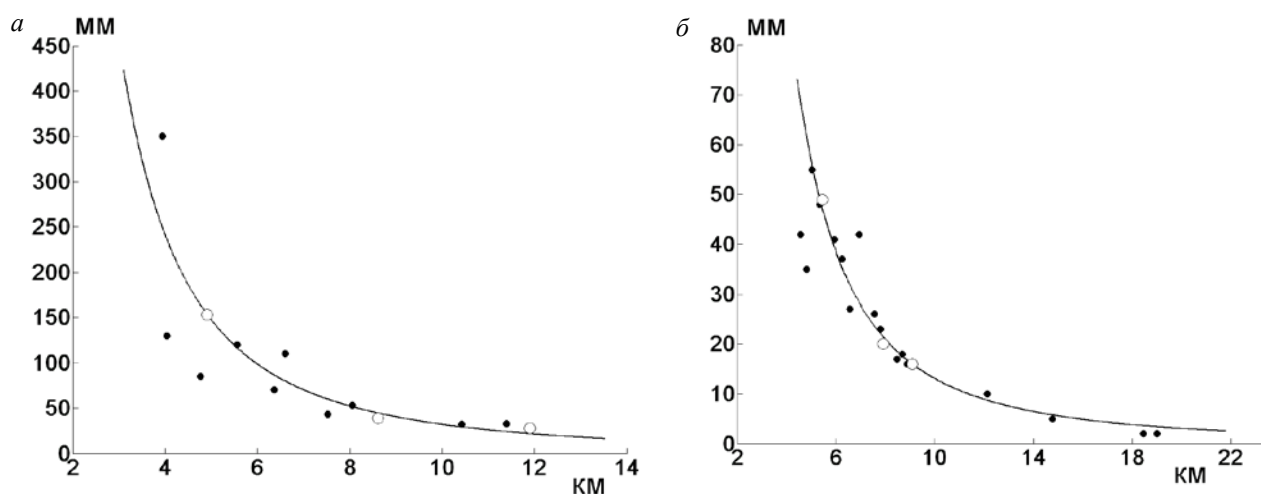


Рис. 2. Измеренные и численно восстановленные размеры частиц тефры по осям пеплопадов: извержение 1853 г. (а), извержение 1986 г. (б):
○ – опорные точки; ● – контрольные точки наблюдений

Следует отметить, что для восстановления поля выпадений может быть использовано весьма ограниченное число точек измерений. Это создает определенные преимущества при анализе имеющихся данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 4.4, ИП СО РАН № 84.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лучицкий И.В. Основы палеовулканологии. – М.: Наука, 1971. – Т. 1. – 480 с.
2. Исторические извержения вулкана Чикурачки (о. Парамушир, Курильские острова) / А.Б. Белоусов, М.Г. Белоусова, С.Ю. Гришин, П.В. Крестов // Вулканология и сейсмология. – 2003. – № 3. – С. 15–34.
3. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
4. Динамическая метеорология / Под ред. Д.Л. Лайхмана. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 608 с.

5. Смит Ф.Б. Турбулентное рассеяние облака тяжелых частиц // Атмосферная диффузия и загрязнение атмосферы / Под ред. А.С. Моница. – М.: ИЛ, 1962. – С. 217–235.

6. Успенский А.Б., Федоров В.В. Вычислительные аспекты метода наименьших квадратов при анализе и планировании регрессионных экспериментов. – М.: Изд-во МГУ, 1975. –168 с.

Получено 14.06.2012

© Т.В. Ярославцева, В.Ф. Рапуца, 2012