

Численная модель реконструкции полей выпадений вулканического пепла

Т.В. Ярославцева, В.Ф. Рапута*

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6*

Поступила в редакцию 25.01.2011 г.

Предложена модель реконструкции полей выпадений крупнодисперсной примеси от непрерывного высотного источника. Для описания процесса распространения примеси в атмосфере используется кинематическое приближение. Распределение состава примеси в источнике по скоростям оседания задается с помощью гамма-распределения. Проведена апробация предложенной модели оценивания на данных натурных исследований выпадения тефры в окрестностях влк. Чикурачки (о. Парамушир, Курильские острова).

Ключевые слова: атмосфера, примесь, аэрозоль, измерение, модель, вулкан, пепел, реконструкция, обратная задача; *atmosphere, admixture, aerosol, measuring, model, volcano, ash, reconstruction, reverse problem.*

Введение

Воздействие крупнейших вулканических извержений на природную среду происходит прежде всего за счет образующихся при извержениях эруптивных туч, нагруженных частицами тефры и аэрозолями. Для изучения их влияния в региональном и глобальном масштабах необходимо выявить все эти извержения, опираясь на изучение вулканических отложений и форм рельефа, и реконструировать параметры извержений, включая возраст, а также объем и состав вулканических продуктов [1, 2].

Вулканические извержения могут влиять на климат в регионах, расположенных далеко за пределами зоны выпадения кислотных дождей, возникающих при пассивной дегазации. Газ или пепел от эруптивной колонны, проникающие в стратосферу, разносятся на большие расстояния высотными воздушными течениями [3, 4]. Частицы пепла и аэрозольные капли поглощают солнечный свет, что приводит к понижению температуры на Земле и в нижних слоях атмосферы. Таким образом, крупное вулканическое извержение нагревает верхние слои атмосферы, где происходит абсорбция, но охлаждает поверхность и нижнюю часть атмосферы. Микроскопические частицы пепла, выброшенные в стратосферу, осаждаются примерно за 3 мес, но аэрозольные капли серной кислоты могут плавать в воздухе в течение нескольких лет. Таким образом, крупные извержения, связанные с мощными выбросами двуокиси серы, оказывают наиболее значительное и устойчивое влияние на климат [5].

В связи с вышесказанным проблема определения количественных характеристик отложений вул-

канического пепла в результате извержений вулканов является весьма актуальной. Применение методов прямого моделирования распространения примесей в атмосфере от такого типа источников сталкивается со значительными затруднениями, поскольку прямые измерения дисперсного состава и массы выбрасываемых вулканом веществ практически невозможны. Эти трудности усугубляются изменениями параметров источника на разных фазах индивидуального извержения. С другой стороны, современные знания о характеристиках вулканических выбросов основаны на косвенных экспериментальных исследованиях их состава на поверхности, в тропосфере и стратосфере, что приводит к необходимости соответствующих постановок обратных задач оценивания параметров извержений и моделей реконструкции полей выпадений пепла [6–8].

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

Вулкан Чикурачки является одним из наиболее активных вулканов Курильской дуги. Мощные (плинианские) извержения за исторический период происходили дважды – в 1853 и 1986 гг. Высоты эруптивных колонн достигали 13–14 км при скоростях ветра 35–40 и 15 м/с соответственно. Продолжительность плинианских стадий составила 5–7 ч [2, 9]. Спутниковые изображения показывают, что для извержения 1986 г. пепловый шлейф уходил на расстояние до 400 км от вулкана.

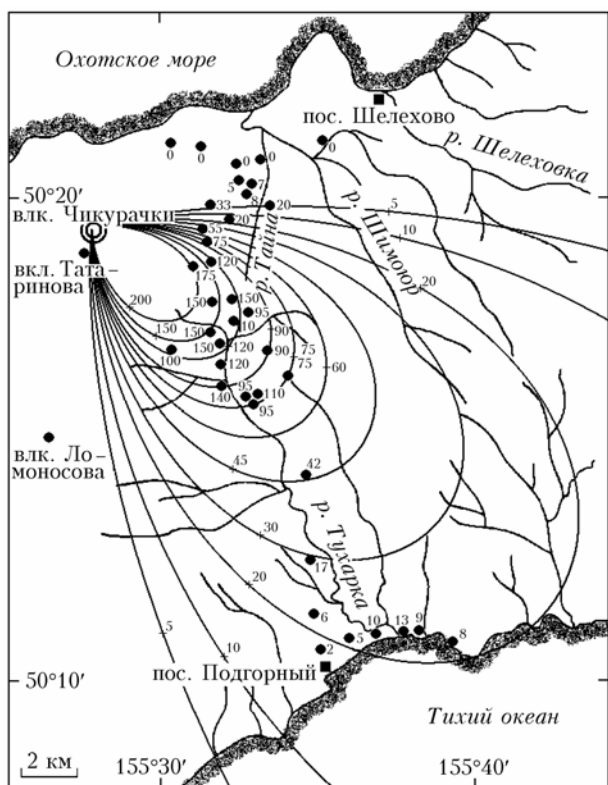
Пирокластика плинианских стадий извержений 1853 и 1986 гг. представлена преимущественно тефрой, которая, благодаря широкому распространению

* Владимир Федотович Рапута (raputa@sscc.ru); Татьяна Владимировна Ярославцева.

и большой толщине, хорошо сохранилась в разрезах почвенно-пирокластического чехла. Отложения тефры извержений 1853 и 1986 гг. очень похожи. Результаты измерений толщины слоя тефры в зонах выпадений приведены на рис. 1 и 2.



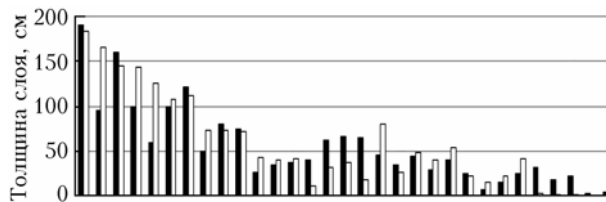
а



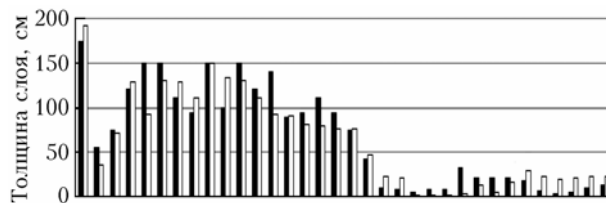
б

Рис. 1. Схемы отбора проб тефры в окрестностях влк. Чикучрачки: извержение 1853 г. (а), извержение 1986 г. (б). Восстановленные по модели (9) поля выпадений; ● — точки пробоотбора; цифры рядом — толщина слоя пепла, см

Гистограммы 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



а



б

Рис. 2. Измеренные и численно восстановленные толщины слоев выпадений тефры в точках пробоотбора: извержения 1853 г. (а), 1986 г. (б); измеренные (■) и вычисленные (□) значения в точках отбора проб

тефры 1986 г. Высокая пористость ювенильного материала и хорошая сортировка тефры свидетельствуют о чисто магматической природе извержений [2].

2. Постановка обратной задачи переноса в атмосфере полидисперсной примеси

Результаты проведенных экспедиционных исследований показали, что выпадение пепла в исследуемых зонах о. Парамушир в основном произошло 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:

$$H/w = x/U. \quad (1)$$

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.

Условие (1) позволяет установить однозначное соответствие между количеством частиц P со скоростями оседания w , выпавших в точке x , и функцией $N(w)$ распределения примеси в источнике. В данном случае справедливо соотношение

$$P = \gamma N, \quad (2)$$

где γ — нормирующий множитель.

Турбулентную диффузию частиц в поперечном к ветру направлении опишем следующим выражением [10–12]:

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(x)} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma^2(x)}\right], \quad (3)$$

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

Для непрерывно действующего источника в случае легкой примеси интерполяция $\sigma^2(x)$ имеет вид [10]:

$$\sigma^2(x) = \frac{\bar{v}^2(x/U)^2}{1 + x/2UT_L}. \quad (4)$$

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

Из соотношения (4) вытекает, что при относительно небольших x горизонтальная дисперсия $\sigma^2(x) \sim x^2$. Для больших же удалений от источника $\sigma^2(x) \sim x$. При оседании облака тяжелых частиц σ^2 зависит не только от расстояния до источника, но и от скоростей оседания этих частиц в атмосфере. В частности, для больших x справедливо соотношение [10, 11]:

$$\sigma^2 \rightarrow k \frac{x}{w}, \quad (5)$$

где k – некоторый коэффициент пропорциональности.

Распределение аэрозольной примеси в источнике по скоростям оседания w зададим в виде следующей двухпараметрической функции [13]:

$$N(w) = \frac{a^{n+1}}{\Gamma(n+1)} w^n e^{-aw}, \quad n \geq -1, \quad a = \frac{n}{w_m}, \quad (6)$$

где параметр w_m характеризует скорость преобладающей по количеству частиц фракции примеси; n – степень однородности распределения частиц пепла по скоростям w ; $\Gamma(n)$ – гамма-функция Эйлера.

Тогда с учетом (1)–(6) количество частиц, выпавших в точке (x, y) за время T , можно описать с помощью соотношения

$$P(x, y, \theta) = \theta_1 x^{\theta_2} \exp\left(-\frac{\theta_3}{x} - \frac{\theta_4 y^2}{x^2}\right), \quad (7)$$

где

$$\theta_1 = \frac{\gamma T a^{n+1} (UH)^{n+1}}{\sqrt{2\pi k} \Gamma(n+1)}, \quad \theta_2 = -n - 2,$$

$$\theta_3 = aUH, \quad \theta_4 = \frac{UH}{2k}.$$

Оценка неизвестного вектора параметров θ проводится с использованием метода наименьших квадратов [14]. Минимизируется следующий функционал:

$$J(\theta) = \sum_{j=1}^M [N_j - P(x_j, y_j, \theta)]^2 \rightarrow \min_{\theta \in \Omega}. \quad (8)$$

Здесь N_j – измеренное по вертикали количество частиц наиболее характерного размера, выпавших

в точке (x_j, y_j) ; Ω – область допустимых значений вектора θ .

Замечание 1. С использованием соотношений (1), (7) и формулы Стокса $w = cd^2$ для скоростей оседания частиц в атмосфере [12] при толщине h слоя выпадения пепла имеют место соотношения

$$h = P(x, y, \theta)d = P(x, y, \theta)\lambda x^{-0.5} = s_1 x^{s_2} \exp(-s_3/x - s_4 y^2/x^2) \equiv F(x, y, \mathbf{s}), \quad (9)$$

где d – наиболее характерный диаметр частиц в точке измерения (x, y) ;

$$\lambda = \sqrt{UH/c}; \quad s_1 = \lambda\theta_1, \quad s_2 = \theta_2 - 0,5, \quad s_3 = \theta_3, \quad s_4 = \theta_4.$$

В случае, когда производятся лишь непосредственные измерения толщин h слоев выпадений пепла, оценка неизвестного вектора параметров \mathbf{s} проводится на основе минимизации следующего функционала:

$$I(\mathbf{s}) = \sum_{j=1}^M [h_j - F(x_j, y_j, \mathbf{s})]^2. \quad (10)$$

Замечание 2. Используя свойства функции $F(x, y, \mathbf{s})$, поиск минимума функционала (10) удобнее проводить в два этапа. Сначала по данным измерений высот слоев пепла по оси следа (т.е. при $y = 0$) определить параметры s_1, s_2, s_3 , а затем выполнить оценивание параметра s_4 по точкам наблюдений, расположенных на периферии следа.

3. Численная реконструкция полей выпадений пепла от извержений влк. Чукурачки 1853 и 1986 гг.

На основе имеющихся данных экспериментальных исследований и модели (9), (10) по ограниченному числу опорных точек была проведена реконструкция следов выпадений тефры от извержений 1853 и 1986 гг., представленная на рис. 1.

Оценивание параметров s_1, s_2, s_3 с помощью предложенной модели реконструкции в обоих случаях проводили по трем опорным точкам измерений, достаточно близко расположенным к осям пеплопадов. Для оценивания параметра s_4 также использовали по три опорные точки измерений, расположенные на различных расстояниях от осей. Результаты численного восстановления полей выпадений тефры приведены на рис. 1 и 2. Оценки параметров s_2, s_3 оказались довольно близкими для обоих извержений. Оценки же s_4 заметно отличаются, что объясняется существенным 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 толщины слоя тефры в точках отбора проб, прилегающих к осям пеплопада.

В точках отбора проб, расположенных на периферии следов выпадений, расхождения становятся более заметными, что может быть связано как с относительно большими погрешностями измерений, так и с влиянием колебаний факела выбросов.

В заключение следует отметить, что разработанная малопараметрическая модель реконструкции выпадений полидисперсной примеси дает возможность проведения численного анализа данных наблюдений в пределах нескольких десятков километров от вулкана. Данное ограничение продиктовано использованием кинематического приближения. Для восстановления поля выпадений может быть использовано весьма ограниченное число точек измерений, что дает определенные преимущества при анализе имеющихся данных.

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

1. Луцицкий И.В. Основы палеовулканологии. М.: Наука, 1971. Т. 1. 480 с.
2. Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., Гришин С.Ю., Крестов П.В. Исторические извержения вулкана Чикурачки (о. Парамушир, Курильские острова) // Вулканол. и сейсмол. 2003. № 3. С. 15–34.
3. Зуев В.В., Зуева Н.Е. Вулканогенные возмущения стратосферы – главный регулятор долговременного поведения озоносферы в период с 1979 по 2008 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 30–34.
4. Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Зуев В.В., Макеев А.П., Макиенко Э.В., Невзоров А.В. Измерения микроструктурных характеристик фонового и вулканогенного стратосферного аэрозоля на основе многочастотного лазер-

- ного зондирования в Томске (56,5° с.ш.; 85,0° в.д.) // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 9. С. 803–810.
5. Асатуров М.Л., Будыко М.И., Винников К.Я., Гройсман П.Я., Кабанов А.С., Кароль И.Л., Коломеев М.П., Пивоварова З.И., Розанов Е.В., Хмельцов С.С. Вулканы, стратосферный аэрозоль и климат Земли. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 256 с.
 6. Рапута В.Ф., Олькин С.Е., Резникова И.К. Модель оценивания аэрозольных выпадений бенз(а)пирена в окрестностях Новосибирского электродного завода // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 601–604.
 7. Carey S., Sparks R.S.J. Quantitative models of the fallout and dispersal of tephra from volcanic eruption columns // Bull. Volcanol. 1986. V. 48. P. 109–125.
 8. Wilson L., Walker G.P.L. Explosive volcanic eruptions – VI. Ejecta dispersal in plinian eruptions: the control of eruption conditions and atmospheric properties // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 1987. V. 89. P. 657–679.
 9. Овсянников А.А., Муравьев Я.Д. Извержение вулкана Чикурачки в 1986 г. // Вулканол. и сейсмол. 1992. № 5–6. С. 3–21.
 10. Динамическая метеорология / Под ред. Д.Л. Лайхмана. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 608 с.
 11. Смит Ф.Б. Турбулентное рассеяние облака тяжелых частиц // Атмосферная диффузия и загрязнение атмосферы / Под ред. А.С. Моница. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1962. С. 217–235.
 12. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 448 с.
 13. Прессман А.Я. О распространении в атмосфере тяжелой неоднородной примеси из мгновенного точечного источника // Инженерно-физ. ж. 1959. Т. 2, № 3. С. 78–87.
 14. Успенский А.Б., Федоров В.В. Вычислительные аспекты метода наименьших квадратов при анализе и планировании регрессионных экспериментов. М.: Изд-во МГУ, 1975. 168 с.

T.V. Jaroslavtseva, V.F. Raputa. Numerical reconstruction of fields of losses of volcanic ashes.

The model of reconstruction fields of a large-dispersion impurity losses from a continuous high-rise source is offered. To describe the propagation of impurities in the atmosphere the kinematic approximations were used. The distribution of impurities in the source of sedimentation rate is given by the gamma-distribution. By data of field observations of tephra fallout in vicinities of a volcano of Chikurachki (an island of Paramushir, Kuriles) the proposed model estimation was approbated.