

УДК 551.21

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ ТЕФРЫ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЛОЗИВНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ТЯТЯ 1973 г., о. КУНАШИР, КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА

© 2017 г. А. Б. Белоусов¹, М. Г. Белоусова¹, Д. Н. Козлов²

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9

²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН
693022 Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б

¹e-mail: belousov@mail.ru

²e-mail: kozlovdn@bk.ru

Поступила в редакцию 14.07.2016 г.

Изучено распространение отложений тефры базальтового (52–54% SiO₂) эксплозивного извержения 1973 г. вулкана Тятя (о. Кунашир, Курильские острова). Построены карты с изолиниями толщины слоя тефры (изопахиты) и максимального размера пирокластических частиц (изоплеты). На основе полученных данных по стандартным методикам вычислены параметры эксплозивной активности отдельно для каждой из двух стадий этого извержения. На первой, фреатомагматической стадии извержения, при формировании мааров на северном склоне вулкана, выброшено 0.008 км³ тефры (преимущественно раздробленные вмещающие породы с примесью фрагментов слабовспененного ювенильного базальта). Продолжительность стадии 20 часов, интенсивность выноса пирокластики 2×10⁵ кг/с; высота эруптивного облака 4–6 км при скорости ветра до 10 м/с. На второй, магматической стадии извержения, при формировании шлакового конуса Отважный на юго-восточном склоне вулкана, выброшено 0.07 км³ тефры (преимущественно ювенильный базальтовый шлак). Высокоэксплозивная субплинианская фаза этой стадии продолжалась 36 часов, интенсивность выноса пирокластики 8×10⁵ кг/с; высота эруптивного облака 6–8 км при скорости ветра 10–20 м/с. Суммарный объем тефры извержения составил около 0.08 км³; общее количество выброшенной пирокластики (включая образовавшиеся моногенные постройки) 0.11 км³; объем изверженной магмы 0.05 км³ (в пересчете на плотность 2800 кг/м³); индекс эксплозивности извержения (Volcanic Explosivity Index, VEI) соответствует 3. Продуктивность питающей системы вулкана Тятя оценивается в 3×10⁵ м³ магмы в год.

DOI: 10.7868/S0203030617040034

ВВЕДЕНИЕ

Тефра – пирокластика, отложенная из всплывающего/дрейфующего в атмосфере облака вулканического извержения [Thorarinsson, 1981; Bonadonna et al., 2015]. Размерность частиц тефры может быть любой: от пепла до лапилли и крупнее. Параметры, характеризующие распространение тефры по площади (например, изменение толщины слоя и размера частиц с расстоянием от жерла) являются важным источником информации о сформировавшем этот слой эксплозивном извержении. Существуют алгоритмы, позволяющие на основе вышперечисленных данных вычислять общий объем выброшенной тефры, продолжительность извержения, расход пирокластики в единицу времени, максимальную высоту эруптивного облака, скорость ветра на высоте распространения облака и др.

[Williams, 1983; Carey, Sparks, 1986; Wilson, Walker, 1987; Pyle, 1989; Fierstein, Nathenson, 1992; Sparks et al., 1997]. По этим данным также определяется индекс эксплозивности (Volcanic Explosivity Index, VEI), характеризующий относительную силу извержений [Newhall, Self, 1982]. Слои тефры хорошо сохраняются в геологических разрезах (например, в почве), поэтому реконструкции возможны и для извержений прошлых лет. Карты с изолиниями толщины слоя тефры (изопахиты) и максимальной размерности пирокластических частиц (изоплеты) служат основой для районирования вулканической опасности.

Преимущественно базальт-андезибазальтовый стратовулкан Тятя (1822 м абс. отм.) – второй по высоте вулкан Курильских островов и самая высокая точка о. Кунашир (рис. 1).

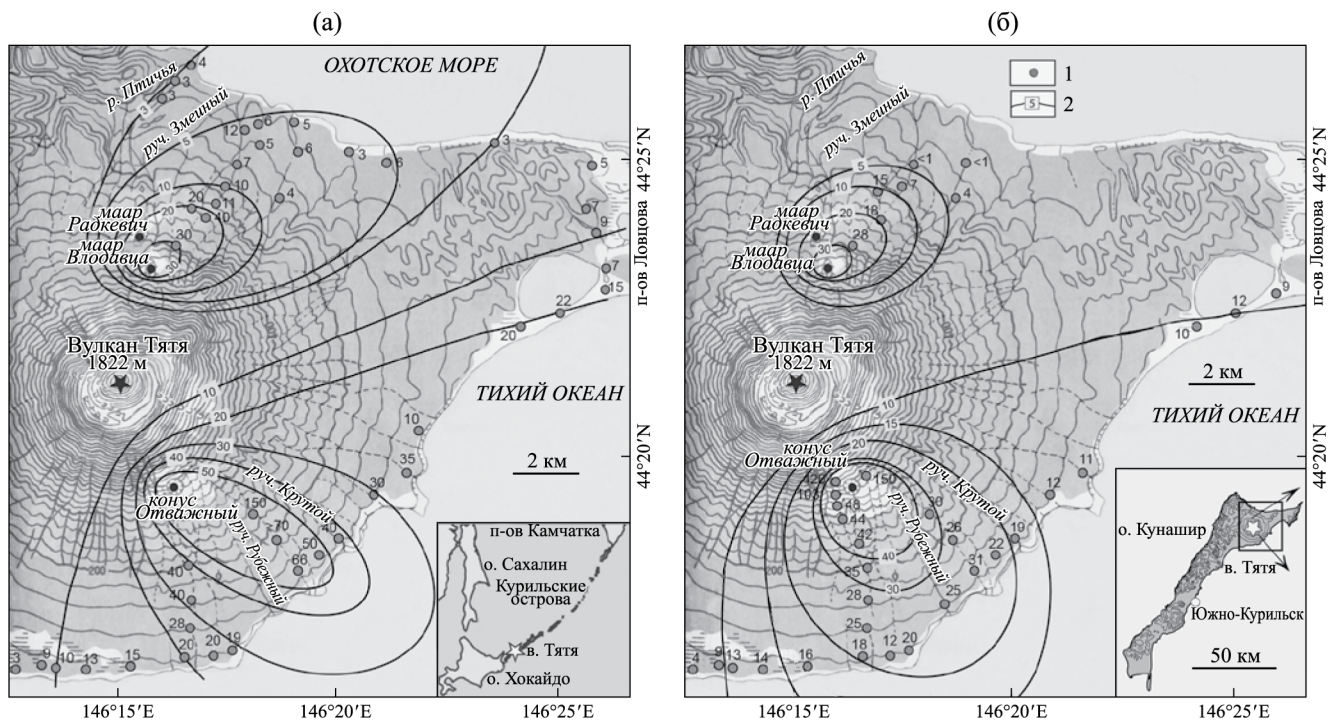


Рис. 1. Отложения тефры мааров и конуса Отважный извержения вулкана Тятя 1973 г.

а – изопахиты (в см), б – изоплеты (в мм).

1 – точки измерений, 2 – значения изолиний. На врезках: положение вулкана Тятя в Курильской дуге (а), положение изученного участка о. Кунашир и направления главных осей пеплопадов извержения 1973 г. (б).

Г.С. Горшков [1967] сделал первое детальное описание морфологии и геологического строения постройки вулкана, которая считается одной из самых красивых в мире. В историческое время извержения вулкана отмечены в 1812 и 1973 гг. [Гушенко, 1979]. Извержение 1812 г. было относительно слабым. Оно сопровождалось выбросами “черного дыма” из вершины вулкана и, вероятно, также излиянием небольшого лавового потока [Гушенко, 1979; Nakagawa et al., 2002]. Побочное эксплозивное извержение 1973 г. относится к числу наиболее значительных исторических извержений Курильских островов и изучено достаточно хорошо [Мархинин и др., 1974, 1979; Малеев, 1976; Nakagawa et al., 2002].

Несмотря на существование ряда статей, посвященных извержению вулкана Тятя 1973 г., информация о динамике его эксплозивной активности и распространении тефры по территории острова очень схематична. Это связано как с малым количеством выполненных наблюдений, так и со сложным характером самого извержения, которое происходило последовательно из двух эруптивных центров, образовавшихся на противоположных склонах постройки вулкана.

Целью предлагаемой работы являлась реконструкция динамики эксплозивной активности извержения 1973 г. Для этого было проведено изучение распределения по площади тефры, которая

составляет более 95% объема всей пирокластике извержения (менее 5% приходится на крупные фрагменты пирокластике, выброшенные по баллистическим траекториям). В ходе многодневного пешего маршрута вокруг северной части острова Кунашир выполнялось систематическое измерение толщины слоя и максимального размера частиц тефры. Это позволило построить карты изопахит и изоплет отдельно для центров извержения на северном и юго-восточном склонах вулкана. Полученные данные легли в основу вычисления параметров эксплозивной активности этого извержения по стандартным методикам.

ИЗВЕРЖЕНИЕ ВУЛКАНА ТЯТЯ 1973 г.

Сильно усеченный конус стратовулкана Тятя поднимается от уровня моря до высоты около 1400 м, где расположена вершинная кальдера диаметром 2 км. Кальдера полностью заполнена лавой и пирокластикой посткальдерных извержений, которые также формируют внутрикальдерный конус с относительной высотой 400 м. На вершине конуса находятся два слившихся кратера с диаметрами 150 м и 200 м. На склонах докальдерной постройки имеется несколько шлаковых конусов и мааров доисторических побочных извержений [Горшков, 1967].

Развитие процесса извержения 1973 г. описано в статьях [Мархинин и др., 1974, 1979; Малеев, 1976; Nakagawa et al., 2002]. Извержение происходило на склонах докальдерной части вулканической постройки (было побочным) и характеризовалось чисто эксплозивной деятельностью, которая продолжалась 14 суток. Эксплозии начались 14 июля на северном склоне вулкана на высоте 400–550 м с образованием двух небольших мааров (названы маарами Влодавца и Радкевич). Описания извержения мааров практически отсутствуют, так как сильный пеплопад сделал невозможными визуальные наблюдения. Эта первая стадия извержения продолжалась всего несколько часов: объем выброшенной пироклаستيку оценен в $7 \times 10^6 \text{ м}^3$ [Мархинин и др., 1974].

15 июля эксплозивная активность продолжилась на противоположном, юго-восточном склоне вулкана, где на высоте 500–700 м открылись два эксплозивных жерла (вторая стадия извержения). По визуальным наблюдениям высота эруптивного облака 15 июля достигала 8 км. Частота и сила выбросов из жерл постепенно ослабевали, и 28 июля извержение прекратилось. В результате деятельности жерл юго-восточного склона сформировался шлаковый конус Отважный высотой до 100 м (для упрощения описания маленький шлаковый конус, названный Е.К. Мархининым “Пограничник”, мы включаем в состав конуса “Отважный”). Его вершинный кратер имел диаметр 570 м и максимальную глубину 100 м. Объем пироклаستيку, выброшенной на второй стадии извержения, был оценен в 0.2 км^3 [Мархинин и др., 1974].

Общий объем выброшенной извержением пироклаستيку был оценен в $0.2–0.25 \text{ км}^3$ [Мархинин и др., 1974; Малеев, 1976]. Ювенильный материал извержения представлен базальт-андезибазальтами (далее по тексту “базальт”) с содержанием SiO_2 , 52–54% [Мархинин и др., 1974; Nakagawa et al., 2002].

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕФРЫ И ЕЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПО ПЛОЩАДИ

Тефра извержения 1973 г. образует четкий, легко диагностируемый слой темно-серого цвета в самой верхней части почвенно-пирокластического чехла в северной части острова Кунашир (тефра перекрыта дерниной до 6 см толщиной). Области распространения и характеристики тефры, изверженной на северном и юго-восточном склонах вулкана, заметно различаются.

Тефра, выброшенная жерлами северного склона (маарами Влодавца и Радкевич) на первой стадии извержения, характеризуется преобладанием обломков вмещающих пород и незначительным содержанием частиц ювенильного базальта,

которые имеют плотность 1760 кг/м^3 и вспененность 37% (определено по методике [Hoblitt, Harmon, 1993]). Гранулометрический состав тефры мааров отличается высоким содержанием тонких фракций и плохой сортировкой (рис. 2, рис. 3). На графике сортировка/медианный диаметр (см. рис. 3) пирокластика мааров попадает в поле пирокластики извержений Суртсейского типа, по [Walker, Croasdale, 1972]. Характеристики пирокластики показывают, что на первой стадии извержения механизм эксплозивной активности был фреато-магматическим (фрагментация магмы происходила при ее контакте с подземными водами).

Тефра, выброшенная на второй стадии извержения (шлаковым конусом Отважный), состоит в основном из частиц ювенильного базальта, которые имеют заметно большую вспененность, чем ювенильные частицы пирокластики мааров. Гранулометрический состав этой тефры выделяется низким содержанием тонких фракций (см. рис. 2, рис. 3). Указанные характеристики тефры показывают, что на второй стадии механизм эксплозивной активности был преимущественно магматическим (фрагментация магмы происходила при ее вспенивании, вызванном выделением растворенных летучих).

Отложения тефры, выброшенной маарами на первой стадии извержения, распространены на охотоморском побережье острова; ось пеплопада была направлена на северо-восток. На побережье толщина слоя тефры мааров достигает максимума восточнее устья руч. Змеиный и быстро уменьшается вдоль берега к западу по направлению к устью р. Птичь, и к востоку по направлению к полуострову Ловцова (см. рис. 1а). На склоне вулкана выше мааров отложения тефры быстро выклиниваются.

Тефра, выброшенная жерлами юго-восточного склона на второй стадии извержения, отложилась на тихоокеанском побережье острова (см. рис. 1). В целом, максимальная толщина этой тефры фиксируется между руч. Рубежный и Крутой; при этом она быстро уменьшается вдоль берега к западу, по направлению к устью р. Тятинка, и значительно медленнее – к северо-востоку, по направлению к полуострову Ловцова (см. рис. 1а). На перешейке полуострова Ловцова слой этой тефры имеет толщину 5–9 см. На склоне вулкана выше конуса Отважный отложения быстро выклиниваются. Ось главного пеплопада была направлена на юго-восток. Изопахиты и изоплеты тефры, выброшенной жерлами юго-восточного склона, не осесимметричны, потому что в процессе второй стадии извержения ось пеплопада изменила направление с восточного на юго-восточное (из-за смены направления ветра).

В отложениях тефры конуса Отважный выделяется 2 прослоя, материал которых и распространение по

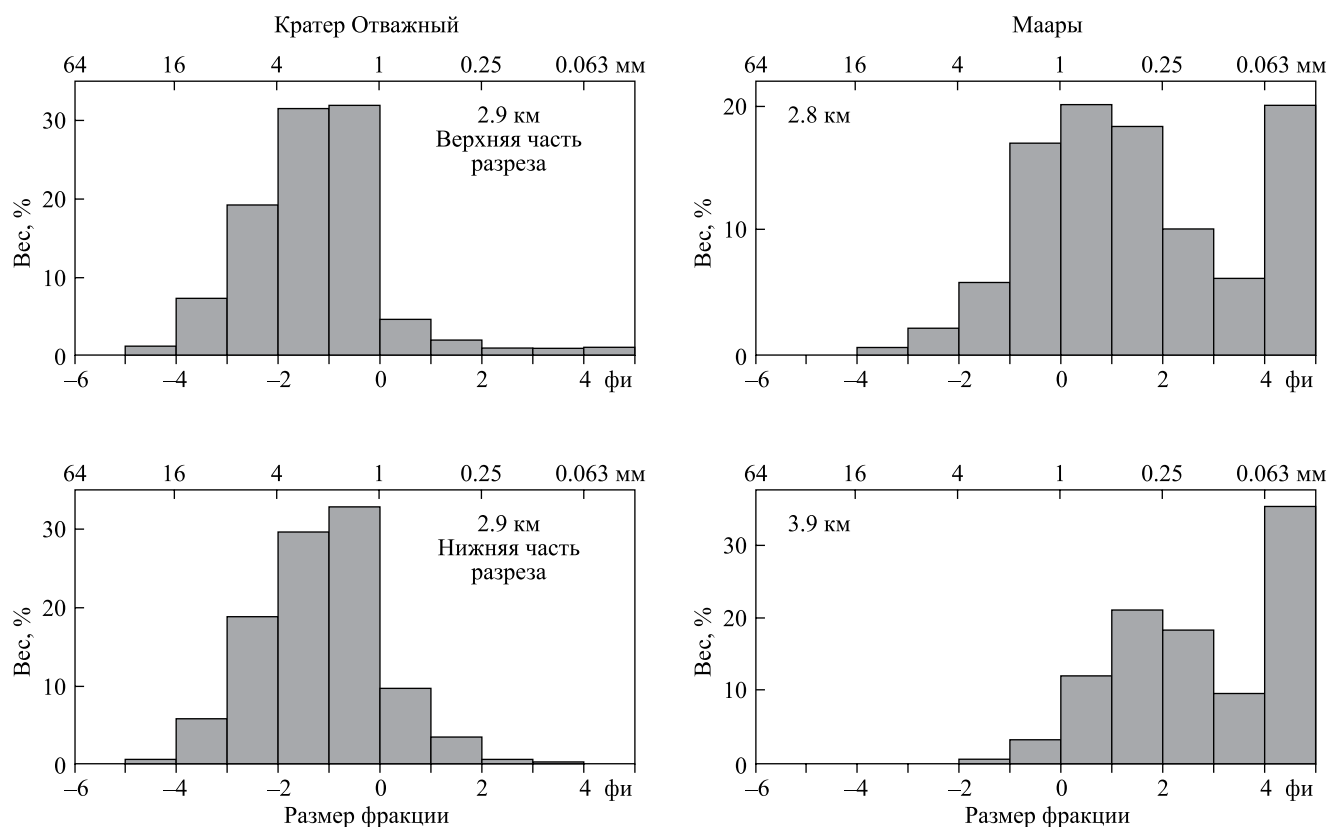


Рис. 2. Примеры гистограмм гранулометрического состава тephры извержения 1973 г. Образцы тephры конуса Отважный из одного разреза на расстоянии 2.9 км, образцы тephры мааров из двух точек на расстояниях 2.8 и 3.9 км. Расстояния указаны от соответствующих жерл. На горизонтальных осях для размерности гранулометрических фракций даны две шкалы: в миллиметрах и фи единицах ($\phi = -\lg_2 \text{мм}$).

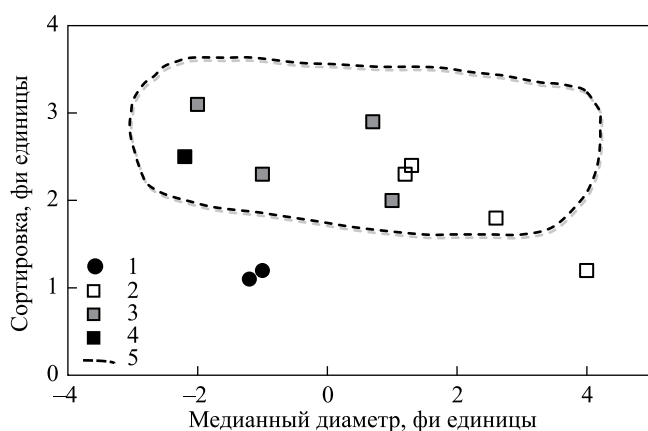


Рис. 3. Соотношение между сортировкой и медианным диаметром (параметры, по [Inman, 1952; Walker, 1971]).

1 – тephра конуса Отважный на расстоянии 2.9 км; 2 – тephра мааров на расстоянии 2.2–5.4 км; 3 – тephра кромки маара Влодавца; 4 – тephра кромки маара Радкевич; 5 – область отложений суртсейского типа, согласно [Walker, Croasdale, 1972]. Расстояния указаны от соответствующих жерл. Соотношение между фи единицами и миллиметрами см. рис. 2.

площади несколько различны (детально разрез описан в работе [Nakagawa et al., 2002]). Нижний прослой, с меньшей вспененностью ювенильных частиц, был отложен в начале деятельности конуса Отважный. Возможно, что в этот период фрагментация магмы происходила как за счет вспенивания при выделении летучих, так и в результате контакта с подземными водами (был переход от фреато-магматической фрагментации к магматической). Ось этого пеплопада была направлена на восток. Верхний прослой, несколько более грубозернистый и состоящий из сильно вспененных частиц базальтового шлака, был отложен позднее, когда деятельность конуса Отважный стала чисто магматической. Ось этого пеплопада была направлена на юго-восток.

ПАРАМЕТРЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕФРЫ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗВЕРЖЕНИЯ

Параметры отложений тephры и вычисленные на их основе характеристики извержений мааров и конуса Отважный сведены в таблице. Методика определения параметров и алгоритмы

Параметры отложений тефры и реконструированные на их основе параметры извержения вулкана Тятя 1973 г.

Параметры отложений тефры	Маары	Конус Отважный	Методика вычисления
T_0 : максимальная экстраполированная толщина слоя тефры в источнике, м	0.38	0.8	[Pyle, 1989]
b_t : значение $A^{1/2}$, при котором T_0 уменьшается в 2 раза, км	2	4.7	—//—
k_t : наклон графика на рис. 5а	-0.33	-0.15	—//—
M_0 : максимальный экстраполированный размер обломков в кратере, см	6	6.1	—//—
b_c : значение $A^{1/2}$, при котором M_0 уменьшается в 2 раза, км	1.2	3.6	—//—
k_c : наклон графика на рис. 5б	-0.66	-0.17	—//—
b_c/b_t	0.6	0.77	—//—
α_t : “эллиптичность” изопахит	0.68	0.5	—//—
α_c : “эллиптичность” изоплет	0.76	0.85	—//—
Параметры извержений			
H_t : макс. высота облака извержения, км	4–6	6–8	[Carey, Sparks, 1986; Sparks et al., 1997]
v : скорость ветра, м/с	0–10	10–20	—//—
R : расход пирокластики, кг/с	2×10^5	8×10^5	[Wilson, Walker, 1987]
Продолжительность извержения, ч	20	36	см. Приложение
V : объем изверженной тефры, км ³	0.008	0.07	[Fierstein, Nathenson, 1992]
V_{DRE} : объем изверженной магмы, км ³	—*	0.05	см. Приложение

Примечание. Высоты эруптивных колонн даны относительно уровня моря. Пояснения по определению параметров и методике реконструкции см. в тексте и Приложении. Указанные объемы изверженной тефры не включают объемы самих моногенных построек извержения (мааров Влодавца и Радкевич и конуса Отважный).

* – тефра мааров содержит мало ювенильного материала, поэтому объем изверженной магмы незначителен.

вычислений даны в Приложении. Вдоль осей пеплопадов толщина слоя и максимальный размер частиц тефры мааров и конуса Отважный уменьшаются экспоненциально с удалением от соответствующего центра извержения (рис. 4, рис. 5). Максимальный экстраполированный размер частиц тефры в источнике (M_0) у мааров и конуса Отважный одинаковы. Максимальная экстраполированная толщина слоя тефры в источнике (T_0) у мааров в 2 раза меньше, чем у конуса Отважный (соответственно, 38 и 80 см). Толщина слоя тефры и максимальный размер частиц тефры мааров уменьшаются с удалением от центра извержения быстрее, чем у тефры конуса Отважный (что видно по соотношению параметров b_t , k_t , b_c и k_c).

Объемы тефры (см. таблицу) подсчитаны по методике J. Fierstein, M. Nathenson [1992]. Островное

положение вулкана не позволило изучить отложения тефры дальнего разноса. Это, а также сама методика подсчета, накладывают ограничения на точность определения объемов отложений (см. Приложение). Полученные объемы изверженной тефры следует рассматривать как минимальные.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выполненное картирование позволило впервые построить изопахиты и изоплеты отложений тефры отдельно для двух стадий извержения вулкана Тятя 1973 г., и по современным методикам вычислить параметры их эксплозивной деятельности.

Вычисления показали, что маары, образовавшиеся на северном склоне вулкана Тятя на первой стадии извержения, выбросили всего 0.008 км³ тефры со средним расходом пирокластики 2×10^5 кг/с. Эта

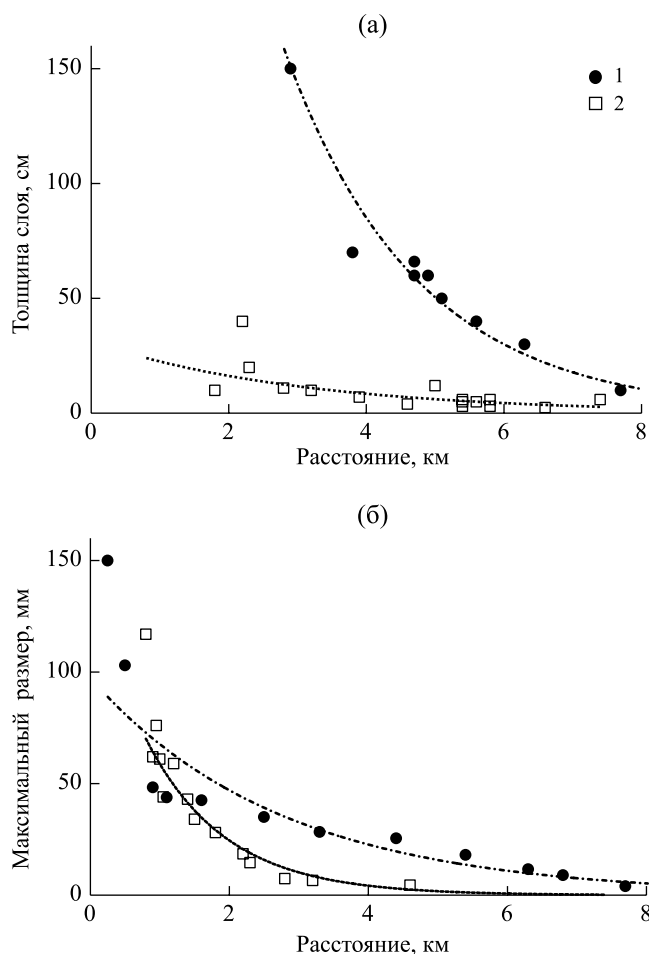


Рис. 4. Изменение параметров тefры вдоль осей пеплопадов при удалении от соответствующих жерл. а – толщина слоя тefры, б – максимальный размер частиц тefры.

1 – конус Отважный, 2 – маары Влодавца и Радкевич. Максимальный размер частиц определялся как среднее значение максимальных размеров 10 самых крупных частиц, найденных в разрезе слоя тefры.

тefра состоит преимущественно из фрагментов вмещающих пород, и поэтому количество свежего магматического материала, выброшенного этими жерлами, незначительно. Высота эруптивного облака при формировании мааров достигала 4–6 км, при скорости ветра менее 10 м/с, ось пеплопада была направлена на северо-восток. На этой стадии извержение имело фреато-магматический характер; эруптивное облако было относительно холодным и содержало много водяного пара. Это обусловило небольшую высоту облака и ее низкую способность транспортировать пирокластику, что проявилось в быстром уменьшении толщины слоя и размера частиц тefры с расстоянием от центра извержения (см. рис. 5). Конденсация пара в облаке вызывала слипание тонких частиц пепла и их выпадение совместно с крупными

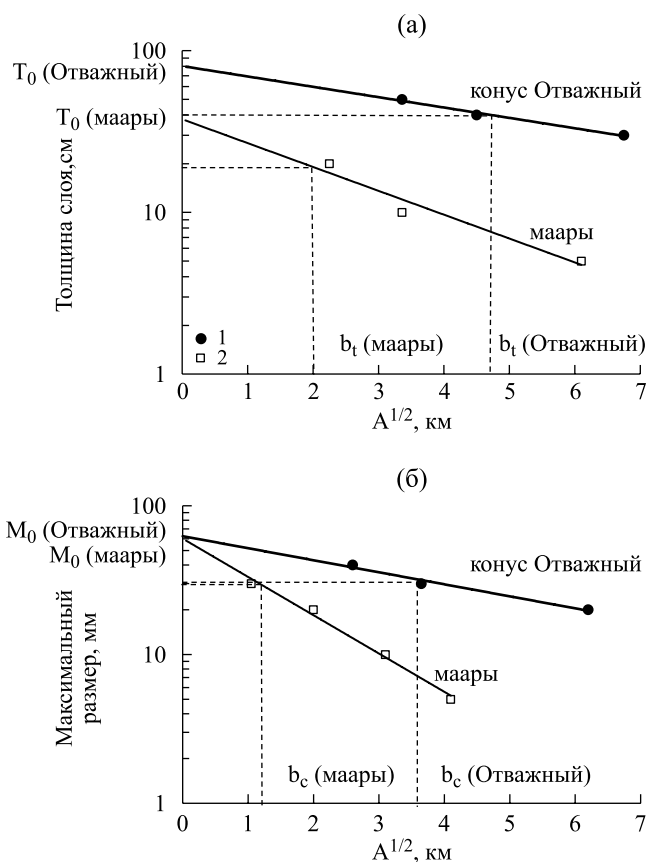


Рис. 5. Зависимость толщины слоя тefры извержений от квадратного корня из площади соответствующей изопакиты.

а – показано определение максимальной экстраполированной толщины слоя тefры в источнике (жерле) – T_0 и b_t – значение $A^{1/2}$, где T_0 уменьшается в два раза; 1 – конус Отважный, 2 – маары;

б – зависимость максимального размера частиц тefры извержений мааров и конуса Отважный от квадратного корня из площади соответствующей изоплеты. Показано определение максимального экстраполированного размера частиц тefры в источнике (жерле) – M_0 и b_c – значение $A^{1/2}$, где M_0 уменьшается в два раза. Условные обозначения см. рис. 5а. Пояснения по определению параметров см. Приложение.

фракциями, что проявилось в бимодальности гранулометрического состава и плохой сортировке тefры мааров (см. рис. 2, рис. 3). Эксплозивная активность по нашим оценкам продолжалась около 20 часов, что подтверждается данными визуальных наблюдений, показывающими прекращение деятельности мааров в первый день извержения.

Основное количество тefры (0.07 км^3) было выброшено на второй стадии извержения жерлами юго-восточного склона, которые образовались 15 июля 1973 г. По данным визуальных наблюдений в этот день наблюдалась максимальная высота эруптивного облака – 8 км, после чего сила извержения постепенно снижалась. Это совпадает с нашими данными, показывающими максимальную

высоту облака извержения в пределах 6–8 км. Параметр b_c , характеризующий скорость уменьшения толщины слоя этой тефры с расстоянием, имеет значение более 3, что характерно для эксплозивной активности субплинианского типа [Pyle, 1989]. Наши вычисления показывают, что высокоэксплозивная субплинианская фаза второй стадии извержения продолжалась 36 часов со средним расходом пирокластики 8×10^5 кг/с. Ось пеплопада сначала была направлена на восток, а потом в процессе субплинианской фазы направление ветра изменилось, и ось пеплопада повернула на юго-восток. Очевидно, после этого интенсивность извержения снизилась настолько, что выбрасываемая пирокластика не разносилась далеко за пределы подножия шлакового конуса Отважный (извержение приняло стромболианский характер, который наблюдался до 28 июля).

Суммарный объем пирокластики, выброшенной жерлами юго-восточного склона на второй стадии извержения, складывается из объема пирокластики самого конуса Отважный (около 0.03 км^3) и пирокластики, разнесенной ветром в качестве тефры (0.07 км^3), т.е. составляет около 0.1 км^3 . Эта пирокластика состоит в основном из частиц ювенильного базальта. Если принять средний объемный вес пирокластики 1300 кг/м^3 [Мархинин и др., 1974], а объемный вес базальт-андезибазальтовой магмы 2800 кг/м^3 [Stolper, Walker, 1980], то объем магмы, выброшенный на второй стадии извержения, составит 0.05 км^3 . Так как жерла северного склона (маары) выбрасывали преимущественно раздробленный материал вмещающих пород, то вышеприведенная цифра примерно соответствует количеству магмы, выброшенной извержением в целом.

Подсчитанное нами суммарное количество тефры извержения 1973 г. оказалось около 0.08 км^3 (общий объем выброшенной пирокластики вместе с объемом построек мааров и конуса Отважный составляет около 0.11 км^3), что в два раза меньше, чем ранее сделанные оценки [Мархинин и др., 1974, 1979; Малеев, 1976; Nakagawa et al., 2002]. Индекс эксплозивности этого извержения (VEI) соответствует 3. Если принять, что количество магмы, поступившее в 1973 г. на поверхность (0.05 км^3), накопилось в питающей системе за 160 лет, прошедших после предыдущего извержения 1812 г., то продуктивность вулкана Тятя составляет $3 \times 10^5 \text{ м}^3$ магмы в год.

Среди исторических извержений Курильских островов, по типу эксплозивной активности, составу и объему изверженной магмы извержение конуса Отважный сходно с извержениями 1853 и 1986 гг. вулкана Чикурачки на о. Парамушир [Белуусов и др., 2003; Gurenko et al., 2005]. Однако расход пирокластики в процессе субплинианской фазы извержения конуса Отважный был

в несколько раз меньше, а ее продолжительность в несколько раз больше (извержение было более растянутым во времени).

Данное исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (№ 15-17-20011).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Вычисление параметров отложений тефры (T_0 , b_v , k_v , M_0 , b_c , k_c , α_v , α_c) и объемов изверженной тефры и магмы

Параметры T_0 , b_t и k_t определяются по графику $T/A^{1/2}$ (см. рис. 4а), где T – толщина слоя тефры в логарифмическом масштабе, A – площадь, ограниченная изопохитой соответствующей толщины [Pyle, 1989]. Если этот график имеет вид прямой линии, то толщина слоя тефры убывает экспоненциально с удалением от источника (жерла).

T_0 – максимальная экстраполированная толщина слоя тефры в источнике. Определяется продлением прямой графика в область, где $A^{1/2} = 0$.

b_t – значение $A^{1/2}$, где T_0 уменьшается в два раза. Эта величина наглядно характеризует скорость уменьшения толщины слоя тефры с расстоянием от источника.

k_t – наклон графика $T/A^{1/2}$ – вычисляется по формуле:

$$k_t = [\ln T_2 - \ln T_1] / [(A_2)^{1/2} - (A_1)^{1/2}].$$

M_0 , b_c и k_c определяются по графику $M/A^{1/2}$ (см. рис. 4б), где M – максимальный размер частиц тефры в логарифмическом масштабе, A – площадь, ограниченная соответствующей изоплетой. Если этот график имеет вид прямой линии, то размер частиц тефры убывает экспоненциально с удалением от источника.

M_0 – максимальный экстраполированный размер частиц тефры в источнике. Определяется продлением прямой графика $M/A^{1/2}$ в область, где $A^{1/2} = 0$.

b_c – значение $A^{1/2}$, где M уменьшается в два раза. Эта величина наглядно характеризует скорость уменьшения максимального размера частиц тефры с расстоянием от источника.

k_c – наклон графика $M/A^{1/2}$. Вычисляется по формуле:

$$k_c = [\ln M_2 - \ln M_1] / [(A_2)^{1/2} - (A_1)^{1/2}].$$

α_t и α_c определяются как отношение длин малой (Y) и большой (X) осей эллипсов изопохит и изоплет, соответственно, и характеризует их “эллиптичность”, т.е. степень вытянутости. Так как изопохиты и изоплеты не образуют идеальных эллипсов, берутся средние значения Y и X.

Вычисление объема изверженной тefры производилось по формуле $V = 2T_0/k_t^2$ [Fierstein, Nathenson, 1992]. Известно, что этот метод, как и другие методы подсчета, основанные на измерении толщины слоя тefры, как правило, дает заниженные оценки [Fierstein, Nathenson, 1992]. Это происходит из-за того, что невозможно точно подсчитать объем (обычно, значительный) тонкой тefры, выпадающей на больших расстояниях от вулкана. Толщина слоя тefры дальнего разноса менее нескольких мм; он не сохраняется в разрезах и не поддается измерению. Простая экстраполяция прямой графика $T/A^{1/2}$ в область нулевой толщины слоя тefры, которая используется при вычислении, занижает объем, так как известно, что во многих случаях в дальней зоне происходит выполаживание графика (скорость уменьшения толщины слоя тefры с расстоянием замедляется). Поэтому, указанные в таблице объемы, а также вычисленные на их основе продолжительности извержений (см. ниже) следует рассматривать как минимальные. Пересчет на объем и массу изверженной магмы ($\rho = 2800 \text{ кг/м}^3$) осуществлялся исходя из объемного веса отложений (слоя) тefры мааров 1500 кг/м^3 и тefры конуса Отважный 1300 кг/м^3 .

Вычисление высоты эруптивного облака и скорости ветра

Максимальная высота облака извержения находит свое отражение в отложенной тefре в единственном параметре — максимальном расстоянии от оси пеплопада (измеренном в перпендикулярном оси направлении, т.е. поперек направления ветра), на котором выпадали частицы тefры какого-либо определенного размера и плотности. Если известно еще и максимальное расстояние от жерла, на котором частицы этого же размера и плотности выпадали на оси пеплопада, т.е. по направлению ветра, то можно определить скорость ветра во время извержения, т.е. высота облака и скорость ветра могут быть определены, если построена хотя бы одна изоплета отложенной извержением тefры [Carey, Sparks, 1986].

Мы использовали методику [Carey, Sparks, 1986], которая для исторических извержений дает параметры эруптивных облаков и скорости ветра, хорошо согласующиеся с данными наблюдений. Необходимые расстояния снимались с карты изоплет (см. рис. 16) и откладывались на графике из работы [Carey, Sparks, 1986, с. 121]. В случае извержения мааров мы использовали диаметры частиц тefры 20 мм (расстояния: 1.9 км поперек ветра, 2.7 км по ветру), 10 мм (3.1 км и 4 км, соответственно) и 5 мм (4 км и 5.3 км, соответственно). В случае извержения конуса Отважный мы использовали диаметр 20 мм (расстояния: 6.3 км поперек ветра, 7.7 км по ветру), 16 мм (7.7 км и 9.2 км, соответственно) и 13 мм (9.2 км и 10.2 км, соответственно). Объемный вес частиц тefры (шлака базальтового

состава) для мааров считался 1800 кг/м^3 и для конуса Отважный — 1500 кг/м^3 (не путать с объемным весом слоя тefры, который меньше за счет пространства между частицами). Кроме того, для определения высоты эруптивного облака мы использовали формулу из работы [Sparks et al., 1997]:

$H_t = 0.236(R)^{1/4}$, где R — расход пирокластики в кг/с .

Для извержения мааров была получена высота 5 км, для конуса Отважный — 7 км.

Вычисление расхода пирокластики и продолжительности извержения

Для определения расхода пирокластики использовался график из работы [Williams, 1983], где построена зависимость гидравлического размера частиц тefры (произведение диаметра на плотность частицы) от расстояния поперек оси пеплопада, на котором они выпадают при различных расходах пирокластики. Использовались те же исходные данные, что и при определении высоты эруптивных облаков. Для определения продолжительности стадий извержения масса изверженной пирокластики делилась на величину ее расхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., Гришин С.Ю., Крестов П.В. Исторические извержения вулкана Чикучачки (о. Парамушир, Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2003. № 3. С. 15–34.
- Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 287 с.
- Гущенко И.И. Извержения вулканов мира. Каталог. М.: Наука, 1979. 476 с.
- Малеев Е.Ф. Пеплы вулкана Тятя извержения 1973 г. (предварительное сообщение) // Бюлл. вулканол. станций. 1976. № 51. С. 19–27.
- Мархинин Е.К., Аникиев Ю.А., Гранник В.М. и др. Извержение вулкана Тятя на Курильских островах в июле 1973 г. // Геология и геофизика. 1974. № 10. С. 22–32.
- Мархинин Е.К., Долганова П.С., Радкевич Р.О., Шутова Г.С. Пеплы вулканов Алаид (извержение 1972 г.) и Тятя (извержение 1973 г.) // Магмообразование и его отражение в вулканическом процессе. М.: Наука, 1977. С. 57–79.
- Bonadonna C., Costa A., Folch A., Koyaguchi T. Tephra dispersal and sedimentation // The Encyclopedia of volcanoes / Ed. H. Sigurdsson. Elsevier, 2015. P. 587–599.
- Carey S., Sparks R.S.J. Quantitative models of the fall out and dispersal of tephra from volcanic eruption columns // Bull. Volcanol. 1986. V. 48. P. 109–125.

- Fierstein J., Nathenson M.* Another look at the calculation of fallout tephra volumes // *Bull. Volcanol.* 1992. V. 54. P. 156–167.
- Gurenko A.A., Belousov A.B., Trumbull R.B., Sobolev A.V.* Explosive basaltic volcanism of the Chikurachki Volcano (Kurile arc, Russia): Insights on pre-eruptive magmatic conditions and volatile budget revealed from phenocryst-hosted melt inclusions and groundmass glasses // *J. Vol. Geoth. Res.* 2005. V. 147. № 3. P. 203–232.
- Hoblitt R.P., Harmon R.S.* Bimodal density distribution of cryptodome dacite from the 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington // *Bull. Volcanol.* 1993. V. 55. P. 421–437.
- Inman D.L.* Measures for describing the size distribution of sediments // *J. Sed. Petrol.* 1952. V. 22. P. 125–145.
- Nakagawa M., Ishizuka Y., Kudo T. et al.* Tyatya volcano, southwestern Kuril arc: recent eruptive activity inferred from widespread tephra // *Island Arc.* 2002. V. 11. № 4. P. 236–254.
- Newhall C.G. and Self S.* The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism // *J. Geoph. Res.* 1982. V. 87. P. 1231–1238.
- Pyle D.* The thickness, volume and grain size of tephra fall deposits // *Bull. Volcanol.* 1989. V. 51. P. 1–15.
- Sparks R.S.I., Bursik M.I., Carey S.N. et al.* Volcanic plumes. N. Y.: Wiley, 1997. 574 p.
- Stolper E., Walker D.* Melt Density and the Average Composition of Basalt // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1980. V. 74. P. 7–12.
- Thorarinsson S.* Tephra studies and tephrochronology: a historical review with special reference to Iceland // *Tephra Studies.* Netherlands: Springer, 1981. P. 1–12.
- Walker G.P.L.* Grain-size characteristics of pyroclastic deposits // *J. Geol.* 1971. V. 79. P. 696–714.
- Walker G.P.L., Croasdale R.* Characteristics of some basaltic pyroclastics // *Bull. Volcanol.* 1972. V. 35. P. 303–317.
- Williams S.* Plinian airfall deposits of basaltic composition // *Geology.* 1983. V. 11. P. 211–214.
- 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.R. Astr. Soc.* 1987. V. 89. P. 657–679.