



УДК 551.21.032+528.74

В. Н. Двигало¹, И. Ю. Свирид^{1,2}, А. В. Шевченко^{1,2}

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail:dvig@kscnet.ru*

² *Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, г.
Петропавловск-Камчатский*

Аэрофотограмметрические исследования Нового трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг.

В результате стереофотограмметрических измерений по материалам аэрофотосъёмочных работ и обработки спутниковых снимков EO-1 выполнена оценка геологического эффекта Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. (ТТИ). Количественные параметры извержения определены на период с 27 ноября 2012 г. по 5 июня 2013 г. При сопоставлении полученных данных с известными для Северного и Южного прорывов Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. выявлены различия, указывающие на неисследованные ранее особенности ТТИ 2012–2013 гг.

Введение

Трещинное Толбачинское извержение 2012 – 2013 гг. (ТТИ) началось после непродолжительной сейсмической подготовки 27 ноября 2012 г. в 17:15 по местному времени [1] с образования разрывов субмеридионального простирания на гребне северной части пологого увала [2], протянувшегося к ЮЗ от вершины Плоского Толбачика. В первые часы извержение происходило из жерл, возникших на протяжении всей новообразованной зоны разрывов, но уже к концу вторых суток локализовалось на двух участках: центральном, названном именем И. А. Меньяйлова, и южном, получившем имя С. И. Набоко. Именно эти центры извержения стали источниками поступления на поверхность основного объёма лав и пирокластики.

Методика исследований

Определение количественных параметров ТТИ 2012–2013 гг., также как и БТТИ 1975–1976 гг., происходившего в этой же трещинной зоне, выполнено на основе стереофотограмметрической обработки аэрофотоснимков. За время извержения аэрофотосъёмка района ТТИ была выполнена три раза. Первая перспективная аэрофотосъёмка лавовых потоков произведена А. В. Сокоренко ручной камерой Canon EOS 20D около 14:00 29 ноября 2012 г., т. е. менее чем через двое суток после начала извержения. Повторные (плановые) аэрофотосъёмки всей площади извержения выполнялись В. Н. Двигало 13 декабря 2012 г. и 5 июня 2013 г. В этих двух случаях применялся топографический аэрофотоаппарат АФА-ТЭ 140, имеющий фокусное расстояние 139,53 мм и формат кадра 18×18 см. Съёмки производились с вертолёт Ми-8 на высоте 4200 м.

Стереофотограмметрическая модель затронутой извержением поверхности, соответствующая её состоянию до ТТИ 2012–2013 гг., была построена на основе аэрофотоснимков 19 сентября 1987 г. Планово-высотная подготовка всех снимков осуществлена посредством фотограмметрического сгущения опорной геодезической сети. За основу была взята сеть точек, созданная лабораторией геодезии Института вулканологии ДВНЦ АН СССР в 1975–1977 гг. [2]. Использовались также точки с известными отметками (надёжно опознанные на аэрофотоснимках) топографических карт масштаба 1:25 000.

Фотограмметрическая обработка плановых и перспективных стереопар выполнена в цифровой фотограмметрической системе PHOTOMOD 4.3.

Количественные оценки площадей и объёмов лав на 6 марта 2013 г. производились с использованием одиночного снимка спутника EO-1 (NASA). Чаще всего определить объём лав по одиночному снимку невозможно. Но в данном случае одна из особенностей ТТИ 2012–2013 гг. позволила обойти это ограничение. Она заключается в том, что в пределах лавового поля ТТИ оказалось много выступающих над свежей лавой фрагментов подстилающей поверхности (крупных и мелких шлаковых конусов, бугров и выступов старых лавовых потоков). По ортотрансформированному и масштабированному снимку EO-1 были легко определены контуры и площади выступающих над поверхностью свежих лавовых потоков элементов прежнего рельефа. Этих данных, при сопоставлении с ориентированной стереофотограмметрической моделью подстилающей поверхности, оказалось вполне достаточно для определения уровня, по который оказались залиты лавой фрагменты исходного рельефа. Получен-

ные таким образом мощности, а также площади новых лавовых потоков, измеренные по их контурам, позволяют вычислить близкую к достоверной цифру объёма. Точность подобных определений объёмов лав зависит главным образом от количества и расположения островков старой поверхности в пределах нового лавового поля. Конечно, точность таких оценок всегда будет ниже точности методов, основанных на использовании плотных цифровых моделей рельефа (ЦМР), но при отсутствии аэрофототопографических или спутниковых стереоскопических снимков высокого разрешения они могут быть вполне приемлемыми.

Морфологические характеристики системы трещин

Все распознанные по аэрофотоснимкам 13 декабря 2012 г. разрывы разместились в интервале высот от 1460 до 2358 м. Общая длина зоны разрывов — 6 км. Её наибольшая ширина — не менее 350 м. Большая часть трещин, эксплозивных и эффузивных центров образовалась между нижним жерлом Меняйлова и конусом извержения 1941 г. (рис. 1). По-видимому, именно на этом участке протяжённостью 2 км произошло внедрение основного объёма магматического вещества в первые моменты извержения. От верхних лавовых жерл Меняйлова до подножия конуса 1941 г. на стереофотограмметрических моделях отчётливо просматривается лавовод. Его длина — 1200 м. По поверхности он трассируется трещинами (местами шириной более 10 м), эксплозивными и провальными формами. Вблизи конуса 1941 г. через трещину в кровле лавовода на глубине 20 м хорошо просматривается лава. В нижней части лавовода (в 430 м к северу от верхнего лавового жерла Меняйлова) над ним образовались провалы. Этот лавовод и жерла Меняйлова действовали только несколько первых суток, так как сопоставление изображений аэрофотосъёмки 13 декабря 2012 г. с полученными позже показало полную идентичность поверхности лавы в этих местах.

Продолжение разрыва в сторону Плоского Толбачика расположено в нижней части ЮВ склона конуса прорыва 1941 г. Здесь возникла трещина длиной 215 м. Вдоль трещины насчитывается 12 эффузивных жерл, из которых произошло очень кратковременное излияние потоков жидкой лавы.

Выше конуса 1941 г. чётко дешифрируются только одиночные трещины. На ближайшей к нему (в интервале высот 2150–2239 м, длина — 500 м), rozpoзнаётся не менее 9 эксплозивных и эффузивных жерл.

Следующие (выше по склону) следы разрывов проявились двумя отдельными проплавленными во льду воронками. Нижняя разместилась на высоте 2298 м. Её диаметр 20 м, средняя глубина 6 м. Верхняя — на отметке 2314 м — имеет глубину 5 м и размеры по верхней кромке 19×29 м.

Ближайшие к новой кальдере Плоского Толбачика трещины уверенно просматриваются до высоты 2358 м. Расстояние северной оконечности трещины (её видимого на стереомодели следа) от нижней точки дна кальдеры (отметка 2503 м) составило в плане — 2420 м, по высоте — 145 м.

Ниже жерл Меняйлова разрыв (с азимутом, близким к 200°) трассируется под СЗ склон конуса Красный, где, резко изменив направление (до азимута около 220°), распространяется от него к ЮЗ не менее чем на 900 м. Вдоль этого участка трещины в процессе извержения происходили наиболее интенсивные выбросы пирокластики, образовавшей группу конусов Набоко и клешнеобразную пристройку к ЮЗ склонам конуса Красный. Здесь же излился основной объём лав.

Характеристики последствий эффузивной деятельности

Количественные данные по площадям, покрытым новыми потоками лавы, их объёмам на каждую дату определений и средним расходам лавы, приведены в таблице и на графике (рис. 2). Объёмы изверженных лав и пирокластики на все даты аэрофотосъёмки определялись по ЦМР. На данном этапе обработки аэрофотоснимков средняя плотность точек ЦМР составляет 350 на 1 км². По нашим оценкам погрешности определения объёмов в этом случае не превышают 2%. Точность определений объёма лав на 6 марта 2013 г. существенно ниже, т. к. оценка мощностей производилась только по относительно редким выступающим элементам подстилающей поверхности. Однако, возможная погрешность для объёма лавовых потоков на 6 марта 2013 г. не должна быть более 7%.

Из нижней половины трещины, расположенной в интервале высот 2150–2239 м, излились маломощные (толщиной от 1 до 4 м), потоки лавы. Объединившись на высоте 2145 м в один поток, лава распространилась вниз по склону вдоль русла существовавшей здесь до извержения промоины на 1900 м до отметки 1874 м. Весь объём лавы этого потока составил 480 000 м³. Небольшое количество лавы излилось из трещины, возникшей в нижней части ЮВ склона конуса прорыва 1941 г. Маломощные (не более 1 м) потоки, практически соприкасаясь, одновременно излились из трещины и, достигнув основания конуса, выплеснулись на поверхность лавового потока из жерл вышерасположенной трещины. Максимальная длина этой группы потоков равна 105 м (в плане). Их общая ширина — 230 м. Объём — не более 12 400 м³.

Лавовое поле Водопадное главным образом сформировалось в первые двое суток извержения, достигнув к 29 ноября 2012 г. площади 5,65 км² и объёма 0,027 км³. К 5 июня 2013 г. лавовое поле увеличилось по площади до 6,17 км², в объёме — до 0,043 км³. Прирост поля произошёл преимущественно за счёт деятельности лавовых бокк, возникших у подножия северного шлакового конуса из группы Набоко.

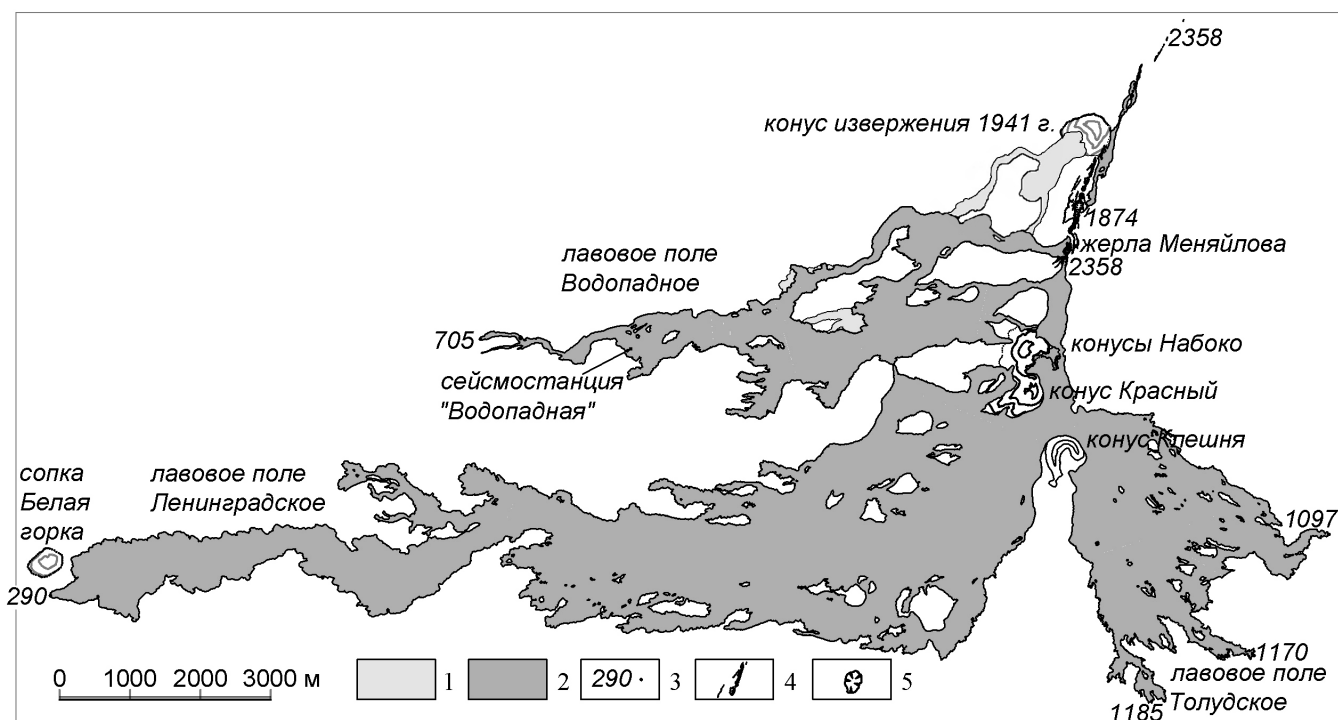


Рис. 1. План расположения трещинной зоны, эксплозивных жерл и лавовых потоков ТТИ 2012–2013 гг. на склоне вулкана Плоский Толбачик (по состоянию на 5 июня 2013 г.): 1 — лавовые потоки прорыва 1941 г.; 2 — лавовое поле ТТИ 2012–2013 гг.; 3 — высотные отметки; 4 — зияющие трещины; 5 — провальные воронки.

Лавовое поле Ленинградское формировалось с первых моментов извержения. К 29 ноября 2012 г. длина поля от жерл Меняйлова по осевой линии составила 10 км, ширина в самом широком месте — 1,6 км. На эту дату площадь поля — 8,67 км², объём — 0,045 км³. Через 14 суток (13 декабря 2012 г.) Ленинградское лавовое поле достигло наибольшей длины — 17,8 км. Его фронт оказался в 480 м к югу от центра кратера сопки Белая Горка. Площадь поля равна 17,04 км², объём — 0,208 км³. К 5 июня 2013 г. площадь поля увеличилась до 22,44 км², объём возрос до 0,397 км³. В отличие от Водопадного поля лавы, образованного несколькими потоками и имеющего наибольшие мощности до 10 м, Ленинградское лавовое поле сформировано множеством наслаивающихся и переплетающихся потоков. Мощности лавового поля меняются от 69 м на участке между конусами Красный и Клешня до 5–15 м на фронте у сопки Белая Горка.

Нагромождение лав между конусом Красный и конусом Клешня привело к образованию ещё одной ветви лавового поля ТТИ 2012–2013 гг. Поток, давший начало формированию Толудского лавового поля, огибая восточные склоны конуса Клешня стал изливаться в ЮВ направлении 25 декабря 2012 г. К 5 июня 2013 г. он имел вблизи конуса Клешня (отметка поверхности 1 585 м) ширину 340 м и мощность до 53 м. На фронте Толудское лавовое поле увеличилось до ширины 3800 м. Отдельные потоки фронтальной части лавового поля спустились до вы-

сот, близких к 1100 м. Длина поля на плане — 4260 м. Площадь — 6,6 км², объём лавы — 0,08 км³.

Границы лавового поля ТТИ 2012–2013 гг. на 5 июня 2013 г. показаны на рис. 1.

Итоговый объём изверженного при ТТИ 2012–2013 гг. эффузивного материала будет определён в дальнейшем по результатам обработки материалов будущих аэрофотосъёмочных работ. В настоящее время возможно лишь предполагать его окончательное значение, исходя из существующих данных. Поскольку средний расход между двумя последними датами измерений (6 марта 2013 г. и 5 июня 2013 г.) составлял 19 м³/с, мы можем утверждать, что до самого конца извержения (17 сентября 2013 г.) расход не превышал эту величину, и, соответственно, предельный итоговый объём лавовых потоков ТТИ 2012–2013 гг. не может быть больше 0,69 км³. Но так как расход к концу извержения неизбежно уменьшался, то наиболее вероятное значение величины этого объёма находится в пределах 0,55–0,65 км³.

Заключение

Наибольшую интенсивность извержение имело в первые двое суток (при среднем расходе лавы 440 м³/с), когда вдоль всей зоны трещин действовало наибольшее количество лавовых жерл. В последующие две недели расход снижался (среднее значение 140 м³/с). Со второй половины декабря 2012 г. по июнь 2013 г. изливание лав происходило

Количественные характеристики Трещинного Толбачинского извержения в период с 29.11.2012 г. по 05.06.2013 г.

Дата получения исходных материалов	Площадь лавовых потоков, км ²	Объём лавы, км ³	Расход лавы, м ³ /с
29 ноября 2012 г.	14,46	0,072	440
13 декабря 2012 г.	22,83	0,243	140
06 марта 2013 г.	28,74	0,370	18
05 июня 2013 г.	35,23	0,520	19

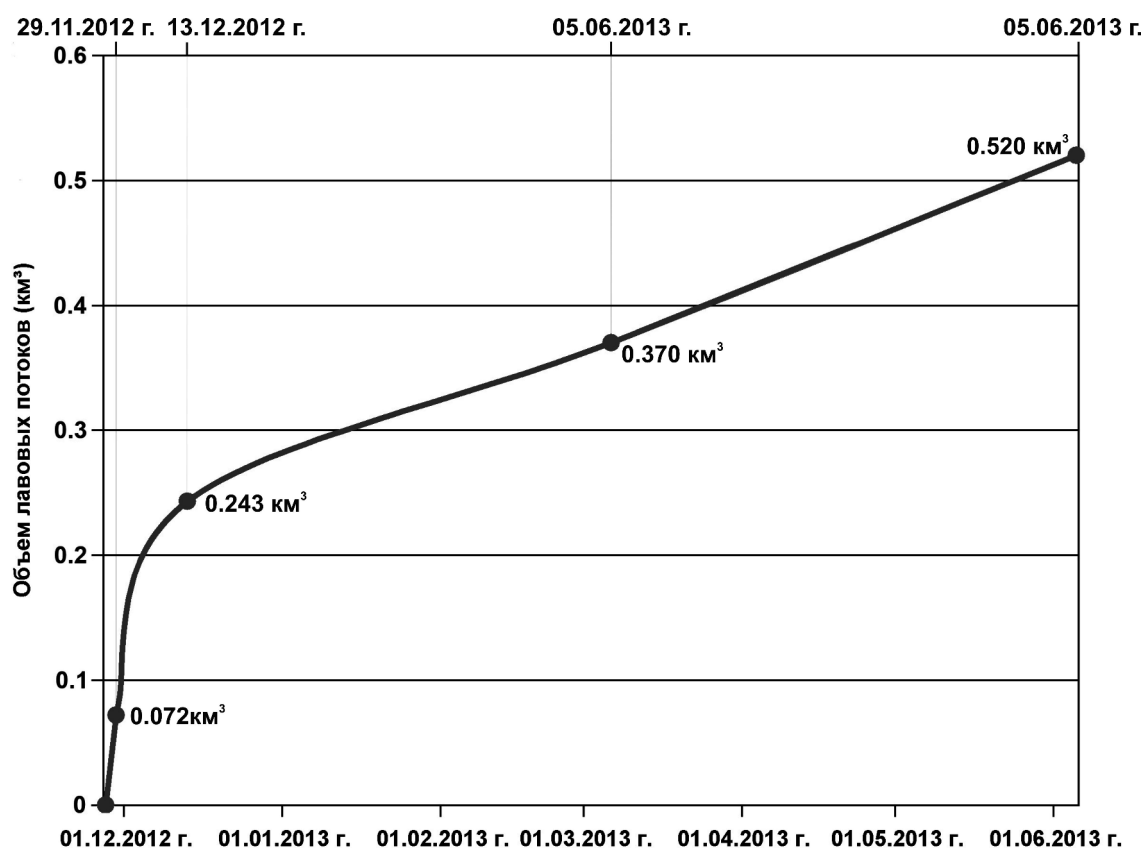


Рис. 2. График изменения объёма лавовых потоков за первые полгода ТТИ 2012–2013 гг.

почти равномерно — с расходом близким к 18 м³/с. Извержение было преимущественно эффузивным. За 6 месяцев излилось 0,52 км³ лавы, которой была покрыта поверхность площадью 35,23 км². Объём пирокластики на удалении до 1,5 км от зоны новых трещин не превысил 0,1 км³.

ТТИ 2012–2013 гг., происходившее, как и БТТИ 1975–1976 гг., на склоне Плоского Толбачика, и в некоторых чертах напоминающее события 36-летней давности, имеет ряд отличительных особенностей. Так, колодеобразный провал в малой вершинной кальдере Плоского Толбачика, увеличившийся в объёме в период 1975–1976 гг. до 0,347 км³ (с 0,022 км³ перед БТТИ) за время Тре-

щинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. не изменился.

Трещинная зона ТТИ 2012–2013 гг. образовалась практически мгновенно. На протяжении всей зоны трещин первое время одновременно действовало множество explosивно-эффузивных жерл. В начальный период БТТИ центры извержений возникали последовательно, как в пространстве, так и во времени — на протяжении более 2-х месяцев (с 6 июля по 17 сентября 1975 г.) и на сравнительно коротких поверхностных трещинах (200–600 м), мигрируя сначала в районе Северного прорыва с ЮЗ на СВ в 2 км зоне, а затем локально в районе Южного прорыва (в 10 км к ЮЗ).

ТТИ 2012–2013 гг. имело преимущественно эффузивный характер, при этом вокруг жерл трещинной зоны возникло множество мелких шлаковых образований высотой до 15 м и группа конусов Набоко, высотой до 123 м, с общим объемом $0,02 \text{ км}^3$. Извержение Северного прорыва БТТИ характеризуется мощной эксплозивной деятельностью, с образованием шлаковых конусов высотой до 300 м и объемом пирокластики в конусах и на прилегающих территориях около $0,5 \text{ км}^3$. Потоками лавы Северного прорыва была покрыта площадь $8,86 \text{ км}^2$ с объемом $0,223 \text{ км}^3$.

Напротив, извержение Южного прорыва БТТИ имело ярко выраженный эффузивный характер и продолжалось 15 месяцев. Это привело к образованию лавового покрова площадью $35,87 \text{ км}^2$ с объемом $0,968 \text{ км}^3$ и небольшого шлакового конуса высотой 165 м, объемом $0,012 \text{ км}^3$. Как мы можем видеть, площадь лавового поля ТТИ 2012–2013 гг. на 5 июня 2013 г. ($35,23 \text{ км}^2$), почти соответствует таковой для Южного прорыва БТТИ — при почти вдвое меньшем ($0,52 \text{ км}^3$) объеме лав. Распространение вдвое меньшего объема лав на той же площади произошло в связи с существенно большими уклонами подстилающей поверхности района нового извержения.

Объяснение только последней особенности ТТИ 2012–2013 гг. лежит на поверхности. Остальные, по всей вероятности, являются проявлениями глубоких различий в механизме извержения. По мнению авторов настоящей статьи, главная отличительная особенность ТТИ 2012–2013 гг. по сравнению с БТТИ заключается в характере внедрения магматического вещества в трещинную зону района извержения. Если для БТТИ этот процесс был растянут во времени так, что сейсмические сигналы, связанные с внедрением магмы были зарегистрированы ещё за 9 дней до извержения, то ТТИ 2012–2013 гг. началось через 15 часов после регистрации сейсмических предвестников. Отличительной особенностью этих предвестников является расположение их эпицентров не в месте извержения (как в случае БТТИ), а в ЮВ секторе постройки вулкана Плоский Толбачик (в 3–5 км от жерл Меняйлова) [3].

Также следует ещё раз отметить контраст преимущественно эксплозивного начального периода БТТИ (Северный прорыв) и сугубо эффузивной деятельности первых дней ТТИ 2012–2013 гг. Расход лавы за первые двое суток ТТИ 2012–2013 гг. на порядок превышает расход твёрдого вещества при формировании первого шлакового конуса БТТИ [2]. Причем в это же время (27–28 ноября 2012 г.) происходит огромный выброс SO_2 — около 10^4 тонн [1]. Сочетание относительно спокойного излияния лавы (коэффициент эксплозивности около 3% [1]) и колоссальной эмиссии газов (SO_2) при ТТИ 2012–2013 гг. является парадоксальным.

По всей видимости, отделение значительной части газовой составляющей магмы произошло под

землей. По предположению авторов первоначальное внедрение магмы с большой глубины произошло в стороне от района извержения в ослабленный приповерхностный горизонт. Дегазация в пространство этого горизонта произошла вследствие падения давления при быстром подъёме магмы. Свидетельством высокой скорости подъёма магматического расплава являются структурные особенности пород ТТИ 2012–2013 гг. [4]. Лавинообразно растущее давление газов вызвало латеральное движение дегазированного магматического расплава по ослабленному магмопроводящему горизонту.

Морфологические особенности ТТИ 2012–2013 гг. указывают на то, что его начальный период происходил по сценарию гидравлического удара. По характеру трещинной зоны мы можем заключить, что фронт данного гидравлического удара был локализован там, где она имеет наибольшую ширину и где произошли излияния первых лавовых потоков — в районе жерл Меняйлова. В этом же месте 27 ноября 2012 г. в 17:15 было зарегистрировано сильное ($K_s > 9$) поверхностное землетрясение, охарактеризованное в работе [1] как свидетельство начала извержения. Давление на фронте ударной волны оказалось достаточным для образования алмазов, обнаруженных в лавах ТТИ 2012–2013 гг. [5]. В дальнейшем, при раскрытии трещинной зоны, ареал излияния магматического вещества распространился по ней на юг вниз по склону до уровня 1700 м, где уже при более спокойном характере выноса были сформированы наиболее крупные лавовые потоки и конусы.

Список литературы

1. Гордеев Е. И., Муравьев Я. Д., Самойленко С. Б. и др. Трещинное Толбачинское извержение в 2012–2013 гг. Первые результаты // ДАН. 2013. Том. 452. № 5. С. 562–566.
2. Большое трещинное Толбачинское извержение (Камчатка 1975–1976) / Отв. ред. Федотов С. А. М.: Наука, 1984. 637 с.
3. Ермаков В. А., Гонтовая Л. И., Сенюков С. Л. Предварительная модель нового Толбачинского извержения (50 лет ИВиС), полученная по комплексу геолого-геофизических данных / Материалы региональной конференции, посвященной дню вулканолога 29–30 марта 2013 г. / Отв. редактор Гордеев Е. И. // ИВиС ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский. 2014. С. 63–72.
4. Волынец А. О., Мельников Д. В., Якушев А. И. Первые данные о составе продуктов трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС (Камчатка) // ДАН. 2013. Т. 452. № 3. С. 303–307
5. Аникин Л. П., Сокоренко А. В., Овсянников А. А., Сидоров Е. Г., Дунин-Барковский Р. Л., Антонов А. В., Чубаров В. М. Находка алмаза в лавах Толбачинского извержения 2012–2013 гг. / Материалы региональной конференции, посвященной дню вулканолога 29–30 марта 2013 г. / Отв. редактор Гордеев Е. И. // ИВиС ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский. 2014. С. 20–23.