

УДК 551.21.032

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОСТИ ВУЛКАНА МАЛЫЙ СЕМЯЧИК (КАМЧАТКА) ПО МОРФОДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ КРАТЕРА ТРОИЦКОГО

© 2013 И.Ю. Свирид^{1, 2}, А.В. Шевченко^{1, 2}, В.Н. Двигало¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;
e-mail: svirid@kscnet.ru

²Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга,
Петропавловск-Камчатский, 683032

Представлены результаты исследования кратера Троицкого (вулкан Малый Семячик), полученные на основе фотограмметрической обработки и дешифрирования аэрофотографических материалов, начиная с аэрофотоснимков 1946 и 1950 гг. Данное исследование является первым, охватывающим почти 70-летний период научных наблюдений кратера. Морфодинамический анализ выполнен настолько детально, насколько это позволяет наличие аэрофотосъемочных материалов и данных предыдущих исследований. Получены точные морфометрические характеристики кратера, определены неизученные ранее параметры кратерного озера. Установлено, что с 1950 по 2012 гг. уровень озера повысился на 53.7 м. В результате обработки наиболее детальных аэрофотоснимков произведена оценка объема материала, осыпавшегося со стенок кратера. Вклад осыпей в прирост объема озера с 1968 по 2012 гг. составляет до 17%. В процессе исследования были выявлены факты, указывающие на возможную взаимосвязь активности вулканов Малый Семячик и Карымский.

Ключевые слова: кратерное озеро, фотограмметрия, морфометрия, анализ морфодинамики, корреляция активности.

ВВЕДЕНИЕ

Малый Семячик относится к Карымской группе вулканов и расположен на юге центрального участка Восточного вулканического пояса Камчатки. Координаты центра активного кратера: 54°07' с.ш., 159°39' в.д. (рис. 1). Постройка вулкана представляет собой простирающийся на 3 км с северо-востока на юго-запад хребет, образованный слиянием трех последовательно сформированных вулканических конусов. Современная активность вулкана сосредоточена в кратере Троицкого – южном кратере его юго-западного конуса.

Уникальность вулкана Малый Семячик, имеющего в активном кратере одно из самых кислых в мире озер, условия образования которого до сих пор остаются невыясненными, вызывает особый интерес среди исследователей камчатских вулканов (Гавриленко и др., 1993).

Первым исследователем, обратившим внимание на данный вулкан, был К. Дитмар (1901). В своей работе он описывает состояние Малого

Семячика в 1852 и 1854 гг. и сообщает об интенсивном выделении пара в южном секторе вершины усеченного конуса исполинского вулкана, за который он принял хребет из трех конусов. Со слов местных жителей и по наблюдениям отложений К. Дитмар заключает, что в самом начале XIX в. произошло сильнейшее извержение вулкана, которое привело к обрушению его вершины и оказало большое влияние на прилегающие территории.

В 1932 г. П.Т. Новограбленов (1932) характеризует Малый Семячик как угасший вулкан. В 1938 г. вулкан издали наблюдали В.И. Влодавец и В.Д. Троицкий (Влодавец и др., 1948). Признаков активности в то время ими также не было обнаружено.

Научные наблюдения кратера проводятся в течение почти 70 лет. Его активность за это время сводилась в основном к термальной разгрузке через кратерное озеро и сольфатарно-фумарольной деятельности.

В работе (Влодавец, Пийп, 1957) указаны годы пепловых извержений: 1851, 1852, 1945-1946

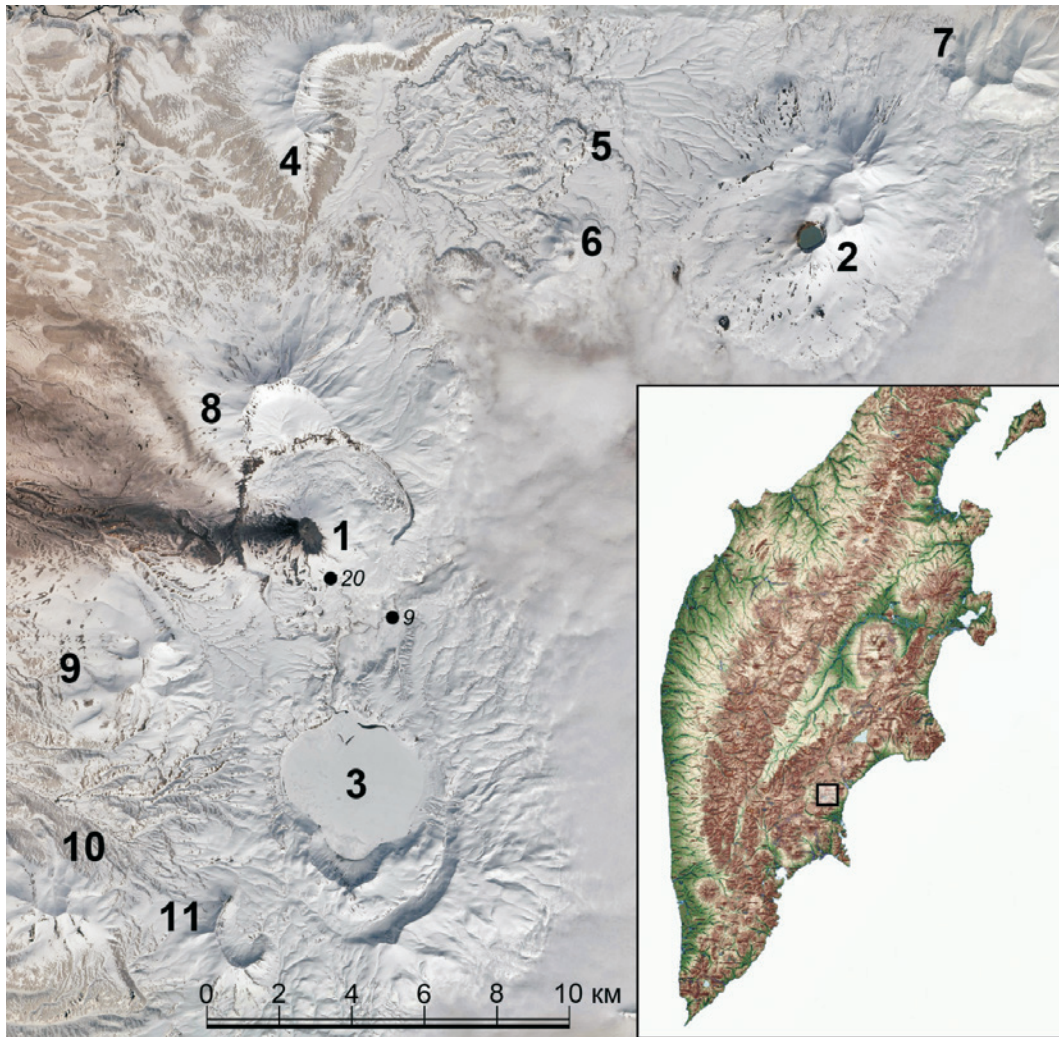


Рис. 1. Вулканы Карымского вулканического центра: 1 – Карымский, 2 – Малый Семячик, 3 – кальдера Академии Наук, 4 – Соболиный, 5 – Ступенчатый Бастион, 6 – Сухой, 7 – Березовый, 8 – Двор, 9 – Раз-
 латый, 10 – Крайний, 11 – Белянкина. Залитыми кружками обозначены грунтовые реперы из работы (Ма-
 гуськин, Шароглазова, 1992). Спутниковый снимок 20.03.2013 г. Landsat 8. На врезке показано географиче-
 ское положение территории на снимке.

и 1952 гг. Однако, следует с большой осторожностью отнестись, по крайней мере, к указаниям на 1851 и 1852 гг. Сведения об этих извержениях В.И. Влодавцев и Б.И. Пийп приводят со ссылкой на работу (Дитмар, 1901), но в ней сообщается лишь, что в 1851 г. в с. Мильково выпал пепел «Семячика» без указания на конкретный вулкан¹, а описывая состояние Малого Семячика во время экскурсии 1852 г. К. Дитмар сообщает о сильнейшем извержении клубов пара. Более вероятной трактовкой «извержения» 1852 г., приведенной также в работе (Селянгин, Брайцева, 1991), авторам настоящей статьи представляется интенсивная фумарольная деятельность.

В работе (Слезин и др., 1971) предполагается также одно извержение, произошедшее в период

с 1946 по 1950 гг. и приведшее к образованию взрывной воронки в районе северо-восточного берега кратерного озера

КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МОРФОДИНАМИКИ КРАТЕРА ТРОИЦКОГО

В 1946 г. В.Д. Троицким, В.И. Влодавцем и А.И. Морозовым впервые было совершено восхождение на вулкан Малый Семячик. В результате этого восхождения ими были обнаружены и описаны кратеры на вершине вулкана: Восточный, Средний и Троицкого². В кратере Троицкого было обнаружено термальное озеро с развитой фумарольной деятельностью на осыпях

¹Названия вулканов в работе К. Дитмара (1901) отличаются от современных. Малый Семячик называется в ней Большим Семячиком, а Малым Семячком К. Дитмар называет Карымский вулкан.

²Название было дано В.И. Влодавцем и А.И. Морозовым в честь В.Д. Троицкого – единственного из участников восхождения, отважившегося на спуск в этот кратер.

вдоль северо-восточного берега, которое, вследствие его необычного цвета, получило название оз. Зеленое (рис. 2).

На основе собственных наблюдений, рассказов местных жителей, а также анализа карты 1943 г., выполненной Военно-топографическим управлением генерального штаба СССР, исследователи заключили, что в период с 1943 г. до первого посещения кратера в 1946 г. произошло извержение, которое привело к значительному углублению кратера и образованию в нем озера (Влодавец и др., 1948).

Данное заключение стало отправной точкой для большинства последующих работ, но, по мнению авторов настоящей статьи, оно недостаточно обосновано. С целью более детальной постановки проблемы приведем цитату:

«Из рассказа местного охотника Ф.М. Григорьева, который был на вершине вулкана последний раз 12 июля 1942 г., следует, что в то время на месте кратера Троицкого было небольшое углубление, заполненное снегом, а в Среднем кратере росла трава. Об отсутствии признаков вулканической активности говорит и карта Камчатки, составленная по работам 1943 г., где Малый Семячик назван горой. Все это позволяет

утверждать, что извержение кратера Троицкого произошло в самое недавнее время.

Следы этого извержения в виде свежих покровов из лапилли и уничтоженной растительности наблюдаются достаточно широко, с чем, конечно, должны быть связаны как вертикальность стенок кратера, так и появление фумарол, а также концентрация глыб лавы и крупнообломочного материала на северо-восточном и восточном склонах кратера.

Основываясь на засыпанности лапилли ледника в Восточном кратере, ... на наличии эксплозивных глыб на северо-восточном внешнем склоне кратера Троицкого ... можно думать, что в это же время произошло и извержение Малого Семячика.» (Влодавец и др., 1948, с. 27)

При внимательном рассмотрении упомянутой карты 1943 г. становится очевидно, что морфология вулкана, отображенная на ней, не имеет существенных отличий от современной (рис. 2, 3), но вместе с тем, отметки высотных точек значительно и бессистемно отличаются от высотных отметок на более поздних картах Малого Семячика. Это несоответствие может быть объяснено разреженной геодезической сетью 1940-х гг. и неточностью метода

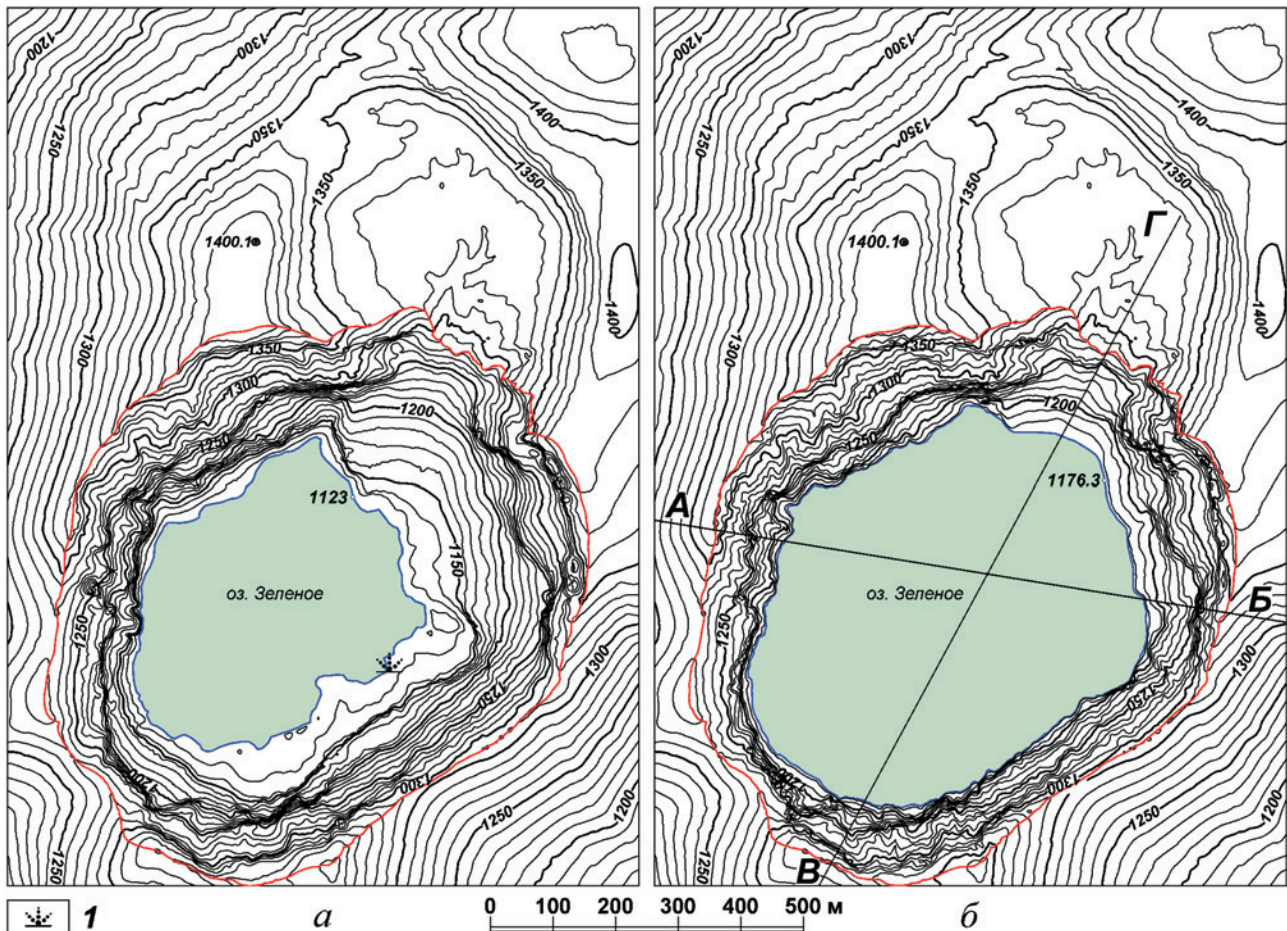


Рис. 2. Карты кратера Троицкого: а – 1950 г., б – 2012 г. Составлены В.Н. Двигало. А-Б и В-Г – сечения, представленные на рис. 5.

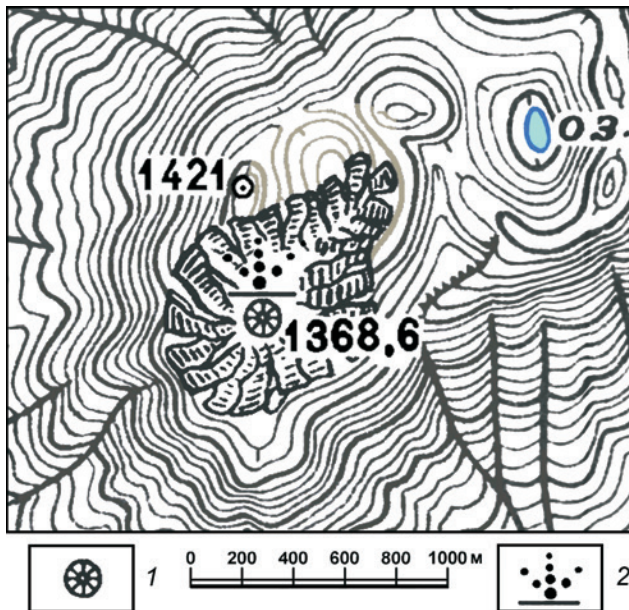


Рис. 3. Фрагмент карты вулкана Малый Семячик 1943 г.: 1 – вулканический кратер, 2 – фумарола. Кратер Троицкого выделен более темным цветом, кратер Средний – светлым. На дне Восточного кратера небольшое озеро.

дифференцированных процессов, который применялся в то время при составлении карт. Высотная отметка точки, расположенной на гребне кратера Среднего, имеет значение 1421 м (приблизительно соответствующее современному), а высотная отметка, изображенная на дне кратера Троицкого, равна 1368.6 м. То есть, исходя из данной карты, разница между ними составляет всего 52.4 м, чего быть не может по следующим причинам: во-первых, кратер Троицкого изображен условным знаком глубокого обрыва; во-вторых, с северной стороны этот обрыв начинается от уровня дна открытой части кратера Среднего, глубина которого уже не менее 100 м, что можно легко просчитать по горизонталям, сечение которых 20 м. Нетрудно также заметить, что высотная отметка, указанная на дне кратера (1368.6 м) не имеет точки, к которой она должна относиться. Скорее всего (если только она не является результатом грубой ошибки), высотная отметка относится не ко дну кратера, а к его восточному гребню, так как ее значение приблизительно соответствует значениям высот данного гребня на современных картах. Таким образом, исходя из анализа карты, можно заключить, что во время ее составления (1943 г.) кратер Троицкого уже имел значительную глубину³.

³Год выполнения аэрофотосъемки, на основе которой составлена карта, изданная в 1943 г., точно не известен. Существует вероятность, что карта могла быть составлена по материалам более ранних аэрофотосъемочных работ.

Если предположить, что в период с 1943 по 1946 гг. действительно произошло эксплозивное событие, приведшее к столь значительному изменению объекта, что на месте небольшого углубления образовался кратер с почти отвесными стенками, то следует представлять масштабы столь мощного извержения, следами которого не могут быть лишь покровы из лапилли и концентрации лавовых глыб на северо-восточном и восточном склонах кратера. Подобное извержение должно было привести к гораздо более значимым последствиям, таким как изменение морфологии вершины вулкана и значительному воздействию на соседние кратеры и близлежащие территории.

Наличие покровов из лапилли в соседних кратерах и эксплозивных глыб с одной стороны склона свидетельствуют о сравнительно небольшом извержении, которое не могло так сильно повлиять на морфологию кратера и его глубину, и, скорее всего, происходило ранее указанного в работе (Влодавец и др., 1948) периода. Лапилли, покрывавшие снежник в Восточном кратере, могли быть продуктом более ранних извержений и иметь осыпное происхождение.

На карте 1943 г. вулкан Малый Семячик действительно назван горой, но данная карта не является свидетельством отсутствия признаков вулканической активности, так как на дне кратера Троицкого изображена фумарола.

Особый интерес представляет то, что на карте 1943 г. в кратере Троицкого отсутствует озеро. Трудно представить, чтобы картографы могли ошибиться, не заметив озеро на материалах аэрофотосъемки, но при этом разглядели на дне кратера фумаролу. Исходя из этого, мы можем заключить, что озера в момент аэрофото-топографической съемки для создания карты 1943 г. действительно не было. Таким образом, достаточно глубокое термальное озеро в кратере Троицкого образовалось за весьма непродолжительное время в интервале между аэрофотосъемочными работами генштаба СССР и полевыми наблюдениями сотрудников Ключевской вулканической станции, то есть в первой половине 1940-х гг.

В 1946 г. кратер Троицкого был также исследован Ю.С. Доброхотовым (1949, 1951) посредством аэрофотограмметрического метода. К сожалению, из-за недостатка времени планово-высотная подготовка объекта Ю.С. Доброхотовым не была выполнена, поэтому все полученные им морфометрические данные являются относительными и не могут быть использованы для сопоставления с определенными впоследствии характеристиками.

Аэрофильмы съемки 1946 г. до нас не дошли, поэтому в настоящее время возможно только визуально оценить состояние кратера и озера на 1946 г. по единственному опубликованному

в работах (Влодавец, Пийп, 1957; Заварицкий, 1955; Святловский, 1958) снимку (рис. 4а). Принимая во внимание этот снимок, сведения об извержениях вулкана Малый Семячик в 1945-1946 гг., приведенные в перечисленных работах, а также в работах (Влодавец, 1949; Влодавец и др., 1948; Заварицкий и др., 1954) следует подвергнуть детальному анализу.

Приведем цитаты: «Нам сообщили (метеоролог А.Ф. Никитин и др.), что ... с июля 1945 г. Малый Семячик начал «дымить» ... Самые сильные выделения газов (по словам А.Ф. Никитина — «извержения») происходили в сентябре и октябре 1945 г. ... Извержения темных туч (с пеплом?) наблюдались два раза. ... 14 августа (1946 г.) в 20 час. поднялся над кратером Малого Семячика не особо высоко черный «дым». Такое же явление наблюдалось и 16 августа 1946 г. около 21 часа 30 мин. (Последние сведения получены от А.Я. Дерешева.» (Влодавец и др., 1948, с. 19). «14 августа 1946 г., по рассказам жителей ближайшего селения, как будто бы было эксплозивное извержение вулкана.» (Заварицкий, 1955, с. 40). «Последнее извержение вулкана в 1945-1946 гг. было эксплозивным.» (Святловский, 1958, с. 50). «1945-1946 гг. С осени до весны отмечались одиночные пепловые извержения. 1952 г. В начале ноября — пепловое извержение. Тип извержений. Вулканский.» (Влодавец, Пийп, 1957, с. 51). «В 1945-1946 гг. местные жители наблюдали взрывную деятельность вулкана. ... Очевидно, новый кратер с озером образовался в результате извержений 1945-1946 гг.» (Заварицкий и др., 1954 с. 53).

Поскольку аэрофотосъемка вулкана Малый Семячик производилась Ю.С. Доброхотовым 27 августа 1946 г. на ее материалах должны быть запечатлены следы эксплозивных извержений, происходивших со слов местных жителей за считанные дни до съемки. Вопреки этому, на снимке мы не находим ни эксплозивных воронок, ни следов заплесков волн цунами в озере. Это — серьезный повод для сомнений. Сравнивая процитированные работы, легко заключить, что только в работе (Влодавец и др., 1948) приводятся сведения, собранные непосредственно от очевидцев, приводимые же в остальных — взяты из данной работы со ссылкой на оригинальный материал. Внимательное прочтение оригинала приводит нас к выводу о том, что уверенно говорить можно лишь о парогазовой деятельности Малого Семячика в 1945-1946 гг. Также следует обратить внимание, что об извержениях 14 и 16 августа 1946 г. сообщал только один из опрошенных местных жителей — А.Я. Дерешев.

Об извержении 1952 г., упоминается исключительно в работе (Влодавец, Пийп, 1957) без указания источника информации. Видимые следы извержения отсутствуют на снимках

1968 г. при их сравнении со снимками 1950 г. (рис. 4б, 4в).

В 1968-1978 гг. большим коллективом из сотрудников Института вулканологии и приглашенных специалистов производились работы по комплексному геологическому исследованию Карымского вулканического центра. В процессе этих работ были получены радиоуглеродные датировки и на их основе проведена реконструкция истории формирования вулканов, находящихся на его территории (Брайцева и др., 1980). Ю.Б. Селянгиным (1987) было выполнено геолого-морфологическое картирование вулкана Малый Семячик. Также, на основании радиоуглеродного определения возраста самых верхних покровов постройки вулкана Малый Семячик, им было выдвинуто предположение об образовании кратера Троицкого около 400 лет назад в результате мощного взрыва, непосредственно вслед за которым последовал период длительного затишья. Более молодых отложений тефры, которые должны были образоваться на рубеже XVIII и XIX вв. в результате упоминаемого К. Дитмаром (1901) извержения, обнаружено не было.

А.П. Горшков с соавторами (Горшков и др., 1975) проводили систематические наблюдения в кратере Троицкого с 1969 по 1973 гг. По результатам непосредственных батиметрических измерений (при помощи капроновой веревки с грузом) была установлена максимальная глубина озера — 140 м, также, с привлечением геодезических измерений, произведенных М.А. Магуськиным в 1971 г., была составлена схематическая карта кратера и определен уровень озера — 1152.2 м. Было установлено, что в период наблюдений уровень воды в озере изменялся незначительно по причине компенсации процессов питания (атмосферное осадконакопление, поступление влаги с донной фумаролой) процессами разгрузки (испарение, скрытый сток). В работе (Горшков и др., 1975) приводится предположение, что уровень воды остается постоянным вследствие изменения вмещающих пород водами озера, приводящего к уменьшению их проницаемости, а при повышении воды в озере происходит скрытая разгрузка сквозь еще не измененные породы и уровень восстанавливается.

Г.М. Гавриленко (1998, 2000, 2003), полагая, что основные морфометрические параметры озерной чаши со времени его первого описания в 1946 г. практически не менялись «вследствие неизменности формы дна кратера» (Гавриленко, 2000, стр. 22), заключил, что изменения максимальной глубины свидетельствуют, вероятно, о непостоянстве уровня поверхности озера и объема его вод. Предполагая отметку самого глубокого участка дна кратера Троицкого неизменной и равной 1050 м, и распространяя действие

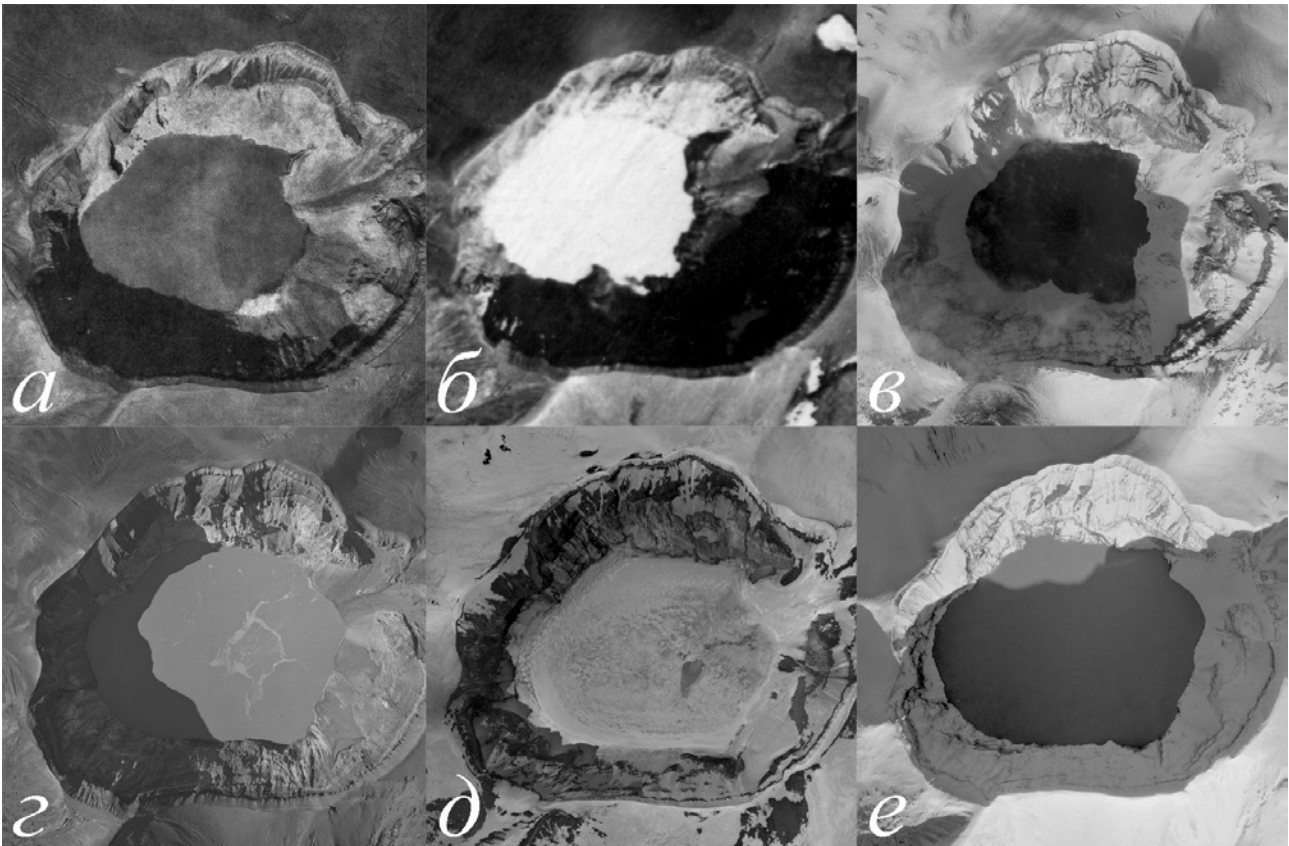


Рис. 4. Аэрофотоснимки кратера Троицкого: *а* – август 1946 г., *б* – июнь 1950 г., *в* – декабрь 1968 г., *г* – сентябрь 1986 г., *д* – май 1996 г., *е* – октябрь 2012 г.

своих предположений во времени, он приходит к выводу, что в 1946 г. глубина озера должна была равняться 154 м. Далее Г.М. Гавриленко приводит результаты замеров максимальной глубины: в 1971 г. – 140 м, в 1986 г. – 132 м, в 1993 г. – 117 м. На основании того, что глубина озера, по его мнению, уменьшилась со 154 м в 1946 г. до 117 м в 1993 г., а также полагая морфологию кратера постоянной, Г.М. Гавриленко (2000, 2003) заключает, что уровень озера постоянно снижается.

Тем не менее, ранее Ю.Б. Слезиным с соавторами (Слезин и др., 1971) были выявлены достаточно значимые морфологические изменения кратера, произошедшие с 1946 до 1950 г. На основе сравнения аэрофотоматериалов 1946 и 1950 гг. (рис. 4*а* и 4*б*) и непосредственных наблюдений было предположено, что в это время произошло извержение, в результате которого в СВ части кратера на месте группы fumarol образовалась воронка диаметром около 200 м, следствием чего стало увеличение площади озера на 17000 м² (Слезин и др., 1971). Таким образом, с 1946 по 1950 гг. имело место значительное изменение морфометрических параметров озерной чаши.

В.Н. Двигало в июле 1986 г. впервые произвел сводную фотограмметрическую обработку аэрофотоматериалов по вулкану Малый Семя-

чик (Двигало, 2000), который, как отмечалось, «в обзорах о деятельности вулканов упоминается редко», и обнаружил «основания обратить на него более пристальное внимание» (Двигало и др., 1988, с. 13). На вулкане Малый Семячик им были выявлены признаки активизации: значительное повышение уровня и появление пятен на поверхности озера начиная с 1984 г. Благодаря своевременно полученным данным научный интерес к вулкану был возобновлен, и уже «в сентябре 1986 г. были проведены исследования непосредственно на озере, и было установлено, что упоминавшееся пятно (пятна) – это поверхностные проявления подводной вулканической активности» (Двигало и др., 1988, с. 14).

В 2000 г. эта работа получила продолжение – были обработаны материалы с 1974 по 1995 г. и определены морфологические предвестники активности вулкана в данном интервале времени. Необходимость применения стереофотограмметрического метода в вулканологии получила обоснование на практике: «приходилось не раз убеждаться в необходимости детальнейшей фотограмметрической обработки всех полученных стереопар кратеров активных вулканов, поскольку только высокоточная фотограмметрия позволяет своевременно выявить незаметные для невооруженного глаза внешние проявления вулканического процесса» (Двигало, 2000, с. 3).

МОРФОДИНАМИКА КРАТЕРА ТРОИЦКОГО НА ОСНОВЕ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Авторами настоящей статьи приблизительный уровень озера в 1946 г. был определен путем визуального сопоставления контура озера и элементов рельефа кратера на снимке 1946 г. (рис. 4а) и стереомодели, построенной по снимкам 1968 г. (рис. 4б). Очевидно, что плоскость зеркала озера на этих снимках находится на почти одинаковом уровне: в 1946 г. не более чем на 1 м ниже, чем в 1968 г. Уровень озера в 1968 г. был определен фотограмметрически и составил 1139.1 м. Уровень воды в 1946 г., таким образом, приблизительно соответствовал 1138 м. Уровень озера в 1950 г. был также определен фотограмметрическим методом и составлял 1123 м. Следовательно, уровень поверхности озера с 1946 по 1950 гг. снизился на величину около 15 м.

Отрицательная форма рельефа, проинтерпретированная в работе (Слезин и др., 1971) как взрывная воронка, имеет крутые борты высотой около 50 м и пологое дно. По всей видимости, в образовании этой формы участвовали обвальные, или даже провальные процессы. Интересной особенностью является ее расположение в непосредственной близости от fumarола, существовавшей практически на одном и том же месте и имевшей совершенно одинаковый шлейф как в 1946 г., так и в 1950 г., то есть, судя по аэрофотоснимкам, событие, отмеченное как извержение, не оказало влияния на режим fumarольной деятельности. Принимая во внимание данные обстоятельства, наиболее вероятным происхождением этой отрицательной формы следует считать гравитационное, а не взрывное. Также, авторы настоящей статьи считают нужным привести полученное на основе фотограмметрических измерений увеличение площади поверхности озера вследствие изменения формы кратера в 1946-1950 гг. На уровне⁴ 1138 м величина этого увеличения составляет 8000 м².

Между изменением формы кратерной чаши и понижением уровня озера могла существовать причинно-следственная связь в том случае, если имело место увеличение подповерхностного стока на новообразованной площади дна, сложенной еще не измененными от контакта с термальным кислотным раствором породами.

По результатам фотограмметрической обработки аэрофотоматериалов разных лет была

⁴В работе (Слезин др., 1971) отметка уровня, для которого было получено увеличение площади поверхности оз. Зеленого на 17000 м² не приводится, однако это значение в 1.5-2 раза превышает величины действительных изменений площади сечений для всех уровней, затронутых образованием данной отрицательной формы.

выявлена общая тенденция к повышению уровня озера, которую мы можем проследить и наглядно, сравнивая снимки 1950, 1968, 1986, 1996 и 2012 гг. (рис. 4). Элементы береговой линии озера, хорошо заметные на снимке 1968 г. (рис. 4б), не видны на более поздних снимках, так как уже находятся под водой. Тенденция к повышению уровня воды свидетельствует о преобладании процессов питания озера над процессами разгрузки.

Также в процессе анализа аэрофотоснимков было установлено, что на внутренних стенках кратера Троицкого постоянно происходят обвалы и осыпания, материал которых, поступая в воды озера, влияет на морфологию его дна и, следовательно, на уровень его поверхности.

В настоящей работе определены объемы надводной части чаши кратера на 1968 и на 2012 гг., относительно одной плоскости, соответствующей более высокому уровню воды 2012 г. Они равны соответственно 91000000 м³ и 92500000 м³. Разница между объемами равна 1500000 м³, что и составляет величину объема осыпного материала, отложенного на дне кратера с 1968 по 2012 гг. Уровень воды в озере с 1968 по 2012 гг. поднялся с отметки 1139.1 м до 1176.3 м. Объем прироста воды в озере составил 9000000 м³, следовательно, объем осыпного и обвального материала за 44 года составляет 17% от объема прироста воды. Следует отметить, что за счет разрыхленности осыпавшейся со стенок кратера породы реальный вклад осыпей и обвалов в прирост объема воды мог быть несколько меньшим.

Уровень озера не может зависеть лишь от объема вод и от величины максимальной глубины, но зависит и от морфологических изменений дна кратера. Поэтому при оценке динамики глубины озера необходимо кроме процессов питания и разгрузки озера учитывать и материал, осыпавшийся в воды озера за исследуемый период. С 1950 по 2012 гг. крупных обвалов, приводивших к заметным изменениям морфологии стенок кратера, не выявлено. Осыпи и небольшие обвалы происходили постоянно.

При выполнении настоящей работы были построены объемные ориентированные модели на все даты аэрофотосъемки⁵ (начиная с 1950 г.),

⁵Снимки 1950 г. дошли до нас в виде бумажных отпечатков, заметно переэкспонированных при изготовлении, в результате чего ЮВ сектор кратерной стенки сильно затемнен вплоть до потери детальности (рис. 4б). Вследствие этого цифровая модель рельефа (ЦМР) на 1950 г. построена по разреженной сети пикетов и является закругленной по сравнению с ЦМР на последующие даты. Данное обстоятельство приводит к несопоставимости ЦМР на 1950 г. с более поздними. По этой причине подсчет измененный объема кратерной чаши ведется от 1968 г. Тем не менее, точность ЦМР на 1950 г. удовлетворяет требованиям для составления карты (рис. 2).

составлены карты кратера на 1950 и 2012 гг. (рис. 2а и 2б) и профили кратера на 1950, 1968 и 2012 гг. (рис. 5). Они наглядно отображают произошедшие изменения морфологии кратера и повышение уровня поверхности озера.

На основе измерений и определений, выполненных на даты с 1946 по 2012 г. были составлены таблица и график уровня поверхности озера (рис. 6). На графике показано, что на общем фоне роста уровня озера с 1950 г., в среднем на 0.9 м в год, также происходят резкие повышения поверхности воды, связанные с активизацией вулкана: с 1968 по 1971 г. уровень воды повысился на 13 м, с 1981 по 1986 г. — на 8.7 м, указанные периоды по результатам комплексных исследований (Гавриленко и др., 1993; Двигало и др., 1988; Фазлуллин и др., 1998) являются периодами повышенной активности Малого Семячика.

ОБРАТНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ АКТИВНОСТИ ВУЛКАНОВ МАЛЫЙ СЕМЯЧИК И КАРЫМСКИЙ

С целью определения возможной причины резких колебаний уровня оз. Зеленого авторами настоящей статьи было проведено их сопоставление по времени с другими событиями в Карымском вулканическом центре. Сопоставление изменений уровня кратерного озера вулкана Малый Семячик с деятельностью вулкана

Карымского позволило заметить возможную взаимосвязь между ними. Резкие повышения уровня озера, свидетельствующие об активизации вулкана Малый Семячик, в основном соответствуют периодам снижения либо прекращения активности на Карымском вулкане, и напротив, стабилизации уровня озера либо его понижения совпадают по времени с периодами активизации вулкана Карымского.

Предположение о существовании у данных вулканов единой очаговой зоны выдвигалось А.П. Горшковым (1975) на основе материалов геофизических работ. К выводу о едином источнике магматического вещества всего Карымского вулканического центра также пришел и О.Б. Селянгин в результате анализа геологических исследований: «данные тефрохронологии о непрерывности вариаций состава пород... фактически свидетельствуют о деятельности единого источника магмы, эволюционирующей в соответствии с режимом вулканического процесса. ...закономерное соподчинение разномасштабных пульсаций-ритмов вулканизма и направленность изменения его основных параметров свидетельствуют, что плиоцен-четвертичный вулканизм центра — это действительно единый процесс ..., а не просто сумма независимых вспышек активности.» (Селянгин, 1987, с. 42).

Как было отмечено ранее, в кратере Троицкого в 1943 г. отсутствует озеро и проявляется

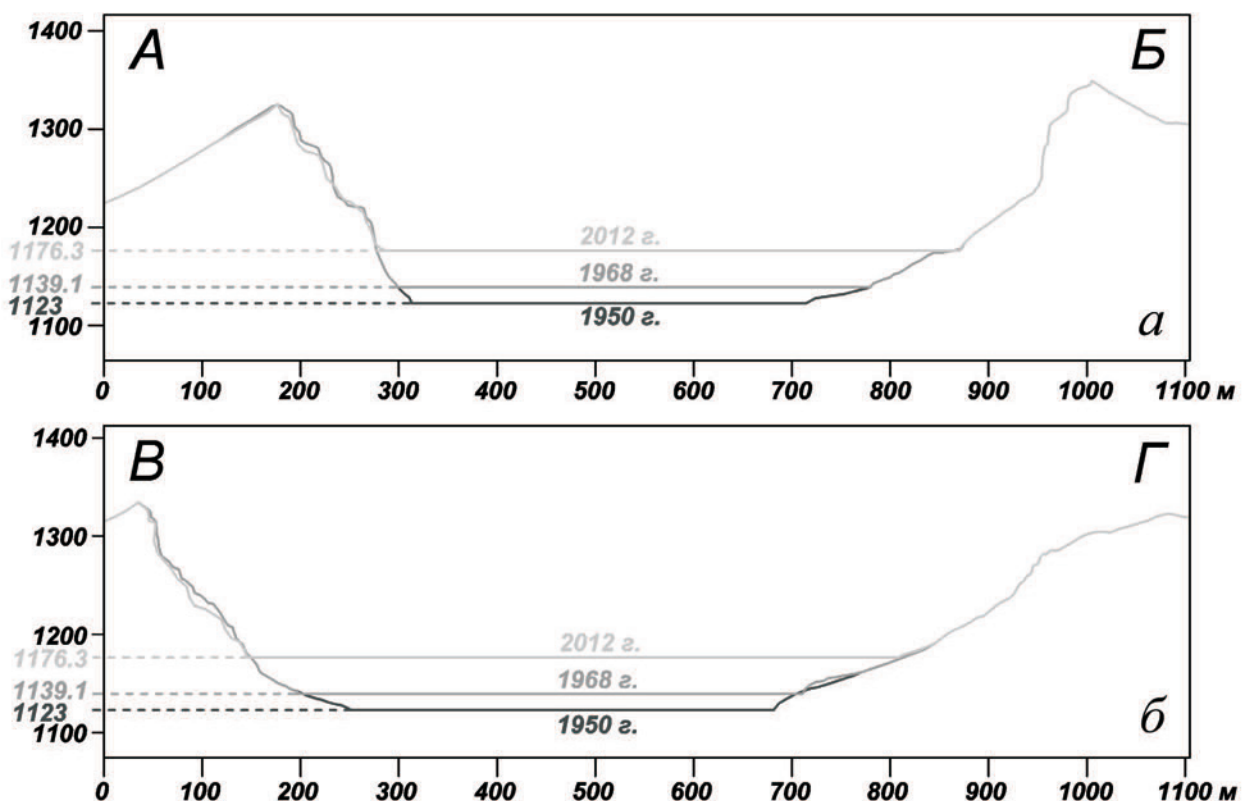


Рис. 5. Профили кратера Троицкого на 1950, 1968 и 2012 гг.: а — сечение А-Б, б — сечение В-Г. Пространственное положение сечений показано на рис. 2б.

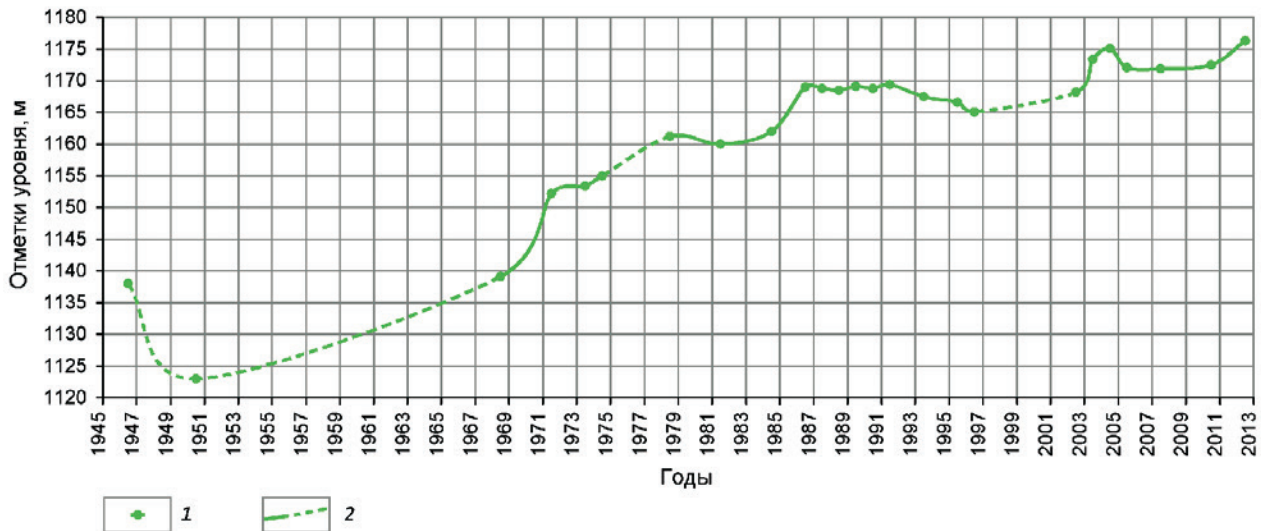


Рис. 6. График уровня озера с 1946 по 2012 г.: 1 – уровень озера вулкана Малый Семячик на даты аэрофотосъемок; 2 – интерполяционная кривая. Пунктиром показаны участки, для которых перерывы между наблюдениями составляют четыре года и более.

лишь фумарольная активность на дне кратера. В 1943 г. директором Кроноцкого заповедника Ю.В. Авериным наблюдалось извержение Карымского вулкана (Влодавец, 1948).

Со слов местных жителей, снег на склонах Малого Семячика в 1944–1945 гг. стаивал быстрее, а с июля 1945 г. на вулкане началась паро-газовая активность, которая наблюдалась до весны 1946 г. (Влодавец и др., 1948). С сентября 1945 г. по октябрь 1947 г. на Карымском вулкане отмечен ряд извержений (Влодавец, 1948).

В период с 1946 по 1950 гг. в кратере Троицкого происходят морфологические изменения и, возможно связанное с ними, снижение уровня озера на 15 м. Интенсивность фумарольной деятельности в 1950 г. сохранялась на таком же уровне, как и в 1946 г. На Карымском активность ослабевает с 1947 до 1952 гг. (Горшков, 1962).

Вулкан Карымский проявляет эксплозивную и фумарольную активность с 1952 по 1957 гг., затем активизируется вновь в 1960 г. Вслед за эксплозивной деятельностью в октябре 1962 г. начинают изливаться лавовые потоки (Горшков, 1962). К сожалению, данные о деятельности вулкана Малый Семячик за этот период отсутствуют. По аэрофотоснимкам (рис. 4б, 4в) можно отметить исчезновение фумаролы на восточном берегу кратерного озера в период с 1950 по 1968 гг.

С декабря 1968 по сентябрь 1971 гг. зафиксировано резкое повышение уровня кратерного озера вулкана Малый Семячик на 13 м, исследования, проводимые в это время в кратере Троицкого, также выявили активизацию вулкана по другим признакам (Горшков и др., 1975). Активность Карымского пошла на убыль с августа 1966 г., а с ноября 1967 г. по май 1970 г. наблюда-

лась лишь фумарольная деятельность (Чирков, 1970).

Уровень оз. Зеленого в период с сентября 1971 г. по август 1973 г. повышается незначительно – на 1.2 м за два года. На Карымском вулкане с мая 1970 г. по июнь 1973 г. происходит новый цикл эффузивно-эксплозивной активности (Дубик и др., 1972). С ослаблением активности Карымского вулкана с августа 1973 г. по октябрь 1974 г. вода воз. Зеленом за один год поднимается на 1.6 м, таким образом, интенсивность подъема уровня кратерного озера вулкана Малый Семячик возрастает более чем в 2.5 раза.

По графику уровня оз. Зеленое в 1976 г. взаимосвязь вулканов Малый Семячик и Карымский не прослеживается (рис. 6). Но возможно это связано с некоторыми особенностями активизации Карымского вулкана в этот период: его извержение началось без предварительной сейсмической подготовки, а после излияния лавового потока в 1976 г. он до 1978 г. работал в режиме умеренной эксплозивной деятельности (Фирстов и др., 1978). Следует принять во внимание и то, что на 1976 г. приходится середина четырехлетнего интервала 1974–1978 гг, во время которого аэрофотосъемки и научные наблюдения вулкана Малый Семячик не производились. Характер изменения уровня его кратерного озера в эти годы мог отличаться от гладкой линии, которой соединены отметки на графике.

На вулкане Малый Семячик в период с сентября 1978 г. по март 1981 г. произошло понижение уровня кратерного озера на 1.2 м. С ноября 1978 г. по декабрь 1980 г. на Карымском вулкане отмечены наиболее сильные эффузивно-эксплозивные события за весь период деятельности 1976–1982 гг. В 1978–1979 гг. сильными взрывами был разру-

Уровни озера с 1946 по 2012 гг.

Даты	Высотные отметки, м
27.08.1946	1138
06.1950	1123
12.1968	1139.1
02.09.1971	1152.2
02.10.1974	1153.6
17.09.1978	1161.2
31.03.1981	1160.0
15.09.1984	1162.0
22.09.1986	1169.0
30.10.1987	1168.8
14.07.1988	1168.5
29.05.1989	1169.1
05.02.1990	1168.8
18.08.1991	1169.4
31.03.1993	1167.5
02.09.1995	1166.6
21.05.1996	1165.1
05.09.2002	1168.2
29.08.2003	1173.4
22.10.2004	1175.1
24.10.2005	1172.1
12.07.2007	1171.9
21.11.2010	1172.5
15.10.2012	1176.3

шен внутрикратерный купол, и стал формироваться новый. Излияния лавовых потоков происходили летом 1979 г., а также летом и осенью 1980 г.; на 1980 г. приходился пик эксплозивной активности – отмечалось до 200 пеплогазовых взрывов в сутки. В 1981 г. активность Карымского резко идет на убыль: наблюдается только слабая эксплозивная деятельность – от 20-40 взрывов в сутки с января по март, до 5-15 – в июле (Магуськин, Шароглазова, 1992).

Далее, с конца марта 1981 по сентябрь 1986 г. в кратере Троицкого происходит значительное повышение уровня воды на 9 м (Двигало и др., 1988). Резкий скачок уровня на 7 м зафиксирован с 1984 по 1986 г. На Карымском с сентября 1982 г. в течение 14 лет эруптивной деятельности не наблюдается. В 1985 г. на фоне очень слабой фумарольной деятельности имело место усиление сейсмической активности под вулканом, за которым извержения не последовало, но в 1986 г. наступило полное затишье.

С августа 1991 г. началось снижение уровня поверхности озера. В 1992 г. впервые отмечено появление льда в зимнее время. Зимой 1995-1996 гг. озеро замерзло полностью (Двигало и др., 2011). Отметка уровня воды достигла минимума в мае

1996 г. За четыре года с августа 1991 по сентябрь 1995 г. поверхность озера опустилась на 2.8 м, за девять месяцев с сентября 1995 г. по май 1996 г. – на 1.5 м.

На рубеже 1995-1996 гг. на территории Карымского вулканического центра происходят сильнейшие за всю историю наблюдений сейсмические события (Гордеев и др., 1998). 1 января 1996 г. на вулкане Карымском началось мощное эксплозивное извержение, одновременно с которым произошло катастрофическое извержение в кальдере Академии Наук, на дне Карымского озера (Федотов, 1997). В последующие годы происходили умеренной силы эксплозии с периодическим излиянием лавовых потоков. Наибольшая эффузивная активность наблюдалась в начале извержения, в 1996 г., а также в 1998-1999 гг. (Иванов, 2007).

Следующее повышение уровня воды в кратере Троицкого происходит лишь в 2002 г., максимум уровня зафиксирован в октябре 2004 г., затем уровень понижается и остается стабильным до 2010 г. С 2010 по 2012 гг. уровень оз. Зеленого снова повышается.

С 2000 г. активность вулкана Карымского идет на убыль. С мая 2000 по декабрь 2001 г. имело место полное прекращение вулканической деятельности (Иванов, 2007). В 2002 г. она возобновляется, лавовые потоки, достигающие подножия вулкана изливаются по 2003 г. В 2004 г. происходит последнее весьма незначительное поступление лавы на поверхность в прикратерной зоне. В 2005 г. отмечался пиковый уровень эксплозивной активности, которая в последующие годы также пошла на спад. В настоящее время вулкан Карымский находится в стадии относительно слабой эксплозивной активности (Двигало и др., 2011).

Корреляция активности вулканов Мало-го Семячика и Карымского прослеживается достаточно явно. По всей видимости, данные вулканы действуют в противофазе. Возможные исключения составляют лишь небольшие периоды 1945-1946 гг. и 1976-1978 гг., но, к сожалению, сведения о состоянии вулканов в эти годы не вполне надежны.

Данная корреляция хорошо прослеживается по интенсивности вулканической активности. Значительное повышение уровня озера, происходившее в середине 1980-х гг., совпадает с периодом бездействия Карымского вулкана. Снижение уровня озера и его полное замерзание в середине 1990-х гг. соответствует катастрофическому извержению в кальдере Академии Наук и началу нового цикла активности Карымского вулкана. Самое резкое повышение уровня оз. Зеленого зафиксировано в 2003 г.: за один год оно составило 5.2 м. Это явление совпадает с

резким спадом эффузивной активности Карымского вулкана (Двигало и др., 2011).

Перечисленные факты могут свидетельствовать о взаимосвязи источников питания вулканов Малый Семячик и Карымский, обуславливающей перераспределение энергии и вещества между их вулканическими аппаратами таким образом, что они функционируют в основном в противофазе.

Антагонистичность периодов активности Малого Семячика и Карымского впервые была отмечена в работе (Брайцева и др., 1980) при стратиграфическом исследовании района вулкана Малого Семячика для одного из этапов его деятельности. Начиная с 8 тыс. лет назад и до 7.5-7.3 тыс. лет назад имел место период прекращения активности Малого Семячика, во время которого происходили массовые выбросы пирокластики, четко связанной с формированием кальдеры Карымского вулкана. Более молодые лавовые комплексы Малого Семячика полностью лишены тефры кальдеры Карымского вулкана на поверхности, так как с началом деятельности вулкана Малый Семячик произошел резкий спад ее активности.

При использовании стратиграфического метода в районе Малого Семячика возможно фиксировать отложения материала или их отсутствие только для наиболее крупномасштабных по силе и времени периодов активности или бездействия. Этим обусловлено обнаружение закономерности, имевшей место в масштабе времени порядка столетий – первых тысячелетий. Отмечающаяся в настоящее время обратная корреляция активности Малого Семячика и Карымского прослеживается на масштабе времени в единицы лет.

Если на основании работы (Брайцева и др., 1980) можно было предположить миграцию вулканической активности на региональном уровне, происходящую в течение столетий и тысячелетий, то сейчас, при использовании данных аэрофотограмметрических измерений, становится очевидной корреляция активности двух вулканических аппаратов, в масштабе единиц лет, которую нельзя объяснить миграцией вещества, происходящей на значительной глубине под вулканами. Активные вулканы Карымского вулканического центра представляют собой элементы единого комплекса, являющегося переждением реликтовой кальдерной структуры.

КОРРЕЛЯЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВУЛКАНОВ МАЛЫЙ СЕМЯЧИК И КАРЫМСКИЙ

Еще более наглядно иллюстрирует обнаруженную корреляцию график, приведенный на

рис. 7. В качестве соответствующих динамических характеристик при его составлении были взяты скорости изменений двух параметров: уровня озера в кратере Троицкого и уровня⁶ расположенного на подножии Карымского вулкана грунтового репера 20 (Магуськин, Шароглазова, 1992). Данные регулярного геометрического нивелирования, производившегося почти ежегодно в периоды 1971-1992 гг. и 1996-2005 гг., являются результатом самой точной из геодезических работ, выполнявшихся в Карымском вулканическом центре. По мнению авторов настоящей статьи, они могут служить косвенной характеристикой объема вещества, внедрявшегося в постройку Карымского вулкана.

В течение всего периода активности Карымского с 1970 по 1973 гг. на вулкане Малый Семячик происходит падение скорости подъема уровня оз. Зеленого. За время перерыва в вулканической деятельности Карымского в 1973-1976 гг. оз. Зеленое демонстрирует положительную динамику роста уровня, которая вновь начинает идти на спад в 1976-1981 гг. На эти годы приходится самый продолжительный этап активности Карымского вулкана за весь цикл деятельности 1970-1972 гг. Кульминационными по уровню эффузивно-эксплозивной активности являлись 1979-1980 гг. В 1980 г. произошло излияние двух лавовых потоков (летом и осенью), между которыми наблюдалось увеличение частоты пеплогазовых взрывов до 200 в сутки (Магуськин, Шароглазова, 1992). Возможно, быстрое опускание подножия Карымского в 1980 г. обусловлено только его собственной высокой активностью. После окончания цикла деятельности Карымского в 1982 г. скорость подъема уровня озера в кратере Троицкого стремительно возрастает и достигает максимума в 1985-1986 г. На то же время приходится прекращение фумарольной деятельности Карымского.

По данным работы (Фазлуллин и др., 1998) максимумы температуры воды озера в кратере Троицкого были зафиксированы в 1969-1971 и 1986 гг. Как мы можем видеть на рис. 7, им соответствовали наиболее значительные максимумы скорости подъема его уровня. Повышение температуры в 1986 г. было интерпретировано в работах (Двигало и др., 1988; Фазлуллин и др., 1998) как подводное извержение.

В 1987-1991 гг. скорость изменения уровня озера колебалась около нуля, с 1991 по 1996 гг. пошла на спад, сохраняя колебательный характер предыдущих лет. На минимум 1992 г. приходится первое (частичное) замерзание озера в зимнее время. На минимум 1996 г. – целый ряд событий, одновременно случившихся в Карымском вулканическом центре: землетрясение и

⁶Относительно грунтового репера 9.

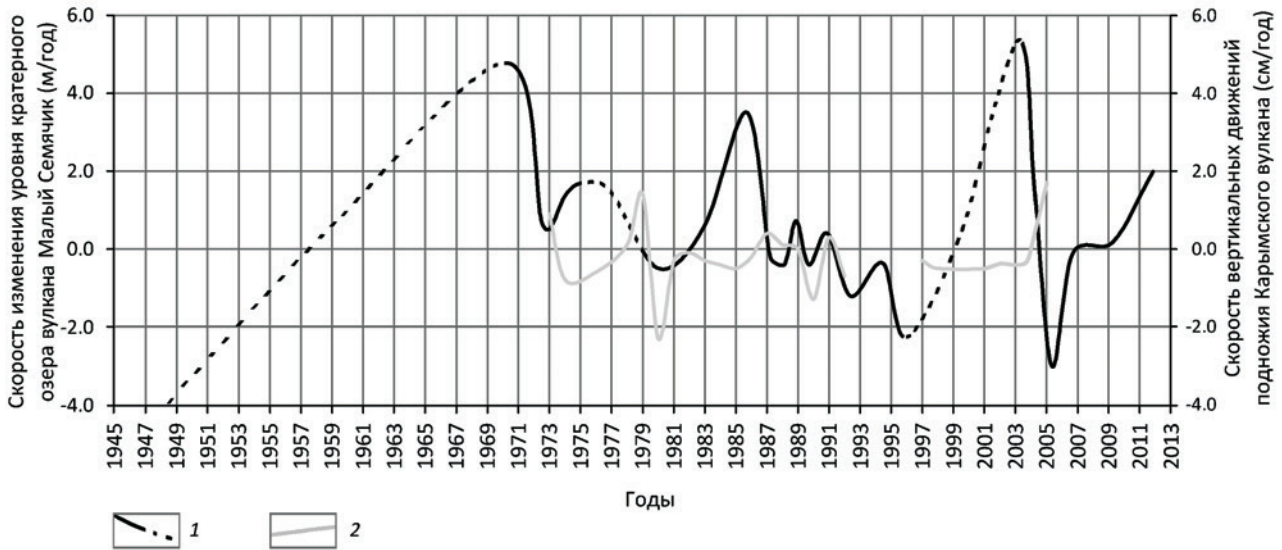


Рис. 7. График скоростей: 1 – скорость изменения уровня озера вулкана Малый Семячик; 2 – скорость вертикальных движений подножия Карымского вулкана. Пунктиром показаны участки, для которых перерывы между наблюдениями составляют четыре года и более.

извержение Карымского вулкана и кальдеры Академии наук (Гордеев и др., 1998; Федотов, 1997).

Особый интерес представляет тот факт, что с 1989 по 1992 гг. колебания скорости изменения уровня озера в кратере Троицкого и скорости вертикальных движений подножия Карымского вулкана происходили синфазно. Возможно, это свидетельствует об имевшем место в эти годы пульсационном режиме общего источника питания Карымского вулканического центра. Также, вероятной причиной могло быть существование неизвестного нам процесса с положительной обратной связью. Пиковое значение амплитуды этого процесса на рубеже 1995 и 1996 гг. в таком случае могло послужить триггером произошедших в это время событий.

Плавный прирост уровня озера в кратере Троицкого с мая 1996 по сентябрь 2002 г., отображенный на графике, по всей видимости, обусловлен лишь тем, что извержение Карымского отвлекло на себя основное внимание вулканологов. К сожалению, в этот период, аэрофотосъемки кратерного озера вулкана Малый Семячик не выполнялись. Его уровень мог продолжать понижаться и после 1996 г., а максимум скорости иметь место несколько ранее, чем на рис. 7. Таким образом, максимальное значение скорости подъема уровня воды оз. Зеленого было достигнуто в период 2000–2003 гг., и могло быть связано с перерывом деятельности Карымского 2000–2002 гг., или с прекращением излияний заметных лавовых потоков на Карымском в 2003–2004 гг.

Следует отметить, что в зимы 1996–2002 гг. поверхность оз. Зеленого была полностью покрыта льдом. В марте 2003 и апреле 2004 гг. на ледовом покрове в центре озера наблюдались

попытки, а в апреле 2005 г. снежно-ледовой покров был снова сплошным (Ушаков, 2005). С 2002 по 2003 г. уровень озера возрастал с максимальной отмеченной скоростью – 5.3 м/год. Рост продолжался до 2004 г со скоростью 1.5 м/год. С 2004 по 2005 гг. произошло резкое снижение уровня – на 3 м. Этот минимум скорости прироста озера в кратере Троицкого приурочен не только к замерзанию оз. Зеленого, но также и к вздыманию подножия Карымского вулкана, зафиксированному с 2004 по 2005 г.

В 2008 г. цвет оз. Зеленого изменился с бирюзового на лазурно-серый. Озеро перестало замерзать, его термальность возобновилась. Материалы тепловизионной съемки 2010 г., выполненной сотрудником лаборатории активного вулканизма Института вулканологии и сейсмологии С.А. Чирковым, демонстрируют активность, проявляющуюся в виде мощных конвективных движений вод озера.

С 2010 по 2012 г. уровень озера поднимался со скоростью 1.9 м/год.

Исходя из отмеченной закономерности, авторы склонны полагать, что в дальнейшем возможно возрастание активности Малого Семячика на фоне завершения цикла деятельности Карымского вулкана.

Подводя итоги проведенного исследования можно заключить, что благодаря именно точности и детальности фотограмметрического метода стало возможным выявление значимых, но трудноуловимых при визуальном изучении геоморфологических особенностей вулканических объектов, исключение которых может привести к неправильным интерпретациям происходящих процессов. Кроме того, дистанционные

наблюдения позволили проследить морфодинамику исследуемых объектов и выявить возможную взаимосвязь в их функционировании. К сожалению, отсутствие аэрофотосъемочных материалов за некоторые годы лишает нас возможности проследить корреляцию активности двух вулканических аппаратов в определенные непродолжительные периоды. Несмотря на это общая корреляционная картина просматривается достаточно явно. Кроме того, выявленная на основе фотограмметрических данных корреляция отмечается и по материалам других исследований (Брайцева и др., 1980).

Необходимо особо подчеркнуть, что качество исследований таких динамичных объектов, какими являются вулканы, во многом зависит от частоты аэрофотосъемочных работ. Съемки вулканов Карымский и Малый Семячик необходимо выполнять регулярно.

Авторы выражают благодарность И.В. Мелекесцеву за полезные замечания и ссылки на необходимую информацию, М.А. Магуськину и И.К. Дубровской за предоставленные данные геодезических работ на Карымском полигоне и теплосъемки кратера Троицкого, О.В. Дирксену за плодотворное обсуждение материалов, а также Ю.Б. Слезину и В.И. Андрееву за ценные сведения о предыдущих исследованиях вулкана Малый Семячик.

ВЫВОДЫ

1. Анализ карты, выполненной Военно-топографическим управлением Генштаба СССР, показывает, что на время ее создания кратер Троицкого имел значительную глубину, но озеро в нем отсутствовало. Следовательно, оз. Зеленое образовалось в первой половине 1940-х гг. в уже существующем кратере вулкана Малый Семячик.

2. Анализ предыдущих исследований позволил выявить необоснованность сведений об эксплозивной активности вулкана Малый Семячик в 1945-1946, 1946-1950 и 1952 гг. Извержения вулканского типа, указываемые в каталоге (Влодавец, Пийп, 1957), не прослеживаются в современном цикле активности вулкана Малый Семячик.

3. Объем осыпного и обвального материала с внутренних стенок кратера за период с 1968 по 2012 гг. (1500000 м³) составляет 17 % от объема прироста воды в оз. Зеленом (9000000 м³). Воздействие постоянно происходящих обвалов и осыпаний обязательно следует учитывать при исследовании морфометрических характеристик кратерной чаши.

4. Уровень оз. Зеленого с 1950 по 2012 гг. повысился на 53.7 м. Его изменение имеет преимуще-

ственно скачкообразный характер. Как правило, ускоренные повышения связаны с усилением активности, а наименьшие и отрицательные скорости подъема – с ее спадом. Таким образом, скорость изменения уровня кратерного озера представляет собой наиболее явный показатель активности вулкана Малый Семячик на данном этапе его деятельности.

5. При сравнительном анализе колебаний уровня кратерного озера вулкана Малый Семячик с активностью Карымского вулкана отмечается обратная корреляция активности, что может быть свидетельством взаимосвязи источников питания данных вулканических аппаратов. В случае прекращения деятельности Карымского следует уделить особое внимание вулкану Малый Семячик в связи с возрастанием риска его активизации.

Список литературы

- Брайцева О.А., Егорова И.А., Несмачный И.А., Сулержицкий Л.Д.* Вулкан Малый Семячик // Вулканический центр: строение, динамика, вещество. М.: Наука, 1980. С. 198-235.
- Влодавец В.И.* Вулканы Советского Союза. М.: – Государственное издательство географической литературы, 1949 г. 163 с.
- Влодавец В.И.* О деятельности Карымского вулкана в 1943-1947 гг. // Бюллетень вулканологической станции. 1948. Вып. 15. С. 17-18.
- Влодавец В.И., Морозов А.И., Троицкий В.Д.* Вулкан Малый Семячик // Бюллетень вулканологической станции. 1948. Вып. 15. С. 19-27.
- Влодавец В.И., Пийп Б.И.* Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюллетень вулканологической станции. 1957. Вып. 25. С. 5-95.
- Гавриленко Г.М.* Концептуальная модель кратерного озера вулкана Малый Семячик (Камчатка) // Минерало-рудообразование в вулканно-гидротермальных системах островных дуг (Камчатка – Курильские и Японские острова). Материалы Российско-Японского полевого семинара / Ред. С.А. Федотов. Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО РАН, 1998. С. 194-201.
- Гавриленко Г.М.* Гидрологическая модель кратерного озера вулкана Малый Семячик (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2000. № 6. С. 21-31.
- Гавриленко Г.М.* Гидрохимические исследования активных островодужных вулканов, находящихся в различных гидрологических обстановках // Гидрология и геохимия вод складчатых областей Сибири и Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2003. С. 133-143.
- Гавриленко Г.М., Двигало В.Н., Фазлуллин С.М., Иванов В.В.* Современное состояние вулкана

- Малый Семячик (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1993. № 2. С. 3-73.
- Гордеев В.И., Дроздники Д.В., Касахара М. и др.* Сейсмические явления, связанные с извержениями вулканов в Карымском вулканическом центре в 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 2. С. 28-48.
- Горшков А.П.* Глубинное строение вулкана Малый Семячик (Камчатка) по геофизическим данным: Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 1975. 23 с.
- Горшков А.П., Гребзды Э.И., Самойленко Б.И., Слезин Ю.Б.* К расчету баланса тепла и массы кратерного озера вулкана Малый Семячик // Бюллетень вулканологических станций. 1975. Вып. 51. С. 50-59.
- Горшков Г.С.* Заметки об извержении Карымского вулкана в 1960 г. // Бюллетень вулканологической станции. 1962. Вып. 32. С. 24-33.
- Двигало В.Н.* Морфологические предвестники (первые признаки) активизации некоторых вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 3-16.
- Двигало В.Н., Андреев В.И., Гавриленко Г.М. и др.* Деятельность вулканов Юго-Восточной Камчатки и Северных Курил в 1985-1986 г. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 3. С. 13-20.
- Двигало В.Н., Свирид И.Ю., Шевченко А.В. и др.* Состояние активных вулканов Северной Камчатки по данным аэрофотосъемочных облетов и фотограмметрической обработки снимков 2010 г. // Материалы региональной конференции, посвященной дню вулканолога / Отв. редактор С.Б. Самойленко. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 26-36.
- Дитмар К.* Поездки и пребывание в Камчатке в 1851 – 1855 гг. Ч. I. СПб.: Императорская академия наук, 1901 г. 156 с.
- Доброхотов Ю.С.* Геометрическое строение кратеров некоторых камчатских вулканов // Бюллетень вулканологической станции. 1949. Вып. 16. С. 26-33.
- Доброхотов Ю.С.* Аэросъемка в геологических экспедициях АН СССР // Природа. 1951. № 12. С. 11-19.
- Дубик Ю.М., Огородов Н.В., Абдурахманов А.И. и др.* Начало нового эруптивного цикла активности вулкана Карымский в мае 1970 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1972. Вып. 48. С. 3-21.
- Заварицкий А.Н., Пийп Б.И., Горшков Г.С.* Изучение вулканов Камчатки // Труды лаборатории вулканологии. 1954. № 8. С. 18-57
- Заварицкий А.Н.* Вулканы Камчатки // Труды лаборатории вулканологии. 1955. Вып. 10. С. 3-82.
- Иванов В.В.* Повторяемость извержений Карымского вулкана и сейсмологические предвестники пароксизмальных событий 1-2 января 1996 г. в Карымском районе // Материалы ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога / Отв. редактор Е.И. Гордеев Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2007. С. 50-60.
- Магуськин М.А., Шароглазова Г.А.* Деформации земной поверхности Карымского вулканического центра // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С. 90-110.
- Новограбленов П.Т.* Каталог вулканов Камчатки // Изв. Гос. геогр. общества. 1932. Т. 64. Вып. I. С. 88-89.
- Святловский Е.А.* Атлас вулканов СССР. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1958. 174 с.
- Селянгин О.Б.* Петрогенезис базальт-дацитовый серии в связи с эволюцией вулканоструктур. М.: Наука, 1987. 148 с.
- Селянгин О.Б., Брайцева О.А.* Вулкан Малый Семячик // Активные вулканы Камчатки в 2-х томах / Отв. редакторы С.А. Федотов и Ю.П. Масуренков М.: Наука, 1991. Т. 2. С. 162-181.
- Слезин Ю.Б., Ковалев Г.Н., Гребзды Э.И., Чеглицова Е.А.* Об активности вулкана Малый Семячик // Бюллетень вулканологических станций. 1971. Вып. 47. С. 37-39.
- Ушаков С.В.* Информационное сообщение о состоянии вулкана Малый Семячик. http://www.kscnet.ru/ivs/volcanoes/inform_messages/2005/MalSem_04052005/MalSem_04052005.html
- Фазлуллин С.М., Ушаков С.В., Гавриленко Г.М. и др.* Эволюция состояния кратерного озера вулкана Малый Семячик // Минерало-рудобразование в вулканно-гидротермальных системах островных дуг (Камчатка – Курильские и Японские острова) // Минерало-рудобразование в вулканно-гидротермальных системах островных дуг (Камчатка – Курильские и Японские острова). Материалы Российско-Японского полевого семинара / Ред. С.А. Федотов. Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО РАН, 1998. С. 246-251.
- Федотов С. А.* Об извержениях в кальдере Академии Наук и Карымского Вулкана на Камчатке в 1996 г., их изучении и механизме // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 3-37.
- Фирстов П.П., Токарев П.И., Гусев Н.А. и др.* Динамика извержения и сейсмический режим вулкана Карымского в 1976 г. // Бюллетень вулканологических станций 1978. № 55. С. 28-34.
- Чирков А.М.* Карымский вулкан в 1967-1968 гг. // Бюллетень вулканологических станций. 1970. Вып. 46. С. 42-45.

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОСТИ
**INVESTIGATION OF MALY SEMYACHIK VOLCANO (KAMCHATKA) ACTIVITY
USING MORPHODYNAMIC DATA FROM THE TROITSKY CRATER**

I.Yu. Svirid^{1,2}, A.V. Shevchenko^{1,2}, V.N. Dvigalo¹

¹*The Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS Piip avenue 9, Petropavlovsk-Kamchatskiy, 683006, Russia;
e-mail: svirid@kscnet.ru*

²*Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatskiy, 683032, Russia*

The paper presents the results from investigation of the Troitsky Crater (Maly Semyachik Volcano) based on photogrammetric processing and interpretation of data from aerial imagery since 1946 and 1950. This is the first investigation that covers almost the whole 70-years-period of the scientific observation of the crater. The authors used all available data from aerial survey and previous investigations, which resulted in rather detailed morphodynamic analysis. We have obtained the precise morphometrical characteristics of the crater and revealed new parameters of the crater lake. Over the period 1950–2012 the water level of the lake increased by 53.7 m. The processing of the most detailed aerial images allowed estimating the volume of scree material from the crater's inner walls. Over the period 1968–2012 the volume of scree material comprised up to 17 percent of the lake's increasing volume. The investigation revealed a possible correlation between the activity of Maly Semyachik and Karymsky volcanoes.

Keywords: crater lake, photogrammetry, morphometry, morphodynamics analysis, activity correlation.