

УДК 551.21

АКТИВИЗАЦИЯ ВУЛКАНА КОРЯКСКИЙ (КАМЧАТКА) В КОНЦЕ 2008 - НАЧАЛЕ 2009 гг.: ОЦЕНКИ ВЫНОСА ТЕПЛА И ВОДНОГО ФЛЮИДА, КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОДЪЕМА МАГМЫ И ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ АКТИВИЗАЦИИ

В.В. Иванов

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

Введение

Вулкан Корякский находится в Восточном вулканическом поясе Камчатки и расположен рядом с гг. Петропавловск-Камчатский, Елизово с населением около 250 тыс. человек и самым крупным аэропортом полуострова (рис. 1). В конце февраля 2008 г., за 8 месяцев (мес.) до начала видимой активизации вулкана, в земной коре под ним на глубинах от 0 до 40 км началось усиление сейсмичности ($K_{s_{max}} = 8$), которое продолжается и в настоящее время (на начало июля 2009 г.) в течение около 16 мес. Это была беспрецедентная для этого района сейсмическая активизация с начала детальных наблюдений, начатых КФ ГС РАН на Авачинско-Корякской группе вулканов в ноябре 1992 г. Активизация вулкана в 2008 г. была сопряжена с сильными глубокими землетрясениями ($H = 500 - 630$ км) с $M = 7.7$ и 7.3 в Курило-Камчатской сейсмофокальной зоне на широтах Петропавловска-Камчатского (по данным В.А. Широкова [16]). Событий такой силы на такой глубине в этой широтной полосе ранее не отмечалось. Рои микроземлетрясений в земной коре района происходили и ранее, однако они располагались значительно севернее вершины вулкана Корякский ($\Delta = 6-17$ км) в районе вулкана Ааг [3].



Рис. 1. Парогазовый с примесью пепла шлейф при активизации вулкана Корякский 18 марта 2009 г. Фото автора.

Видимая активизация вулкана началась 23 ноября 2008 г., когда фумарольная деятельность сменилась мощной парогазовой эмиссией. Последняя подобная

активизация вулкана происходила 52 года назад в 1956-1957 гг. [10, 19]. К концу декабря в вулканическом шлейфе появилась примесь пепла. За шесть месяцев было выброшено большое количество вулканических газов из жерл на северо-западном склоне вулкана вблизи вершины. В настоящей работе приводятся сведения о выносе тепла и водного флюида во время активизации, полученные по оценкам высот подъема вулканических струй, обсуждается концептуальная модель подъема магмы перед активизацией и прогноз ее развития. Частично эти сведения представлены автором в публикациях [7, 17].

Вулкан Корякский представляет собой стратовулкан высотой 3465 м, диаметр его основания – около 14 км (*здесь и далее измерения сделаны по карте вершинной части Корякского вулкана, составленной В.Н. Двигало на базе карты 1:25 000 масштаба по результатам аэрофотосъемки 1994 г. в системе координат 1963 г.*). Предположительный возраст - верхний плейстоцен. Состав продуктов - базальты, андезибазальты и андезиты. В западной части вершинного гребня на высотах 3150-3250 м над уровнем моря (у.м.) расположен современный кратер диаметром 180-200 м. С этим кратером связаны многие лавовые потоки, бронирующие западные и северо-западные склоны вулкана Корякский; из этого же кратера на южный склон вулкана излился лавовый поток, который хорошо виден из г. Петропавловска-Камчатского [11].

На склонах вулкана видны многочисленные дайки базальтов, андезибазальтов и андезитов, представляющие собой фрагменты магматических питающих систем вулкана в разное геологическое время [10-11]. На конусе вулкана и у его подножия известно 26 шлаковых и лавовых конусов и лавовых потоков базальтового состава [12, рис. 158]. Эти побочные прорывы Корякского находятся в пределах круговой зоны с диаметром ~10 км и с центром, почти совпадающим с вершиной вулкана. Вероятно, указанную зону можно считать проекцией на земную поверхность магматической колонны или промежуточного магматического очага, питающего этот полигенный вулкан (если такой очаг существует). Строение подобных вулканических аппаратов с интрузивно-дайковым типом питающей системы дано в работе [22].

В последние три тыс. лет извержения с выбросом тefры (вероятно, магматические) имели место на Корякском в среднем каждые ~ 600 лет (устное сообщение Л.И. Базановой). В историческое время деятельность вулкана была в основном фумарольной с подъемом шлейфов на высоту не более 200 м над источником (тепловая мощность не выше первых мегаватт). Периодически отмечались активизации (усиления фумарольной деятельности и слабые извержения). По неполным данным из работ [10, 14] и устным сообщениям Н.П. Смелова и А.А. Овсянникова, начиная с 19-го столетия активизации были отмечены 15 раз: в 1827-28 гг., 1855 г., в конце 1880-начале 1890 гг., 1897-1898 гг., 1904 г., 1926 г., 1931 г., 1945 г., 1952 г., 1954 г., 1956-1957 гг., в 1970-е и 1980-е гг., в 1991 г., в 2008-2009 гг. Интервал между слабыми активизациями – от 2 до 30 лет, в среднем около 14 лет, высоты подъема верха шлейфов над источником – до 700 м (тепловая мощность до 50 МВт). Три активизации, из указанных пятнадцати были наиболее мощными с выносом пара и газов с примесью пепла и их можно отнести к слабым вершинным извержениям: в 1926 г., 1956-1957 гг., а также в 2008-2009 гг. Интервалы между извержениями составили 30 и 52 года, в среднем около 40 лет. Верхние кромки парогазовых шлейфов достигали относительных высот подъема 1500 м [14, 19, 20] (максимальная тепловая мощность ~1000 МВт). Таким образом, в соответствии с общим графиком повторяемости, чем слабее были активизации на вулкане, тем они отмечались все чаще и чаще.

В ходе извержения ноябрь 1956 г. - март 1957 г. на северо-западном склоне близ вершины вулкана (на абсолютных высотах 2700 - 3100 м) активизировалась радиальная трещина. Из нее, а также из вершинного кратера происходила интенсивная эмиссия газов и взрывы, нередко с примесью пепла [19]. После окончания извержения

активность Корякского была сосредоточена почти исключительно на этой трещине, на которой постоянно действовала группа фумарол [10]. Согласно карте вершинной части вулкана Корякский, составленной В.Н. Двигало, близ вершины на СЗ склоне линейные прогретые зоны имеют общую протяженность ~700 м. В их пределах два главных фумарольных выхода: верхнее на отметке 2970 м (основное) и нижнее – на отметке 2870 м (менее активное). Они расположены ниже вершины вулкана на 495 и 595 м и удалены от центра кратера вулкана на 600 и 750 м, соответственно. Единственные измеренные значения температур фумарол в 1983 г. составили 199-213⁰С [20].

Активизация вулкана Корякский в конце 2008 – начале 2009 гг.

При наблюдениях из г. Петропавловск-Камчатский ($\Delta=29$ км), фумарольные жерла не видны, поскольку закрыты склоном вулкана (превышение над основным жерлом около 170 м). Таким образом, появление фумарол над склоном при наблюдении из г. Петропавловска означает, что высота верха их шлейфов превышает 170 м. Поскольку регулярные наблюдения ведутся из этого города, это значение принято нами в качестве порогового уровня для определения начала активизации. *Под активизацией Корякского автор понимает интервал времени, в течение которого верхние кромки фумарольных струй устойчиво превышают указанное пороговое значение.*

В течение нескольких лет до начала текущей активизации высоты подъема фумарольных струй были сравнительно невелики и фумаролы из города видны не были. Из г. Петропавловска парогазовый шлейф начал просматриваться с 23 ноября 2008 г., что следует считать началом активизации. Учитывая возможное отсутствие видимости по погодным условиям, активизация могла начаться несколько ранее. Из г. Елизова более слабые фумарольные струи над вулканом впервые были зафиксированы начиная с 6 ноября 2008 г. (фото А.В. Сокоренко). Заметим, что усиление сейсмичности в районе вулкана отмечено с конца февраля 2008 г. Подобные сейсмологические активизации были там и ранее, но они не завершались извержениями [3, 20].

В 2008-2009 гг. парогазовая эмиссия происходила, в основном, из двух упомянутых жерл на трещине. К декабрю 2008 г. интенсивность эмиссии значительно увеличилась, высоты подъема верха шлейфа в условиях спокойной атмосферы достигали 1000 м над верхним жерлом (или 500 м над максимальной отметкой вулкана), к концу месяца в выделениях главного жерла появилась примесь пепла, которым вскоре покрылся весь конус вулкана. В нижнем жерле примеси пепла не было отмечено, там преимущественно выделялся водяной пар. *Появление примеси твердых продуктов (пепла) означает, что, по крайней мере, с конца декабря 2008 г. вулкан Корякский перешел в стадию извержения, которое продолжалось до начала апреля, когда вынос пепла прекратился.* Активизация же продолжается и в настоящее время (на начало июля 2009 г.) в течение около 7 мес. Микроземлетрясения в районе вулкана также происходят. Здесь мы используем определения активизации и извержения из работы [6], следуя исторически сложившемуся на Камчатке пониманию извержения как поступлению на поверхность Земли твердых или расплавленных вулканических продуктов (пепла, бомб, лав и т.д.). Так сложилось, что чисто парогазовая активность, даже сильная, обычно не воспринимается на Камчатке как извержение.

Поскольку во время активизации (извержения) 2008-2009 гг. выноса магматических продуктов не отмечено, логично было отнести его к фреатическому типу. Обсудим эту возможность. Под фреатическими извержениями понимаются такие, которые возникают от взаимодействия магмы с подземными или поверхностными водами [23, 24]. Они имеют пять характерных признаков: а) выбрасывается пар и раздробленные горные породы без присутствия магматического материала; фреатомагматические извержения выбрасывают большую долю магматического материала, но все равно доля резургентного материала составляет не менее 90%; б)

температура фрагментов значительно ниже, чем для магматических извержений (от холодной до температуры красного каления); в) такие извержения обычно сравнительно кратковременны, поскольку при подъеме магмы объем и темп поступления взаимодействующей с магмой воды ограничены; г) извержения часто обладают огромной силой, поскольку происходят в ограниченной области пространства под поверхностью земли; д) в результате формируются диатремы под поверхностью земли и широкие эксплозивные кратеры или маары на ее поверхности. Фреатический этап присутствует у многих магматических извержений, когда магма при ее подъеме приближается к поверхности земли. Мы полагаем, что в близповерхностных условиях при относительно низких давлениях разница между плотностями жидкой воды и образованного от взаимодействия ее с магмой флюида достигает нескольких сот или тысяч раз и взрывной эффект такого взаимодействия проявляется наиболее ярко.

Извержение вулкана Корякский 2008-2009 гг., во время которого наблюдалась относительно спокойная эмиссия пара и газов, иногда с примесью пепла при относительно низкой температуре, без выброса магматического материала удовлетворяет только первым двум из пяти указанных признаков и его формально нельзя относить к фреатическим. Температура, измеренная дистанционно во время извержения на устье нижнего жерла, составила около 400⁰С (устное сообщение В.А. Дрознина). Таким образом, пока это событие следует отнести к газовым извержениям с примесью пепла [1]. Верхнее, наиболее близкое к вершинному кратеру ($\Delta = 600$ м), жерло было основным и из него происходил преимущественный вынос вулканических газов, нередко с примесью пепла. Нижнее, более удаленное от центра кратера жерло ($\Delta = 750$ м) было сравнительно малоактивным и в нем отмечалась эмиссия газов, преимущественно, без примеси пепла.

Текущее извержение вулкана Корякский было подобно слабому вершинному извержению этого вулкана в 1956-1957 гг. [19]. Отличия от предыдущего извержения следующие: а) полное отсутствие взрывной активности; б) отсутствие вулканической активности в кратере вулкана; в) активизация не всей трещины СЗ простирания, а только трех (в основном двух) фумарольных жерл на ней. По указанным двум первым признакам текущее извержение подобно ряду других извержений; к числу последних на Камчатке и северных Курильских островах следует отнести извержения вулканов Мутновский в конце 1960- начале 1961 г. и 17 марта 2002 г., Горелый в 1980-1981 гг. и в 1985-1986 гг., Эбеко в 1985 г. [2, 9, 13]. Однако для них была характерна большая доля взрывной активности и наличие некоторого количества резургентного материала и ювенильного пепла.

Методика оценок выноса тепла и водного флюида

Вулканы выносят огромные массы газов, в основном водяного пара, что пока недостаточно учитывается в расчетах выноса вулканических продуктов. В частности, это могло бы дать объемы магм, при дегазации или охлаждении которых образовался этот вулканический пар. Возможный путь решения: тепловая мощность вулканических струй - расход и масса вынесенного пара - масса магмы. Главная проблема – определить происхождение газов, выделены ли они из магмы или образуются в основном в результате вскипания метеорных вод при ее охлаждении.

Тепловые мощности парогазовых шлейфов вулкана Корякский и некоторых других вулканов южной Камчатки оценивались по формуле, предложенной С.А. Федотовым [21]

$$Q, \text{ кВт} = 0.136 (\Delta h_0, \text{ м})^2 (U, \text{ м/с})^{1.5}, \quad (1)$$

где Δh_0 – высота подъема оси шлейфа над тепловым источником, U – скорость ветра непосредственно над тепловым источником (в оригинале - над верхней кромкой трубы тепловой электростанции) (рис. 2).

Формула (1) выведена для высоких труб мощных электростанций, верхние кромки которых обычно расположены выше границы приземного слоя атмосферы и не искажают циркуляцию воздушных масс. На вулканах это требование, вообще говоря, не выполняется; часто на вершине вулкана (у жерла) скорость ветра равна нулю. Поэтому в качестве скорости U мы использовали среднее арифметическое из скоростей ветра у фумарольного жерла и на высоте оси шлейфа. Скорости определялись по серийной фотосъемке, выполненной с крыши здания Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН с использованием двух линейных масштабов, установленных по карте В.Н. Двигало 1994 г. для вершинной части вулкана (рис. 2).

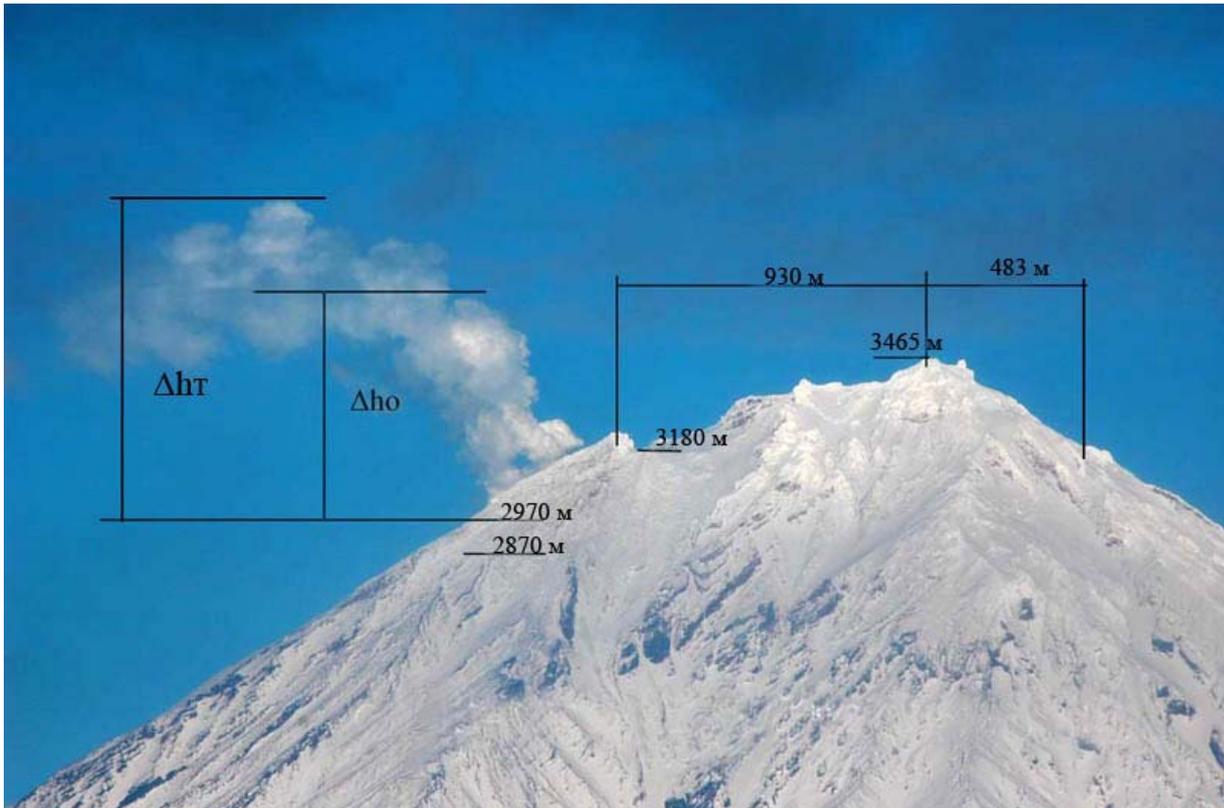


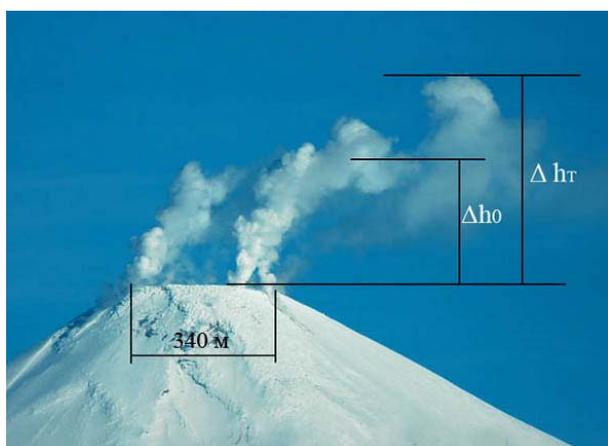
Рис. 2. Вершина вулкана Корякский и его парогазовый шлейф 11 января 2009 г. Показаны опорные элементы рельефа, их высотные отметки и масштабы. Высоты шлейфа (оси и верха) над главным жерлом, расположенным на высоте 2970 м над у.м., составили 710 (980 м), соответственно. Скорость ветра от 0 до 4 м/с, тепловая мощность струи 350 (200) МВт, что соответствует расходу водного флюида 130 (75) кг/с.

Практика оценок тепловых мощностей парогазовых струй в 2008 г. на вулканах Корякский, Авачинский и др. по формуле (1) показала, что для наиболее высоких и красивых шлейфов в условиях спокойной атмосферы получались завышенные оценки тепловых мощностей, по сравнению с оценками при сильном или умеренном ветре. На рис. За показан один такой шлейф Авачинского вулкана и распределение по его высоте скорости ветра (рис. 3б). Видно, что на первых трехстах метрах над вершиной скорость ветра была мала (от 0.7 до 1 м/с), а на высотах, больших чем 300 м, начинался заметный ветер со скоростью 3 - 3.5 м/с. То есть имело место двухслойное строение атмосферы над вулканом. Неудивительно, что первые 300 метров шлейфа поднимался в спокойной атмосфере над вулканом. Использование формулы (1) при высоте подъема оси шлейфа 300 м и средней скорости ветра 1.7 м/с дало оценку 27 МВт, которая представляется завышенной. В таких случаях более разумно использовать формулу для случая подъема верха шлейфа в спокойной атмосфере

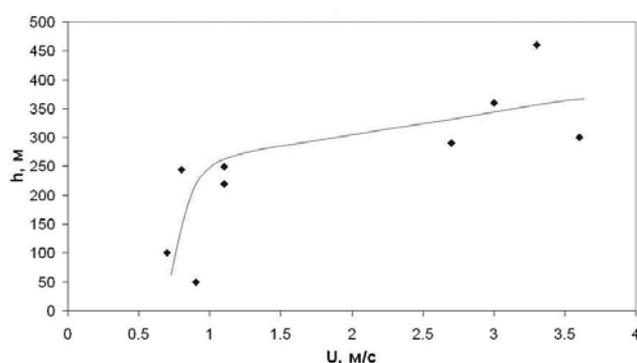
$$Q, \text{ кВт} = (\Delta h_T/46)^4, \quad (2)$$

где Δh_T – высота подъема верха шлейфа над тепловым источником, выраженная в метрах [21]. Она дает оценку 13 МВт.

При использовании формулы (2) надо быть уверенным, что верх фумарольного шлейфа хорошо виден. В таких шлейфах видимое (капельное) облако занимает только часть шлейфа и размеры облака варьируют с изменением температуры и влажности атмосферного воздуха, который примешивается в шлейф на всем его протяжении [5]. Для случая слабого ветра над вершиной вулкана мы делали расчеты, как по формуле (1), так и (2), и полагали, что оценка тепловой мощности представляет собой не число, а числовой интервал. Высоты подъема шлейфов отсчитывались от уровня соответствующего жерла (рис. 2). Скорости ветра у видимого основания шлейфа и на высоте его горизонтальной оси определялись по серийной фотосъемке с поправкой на отличие направления распространения шлейфа от перпендикулярного к наблюдателю. Обсчитывались только те шлейфы, которые мало отклонялись от перпендикуляра к наблюдателю (не более 30 град, в крайних случаях 45 град). Отбраковывались шлейфы, направление распространения которых значительно отклонялось к наблюдателю, поскольку в этом случае шлейф не «выползался» и оценить высоту подъема его оси было невозможно.



а



б

Рис. 3. Пример двухслойного строения атмосферы над Авачинским вулканом 24 ноября 2008 г. Вид фумарольного шлейфа (а) и распределение скорости ветра над вершиной вулкана (б). Высоты подъема шлейфа (оси и верха) равны 300 (500) м, соответственно. Суммарная тепловая мощность обеих фумарол оценивается в 27 (13) МВт.

Расхождение оценок по формулам (1) и (2) с реальными величинами по данным работы [21] оценивается в полпорядка, т.е. ± 3 раза. Это накладывает серьезные ограничения на проведение мониторинга тепловой мощности вулканов с помощью данного метода. Для повышения точности необходимо проведение специальных исследований подъема конвектирующих струй в атмосфере, предполагающих изучение стратификации атмосферы дистанционными методами непосредственно над вершиной вулкана. Рассмотрение этих вопросов не входит в тематику данной статьи.

Вынос тепла и водного флюида во время активизации вулкана в конце 2008 г. – начале 2009 г.

На рис. 4а изображены два отдельных фумарольных шлейфа вулкана Корякский, образовавшихся из верхнего и нижнего жерл. Высоты подъема их осей над соответствующими жерлами были равны $\Delta h_{02} = 450$ м и $\Delta h_{01} = 240$ м. По формуле (1) их тепловые мощности оцениваются как 500 и 60 МВт, т.е. нижнее жерло оказа-

лось на порядок менее мощным, чем верхнее.

На рис. 4б приведен парогазовый с примесью пепла шлейф вулкана Корякский во время сильной активности 9 марта 2009 г. Высоты подъема оси и верха шлейфа над верхним жерлом составили $\Delta h_0 = 1000$ м и $\Delta h_T = 1450$ м, а скорость ветра от 0 до 7.2 м/с. Это соответствует тепловой мощности 600 и 1000 МВт по формулам (1) и (2), соответственно.

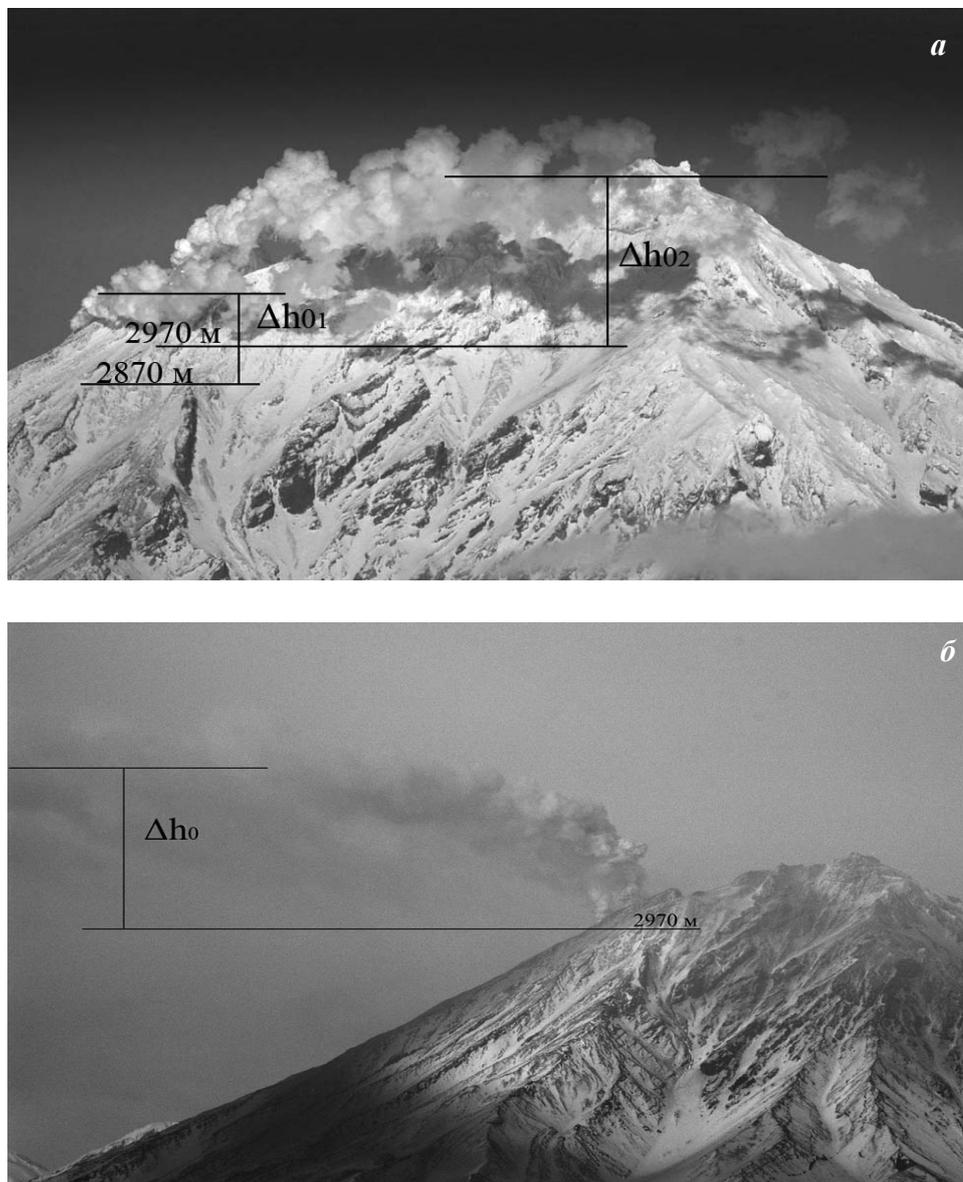


Рис. 4. Шлейфы вулкана Корякский в 2009г.: два отдельных парогазовых шлейфа 14 января из верхнего (основного) и нижнего жерл; $\Delta h_{02} = 450$ м и $\Delta h_{01} = 240$ м и тепловые мощности 500 и 60 МВт для верхнего и нижнего жерл, соответственно (а); пеплогазовый шлейф 9 марта; $\Delta h_0 = 1020$ м и $\Delta h_T = 1450$ м, тепловая мощность 600 (1000) МВт (б).

В табл. 1 даны сведения о тепловой мощности и темпах выноса флюида для вулкана Корякский в ноябре 2008 г. – марте 2009 г. как по формуле (1), так и формуле (2). Величины $\cos\alpha$ описывают отличие направления распространения шлейфа от перпендикулярного к наблюдателю. При расчетах расходов флюида он полагался в основном водным с температурой 400°C и теплосодержанием 2.8 МДж/кг. В теплосодержании основную долю составляла теплота парообразования, равная 2.3

МДж/кг. Из табл. 1 следует, что вулкан Корякский в декабре 2008 г. – начале июня 2009 г. в среднем выносил ~ 380 МВт тепла, что соответствует расходу ~ 140 кг/с водного флюида с температурой 400⁰С. За четыре месяца извержения - с конца декабря

Таблица 1. Сведения о тепловой мощности и темпах выноса водного флюида шлейфами вулкана Корякский в ноябре 2008 г.– июне 2009 г.

Дата и время UTC, h : min	Высоты подъема шлейфа		COS α	Скорости ветра, м/с (внизу, вверху шлейфа и средняя)			Тепловая мощность, МВт		Расход водного флюида, кг/с		Примечание
	Оси Δh ₀ , м	Верха Δh _T , м		Ун	Ув	Уср	По Δh ₀	По Δh _T	По Δh ₀	По Δh _T	
24.11.2008 00:53	300		1			1.7	40		15		Пар и газ, полагая истечение из верхнего жерла
28.12. 2008 05:10	310		0.7	0	20	10	400		150		Пар и газ с примесью пепла
11.01.2009 02:18	730	980	0.87	0	5.7	2.9	350	200	130	75	Пар и газ
12.01.2009 23:36	710	1100	0.7	0	4.0	2.0	200	340	70	120	Пар и газ
14.01. 2009 03:03	450		0.87	3.4	10.7	7.1	500		170		Пар, газ, верхнее жерло
	240		0.87	2.0	7.6	4.8	60		20		нижнее жерло
20.01. 2009 05:03	540	750	1	0	5.0	2.5	160	70	60	25	Пар и газ
9.03. 2009 05:03	1020	1450	1	0	7.2	3.6	600	1000	230	350	Пар и газ с примесью пепла
17.03. 2009 23:22	500		0.87	2.8	6.2	4.9	370		130		То же
18.03.2009 01:18	680		0.87	2.2	7.1	4.7	420		150		То же
1.04.2009 08:03	495		1	4.3	5.3	4.8	230		80		То же
2.04.2009 06:52	495		0.94	3	5.5	4.3	300		110		То же
9.05.2009 22:20		1700						1900			Пар и газ Ненадежн.оценка, темп. инверсия ?
11.05. 2009 20:57	390		0.94	3	9.7	6.4	330		120		Пар и газ
2.06.2009 01:04		1200						1200			Пар и газ Ненадежн.оценка, темп. инверсия ?
8.06. 2009 19:14	390		0.97	2	9.2	6.3	270		100		Пар и газ

до конца апреля - было вынесено ~ 1.5 млн. т водного флюида. В начале активизации 24 ноября 2008 г. тепловая мощность и темп поступления флюида были на порядок меньше. Предположим, что все тепло, идущее на образование водного флюида, было связано с охлаждением и кристаллизацией внедрившейся магмы с начальной температурой 1000°C и с охлаждением закристаллизованной горной породы до 400°C . Тогда теплосодержание такой магмы можно оценить равным 1.3 МДж/кг, полагая теплоту кристаллизации магмы, равной 0.4 МДж/кг, а ее теплоемкость = 1.3 кДж/(кг · град). Тогда это соответствует массе внедрившейся магмы около 3 млн. т. Реальный объем магмы может быть на порядок больше (~30 млн. т), поскольку охлаждение всей массы магмы происходит очень медленно, вследствие закалки ее поверхности (устное сообщение А.П. Максимова).

В конце апреля 2009 г. наметилась тенденция к снижению активности, 28 апреля верх шлейфа в безветренной атмосфере поднимался на высоту около 1000 м над верхним жерлом, что по формуле (2) дает оценку тепловой мощности не более 100-200 МВт. К началу июня тепловая мощность не превышала 400 МВт, что в 2-3 раза ниже, чем во время сильной активности.

Оценка фумарольной разгрузки некоторых вулканов Южной Камчатки в ноябре 2008 г. – январе 2009 г.

Для сравнения активности Корякского вулкана оценивались величины тепловой разгрузки для трех вулканов Южной Камчатки: Авачинский, Горелый и Мутновский. Полученные величины имеют самостоятельный интерес, в частности, для оценки продуктивности этих аппаратов и перспективности их на геотермальные ресурсы.

На рис. 5 показаны схемы измерения высот подъема шлейфов над вулканами Горелый и Мутновский. Высоты подъема осей и верхних кромок шлейфов отсчитывались от дна кратеров этих вулканов. Для вулкана Горелый дно полагалось расположенным на 110 м ниже кромки его кратера, а для вулкана Мутновский отсчет велся от отметок 1530 м и 1575 м для Активной воронки и Верхнего фумарольного поля, соответственно. Для вулкана Авачинский в качестве характерного размера использовался диаметр кратера, равный 340 м (рис. 3а). Для сильного ветра расчет тепловой мощности велся по формуле (1), при слабом ветре также и по формуле (2).

В табл. 2 приведены сведения о тепловой мощности фумарол Авачинского, Горелого и Мутновского вулканов. Средние тепловые мощности и расходы водного флюида для них в конце 2008 г.– начале 2009 г. оцениваются таким образом: Авачинский ~ 12 МВт (~4.5 кг/с), Горелый ~ 65 МВт (~23 кг/с), Мутновский ~ 180 МВт (~65 кг/с). За год эти вулканы выносят в среднем следующие массы водного флюида: Авачинский ~ 0.15 млн. т / год, Горелый ~ 0.7 млн. т / год, Мутновский ~ 2 млн. т / год. Предположим, что фумарольная деятельность является результатом охлаждения и кристаллизации магмы с теплосодержанием 1.3 МДж/кг метеорными водами. Тогда это соответствует средним темпам охлаждения магмы в недрах этих вулканов между извержениями: Авачинский ~ 0.3 млн. т/год, Горелый ~ 1.5 млн. т/год, Мутновский ~ 4.5 млн. т/год.

Сводка параметров текущей активизации

1. По наблюдениям из г. Петропавловск-Камчатский, видимая активизация вулкана Корякский началась 23 ноября 2008 г. (усиление парогазовой активности на трещине на северо-западном склоне вулкана при тепловой мощности струи ~ 40 МВт и расходе ~ 15 кг/с водного флюида). К концу декабря тепловая мощность и темп поступления водного флюида увеличились до ~400 МВт и ~150 кг/с, в шлейфе верхнего жерла появилась примесь пепла. Поэтому с конца декабря активизация перешла в слабое извержение, которое продолжалось до конца апреля. Затем активизация

продолжалась как парогазовая только из основного жерла (на начало июня 2009 г.). Активизацию также можно отнести к преимущественно газовым извержениям [1].

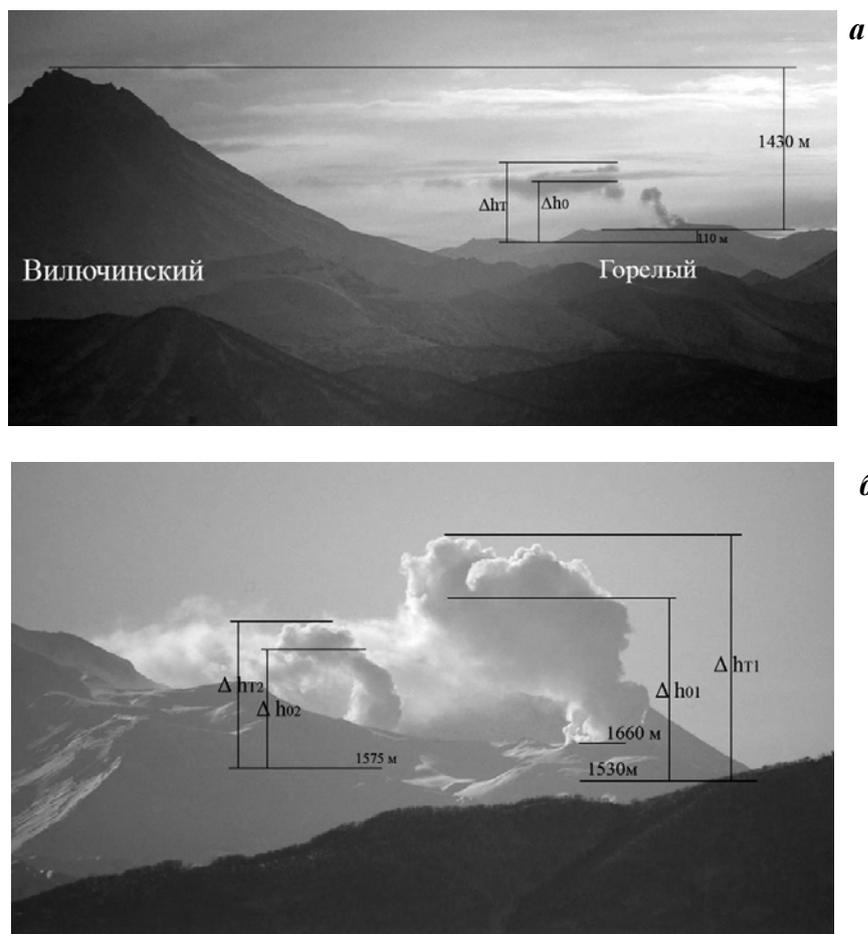


Рис. 5. Шлейфы вулканов Горелый 12 января 2009 г. (а) и Мутновский 24 ноября 2008 г. (б). Вид из г. Петропавловск-Камчатский. Тепловая мощность разгрузки Горелого 80 (50) МВт, на основании высот подъема шлейфа (оси и верха), равных 530 (700) м. Тепловая мощность Активной воронки Мутновского вулкана – 190 (70) МВт и соответствующие высоты подъема шлейфа (оси и верха) – 630 (750) м.

2. Корякский вулкан в конце 2008 г. - начале 2009 г. выносил 50 - 150 кг водного флюида в секунду, что соответствовало средней тепловой мощности 300-400 МВт. Это почти столько же, сколько давал вулкан Горелый в период извержения 1985-1986 гг., в два раза мощнее парогазовой активности кратера вулкана Мутновский, в шесть раз мощнее фумарол вулкана Горелый и в 30 раз мощнее фумарол вулкана Авачинский. Верхнее, ближайшее к кратеру жерло, было основным и характеризовалось на порядок большим расходом водного флюида, чем нижнее. В январе 2009 г. расходы водного флюида из этих жерл составили ~ 170 кг/с и ~ 20 кг/с, соответственно.

3. Для сравнения, средние тепловые мощности и расходы водного флюида для некоторых вулканов Южной Камчатки в конце 2008 г. - начале 2009 г. оцениваются таким образом: Авачинский – 10-15 МВт (4-5 кг/с), Горелый – 60-70 МВт (20-25 кг/с), Мутновский – 200 МВт (60-70 кг/с). За год эти вулканы выносят в среднем следующие массы водного флюида: Авачинский – 0.15 млн. т/год, Горелый – 0.7 млн. т/год, Мутновский – 2 млн. т/год. Если предположить, что фумарольная деятельность вулканов связана с охлаждением и кристаллизацией магмы подземными водами, то это

соответствует средним темпам охлаждения магмы в недрах этих вулканов в межэруптивный период: ~0.3 млн. т/год (Авачинский), ~ 1.5 млн. т/год (Горелый), 4-5 млн. т/год (Мутновский).

Таблица 2. Сведения о тепловой мощности и темпах выноса водного флюида фумарольными шлейфами некоторых вулканов южной Камчатки в ноябре 2008 г. – январе 2009 г.

Дата и время UTC, h : min	Высоты подъема шлейфа		CO S α	Скорость ветра, м/с (внизу,вверху шлейфа и			Тепловая мощность, МВт		Расход водного флюида, кг/с		Примечание
	Оси Δh_0 , м	Верха Δh_T , м		U н	Uв	Uср	По Δh_0	По Δh_T	По Δh_0	По Δh_T	
Вулкан Авачинский											
24.11.2008 00:37	300	500	1	0	3.3	1.7	23	13	10	5	Слабый ветер
Вулкан Мутновский											
24.11.2008 01:24	630	750	0.5	0	4.5	2.3	19 0	70	70	25	Активная воронка
	410	500	0.5	0	4.5	2.3	80	15	30	5	Верхнее фумарольное поле
Вулкан Авачинский											
11.01.2009 02:24	270		0.87	4. 2	6.7	5.5	7		2.5		Удвоенная тепл. мощность правой фумаролы, сильный ветер То же
	23:27	105	1	0	4.0	2.0	7		2.5		
14.01.2009 02:45	50	750	1	4	8	6	11		3		То же
Вулкан Горелый											
12.01.2009 04:32	530	700	0.7	0. 7	2.8	1.7	80	50	50	20	Слабый ветер

4. За четыре месяца извержения (конец декабря 2008 г. - конец апреля 2009 г.) вулкан Корякский вынес ~ 1.5 млн. т водного флюида. Если предположить, что эта вода образовалась при вскипании метеорной воды в результате охлаждения и кристаллизации магмы, то это соответствует массе, как минимум, ~ 3 млн. т внедрившейся магмы. Учитывая сравнительно медленное охлаждение магмы при взаимодействии ее с водой вследствие закалки, масса внедрившейся магмы могла быть на порядок больше.

Концептуальная модель вулкана Корякский

Предположим, что закон повторяемости внедрения интрузий на Корякском подобен повторяемости на вулкане Ключевской, где примерно на десять не вышедших

на поверхность «интрузий» приходится всего одно (магматическое) извержение [6]. Тогда из 600-летнего интервала повторяемости магматических извержений можно ожидать, что на Корякском каждые ~ 60 лет может происходить внедрение интрузии, которое может сопровождаться слабым немагматическим извержением. Т.е. текущее извержение, происшедшее после 52 летнего интервала покоя, вполне могло быть следствием внедрения интрузии и взаимодействием ее с водой. Спокойный характер такого взаимодействия мог быть обусловлен значительной (несколько км) глубиной расположения верхней кромки интрузии от поверхности земли, где разность плотностей воды и образующегося при ее нагревании флюида сравнительно мала.

Магма могла внедряться в область размерами в плане ~8 x 10 км на глубинах примерно от 0 до 9 км от у.м., в которой постоянно происходят микроземлетрясения [18]. Наличие постоянной микросейсмичности во всем объеме области указывает, что в ней снижены пороговые дифференциальные напряжения среды и что она сильно раздроблена. Обычной причиной этого является насыщение флюидами ее порового пространства [24]. В плане область совпадает с зоной побочных извержений вулкана и распространения даек, она, вероятно, представляет собой проекцию магматической колонны вулкана (или промежуточного магматического очага, если он существует). Согласно геофизическим данным, среда в пределах Авачинского грабена, который занимает большую часть этой области, обладает повышенной электропроводностью вследствие насыщения гидротермальными растворами [15]. Мы полагаем, что эта область микроземлетрясений представляет собой геотермальный резервуар вулкана Корякский, который питает фумаролы и немагматические извержения вулкана, при которых выносятся значительные массы водяного пара. Наличие такого резервуара меньшего размера предполагается в постройке вулкана Авачинский [4].

Исходя из размеров области микроземлетрясений, объем геотермального резервуара вулкана Корякский оценивается нами в ~ 700 км³. Если полагать коэффициент пористости среды в резервуаре равным 5 %, а плотность водного флюида в нем ~20 кг/м³, то масса флюида в системе оценивается как ~ 300 млн. т. Здесь плотность водного флюида оценивалась при среднем давлении 40 бар, измеренном в скважине на Мутновском геотермальном месторождении на глубине 980 м [8].

Концептуальная модель перемещений магмы и прогноз развития извержения 2008-2009 гг.

Изучение сейсмичности по данным каталога землетрясений Авачинско-Корякской группы КФ ГС РАН позволяет сделать следующие предварительные выводы:

1) В течение почти 14 лет, начиная с начала детальных наблюдений (ноябрь 1992 г.), уровень микросейсмической активности в земной коре и верхней мантии (на глубинах от 20 до 40 км) в Авачинско-Корякском районе был сравнительно низким [18]. В конце февраля - августе 2008 г. произошло резкое усиление в виде нескольких роевых последовательностей и одиночных событий, причем землетрясения на глубинах от 30 до 40 км происходили непосредственно под вулканом Корякским. Мы полагаем, что это отражало подъем его магматической колонны к поверхности земли и затем внедрение магмы (на глубинах от 10 до 14 км) в примыкающий к вулкану с севера субмеридиональный разлом, на котором располагаются многочисленные Налычевские гидротермы. С июня 2008 г. началось внедрение магмы в основание геотермального резервуара вулкана и увеличение в нем избыточного давления флюида за счет взаимодействия воды с магмой. Под вулканом Авачинский землетрясений на этих глубинах не было, т.е. не было свидетельств подъема магмы к поверхности земли. Этот вулкан уже извергался в недавнем прошлом (в 1991 г.) и, вероятно, еще не накопил достаточно магмы в своем периферическом магматическом резервуаре.

2) С сентября 2008 г. уровень сейсмической активности в Авачинско-Корякском районе на глубинах 20-40 км постоянно снижался. Это указывает, что подтока свежей магмы в систему с того времени практически нет и извержение идет за счет тепла, ранее внедрившейся магмы.

3) В конце ноября 2008 г. началась видимая активизация вулкана Корякский в виде интенсивной разгрузки флюида из его геотермальной системы. Задержка начала видимой активизации по сравнению с сейсмической могла быть вызвана медленным развитием переходных процессов в геотермальной системе вулкана или какими-либо тектоническими причинами.

4) С января 2009 г. микроземлетрясения в районе происходят как под вулканом Корякский, так и в основном вдоль прилегающего к нему субмеридионального разлома на глубинах от 2 до 10 км ниже уровня моря. Мы полагаем, что это отражает отток флюида из геотермального резервуара вулкана к расположенным на разломе Налычевским термальным источникам. Это является первой вероятной причиной снижения избыточного давления флюида в системе и ослабления извержения. Еще одной возможной причиной снижения избыточного давления в системе мог быть приток в геотермальный резервуар вулкана Корякский холодных метеорных вод. Площадь указанного субмеридионального разлома по сейсмологическим данным оценивается равной ~100 км². Моделирование подобных систем, проведенное на вулкане Куджу (Куџу) в Японии, показывает реальность такого сценария [25]. Ослабление извержения не может быть объяснено разгрузкой системы в результате текущего извержения, поскольку во время извержения было вынесено не более 0.5% от массы флюида, имеющегося в геотермальном резервуаре Корякского вулкана.

5) На основании сказанного, на вулкане Корякский не следует ожидать возобновления извержения, т.е. усиления его тепловой разгрузки и появления примеси пепла. Ожидается продолжение парогазовой активизации в жерле на СЗ склоне с тепловой мощностью порядка 100 - 200 МВт в течение нескольких лет.

Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам ИВиС ДВО РАН Л.И. Базановой, В.Н. Двигало, В.А. Дрознину, И.К. Дубровской, А.В. Кирюхину, А.П. Максимова, И.В. Мелекесцеву, М.Ю. Пузанкову, Н.И. Селиверстову, Р.Л. Дунину-Барковскому, а также В.А. Широкову (КФ ГС РАН), Г.Ф. Васильеву за консультации и полезные дискуссии и А.В. Сокоренко за предоставленные фотоматериалы.

Список литературы

1. *Влодавец В.И.* Справочник по вулканологии. М.: Наука. 1984. 338 с.
2. *Гавриленко Г.М., Мельников Д.В.* Пятнадцать лет из жизни вулкана Мутновского // Природа. №2. 2008. С. 54-58.
3. *Горельчик В.И.* О рое землетрясений в районе вулкана Ааг // Бюлл. вулканол. ст. 1969. № 45. М.: Изд-во АН СССР. С. 32-38.
4. *Дрознин В.А., Дубровская И.К., Кирюхин А.В. и др.* Диагностика геотермального резервуара Авачинского вулкана по фумарольной активности и сейсмологическим данным // Материалы IV международного совещания по процессам в зонах субдукции Японской, Курило-Камчатской и Алеутской островным дугам: 2004. Петропавловск-Камчатский:, 21-27 августа 2004. С. 37-39.
5. *Иванов В.В.* Об облаках парогазовых извержений и фумарол // Вулканология и сейсмология. 1988. № 4. С. 37-50.
6. *Иванов В.В.* Вулканическая и магматическая деятельность вулкана Ключевской в январе 1994 г. - марте 2009 г. и прогноз его активности // Материалы ежегодн.

- конф., посвященной Дню вулканолога. 30-31 марта 2009. Петропавловск - Камчатский: ИВиС ДВО РАН (наст. сборник).
7. *Иванов В.В.* Вулкан Корякский: как он устроен, и чего от него можно ожидать в будущем? // Камчатское время № 19 (742) от 20 мая 2009 г. С. 24.
 8. *Кириухин А.В., Корнеев В.А., Поляков А.Ю.* О возможной связи сильных землетрясений с аномальными изменениями давления в двухфазном геотермальном резервуаре // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 3-11.
 9. *Кирсанов И.Т., Озеров А.Ю.* Состав продуктов и энергетический эффект извержения вулкана Горелый в 1980-1981 гг. // Вулканология и сейсмология. 1983. № 1. С. 25-42.
 10. *Маренина Т.Ю., Сирин А.Н., Тимербаева К.М.* Корякский вулкан на Камчатке // Труды лабор. вулканологии. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 67-130.
 11. *Масуренков Ю.П., Пузанков М.Ю., Егорова И.А.* Вулкан Корякский // Действующие вулканы Камчатки. Т.2. М.:1991а. С. 230-240.
 12. *Масуренков Ю.П., Егорова И.А., Пузанков М.Ю. и др.* Вулкан Авачинский // Действующие вулканы Камчатки. Т.2. М.:1991б. С. 246-269.
 13. *Меняйлов И.А., Овсянников А.А., Широков В.А.* Извержение вулкана Эбеко в октябре-декабре 1987 г. // Вулканология и сейсмология. 1988. №3. С. 105-108.
 14. *Мелекесцев И.В.* Вулкан Корякский (Камчатка): Извержение 1895-1896 гг. выделено ошибочно // Вулканология и сейсмология. 1996. №2. С. 91-95.
 15. *Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И.* Глубинное строение района Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2003. №4. С. 3-10.
 16. *Мороз Н.* Землетрясение будет сегодня // Камчатское время №44 (718) 26 ноября 2008 г.
 17. *Мороз Н.* Ядовит ли пепел Корякского вулкана? // Камчатское время №14 (737) 15 апреля 2009 г.
 18. *Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дроздина С.Я., Кожевникова Т.Ю.* Сейсмичность Авачинского вулкана в 1994-2005 гг. // Геофизический мониторинг Камчатки: Материалы научно-техн. конф. 17 -18 января 2006. Петропавловск - Камчатский: КФ ГС РАН. С. 101-105.
 19. *Сирин А.Н., Тимербаева К.М.* Извержение Корякского вулкана в начале 1957 г. // Бюл. вулканол. ст. 1959. № 28. М.: Изд-во АН СССР. С. 3-20.
 20. *Таран Ю.А.* Фумарольная активность Корякского вулкана в 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1985. №4. С. 82-85.
 21. *Федотов С.А.* Оценка выноса тепла и пироклаستيку вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков // Вулканология и сейсмология. 1982. №4. С. 3-28.
 22. *Шеймович В.С., Патока М.Г.* Геологическое строение зон активного кайнозойского вулканизма. М.: Недра, 1989. 204 с.
 23. *Phreatic eruption* // *Wikipedia, the free encyclopedia* (http://en.wikipedia.org/wiki/Phreatic_eruptions).
 24. *Phreatic and phreatomagmatic eruptions* // *ThinkQuest 2001 – Team C0112681* (http://library.thinkquest.org/C0112681/Eng/Normal/Eruption/Eruption_Styles/Phreatic-magmatic.htm).
 25. *Sachio Ehara, Yasuhiro Fujimitsu, Jun Nishijima et al.* Change in The Thermal State in a Volcanic Reservoir beneath an Active Fumarolic Field after the 1995 Phreatic Eruption of Kuju Volcano, Japan // *Proceedings World Geothermal Congress. Antalia, Turkey, 24-29 April 2005.*

A NEW CYCLE OF KORYAKSKY VOLCANO ACTIVITY IN LATE 2008 AND EARLY 2009: EVALUATION OF HEAT AND FLUID DISCHARGE, A MODEL OF MAGMA ASCENT AND A FORCAST OF THE CURRENT ACTIVITY

V.V. Ivanov

The Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 683006, Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: victor@kscnet.ru

Since 23 November 2008 steaming on Koryaksky Volcano has been observed and continues up to the present moment (early July 2009). From late December 2008 to April 2009 the volcano showed periods of the highest activity that were accompanied by a little amount of ash in gas and steam emissions. The average calculated heat capacity and water fluid discharge comprised ~ 400 MW and 150 kg/s respectively. Within the first four months the volcano produced 1.5 million of water fluid. The distribution of micro-seismic events revealed a geothermal system located at a depth of 0-9 km with the volume of ~ 700 km³ in which the budget of water fluid is about 300 millions of tons. Likely the current activity was the result of the magma ascend from depths of more than 40 km and intrusion of magma into the geothermal system ($M = 3 - 30$ million of tons), and interaction between magma and water from the system and discharge of water fluid on the surface. The activity was preceded and accompanied by strong seismic activity at a depth of 500-630 km ($M = 7.7$ and 7.3) and in the crust and upper mantle beneath the Avachinsky and Koryaksky group of volcanoes at a depth of 0-40 km ($K_{smax} \leq 8$). We suppose Koryaksky will continue to be active and produce gas and steam emissions for some years with heat capacity of 100-300 mW. We do not expect ash plumes from the volcano for the forecasting period.