

УДК 551.21

О.Б. Селянгин

**СТРОЕНИЕ, ВЕЩЕСТВО И БЛИЗПОВЕРХНОСТНЫЕ
МАГМАТИЧЕСКИЕ ОЧАГИ ВУЛКАНОВ МУТНОВСКИЙ
И ГОРЕЛЫЙ (МУТНОВСКИЙ ГЕОТЕРМАЛЬНЫЙ
РАЙОН, КАМЧАТКА). II. ВУЛКАН МУТНОВСКИЙ**

Описываются строение, состав пород и история развития вулкана Мутновский, по положению в инфраструктуре Камчатки и высокой энергетике современной газо-гидротермальной активности являющегося одним из наиболее благоприятных объектов геотехнологического освоения. Обсуждается его новейшая вулканическая деятельность, механизмы извержений, дается прогноз активности и морфоструктурной эволюции вулкана.

Ключевые слова: стратоконус, вершинная кальдера, лава, пемзы, извержение, прогноз, высокотемпературный флюид.

С строение и развитие вулкана Мутновский

Постройка вулкана Мутновский – сложное хребтообразное сооружение (вулканический массив), состоящее из четырех тесно сближенных, последовательно формировавшихся стратоконусов с вершинными кальдерами и полигенными дочерними внутрикальдерными постройками (рис. 1 (см. вкладку) в [16]).

Вулкан Мутновский-1

Постройка вулкана Мутновский-1 (комплекс M_1^1 , на рис. 1 в [16]) представляет древнейшую северную часть массива. Это глубоко эродированный слоистый конус, не сохранивший даже реликтов первичных склонов. Его незакрытая северная половина расчленена модифицированными эрозией троговыми долинами на систему подковообразно расходящихся хребтов Отходящий и Клешня с отрогами. Южнее фрагменты околожерловой зоны вулкана Мутновский-1 вскрыты одной из молодых кальдер вулкана и ушельем вытекающей из нее р. Вулканная.

Абсолютная высота останца вулкана Мутновский-1 около 1800 м, наибольшая относительная – 1400 м с северо-восточной стороны, над дном долины р. Фальшивая. В ее правом борту, на уровне 500–550 м, Мутновский-1 подстилается ранне-средне-четвертичными ингимбритами. С северо-запада его превышение

составляет всего 650–700 м над поверхностью перекрывающих здесь подножия останца позднечетвертичных игнимбритов кальдеры вулкана Горелый.

Коэффициент эксплозивности вулкана Мутновский-1 около 70 %, количество пирокластического материала меньше в районе подножий, но существенно увеличивается к околожерловой зоне. В составе постройки преобладают базальты и андезибазальты, доля кислых-средних пород не превышает 10–15 %.

Глубокая эродированность и достаточная обнаженность вскрытых толщ северного сектора Мутновского-1 и его вершинной кальдерной зоны позволили выполнить более детальную (1:10000–1:25000 масштаба) съемку этой части вулкана, — вместе с сопредельными с юга вершинными кальдерно-кратерными комплексами вулканов Мутновский-3 и -4 (рис. 1).

Картирование глубоко вскрытого вулкана в таком масштабе предполагает его дальнейшее уточнение, — в частности, в отношении разнообразия и распространенности продуктов газо-гидротермального метаморфизма пород, а также в части классификации и расчленения ледниковых, флювиогляциальных и разнотипных флювиальных отложений позднечетвертичного времени.

В целом разрезы вулканитов Мутновского-1 обнаруживают циклические вариации их состава в ходе его развития, однако без выраженной общей направленности. Так, в разрезе хребта Отходящий (северо-западный сектор бывшей постройки) наблюдается следующее чередование: базальты и андезибазальты – около 180 м видимой мощности, поток двупироксеновых андезитов – 30 м; вновь пачка базитов порядка 120 м и поток смешанных оливин-содержащих кварц-биотитовых дацитов с пористыми гомеогенными включениями долеритоподобных роговообманковых базальтоидов (миктитов и минлитов – от *mixing'a* и *minling'a* англоязычных исследователей), придающими породе вид грубой лавобрекчии, – до 35 м; венчающие разрез шлаки и лавы базитов отрога 1325,8 м – около 80 м. Сводный разрез значительно сниженного отрога хр. Отходящий, протягивающегося к Восточной группе Северо-Мутновских терм, включает около 140 м окисленных туфов (преобладают) и лав базитов, поток аналогичных вышеотмеченным кварц-биотитовых дацитов с включениями – до 40 м, и вновь базальты – 8 м. В 300-

метровом разрезе верхов восточного склона хр. Клешня среди базальтоидов зафиксирован единственный поток субафировых андезитов (10 м) в средней части и горизонт красноцветных андезитовых агглютинатов (8–10 м) у гребня; дациты с включениями в этом секторе постройки уже выклиниваются. Наконец, мощный, до 40–50 м, выход псевдокластических двупироксеновых андезитов со скорлуповато-шаровой отдельностью венчает разрез глубоко измененных пород вулкана Мутновский-1 в правом борту ущелья р. Вулканная, непосредственно под перекрывающим его комплексом заполнения палеокальдеры.

Тела дацитов с включениями, отмеченные в описании разрезов как потоки, по особенностям минерального состава уникальны в истории развития всего вулкана (см. далее). Занимая близкое положение в периклинали Мутновского-1, они, по всей видимости, представляют части некогда единого мощного покрова гибридных лав, перекрывавших весь северо-западный сектор (возможно, всю западную половину) древнейшего конуса. Для этой его части они являются маркирующим горизонтом ($M_1^{1в}$), расчленяющим массив его пород на три толщи (включая и их самих) (рис. 1).

На всей площади эродированной старой постройки расчленено множество выходов даек — преимущественно базальтового состава и радиальной к бывшему жерлу ориентировки. Рой крутопадающих, параллельных и косопересекающихся даек запад-северо-западного простирания вскрыт в толще глубоко измененных пирокластитов Мутновского-1 в правом борту р. Вулканной (рис. 1 в [16], рис. 1) Количество выходов даек заметно возрастает с увеличением глубины эрозионного среза. Одни из них были слепыми, другие питали терминальные извержения, некоторые — побочные прорывы. Несколько сильно разрушенных аппаратов побочных извержений сохранилось у северного подножия вулкана Мутновский-1 (рис. 1 в [16]). Их шлаки и лавы представлены оливин-плагиоклазовыми и афировыми базальтами у западной группы конусов, гибридными оливин-двупироксеновыми андезибазальтами в восточном конусе.

Высота вулкана Мутновский-1 к концу его формирования и перед образованием на нем вершинной кальдеры превышала 2400 м, объем — около 58 км^3 .

В завершение обзора строения и состава пород вулкана Мутновский-1 вернемся к обсуждавшимся выше лавам смешанных кварц-биотитовых дацитов с пористыми долеритообразными включениями роговообманковых базальтоидов. Они представляют характерную особенность его петрографии и магмодинамики, общую с близкими ему по возрасту угасшими и столь же разрушенными соседними вулканами Двугорбый и Скалистый. В истории деятельности всего многоконусного вулкана Мутновский эти гибридные лавы проявились со столь исключительной масштабностью лишь однажды. Они представляют тип смешения магм контрастных, кислых и базальтоидных составов, с преобладающей долей первых. Газонасыщенная основная магма, диспергированная в более холодной кислой на отдельные, экспрессно кристаллизовавшиеся и становившиеся пористыми порции («капли», «подушки» и т.п., размерами от долей мм до 30 – 40 см) [12, 14], одновременно вызвала существенный разогрев и мобилизацию несущего их кислого расплава, с соответствующим снижением его вязкости. Следы разогрева кислого ингредиента смеси выражены резорбцией его вкрапленников и существенно стекловатым, бедным микролитами составом его основной массы. Степень снижения вязкости образовавшихся таким образом такситовых, брекчиевидных лав обеспечивала их медленное, по всей видимости, течение при необычно высокой мощности потоков, варьировавшей в зависимости от уклона подстилающей поверхности. Объем лав этого извержения, достигавший 0,6 – 0,8 км³, был бы достаточным для образования вершинной кальдеры Мутновского-1, однако эффузивный его характер и присутствие в лаве базальтоидных включений указывают, что это извержение развивалось по типу вытеснения (замещения объема на объем) кислого расплава базальтоидной магмой, не образуя полости для кальдерного обрушения. Подобные же дацитовые лавы с включениями, но еще большей, до 100 м, мощности, полностью перекрывали базальтоидную постройку соседнего с севера вулкана Двугорбый. Такие же лавы залегают у юго-восточного подножия следующего к северу вулкана этого субмеридионального ряда – Скалистого; здесь в них, в частности, выщелачиванием и эрозией выработана котлообразная впади-

на известных Дачных источниках Мутновского месторождения парогидротерм. Для характеристики текучести подобных лав с базальтоидными включениями и дацит-риодацитов матрицей упомянем аналогичные, практически сохранившие первичную морфологию потоки среднеплейстоценового вулкана Массивного в Малосемячинском вулканическом центре [9], распространявшиеся по уклону до 10 – 12°. Они имеют мощность порядка 200 м, плоские поверхности со следами валов коробления и крутые боковые и фронтальные уступы, а протяженность крупнейшего из них достигает 7 км.

Необходимо уточнение возраста этих лав в Мутновском районе, но их однотипность для ряда вулканов, сближенных в пространстве и времени, указывает, что в конце среднего – в первой половине позднего плейстоцена их магмопитающие системы проходили одинаковые стадии развития: образование очагов кислых дифференциатов с последующим пополнением их базальтовой магмой, вызывавшим, вероятно, частичное смешение ее передовых порций с кислым расплавом и затем практически полное вытеснение образовавшейся смеси.

После этапа этих грандиозных эффузивных извержений кислых магм деятельность вулкана Мутновский-1 продолжилась новым циклом существенно базальтоидного вулканизма, с единичными извержениями «сухих», двупироксеновых андезитов и дацитов несоизмеримо меньшего объема, — вплоть до этапа кальдерообразования на вершине. Активность вулкана Двугорбый завершилась небольшими прорывами оливинных базальтов, один из которых вскрыт эрозией из-под покрова гореловских игнимбритов на его северо-западном склоне (рис. 1 в [16]).

Любопытно, что вскоре после этапа образования крупных очагов кислых магм и описанных эффузивных извержений их смесей с базальтоидами прекращается деятельность вулканов всего субмеридионального ряда (Северо-Мутновской зоны), расположенных севернее Мутновского-1 – Двугорбого, Скалистого и Каменного. Продолжение же деятельности самого Мутновского-1 совпало, по всей видимости, с реориентацией магмопроводящей структуры района с бывшего субмеридионального направления на запад-северо-западное, обусловившей соответствующую ориентировку формировавшихся далее хребтообразных построек вулканов Мутновский и Горелый.

Кислые очаги, периодически пополняемые менее объемными порциями горячей базальтовой магмы и опустошаемые извержениями лишь частично или не дренируемые ими вовсе, в подходящей гидрогеологической ситуации могут быть источниками тепла длительно существующих гидротермальных систем.

Кальдера вулкана Мутновский-1 и внутрикальдерная постройка (комплекс M_1^2 на рис. 1 в [16], рис. 1). Кальдера, возникшая на древнейшем стратоконусе вулкана, стала местом формирования дочерней, заполнявшей ее полигенной вулканической постройки. К настоящему времени от нее сохранился лишь фрагмент пологозалегающей толщи лав и пирокластики на гребне южной части хр. Отходящий, по которому и возможно приблизительное воссоздание структуры (рис. 1 в [16], рис. 1). Она была несколько смещена относительно центра материнской постройки к северо-западу, имела удлиненную в этом же направлении форму и размеры по осям около $2 \times 2,5$ км. Обезглавленный ею Мутновский-1 был снижен до уровня 1800–1900 м. Характер кальдеробразующего извержения и тип возникшей структуры теперь невосстановимы и могут лишь предполагаться по аналогии с подобной формой одной из более молодых частей вулкана, о чем говорится ниже.

Сохранился единственный четко выраженный участок борта кальдеры в седловине гребня хр. Отходящий с отм. 1545,8 м. Здесь выходит прислоненная к нему пачка флювиогляциальных (?) песчано-гравийных отложений с прослоями глыб, занимавшая некогда часть атрио вокруг внутрикальдерного конуса. Вскрытый на юго-западном склоне фрагмент разреза последнего начинается ниже, с уровня ~ 1450 м. Мощность его составляет около 270 м, из которых нижние 150–170 м приходятся на пачку сравнительно равномерно переслаивающихся лав и пирокластики базальтов, а около 100 м в верхах разреза представлены пачкой грубослоистых туфов плагиобазальтов, в том числе крупнопорфировых анортитовых. Они обильно инъецированы дайками и прослоены маломощными потоками и силлами аналогичного состава.

Деятельность внутрикальдерной постройки Вулкана Мутновский-1 завершилась извержениями вулканитов среднего – кислого состава. В привершинной её части выходит протяжен-

ная дайка андезитов северо-западного простирания, а в палеодолине северного склона вулкана, некогда прорезавшей борт кальдеры и теперь сохранившейся в виде возвышенного участка обращенного рельефа, залегает поток двупироксеновых дацитов, по краям перекрытый сцементированными песчано-глыбовыми флювиогляциальными отложениями (рис. 1).

Среди других частей массива вулкан Мутновский-1 выделяется масштабом и глубиной газо-гидротермального метаморфизма своих пород. В целом это обычное для вулканических аппаратов кислотное выщелачивание с образованием аргиллизитов по основным породам, опалитов по кислым, с импрегнацией их серой, гипсом, халцедоном, иногда сульфидами. Эти изменения предваряются окислением вулканитов и хлоритизацией их темноцветных минералов. Выраженная зональность метаморфизма относительно главных элементов структуры палеовулкана свидетельствует в пользу связи основной доли изменений с его былой деятельностью: их интенсивность возрастает с приближением к жерловой зоне и на более низких стратиграфических уровнях.

Другим фактором метаморфизма пород вулкана Мутновский-1 являются парогидротермы Мутновского геотермального месторождения, южная часть которого располагается на северном склоне бывшего вулкана, а общая линейная структура простирается далеко за его пределы в северо-северо-восточном направлении (рис. 2 в [16]). Это совмещение ставит вопрос о вовлеченности постройки в Мутновский-1 в систему региональной дизъюнктивной тектоники, актуальный как ввиду возможной роли этого фактора в исходной локализации вулкана и последующем усложнении его структуры, так и в отношении характера связей вулканизма и гидротермальной деятельности.

У северного подножия останца вулкана Мутновский-1 располагаются две группы – Западная и Восточная – естественных выходов парогидротерм, названных Т.Ю. Марениной [4] Северо-Мутновскими. Западнее их и выше по склону наблюдается также множество пятен и линейных участков интенсивного изменения пород, маркирующих ранее отмершие зоны разгрузки термального флюида (рис. 1). Размещение этих выходов не зависит от указанной «вулканической» зональности метоморфиз-

ма и имеет наложенный характер. Они имеют преимущественно субмеридиональную (как и цепочка вышеотмеченных побочных конусов) и северо-восточную (40–45°) ориентировку и концентрируются в широком меридиональном понижении между хр. Отодящим и западными отрогами хр. Клешня. Предполагается, что эта депрессия представляет собой грабен, модифицированный эрозионно-экзарационными процессами. По смещению поверхности лав кварц-биотитовых дацитов с включениями, залегающих на хребте Отходящий и на его северо-восточном отроге и, как отмечалось, принадлежавших, вероятнее всего, одному стратиграфическому уровню в периклинали вулкана, глубину погружения в этой части структуры можно оценить приблизительно в 100–120 м.

На продолжении этой зоны по данным анализа трещиноватости пород [3] выделена система разломов северо-северо-восточного простирания, контролирующих, как предполагается, локализацию и разгрузку всего Мутновского геотермального месторождения. Приводимые в этой же работе данные бурения на нем показывают, что здесь эти разрывы мало- или безамплитудны. Дискордантность их ориентировке массива вулкана Мутновский, имеющего общее северо-западное простирание, свидетельствует об определенных различиях форм и механизмов тектонического контроля вулканизма и гидротермальной деятельности новейшего времени. Частичное их совпадение имеет место лишь на верхнем структурном уровне, проявляясь в образовании структур типа секторного грабена на вулкане и разрывов, контролировавших размещение конусов его побочных извержений.

Однако совместный анализ морфологии и магмопроводящих структур вулканов Мутновский и Горелый показывает, что описанная зона разрывов представляет часть системы вулканических рифтов в единой для южнокамчатских вулканов зоне растяжения и магматической проницаемости, имеющей общее северо-восточное простирание. На линии вулкан Горелый – вулкан Мутновский она испытывает двойной, Z-образный разворот, со смещением к юго-востоку её Северо-Мутновской (или Мутновско-Вилючинской) части (рис. 2 в [16]). Разноориентированным отрезкам зоны свойственна разновременность их

длиннопериодной магматической активизации. В конце среднего – начале позднего плейстоцена её Северо-Мутновская ветвь контролировала, как отмечалось, локализацию ряда вулканов Двугорбый, Скалистый и вулкана Каменный далее к северу, в направлении вулкана Вилючинский. В позднем плейстоцене–голоцене наиболее проницаемым для магм был отрезок («сместитель») северо-западного направления, что отразилось в хребтообразной морфологии и пространственной ориентировке вулканов Мутновский и Горелый. Показательно, что за пределами их прижерловых участков газо-гидротермальная активность здесь практически не проявилась. Напротив, с затуханием вулканов Северо-Мутновской ветви её подновляющиеся разрывы и системы трещиноватости пород стали проводниками долгоживущих парогидротерм, питаемых, вероятно, теплом остаточных вулканических очагов. Жизнь некоторых из них может, в свою очередь, продлеваться разогреваемыми их пополнениями глубинной базальтовой магмой.

Вулкан Мутновский-2

Жерло второго конуса в массиве вулкана Мутновский (комплекс M_2^1 на рис. 1 в [16]) было смещено от оси предшествующего на 3 км к юго-востоку. Это значительно лучше сохранившаяся постройка типа Сомма-Везувий, аналогично предыдущей. Разрушен только северный ее склон – двумя крупными трогами, цирки в верховьях которых «съели» северную половину вершины постройки. Восточный и южный склоны близки к первичным, лишь в привершинной части они нарушены довольно глубокими барранкосами и ложбинами стока.

По данным обследования доступных обнажений в бортах троговых долин и в уступе вершинной кальдеры, Мутновский-2 – существенно базальтоидный конус, сходный с предшествующим по индексу эксплозивности и доле средних – кислых дериватов. В нем также отсутствуют признаки однонаправленной эволюции магматического вещества. Среди преобладающих базальтоидов установлены поток риодацитов на водоразделе отмеченных трогов, потоки двупироксеновых андезитов в «окнах» на северо-восточном и южном склонах, поток афировых ферроандезитов на восточном склоне. Большинство из них перекрывается базальтовыми лавами последнего этапа формиро-

вания вулкана Мутновский-2. К заключительной стадии его деятельности относятся также базальт-андезито-базальтовые потоки и шлаковые конусы побочных прорывов, имеющиеся только на его юго-западном склоне. Сформировавшийся конус вулкана Мутновский-2 достигал высоты 2400 м и объема порядка 24 км³.

Соотношения вулканитов комплекса M_2^1 с ледниковыми формами окружающего горно-долинного рельефа дают ключ для приближенной датировки главных сооружений вулкана. Особенно показательна эволюция долины р. Ахонтен. Её нижняя, юго-восточная половина представляет собой молодой ледниковый трог, коррелирующий со второй фазой позднеплейстоценового оледенения. Верхняя, субмеридиональная часть долины, представляет реликт древнего трога, сохранившегося от позднейшей моделировки, по-видимому, вследствие перехвата былой области его питания низовьями р. Фальшивая и резкого ослабления эрозии. Последнему обстоятельству способствовала и вулканическая аккумуляция: именно в этой части долины её правый борт и днище залиты лавами вулкана Мутновский-2, что определяет его возраст как в целом соответствующий межледниковью (Q_3^3). Потоки практически этого же лавового поля, но стекавшие в долину р. Фальшивая, позднее также преобразованную в молодой трог, «срезаны» ею и облекания склона, подобного наблюдаемому в верховьях р. Ахонтен, не обнаруживают (см. разрезы на рис. 1 в [16]).

Вершинная кальдера и внутрикальдерный конус вулкана Мутновский-2 (комплекс M_2^2 на рис. 1 в [16]). Кальдера имела диаметр 2,5 км и субгоризонтальную кромку кольцевого уступа на уровне 2000–2050 м.

Не сохранилось каких-либо взрывных или пирокластических отложений и не выявлено крупных единоактно извергнутых лавовых масс, с которыми можно было бы связывать происхождение этой структуры. Тем не менее, наиболее вероятным представляется взрыво-провальный механизм образования кальдеры при извержении кислой пирокластике, – возможно, направленном в основном на северный, ныне разрушенный склон постройки. В свете концепции синэруптивной дегазации

кислых магм [13] не исключено, что своеобразный след снежных пемз кальдерообразующего извержения представляют удлиненные и вспененные по краям обломки риодацитового обсидиана размерами 3–8 см, во множестве рассыпанные на останцах первичных поверхностей восточного и южного подножий вулкана.

Внутрикальдерный конус вулкана Мутновский-2 разместился с небольшим смещением к западу от центра кальдеры, в связи с чем он полностью скомпенсировал западную ее половину, и часть его лав здесь перелилась на более крутые склоны материнской постройки, затопив ряд ее побочных конусов (см. рис. 1 в [16]). Небольшой незаполненный участок атрио сохранился лишь у юго-восточного подножия внутрикальдерного конуса. Высота последнего достигала 2350 м, современная высота останца 2323 м – максимальная для всего массива вулкана.

Судя по доступной части разреза, конус сложен базальтами и андезибазальтами. В частности, мощный, до 60–70 м, пласт андезибазальтовых агглютинатов, бронированных лавой подобного же состава, слагает верхи разреза полностью сохранившегося юго-восточного сектора внутрикальдерной постройки. На ее разрушенной и малодоступной северной стороне, на разделяющем ледниковые цирки гребне сохранился останец 130-метровой горизонтально-слоистой пачки аргиллизированных и огипсованных вулканокластических отложений и лав, накапливавшихся, по-видимому, в основании внутрикальдерного конуса. В плане и по высоте, однако, обнажение этой пачки выходит за пределы интерполируемой сюда границы кальдеры, указывая на вероятное сбросо-оползневое смещение этого сектора вулкана к подрезающей его основание долине р. Фальшивая.

Вулкан Мутновский-3

Очередная, третья постройка в составе массива вулкана Мутновский (комплекс M_3^1 на рис. 1 в [16]) заложилась на уже готовом высоком пьедестале – между вершинами двух предыдущих сооружений, с некоторым смещением к юго-западу от разделявшей их седловины. Поэтому, достигнув близкой конусам-предшественникам высоты ~ 2200 м, Мутновский-3 далеко не достигал их объема, «набрав» всего около 5 км³.

Развитие вулкана Мутновский-3 совпало, по-видимому, с началом второй фазы позднеплейстоценового оледенения Камчатки. На вулкане Мутновский, по всем признакам, ледники её начальной стадии занимали преимущественно трог и впадины на склонах вулканического массива, тогда уже значительно эродированного, а также долины вокруг его подножий. Так, на северном склоне вулкана, в обнажении верховий трога р. Куропатка можно наблюдать налегание части базальтового потока вулкана Мутновский-3 на коренное основание (на плечо трога), и рядом, в стенке завершающего трог цирка – поверхность отрыва другой его части, некогда натекавшей на ледник и, очевидно, с ним же удаленной. Западнее, в верховьях долины между хребтами Клешня и Отходящий базальтовые туфы окаймляют карнизом циркообразную выемку на месте бывшего ледника, сошедшего вместе с перекрывавшей его частью туфовой пачки. Характерна также прямолинейность, «обрубленность» западного края лавовых полей вулкана Мутновский-3 у борта троговой долины р.р. Освистанная и Мутная, дренировавшей ледом кальдеры вулкана Горелый: такой характер границы, очевидно, мог быть обеспечен только сносом фронтальных частей натекавших на ледник лавовых потоков.

Строение вулкана Мутновский-3 хорошо видно в кольцевом уступе его кальдеры, а также в левом борту ущелья вытекающей из нее р. Вулканная (рис. 1). Вскрытый здесь разрез наиболее высокой и крутосклонной части постройки представляет обычное переслаивание лав и пирокластики с резким преобладанием последней. В разрезе пологого подножия вулкана Мутновский-3 преобладают лавы, местами прослоенные отложениями лахаров. В целом его индекс эксплозивности не ниже 65 %.

В северной стенке кальдеры и в указанном борту ущелья видно налегание менее измененных вулканитов комплекса M_3^1 на глубоко измененные породы вулкана Мутновский-1. На юго-востоке, в «окне» у основания самой высокой части кальдерного уступа выходят, по-видимому, породы комплекса M_2^2 . В облакающей их здесь прижерловой толще вулкана Мутновский-3 по степени измененности выделяются три пачки вулканитов мощностью до 40–50 м каждая: нижняя, аргиллизированная, с

преобладающей бело-желто-бурой окраской; средняя – красноцветная, и верхняя, темно-серая, практически не измененная. Пачки, очевидно, соответствуют крупным циклам активности вулкана, разделявшимся длительными периодами покоя, а степень их измененности представляет результат последовательного наложения дискретных циклов газо-гидротермального метаморфизма.

На фоне такой стратиграфически-контролируемой измененности более высокой ее степенью выделяется западная часть постройки в. Мутновский-3, где сосредоточена и вся современная газо-гидротермальная активность вулкана. Описание ее дано в ряде работ [1, 4, 8, 15]. Здесь отметим лишь еще один пример крупной наложенной флюидопроводящей структуры – «корня» бывшего фумарольного поля на северо-западном склоне вулкана Мутновский-3. Она вскрыта в левом борту ущелья р. Вулканная в виде воронкообразной, расширяющейся кверху зоны трещиноватости и изменения пород, секущей стратификацию комплекса M_3^1 и до сих пор питающей цепочку сольфатар у бровки скального обрыва.

Постройка вулкана Мутновский-3 сложена породами дифференцированного ряда от базальтов до риодацитов, причем в ней выражена определенная направленность эволюции магматического вещества: неоднократные извержения кислых вулкаников были приурочены к финальной стадии её развития. В целом в ней резко преобладают базальты, породы промежуточного, андезибазальтового–андезитового состава установлены в немногих местах: в основании южной части перемычки между кальдерой и Активной Воронкой, в одном из потоков западного подножия (у г. Тарбаганья) и в разрезе восточной, самой высокой части кальдерного уступа.

Кислые вулканики залегают в верхах разреза северовосточного сектора вулкана (рис. 1). Под бровкой северной стенки его кальдеры выходит 2,5-метровой мощности поток мелкоглыбовых риодацитов. Выше гипсометрически и по разрезу, от цирка в истоке р. Куропатка, склон покрывает 2–3-метровый слой дацитовый пемзы – от пепла внизу до лапилли (в т.ч. аккреционных) в верхней части. Пемза перекрывается 0,5–0,8-метровым слоем базальтового шлака с бомбами смешанных

крупнопорфировых оливин-авгит-анортитовых андезибазальтов, содержащих полосы, линзы и включения пемз, аналогичных подстилающим. Извержение, очевидно, было результатом пополнения базальтовой магмой очага кислого расплава. Ниже по склону вулкана Мутновский-3 и на выступавших над ледниками частях Мутновского-1 (вокруг отм. 1626 м на карте 1:25000 масштаба) наблюдаются фрагменты этого же покрова пемз (ранее предположительно коррелировавшиеся с покровом пемз позднейшего, кальдерообразующего извержения), здесь более крупнообломочных, перемешанных с отмеченными основными шлаками и бомбами (переотложение из-за выпадения на снег?) и достигающих мощности 12–15 м. Описанные отложения представляют наиболее надежное свидетельство связи с вулканом Мутновский достаточно крупных масс кислого пирокластического материала.

У северо-восточного края кальдеры вулкана Мутновский-3 (отм. 1880,4 м) на описанных пемзах и шлаках залегает останец фронтальной части мощного, до 80 м потока дацитов, а в понижении склона западнее – протяженный глыбовый развал дацитов с базальтовыми гомеогенными включениями. Их источником могла быть вершинная экструзия. В составе взрывного материала аналогичные дациты распространены у подножия вулкана Мутновский-3 по правому берегу р. Вулканной.

Следующим актом кислого вулканизма Мутновского-3 было кальдерообразующее извержение, описываемое ниже.

Мутновский-3 более других составляющих вулканического массива богат побочными конусами, хотя некоторые из них, расположенные у юго-западного края его лавового поля (г. Долинная, например), по условиям обнаженности отнесены к комплексу M_3^1 с известной долей условности. Большинство из них, однако, непосредственно обтекается и частично перекрывается лавами вулкана Мутновский-4. Шлаки и лавы этой группы побочных прорывов, занимающих наиболее низкое гипсометрическое положение, представлены базальтами, заметно обогащенными оливином и клинопироксеном.

Еще три побочных конуса, изливавших ординарные оливин-плагиоклазовые базальты, вскрыты долиной р. Вулканная. Наиболее ранний из них, размытый и перекрытый лавами ма-

теринской постройки, обнажается в верховьях оврага Опасный; его серые слоистые шлаки, в частности, слагают большую часть уступа известного здесь живописного водопада. На перекрывающей их лаве, практически наследуя место прорыва, разместился один из позднейших побочных конусов – Красный Обрыв. Он сложен окисленными красно-коричневыми базальтовыми шлаками и бомбами и ныне разделен оврагом Опасный надвое: большая часть его фрагмента расположена на правом, меньшая – на левом борту оврага. У западного края правобережного останца из-под шлаков обнажается фронтальный уступ короткого потока глыбовой лавы.

Еще один останец небольшого побочного конуса на собственном лавовом потоке вскрыт в левом борту долины р. Вулканная в 2 км выше конуса Красный Обрыв. Переотлагавшиеся водными потоками шлаки этого (по всей видимости, зимнего) извержения широким шлейфом перекрывают реликты первичных склонов вулкана по обе стороны речной долины, — очевидно, ко времени этих событий еще не существовавшей.

Кальдера вулкана Мутновский-3, коррелятные ей отложения (комплекс M_3^2) **и комплекс её заполнения** (M_3^3). Кальдера в данном случае – одна (северо-восточная) из двух крупных сообщающихся деструктивных форм на вершинах молодых частей вулкана (см. рис. 1 в [16], рис. 1), ранее называвшаяся его «северным кратером» или северо-восточной частью «восьмеркообразного кратера вулкана Мутновский». Однако именно для этой морфоструктуры наиболее обосновано определение «вершинная кальдера»: для нее обнаруживаются коррелятные, связанные с ее образованием пирокластические отложения, загадочным образом отсутствующие у всех других подобных форм вулкана – как более ранних, так и более молодых.

Кальдера вулкана Мутновский-3 имеет в плане овальную, удлиненную к северо-западу форму и размеры по осям 1,5 × 2,0 км. Относительно оси материнской постройки она смещена на ее северо-западный склон и характеризуется асимметричным продольным профилем, с высотой юго-восточной кромки уступа 2185,1 м, реликтов северо-западной – около 1700 м и

предполагаемой первичной высотой днища порядка 1400–1450 м. Объем полости – около 0,45 км³.

Отложения, коррелирующие с кальдерой, представлены пемзовым покровом (тефрой и пирокластическими потоками) у северо-западного подножия вулкана Мутновский-3. Мощность покрова достигает 80–100 м в дистальной зоне, в разрезе гор Пемзовая и Тарбаганья, за которыми он резко выклинивается. Предполагается, что часть покрова, продолжавшая его в этом направлении, отложилась на поверхность позднеплейстоценового ледника, распространявшегося из кальдеры вулкана Горелый по долине р.р. Освистанная и Мутная, и им была удалена.

Связь пемзового покрова со структурообразованием на вершине молодой части вулкана Мутновский предполагалась ранее Т.Ю. Марениной [4], однако при этом имелась в виду связь с обеими сообщающимися формами как элементами единой морфоструктуры. Основанием для увязывания пемзового покрова именно и только с кальдерой вулкана Мутновский-3 являются: 1) соответствующее возрасту кальдеры стратиграфическое положение покрова, перекрывающего лавы материнской постройки и, в свою очередь, перекрываемого лавами вулкана Мутновский-4; эти соотношения можно наблюдать по левому борту оврага Опасный в районе водопада; 2) структурное и пространственное взаиморасположение кальдеры и пирокластического покрова, извергнутого и отложившегося в направлении наименьшей высоты кромки кальдерного уступа; 3) переслаивание пемз с крупноглыбовыми взрывными и лахаровыми отложениями, исключающее вероятность их связи с другим ближайшим вулканом Горелый.

Проверка последней, достаточно популярной идеи на основе изучения состава минералов обсуждаемых пемз обоих вулканов [7] в сравнении с минералогией пемз этапа кальдерообразования в Гореловском центре (38 тыс.л. назад) из колонки океанических осадков вблизи Камчатки показала сходство их ассоциаций между собой, но, по нашим материалам, и с минералами дацит-риолитовых лав и экструзий Мутновского-3, отличающегося от других конусов вулкана несколько повышенной калиевой щелочностью своих пород. Сравнение обсуждаемых пемз с «гореловскими» по соотношению в них кремне-

зема и щелочей [11] показало противоположную для вулканов в целом тенденцию повышенной калиевости пемз Мутновского при гораздо меньшей кремнеземистости (на уровне андезитов), но определенных без пересчета составов интенсивно гидратированного (до 6–8 % H_2O) материала на безводный. С выполнением этого условия соотношение $SiO_2 - K_2O$ в существенно дацитовых пемзах обсуждаемого покрова оказываются аналогичным таковому в кислых лавах и экструзиях Мутновского-3, – что вместе с отмеченными данными по минералогии, на наш взгляд, и решает спор об их принадлежности в пользу последнего.

Пемзовый покров «оторвался» от уступа кальдеры на 2,5–3,0 км, поскольку, очевидно, мог удержаться лишь на выположенной поверхности подножий вулкана. Кальдерообразующее извержение началось взрывной деятельностью в занятом ледником вершинном кратере и сходом лахаров, отложения которых вскрыты в верхах разреза по долине р. Вулканная (овраг Опасный). В её правом борту, в районе водопада, на них залегают: пемзовый пирокластический поток видимой мощностью 1,5–2,0 м со следами перемыва в верхней части; слой пемзовой тefры – 0,5 м, также частично переотложенной; 2–3-метровой мощности пласт сцементированных грязекаменных отложений (еще один, внутрипемзовый лахар); 4–6-метровая пачка отложений главного, по-видимому, пемзового пирокластического потока. У северо-западного края поля пемз M_3^2 отложения пиропотока, слагающего г.г. Тарбаганья и Пемзовая, представлены спекшимся туфом с характерной матрацевидной отдельностью.

Позднее в северо-западной части возникшей кальдеры возобновилась вулканическая активность: формирование внутрикальдерного базальт-андезитового конуса, а затем рост экструзии дупироксеновых риодацитов (комплекс M_3^3 на рис. 1 в [16], рис. 13), продолжавшийся, вероятно, и во время деятельности следующего в массиве вулкана Мутновский-4. Фрагменты лаво-пирокластической постройки внутрикальдерного конуса, частично скрытого ледником и расчлененного долиной р. Вулканная, выходят по бортам последней в районе Донного фумарольного поля. Над ним в правом борту долины среди ледника выходит, вероятно, ранняя часть разреза комплекса

M_3^3 : до 30 м обожженного базальтового туфа и ~25-метровой мощности сложный поток оливин-плагноклазового базальта. Он состоит из 5–6 монолитных пластин-порций идентичного состава, разделенных шлаково-глыбовым материалом. Пачка полого (15–20°) наклонена под ледник, к юго-востоку. Относительно прилегающего участка долины (предполагаемого местоположения эксцентричного кратера) она образует фрагмент периклинали небольшой вулканической постройки, заполнявшей кальдеру до уровня 1650 м.

Напротив, в левом борту долины, наблюдается, по-видимому, позднейшая часть комплекса M_3^3 – останец прослоенного глыбовым материалом чашеобразного тела андезито-базальтов, облегающего здесь коренной склон кальдеры и предполагаемого кратера. Вероятно, это след лавового озера. На карнизе этого останца сохранился фрагмент глыбового потока черных андезитов.

Сохранившаяся часть экструзии риодацитов располагается на северном краю отмеченного кратера внутрикальдерной постройки вулкана Мутновский-3, у выхода глубоко врезанного в неё ущелья р. Вулканная за пределы кальдеры. Правобережная часть экструзии слагает основание Верхнего фумарольного поля, левобережная – северной части Донного поля. Интенсивная газо-гидротермальная деятельность происходила уже во время роста экструзии: местами её породы раздроблены и замещены опалом. Фрагмент её первичного северо-западного склона (место подъема к Донному полю) покрыт плащом сцементированных в брекчию глыбовых отложений, представляющих остатки агломератовой мантии формировавшегося экструзивного купола – материала, осыпавшегося с его склонов и спаянного спеканием или вторичной минерализацией опалом и гидроокислами железа. Показательным свидетельством синхронной экструзивному процессу газо-гидротермальной активности является широкая вариативность степени измененности материала мантийной брекчии, в которой бывают рядом спаяны глыбы совершенно свежих стекловатых риодацитов и их же, полностью превращенных в опалит.

Ко времени описываемых событий северо-западный борт кальдеры еще не был вскрыт ущельем р. Вулканная, и вместе с

экструзией представлял плотину, подпиравшую внутрикальдерный ледник и, видимо, существовавшее у экструзии озеро. Её развитие завершилось крупным взрывным извержением, разрушившим значительную её часть и сопровождавшимся катастрофическим спуском водно-ледяной массы озера. Событие датируется тефрохронологами временем около 4 000 лет назад [5].

Соответствующие отложения представлены 0,2–1,5-метровым слоем дробленых, местами вторично сцементированных опалитов в узкой полосе, дискордантной современному руслу р. Вулканная (взрыв фумарольного поля?), и широким, до 3 км, веерообразным шлейфом перекрывающего их глыбового материала (рис. 2).

В последнем преобладают риодациты экструзии и особенно заметные на поверхности гигантские, до 3–4 м в поперечнике, блоки брекчии, аналогичной описанному материалу мантии экструзива. Вершиной р. Тарбаганья поток разделялся на два рукава. Наряду с отсутствием видимой сортировки обломков

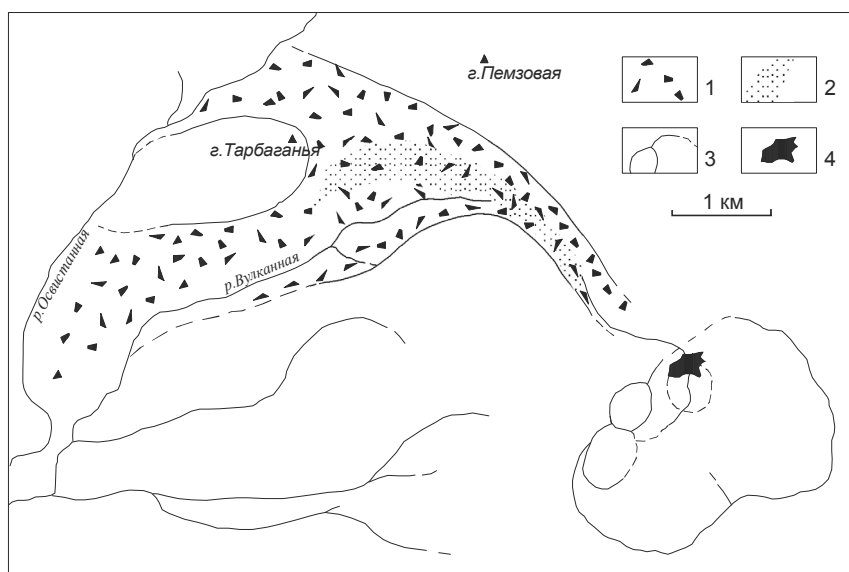


Рис. 2. Распространение отложений лахара, связанного с взрывом экструзивного купола в кальдере вулкана Мутновский-3 ~ 4000 лет назад: 1 – гравийно-глыбовые отложения; 2 – переотложенные опалиты; 3 – контуры кальдеры и кратеров; 4 – останец экструзивного купола

и блоков по крупности в зависимости от расстояния до источника это указывает, что механизмом их транспортировки был не столько сам взрыв, сколько перенос хлынувшей водно-снежно-ледяной массой. Прослеженная длина шлейфа отложений этого потока-лахара достигает 6 км, вплоть до р. Осви-станной.

Не исключено, что причиной эксплозивной активизации экструзии было внедрение в её корневую зону дайки базальтов, связанной с вулканом Мутновский-4.

В завершение обзора деятельности вулкана Мутновский-3 отметим, что наличие связанных с его кальдерой пирокластических отложений определяет её как структуру компенсационного, взрыво-провального происхождения в результате обрушения кровли опустошенного извержением магматического очага. Сходство с ней по размерам и положению вершинных кальдер двух ранних конусов Мутновского, из-за длительной эрозии и оледенений не сохранивших материала кальдерообразующих извержений, позволяет и для них предполагать аналогичный механизм образования. Развитие третьего конуса вулкана Мутновский, таким образом, с наибольшей полнотой отражено в соответствующих вулканических формах и отложениях (M_3^{1-3}), что придает ему значение определенного эталона. Показанное на карте (см. рис. 1 в [16]) двучленное строение комплексов отложений ранних конусов вулкана (M_1^{1-2} , M_2^{1-2}) представляет, очевидно, не все фазы их развития, а лишь сохранившиеся геологические реалии.

Вулкан Мутновский-4

Самый молодой, четвертый конус вулкана (комплекс M_4^1 на рис. 1 в [16]) заложился на юго-западном склоне вулкана Мутновский-3, искажив общую хребтообразную форму массива. Время его деятельности пришлось на начало голоцена.

Современная высота конуса достигает 1941,0 м, объем 3,8 км³. Его венчает округлый кратер (кальдера?) диаметром 1,3 км, частично заполненный позднейшими вулканитами и ледником. С северо-востока он широко сообщается с кальдерой вулкана Мутновский-3 (см. рис. 1 в [16], рис. 1 на вкладке). Кратер в целом соосен конусу и, в отличие от кальдеры, имеет

субгоризонтальную кромку. Поверхность конуса расчленена множеством неглубоких барранкосов, какие-либо аппараты побочных извержений отсутствуют.

Мутновский-4 сложен исключительно оливин-плагиоклазовыми (\pm авгит) базальтами, слабо варьирующими по соотношению вкрапленников этих минералов и, соответственно, глинозема и магнезии. По различиям в степени изменённости пород и небольшому угловому несогласию в разрезе стенки кратера выделяются две пачки лав и пирокластичности мощностью по 120–150 м. Более ранняя, заметно окисленная, слагает низы разреза и сохранившуюся восточную часть кратерного гребня. Вторая практически не изменена и слагает верхнюю часть разреза и западную половину гребня.

Происхождение **кратера-кальдеры вулкана Мутновский-4** неясно: для него, как и для вершинных кальдер древних конусов вулкана, также не находится достоверно коррелятных отложений – ни взрывных, ни пирокластических, ни эффузивных. Ввиду явной молодости формы это обстоятельство нельзя отнести на счет денудации или ледникового сноса. Имея в виду недифференцированный, чисто базальтовый состав вулканитов молодого конуса, в качестве механизма образования его кратера можно предполагать терминальное извержение с последующим подземным оттоком (боковой интрузией) магмы и обрушением вершины постройки. Возможно, именно так начинался процесс очередной перестройки магмопитающей системы вулкана, выразившийся далее последовательным линейным смещением аппаратов его позднейших извержений.

Гипотетичность генезиса кратера молодого конуса заставляет подробнее сопоставить новые данные и ранее сложившиеся на этот счет представления. Сообщаемость кратера с кальдерой вулкана Мутновский-3 и сходная сохранность их форм побудили предыдущих исследователей рассматривать их в некоем единстве, как сдвоенную морфоструктуру, что отразилось и в применении к ней таких терминов-названий, как «сдвоенный», «восьмеркообразный кратер». В них, однако, вкладывался различный генетический смысл: либо практически моногенного, одноактного образования всей морфоструктуры в связи с извержением пемз [4], либо полигенного происхож-

дения вне связи с пемзами, как суммы множества мелких деструктивных форм типа кратеров, взрывных воронок, обвальных цирков и т.п. [5] Отметим, что для обеих этих концепций не обязательно парность, «восьмеркообразия» итоговой структуры, которые, следовательно, надо считать случайными.

Если структурообразование связано с извержением пемз, то приведенные данные об их залегании между комплексами M_3^1 и M_4^1 исключают предположение о моногенности двояной морфоструктуры, оставляя единственно правильный, на наш взгляд, вариант трактовки ее генезиса – последовательное образование ее элементов с разрывом во времени, в течение которого и сформировался Мутновский-4.

Если указанную связь с пемзами игнорировать, то допустимы предположения как моногенного, так и полигенного образования вершинной структуры, но лишь после сформирования вулкана Мутновский-4. Действительно, нет прямых геологических данных, с очевидностью опровергавших бы такие предположения: удаленность пемзового покрова от края кальдеры вулкана Мутновский-3 допускает сомнения в их генетической связи; кальдера не залита лавами вулкана Мутновский-4, как можно было бы ожидать при их близости; разобщены и не обнаруживают прямых соотношений комплексы заполнения кальдеры (M_3^3) и кратера (M_4^2).

Однако четкая индивидуализация обоих элементов двояной структуры и связь каждого из них (и по-своему) со своей материнской постройкой также свидетельствуют об их самостоятельности и различном возрасте. Реконструкция вершины вулкана Мутновский-4 (рис. 3) показывает, что до конца его роста между ним и кальдерой вулкана Мутновский-3 в виде узкой плотины сохранялся непрерывным гребень борта кальдеры.

Сама кальдера, теперь расширенная обвалами, ранее заполнялась консервированным ее ледником, поскольку не была еще вскрыта рекой Вулканная: долина последней (овраг Опасный) заложилась точно по северному краю лавового поля вулкана Мутновский-4, и следовательно, в целом по завершении его формирования. Наконец, морфология двояной структуры не дает никаких оснований считать ее совокупностью мелких деструктивных форм. Две подобные формы, описываемые

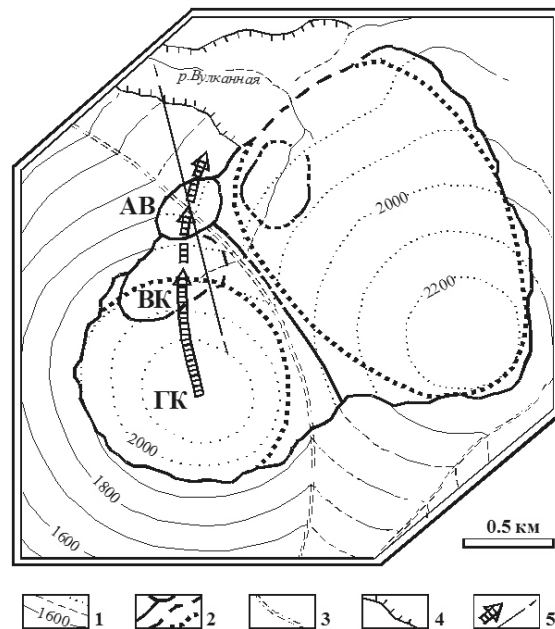


Рис. 3. Реконструкция вершин вулканов Мутновский-3 и Мутновский-4: 1 – изогипсы склонов построек: близких к первичным, эродированных и разрушенных при образовании кальдеры и кратеров; 2 – гребни и бровки уступов кальдеры и кратеров: четко выраженные современные, предполагаемые и в вероятном первичном положении; 3 – границы сочленения разновозрастных конусов вулкана; 4 – бровки обвальных склонов ушей; 5 – видимая траектория смещения новейших эруптивных центров вулкана и простираение реальной трещины извержения 2000 г. (ГК – кратер главного конуса вулкана Мутновский-4; ВК – кратер его внутреннего конуса; АВ – Активная Воронка)

ниже, осложняют кратер вулкана Мутновский-4, будучи существенно моложе его; еще одна – отмеченный кратер на месте Донного фумарольного поля в кальдере вулкана Мутновский-3 – является принадлежностью комплекса её позднейшего заполнения (M_3^3).

Внутрикратерный конус (комплекс M_4^2) представлен моногенной асимметричной шлаковой постройкой андезибазальтового состава. Ее жерло заложилось практически на гребне северной стенки кратера вулкана Мутновский-4, в пределах которого и была отложена почти вся масса извергнутого мате-

риала (рис. 1). В стесненном пространстве сформировался лишь сектор (~ 1/4) нормальной конической постройки (для краткости называемой «конусом»). Ее кратер, ныне вскрытый истоком р. Вулканная, имел овальную, ориентированную на северо-восток форму и размеры по осям 300×600 м. Абсолютная высота его кромки достигала 1750–1770 м, высота над днищем – 210–230 м. По данным геолога В.М. Никольского, исследовавшего сероносность вулкана, в 1950-е годы кратер вмещал теплое (до 42° в 1954 г.) озеро, в котором осаждались серные илы. Сам конус почти полностью перекрыт ледником, за исключением крупного выхода пирокластической толщи в южной стенке его кратера. Здесь под 2–5-метровой пачкой шлаков и осыпных отложений, облегающих склоны кратера, вскрывается периклинально залегающая толща шлаков двупироксеновых андезибазальтов мощностью до 120 м. Шлаки местами изменены и минерализованы гипсом. Лавы в разрезе постройки не вскрыты.

В марте 2000 г. кратер внутреннего конуса вулкана Мутновский-4 вновь стал одним из центров его активности – очередного извержения, описываемого ниже.

Современная активность вулкана Мутновский

Позднейший этап деятельности вулкана Мутновский в основном был связан с Активной Воронкой – молодым взрывным кратером, возникшим на общем гребне кальдеры Мутновского-3 и кратера Мутновского-4. Ее расположение отражает новый этап перестройки магмопроводящей системы вулкана, намеченный уже эксцентричным заложением кратера описанного внутреннего конуса: последовательного линейного смещения эруптивных аппаратов с выходом за пределы ранее контролировавшей их центральной структуры (кратера-кальдеры вулкана Мутновский-4) (рис. 3).

Строго говоря, по этому признаку извержение, образовавшее Активную Воронку, можно было бы считать началом нового, пятого цикла активности вулкана Мутновский, а его отложения соответственно маркировать как M_5^1 . Однако видимая постепенность перехода в формах структурного контроля и в локализации вулканизма, сравнительно небольшой масштаб эрупции и неопределенность дальнейшей устойчивости

его нового центра делают пока целесообразным причисление деятельности и отложений Активной Воронки к циклу и комплексу M_4^2 .

Воронка имеет овальную форму с длиной осей 300 и 450 м, пологое днище на уровне 1526–1530 м и крутые скальные стенки высотой от 80 до 190 м. Она почти целиком выработана в толще пород вулкана Мутновский-3, перекрываемых лишь одним потоком базальтов и слоем шлаков Мутновского-4. Наиболее полный разрез отложений извержения, образовавшего Активную Воронку, можно видеть в скальном выступе среди ледника у подножия восточной стенки кратера внутреннего конуса Мутновского-4. В низах разреза здесь обнажается пачка черных слоистых вулканических песков мощностью до 6–7 м. На нее налегает 8-метровый пласт взрывных глыбовых отложений из измененных пород стенок Воронки с редкими вкраплениями бомб черных ювенильных андезибазальтов. Последние представляют собой гибридную породу со смешанными ассоциациями минералов-вкрапленников, и, в частности, с характерными крупными сростками плагиоклаза (анортита), оливина и авгита. По резкой неровной границе эти отложения фреатомагматической стадии извержения перекрываются 6-метровым пластом андезито-базальтовых бомб и шлаков, аналогичных отмеченным, – с минимальной примесью резургентного материала и редкими включениями габброидов. Эта пирокластика в коренном залегании (до 3–4 м) и осыпях распространена в основном в вершинной части вулкана Мутновский-4 к западу, юго-западу и югу от Активной Воронки; маломощные слои взрывных отложений с редкими бомбами андезибазальтов залегают у северо-западного подножия и у северного края кальдеры Мутновского-3 (рис. 1).

Имеющиеся для вулкана Мутновский тейфрохронологические данные [5, 6] недостаточны для датировок каких-либо его форм или геологически значимых отложений. Сохранившийся разрез голоценовой вулканокластики моложе конуса Мутновский-4. В нем преобладает резургентный материал позднейших взрывных, фреатических и фреатомагматических извержений. Ювенильная фракция имеет преимущественно андезитовый состав. Выделяются отложения четырех наиболее крупных из-

вержений, датируемых временем порядка 7000, 6000, 4000–4100 и 1200–1300-лет назад. Первое из них по преобладанию в его отложениях ювенильной тефры может быть сопоставлено с деятельностью внутрикратерного конуса вулкана Мутновский-4. С образованием Активной Воронки, вероятнее всего, связаны взрывные отложения 1200–1300-летнего возраста.

По-видимому, с момента возникновения Активная Воронка является местом проявления интенсивной фумарольной деятельности вулкана, а периодически – центром более или менее мощных фреатомагматических и фреатических извержений. За исторический период они отмечались в 1848, 1852–1854, 1898, 1904, 1916, 1927–1929 и 1938–1939 годах, последнее произошло в 1960 году. Извержения выносили преимущественно резургентные пеплы. В течение трех последних десятилетий вулкан характеризуется на редкость высоким и устойчивым уровнем газогидротермальной активности.

17 марта 2000 г. произошел очередной эпизод эруптивной деятельности вулкана Мутновский, выразившийся фреатическим взрывом в кратере внутреннего конуса вулкана Мутновский-4 и обычным «сухим» взрывом в Активной Воронке.

Взрыв в кратере внутреннего конуса взломал часть занимавшего его дно ледника и вынес сернистые озерные отложения, покрывшие слоем (до 0,5 м) вязкой серой грязи весь ледник в кратерно-кальдерном комплексе и близлежащую территорию. В обновленном крутосклонном кратере диаметром 230–250 м растопленная фумарольными газами часть просевшего ледника, пополнявшаяся обрушениями льда со склонов, за 2–3 месяца образовала горячее озеро. Температура воды в вытекавшей из него под береговым ледником р. Вулканная в июне 2000 г. превышала 30°. К середине июля протаяла, обрушилась и была размыта часть ледника, скрывавшая исток р. Вулканная, и уровень озера заметно понизился.

Взрыв в Активной Воронке произошел в нижней части её высокого юго-западного склона, в месте разгрузки наиболее активных фумарол. Здесь образовалась воронка поперечником ~ 70 м. Выброшенный из неё глыбовый материал отложился у подножия склона, а новые выходы фумарол сконцентрировались у подножия её южной стенки, на краю плоского наклонного днища.

Озеро в кратере внутреннего конуса вулкана Мутновский-4, охлаждаясь, вновь покрылось льдом в зиму 2001–2002 г.г., и следующим летом на нем наблюдалась лишь узкая полынья у восточного берега. Столь быстрое падение питавшего озеро теплового потока указывает, что причиной фреатического извержения 2000 г. было, по-видимому, внедрение в обводненные породы жерловой зоны вулкана сравнительно маломощного магматического тела (дайки). Однако весной 2003 г. начался новый разогрев водоема с быстрым таянием льда. Возможно, произошло новое внедрение магмы или сейсмогенное подновление постепенно закупоривающихся газопроводящих трещин. Озеро вновь замерзло зимой 2003–2004 гг.

Подобная эруптивная деятельность в кратере внутреннего конуса, не оставлявшая длительно сохраняющихся следов, могла проявляться и в прошлом.

Извержение 2000 г. показало, что обсуждавшееся выше линейное смещение эруптивных центров вулкана имеет, при сохранении общей его направленности, прерывистый, возвратно-поступательный характер. Оба описанных центра эксплозий этого извержения приурочены к возникшей (обновленной?) трещине растяжения, отчетливо видимой на аэроснимке 2003 г. (рис. 4 (см. Приложение, стр. 300)), но не отмеченной в оперативном сообщении об извержении [2].

Она пересекает главный кратер вулкана Мутновский-4, проходя через восточный край кратера его внутреннего конуса, середину Активной Воронки и далее вниз по северо-западному склону вулкана – вплоть до ущелья р. Вулканная. Очевидно, именно оно может стать местом будущего крупного эффузивного извержения вулкана Мутновский (рис. 4).

Предположения о развитии питающей системы и основания для прогноза деятельности вулкана Мутновский

Вулкан Мутновский состоит из четырех двойных стратоконусов, развивавшихся по одинаковой схеме: рост конуса – образование вершинной кальдеры (или крупного кратера) – рост внутрикальдерной постройки и затухание вулкана, после чего происходило смещение выводного канала и цикл повторялся на новом месте.

Причиной такой макроцикличности вулканического процесса является периодическое достижение конусами вулкана определенных пределов роста. Это вытекает из самого характера его морфоструктурной эволюции, отражающей чередование двух основных типов перестройки магмопроводящей системы вулкана – снижения высоты канала путем усечения конусов при кальдерообразовании или за счет его латеральной миграции. Одинаковым их эффектом является снижение гипсометрического уровня разгрузки магмы на дневную поверхность и, таким образом, обеспечение возможности дальнейшего развития вулканического процесса.

В отличие от распространенного типа предельных по высоте вулканов-хребтов, состоящих из элементарных конусов, сооружение вулкана Мутновский достаточно своеобразно четырехкратным повторением в нем однотипных сложных построек «вулкан в вулкане» (типа Сомма-Везувий в разной степени завершенности). Абсолютные высоты конусов вулкана Мутновский, реконструированных до уровней, на которых они имели бы кратеры одинакового диаметра 600 м, изменяются направленно, но в сравнительно узком диапазоне, составляя ~2400 м для вулканов Мутновский-1 и -2, 2200 м для вулкана Мутновский-3 и 2100 м для вулкана Мутновский-4. Высоты трех сохранившихся внутрикальдерных построек обнаруживают более резкое, но не столь выдержанное изменение: ~2350–1650–1750 м, с соответственным уменьшением степени компенсации вершинных структур. Надо полагать, основными причинами этих изменений являются соответствующие вариации состава и газонасыщенности магмы, определяющие её плотность, эксплозивность и, следовательно, способность к поднятию и прорыву. В частности, самый низкий конус Мутновский-4 отличается, как указывалось, наименее дифференцированным, чисто базальтовым составом пород. Дополнительным фактором ограничения роста дочерних построек могли быть ледники в кальдерах и кратерах.

Ассоциации пород трех ранних конусов вулкана (рис. 5) характеризуются практически одинаковыми диапазонами дифференциации от базальтов до риодацитов (в укороченной серии вулкана Мутновский-1 смешанные амфиболовые дациты содержат в качестве кислого ингредиента кварц-биотитовые риодациты-риолиты).

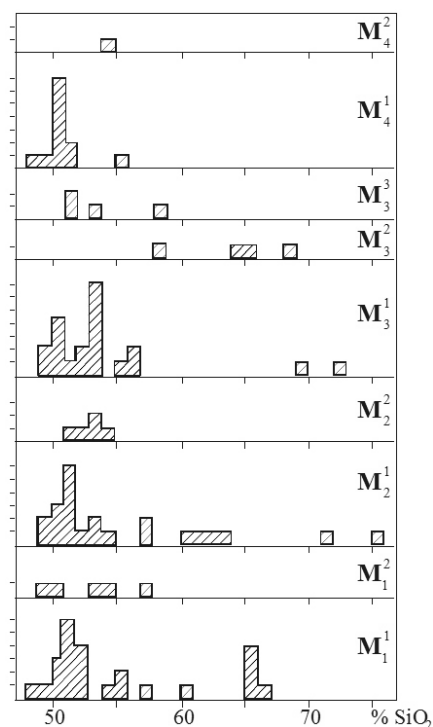


Рис. 5. Распределение составов пород вулкана Мутновский по циклам его деятельности. На вертикальной оси - число анализов

Повторяемость серий вулканитов свойственна и внутрикальдерным постройкам, отличающимся более узкими, базальт-андезитовыми интервалами дифференциации. На макрокомпонентном и минералогическом уровнях самым заметным признаком направленного изменения условий эволюции магмы вулкана является смена ранней ассоциации пород с упомянутыми кислыми амфибол- и биотит-содержащими дериватами на полностью безводные. Это

может свидетельствовать о менее глубинном, в целом, размещении периферических очагов поздних конусов сравнительно с ранним.

Судя по перемежаемости в постройках кислых и основных вулканитов, а также по наличию разнообразных контрастных миктитов, такие очаги были небольшими и непостоянными, они периодически возникали и отмирали в течение жизни каждого конуса, занимая, по-видимому, все менее глубинное положение. Во всяком случае, именно одинаково малоглубинным расположением очагов на конечных стадиях деятельности конусов наиболее логично объясняется возникновение на них одинаково небольших вершинных кальдер. Общей причиной сравнительно высокого размещения магматических резервуаров в земной коре под вулканом Мутновский надо, видимо, полагать его локализацию в зоне (на склоне) поднятия плотных пород фундамента и соответственно высокого положения уровня нейтральной плавучести питающей его магмы.

С затуханием конусов вулкана их очаги, по всей видимости, отмирали. Не возникало сколь-нибудь крупных приповерхностных камер и в ходе развития внутрикальдерных построек. Об этом можно судить по результатам «самозондирования» вулкана: например, канал конуса Мутновский-4, заложившийся наиболее близко к оси предшествующей постройки (1,2 км), выводил на поверхность примитивную базальтовую магму, а не дифференцированный или смешанный расплав, как можно было бы ожидать при пересечении им малоглубинного резервуара.

Гибридизация имела место в случае Активной Воронки, и это дает возможность ориентировочной оценки размеров и состояния современного очага вулкана. По-видимому, он сохранял эволюционировавший расплав со времени деятельности внутрикратерного конуса вулкана Мутновский-4 и был пополнен свежей базальтовой магмой незадолго перед прорывом Воронки. Её центр располагался в 400 м от жерла внутрикратерного конуса. Присутствие в её андезибазальтах габброидных включений свидетельствует о прохождении канала через краевую зону очага, диаметр которого в таком случае был около 1 км.

Вероятно, после прорыва магма локализовалась на уровне, достаточно высоком для её последующей интенсивной дегазации. Она происходит в условиях динамического равновесия открытой системы: большую часть времени вулканический аппарат работает как своеобразный сепаратор газоматической смеси. В течение последних десятилетий интенсивность выноса фумаролами вулкана тепла практически адекватна непрерывному извержению. О близком к поверхности расположении магматической камеры под Активной Воронкой свидетельствуют высокие, более 580°, температуры фумарольных газов.

Столь длительное и мощное истечение эманаций из магматического резервуара ограниченного объема поддерживается, очевидно, кристаллизацией и конвекцией кипящего расплава – ячеистой и пульсационной поступательной за счет периодического пополнения очага глубинной магмой.

Так, раскрытие (обновление?) трещины при извержении 2000 г. показывает, что оно было инициировано внедрением дайки. Неясно, внедрялась ли она преимущественно латераль-

но, в обе стороны от очага под Активной Воронкой, пополнявшегося глубинной магмой по трубообразному каналу, или имело место независимое, существенно вертикальное трещинное внедрение глубинной магмы, частично «перехваченное» приповерхностным очагом. Значительная протяженность (>3 км) и независимый, прямолинейно-секущий характер трещины по отношению к прежним аппаратам извержений (см. рис. 1, 4) свидетельствуют в пользу второго предположения, хотя местами новых взрывов были те же прежние аппараты. Ключом к этой задаче может быть факт проявления в извержении 2000 г. одновременно двух его типов: фреатического в кратере внутреннего конуса вулкана Мутновский-4 и «сухого» взрывного (вулканского) в Активной Воронке. Если первый тип, очевидно, связан с внедрением одного из апикальных выступов дайки в обводненные породы под днищем упомянутого кратера, то движущей силой второго было, скорее всего, резкое усиление газоотделения в пополняемом магмой дайки приповерхностном очаге (рис. 6).

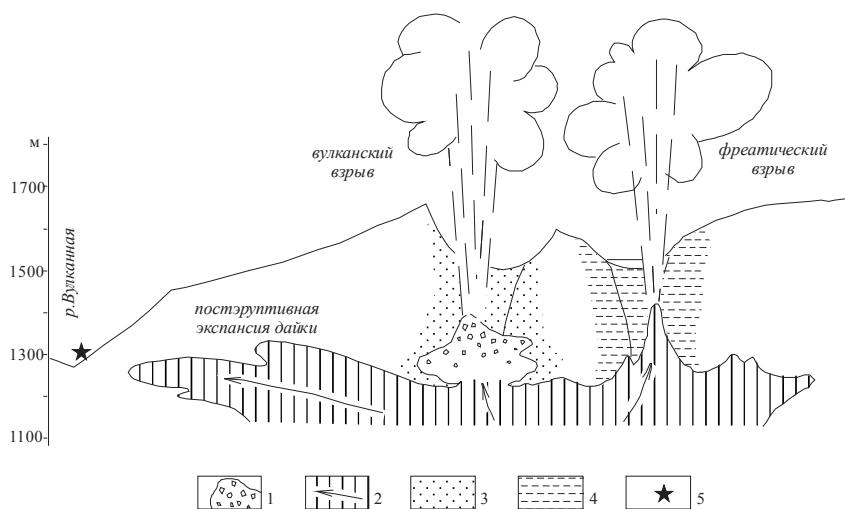


Рис. 6. Вероятный механизм извержения вулкана Мутновский 17 марта 2000 г. (разрез в плоскости активировавшей его дайки, см. текст): 1 – очаг кипящей магмы; 2 – дайка и направления течения магмы в ней; 3 – сухие прогретые породы; 4 – холодные обводненные породы; 5 – место прогнозируемого эффузивного извержения вулкана

Вероятно, невысокая газонасыщенность (возможно, дегазированность в промежуточном очаге) верхних порций глубинной магмы делает её неспособной к прорыву до поверхности в вершинной зоне вулкана. В распространении расклиниваемой дайками трещины далеко вниз по склону можно видеть механизм формирования пути будущего прорыва магмы на низком гипсометрическом уровне. Поднятие её более крупнообъемной порции может привести к существенно эффузивному извержению в низшей точке трещины (существующей или параллельной её новой), в ущелье р. Вулканная (рис. 1, 4) – при одновременной эксплозивной деятельности вершинных кратеров или без неё. По гидравлическим особенностям такой магмопроводящей системы можно ожидать появления в передовых порциях извержения примитивной глубинной магмы, с последующим подтоком и примешиванием к ней более дифференцированного расплава из приповерхностной камеры.

Описанные структурные особенности извержения 2000 г., произошедшего после почти максимального для вулкана Мутновский перерыва, а также известные в его истории серии сближенных во времени эруптивных событий указывают на возможную актуализацию среднесрочного (на десятилетия) прогноза его эффузивного извержения [10].

Долговременный прогноз эволюции сложного многоконусного вулкана Мутновский предполагает образование очередного, пятого стратоконуса в составе его постройки, на её западном склоне. Тенденция линейного смещения его молодых эруптивных центров, подтвержденная и существенно проясненная событиями 2000 г., демонстрирует механизм постепенного преобразования магмопроводящей системы зрелого вулкана, в очередной раз достигшего, вероятно, предельно возможной для него (для подъема питающей его магмы) высоты. Он заключается в боковой экспансии дайковых внедрений в зоне общего (Мутновско-Гореловского) магмоконтролирующего линеамента, с последующими прорывами на низком гипсометрическом уровне все более газонасыщенной глубинной магмы, в стабилизации нового эруптивного центра, формировании малоглубинных очагов и т.д., – по сценарию, пройденному конусами-предшественниками.

Данная статья входит в цикл работ, посвященных строению, веществу и близповерхностным магматическим очагам вулканов Мутновский и Горелый (Мутновский геотермальный район, Камчатка) [16, 17, 18].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакин Е.А., Кирсанов И.Т., Пронин А.А. Активная Воронка Мутновского вулкана // Бюл. вулканол. Станций. 1966. № 40. С. 25–35.
2. Зеленский М.Е., Овсянников А.А., Гавриленко Г.М., Сеников С.Л. Извержение вулкана Мутновский (Камчатка) 17 марта 2000 г. // Вулканология и сейсмология. 2002. № 6. С. 25–28.
3. Леонов В.Л. Методика и результаты крупномасштабного картирования // Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1986. С. 41–62.
4. Маренина Т.Ю. Геолого-петрографический очерк Мутновского вулкана // Тр. лабор. вулканол. 1960. Вып. 12. С. 3–52.
5. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В. Динамика активности вулканов Мутновский и Горелый в голоцене и вулканическая опасность для прилегающих районов (по данным тефрохронологических исследований) // Вулканология и сейсмология. 1987. № 3. С. 3–18.
6. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. Возраст и динамика формирования действующих вулканов Курило-Камчатской обл. // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1990. № 4. С. 17–31.
7. Плечова А.А., Портнягин М.В., Пономарева В.В., Деркачев А.Н. Петрохимическая характеристика пемз вулканического центра Горелый (Камчатка) как основа для их корреляции с тефрой из колонок северо-западной Пацифики // Материалы XX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. 2013. Том 1. Москва: изд-во «ГЕОС». С. 249–253.
8. Поляк Б.Г., Мелекесцев И.В. Продуктивность вулканических аппаратов // Вулканология и сейсмология. 1981. № 5. С. 22–37.
9. Селянгин О.Б. Петрогенезис базальт-дацитової серии в связи с эволюцией вулканоструктур. М.: Наука, 1987. 148 с.
10. Селянгин О.Б. Геологическое строение и эволюция кальдерного комплекса вулкана Ксудач // Вулканология и сейсмология. 1987. № 5. С. 16–27.
11. Топчиева О.М., Мостовая Т.В., Покровский В.А. К вопросу о генезисе пемзовых отложений района гор Тарбаганья и Пемзовая на Камчатке // Вестник Пермского университета. 2014. Вып. 3(24) С. 8–18.
12. Eichelberger J.C. Vesiculation of mafic magma during replenishment of silicic magma reservoirs // Nature. 1980. V. 228. P. 446–451.
13. Eichelberger J.C. Silicic volcanism: Ascent of Viscous Magmas from Crustal Reservoirs // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 1995. № 23. P. 41–63.
14. Sparks R.S.J., Marshall L.A. Thermal and mechanical constraints on mixing between mafic and silicic magmas // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1986. V. 29. P. 99–124.

15. Taran Yu. A., Pilipenko V.P., Rozhkov A. M. and Vakin E.A. A geochemical model for fumaroles of the Mutnovsky volcano, Kamchatka. USSR // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1992. V.49. P. 269–283.

16. Селянгин О.Б., Строение, вещество и близповерхностные магматические очаги вулканов Мутновский и Горелый (Мутновский геотермальный район, Камчатка). I. Геологическое положение вулканов // ГИАБ № 11, Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3». – 2016. С. 348–364.

17. Селянгин О.Б., Строение, вещество и близповерхностные магматические очаги вулканов Мутновский и Горелый (Мутновский геотермальный район, Камчатка). III. Гореловский вулканический центр Мутновского геотермального района // ГИАБ № 11, Специальный выпуск № 32 «Камчатка-3». – 2016. С. 401–437.

18. Селянгин О.Б., Строение, вещество и близповерхностные магматические очаги вулканов Мутновский и Горелый (Мутновский геотермальный район, Камчатка). IV. Пути и механизмы эволюции магм вулканов Мутновский и Горелый. Геологический и энергетический аспекты // ГИАБ № 11, Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3». – 2016. С. 438–452. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Селянгин Олег Борисович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник; nigtc@kscnet.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.



UDC 551.21

STRUCTURE, SUBSTANCE AND NEAR-SURFACE MAGMATIC CHAMBERS OF MUTNOVSKY AND GORELY VOLCANOES (MUTNOVSKY GEOTHERMAL REGION, KAMCHATKA). II. MUTNOVSKY VOLCANO

Selyangin O.B., Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher, nigtc@kscnet.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

Rocks structure and composition and the history of Mutnovsky volcano development which is one of the most favorable objects of geotechnical exploration according to the situa-

tion in the infrastructure of Kamchatka and high energy of modern gas-hydrothermal activity are described. Its latest volcanic activity, eruption mechanisms are discussed, the forecast of activity and morphostructural evolution of the volcano is given.

Keywords: stratocone, apical caldera, lava, pumice, eruption, forecast, high temperature fluid.

REFERENCES

1. Vakin E.A., Kirsanov I.T., Pronin A.A. *Aktivnaya Voronka Mutnovskogo vulkana* (Active Crater of Mutnovskii volcano) // *Byul. vulkanol. Stantsiy.* 1966. No 40. pp. 25–35.
2. Zelenskiy M.E., Ovsyannikov A.A., Gavrilenko G.M., Senyukov S.L. *Izverzhenie vulkana Mutnovskiy (Kamchatka) 17 marta 2000 g.* (The eruption of the Mutnovsky volcano (Kamchatka) March 17, 2000) // *Vulkanologiya i seismologiya.* 2002. No 6. pp. 25–28.
3. Leonov V.L. *Metodika i rezultaty krupnomasshtabnogo kartirovaniya* (Methods and results of large-scale mapping) // *Geotermicheskie i geokhimicheskie issledovaniya vyisokotemperaturnykh gidroterm.* Moscow: Nauka, 1986. pp. 41–62.
4. Marenina T.Yu. *Geologo-petrograficheskiy ocherk Mutnovskogo vulkana* (Geological and petrographical sketch of Mutnovsky volcano) // *Tr. labor. vulkanol.* 1960. Vyip. 12. pp. 3–52.
5. Melekestsev I.V., Braytseva O.A., Ponomareva V.V. *Dinamika aktivnosti vulkanov Mutnovskiy i Gorelyiy v goltsene i vulkanicheskaya opasnost dlya prilegayuschih rayonov (po dannym tefrohronologicheskikh issledovaniy)* (Dynamics of activity of Mutnovsky and Gorely volcanoes in Holocene and volcanic hazard for adjacent areas (according to tephrochronological studies)) // *Vulkanologiya i seismologiya.* 1987. No 3. pp. 3–18.
6. Melekestsev I.V., Braytseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitskiy L.D. *Vozrast i dinamika formirovaniya deystvuyuschih vulkanov Kurilo-Kamchatskoy oblatsi* (Knows what he wants Age and dynamics of formation of the active volcanoes of the Kuril-Kamchatka region) // *Izv. AN SSSR. Ser. geol.* 1990. No 4. pp. 17–31.
7. Plechova A.A., Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Derkachev A.N. *Petrohimicheskaya harakteristika pemz vulkanicheskogo tsentra Gorelyiy (Kamchatka) kak osnova dlya ih korrelyatsii s tefroy iz kolonok severo-zapadnoy Patsifiki* (Petrochemical characteristics of PEMs of the Gorely volcanic center (Kamchatka) as a basis for their correlation with tephra from the speakers of the North-West Pacific) // *Materialy HH Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Shkolyi) po morskoy geologii.* 2013. Tom 1. Moscow: izd-vo «GEOS», pp. 249–253.
8. Polyak B.G., Melekestsev I.V. *Produktivnost vulkanicheskikh apparatov* (Productivity of volcanic edifices) // *Vulkanologiya i seismologiya.* 1981. No 5. pp. 22–37.
9. Selyangin O.B. *Petrogenезis bazalt-datsitovoy serii v svyazi s evolyutsiyey vulkanostруктур* (Petrogenesis of the basalt-dacitic series in connection with the evolution of vulkanostруктуры). Moscow: Nauka, 1987. 148 p.
10. Selyangin O.B. *Geologicheskoe stroenie i evolyutsiya kaldernogo kompleksa vulkana Ksudach* (Geological structure and evolution calderaro complex of Ksudach volcano) // *Vulkanologiya i seismologiya.* 1987. No 5. pp. 16–27.
11. Topchieva O.M., Mostovaya T.V., Pokrovskiy V.A. *K voprosu o genezise pemzovyih otlozheniy rayona gor Tarbaganya i Pemzovaya na Kamchatke* (To the question about the Genesis of the pumiceous deposits of the mountains of Tarragona and Pumiceous on Kamchatka) // *Vestnik Permskogo universiteta.* 2014. Vyip.3(24). pp. 8–18.
12. Eihelberger J.C. Vesicularity of mafic magma during replenishment of silicic magma reservoirs // *Nature.* 1980. V. 228. pp. 446–451.
13. Eihelberger J.C. Silicic volcanism: Ascent of Viscous Magmas from Crustal Reservoirs // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 1995. No 23. pp. 41–63.
14. Sparks R.S.J., Marshall L.A. Thermal and mechanical constraints on mixing between mafic and silicic magmas // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1986. V. 29. pp. 99–124.

15. Taran Yu. A., Pilipenko V.P., Rozhkov A. M. and Vakin E.A. A geochemical model for fumaroles of the Mutnovsky volcano, Kamchatka. USSR // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1992. V.49. pp. 269–283.

16. Selyangin O.B., *Stroenie, veschestvo i blizpoverhnostnyie magmaticheskie ochagi vulkanov Mutnovskiy i Gorelyiy (Mutnovskiy geotermalnyiy rayon, Kamchatka). I. Geologicheskoe polozhenie vulkanov* (Structure, substance and subsurface magma chambers of the volcanoes Mutnovsky and Gorely (Mutnovsky geothermal area, Kamchatka). I. geological position of the volcanoes) // GIAB No 11, Spetsialnyiy vyipusk No 31 «Kamchatka-3». 2016. pp. 348–364.

17. Selyangin O.B., *Stroenie, veschestvo i blizpoverhnostnyie magmaticheskie ochagi vulkanov Mutnovskiy i Gorelyiy (Mutnovskiy geotermalnyiy rayon, Kamchatka). III. Gorelovskiy vulkanicheskiiy centr Mutnovskogo geotermalnogo rayona* (Structure, substance and subsurface magma chambers of the volcanoes Mutnovsky and Gorely (Mutnovsky geothermal area, Kamchatka). III. Gorelovsky volcanic center of the Mutnovsky geothermal area) // GIAB No 11, Spetsialnyiy vyipusk No 31 «Kamchatka-3». 2016. pp. 401–437.

18. Selyangin O.B., *Stroenie, veschestvo i blizpoverhnostnyie magmaticheskie ochagi vulkanov Mutnovskiy i Gorelyiy (Mutnovskiy geotermalnyiy rayon, Kamchatka). IV. Puti i mehanizmyi evolyutsii magm vulkanov Mutnovskiy i Gorelyiy. Geologicheskiiy i energeticheskiiy aspektyi* (Structure, substance and subsurface magma chambers of the volcanoes Mutnovsky and Gorely (Mutnovsky geothermal area, Kamchatka). IV. Ways and mechanisms of the evolution of the magmas of the volcanoes Mutnovsky and Gorely. Geological and energy aspects) // GIAB No 11, Spetsialnyiy vyipusk No 31 «Kamchatka-3». 2016. pp. 438–452.