

УДК 551.21

**О.Б. Селянгин**

**СТРОЕНИЕ, ВЕЩЕСТВО И БЛИЗПОВЕРХНОСТНЫЕ  
МАГМАТИЧЕСКИЕ ОЧАГИ ВУЛКАНОВ МУТНОВСКИЙ  
И ГОРЕЛЫЙ (МУТНОВСКИЙ ГЕОТЕРМАЛЬНЫЙ  
РАЙОН, КАМЧАТКА). III. ГОРЕЛОВСКИЙ  
ВУЛКАНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР МУТНОВСКОГО  
ГЕОТЕРМАЛЬНОГО РАЙОНА**

*Излагаются сведения о строении, развитии и составе пород долгоживущего Гореловского вулканического центра, современный этап деятельности которого представляет многоконусный внутрикальдерный вулкан Горелый с развитой на нем трещинной (рифтовой) зоной. Обсуждаются особенности магматической деятельности в условиях низкой плотности вмещающих коровых пород. Показывается сопряженность направленной эволюции магматического вещества и магмопроводящей структуры вулканического центра, с образованием современного близповерхностного магматического очага вулкана Горелый. Ключевые слова: вулканический центр, кальдера, магмопитающая структура, рифтовая зона, магматический очаг.*

---

**Г**ореловский вулканический центр и вулкан Горелый. При общей близости пространственного и структурного положений, видимом сходстве хребтообразных форм и типов деятельности в историческое время вулканы-соседи Горелый и Мутновский существенно различаются предысторией и характером развития.

Постройка вулкана Горелый – линейный вулканический хребет длиной 3 км по гребню, вытянутый в субширотном, западно-северо-западном направлении. Она состоит из трех главных, длительно действовавших конусов (Горелый-1–3, комплексы  $G_1$  –  $G_3$  на рис. 1 в [20]) и более чем трех десятков конусов одноактных побочных прорывов. Все сооружение располагается в обширной вулcano-тектонической впадине – кальдере, имеющей овальную, удлинённую к северо-западу форму и размеры по осям  $9 \times 13$  км. В отличие от вулкана Мутновский, вулкан Горелый, таким образом, продолжает развитие более древнего вулканического центра (Гореловский вулканический центр)

после кардинального преобразования его магмопроводящей структуры. Современный вулкан Горелый отличаются также существенно меньшие высота (максимальная отметка 1829 м), объем постройки (~25 км<sup>3</sup>), индекс эксплозивности (20–30 %) и, соответственно, крутизна склонов, а также повышенная текучесть лав. По этим признакам стратовулкан Горелый может быть отнесен к щитообразным, т.е. переходным по типу к пологим щитовым, существенно лавовым сооружениям с чертами гавайского и исландского типов.

В противовес исключительно эксплозивной новейшей активности вулкана Мутновский, фактически полностью сформировавшегося ко времени 7–8 тыс. лет назад, вулкан Горелый активно развивался и рос до настоящего времени, чередуя эксплозии с излияниями многочисленных и разнообразных лавовых потоков.

Породы вулкана Мутновский большей частью относятся к толеитовой серии, с повышенной железистостью ее промежуточных, ферробазальт-андезитобазальтовых членов и при подчиненном развитии гибридных известково-щелочных. Вулканиды Гореловского центра известково-щелочные, с умеренным, лишь относительным обогащением железом, заметно повышенным содержанием щелочей (особенно K<sub>2</sub>O) и широким развитием гибридизма магм на позднем этапе его деятельности.

Возрастное расчленение постройки вулкана Горелый проведено на основе детального картирования и тефрохронологических исследований, позволивших датировать его голоценовые эффузивные образования [10]. Достаточно высокогорное расположение вулкана, связанная с этим суровость климата и угнетенность или длительные периоды отсутствия на нем растительного покрова обусловили бедность его голоценового почвенно-пирокластического чехла погребенной органикой. В более низких местах окрестностей вулкана, где растительность могла развиваться, уже выклиниваются горизонты тефры, объемы которой даже при крупнейших извержениях существенно лавового вулкана Горелый не превышали 0,01 км<sup>3</sup>. Вследствие этого прямое <sup>14</sup>C-определение возраста отдельных элементов постройки (конусов, потоков, прорывов) оказалось возможным лишь в единичных случаях. Основным методом их датирования

стало сопоставление частных разрезов перекрывающей их тефры с общим (сводным) разрезом для всего вулкана и положением в них горизонтов датированной транзитной тефры других вулканов (табл. 1). Полученные таким образом значения возраста около десятка лавовых потоков основных конусов вулкана и их побочных прорывов использованы для прямых и опосредованных корреляций с другими элементами сооружения.

На рис. 1 показана сводная хроностратиграфическая колонка вулкана Горелый, в общих чертах отображающая режим его деятельности в голоцене. Он имеет выраженный циклический характер. На фоне сравнительно равномерного распределения по разрезу пирокластического материала лавы вулкана объединяются в дискретные, четко обособленные возрастные группы, включающие как терминальные, так и побочные излияния. Внутри каждой группы потоки перекрываются фактически одним и тем же почвенно-пирокластическим чехлом. Это указывает, что извержения каждого из периодов массового излияния лав были тесно сближены во времени.

#### **Докальдерная постройка и кальдера вулкана Горелый**

Кальдера возникла в вершинной части сложного докальдерного вулканического сооружения – вулкана пра-Горелый. Это был, по-видимому, обширный многовыходной экструзивно-лавовый комплекс ( $Q_2^2$ , рис. 1 в [20]) размерами ~12 x 15 км, несколько вытянутый в северо-восточном направлении. От него сохранились обрубленные уступом кальдеры периферийные части мощных потоков андезитового и дацитового состава, отдельные экструзии, дайки и некки дацитов-риодацитов, ряд древних побочных конусов и потоков базальтов и андезибазальтов. В частности, к докальдерному периоду относится единственный, по-видимому, эпизод ряда прорывов магмы в зоне между вулканами Горелый и Мутновский (пространственно и структурно тяготеющих, однако, к последнему). Прорывы образовали две кулисообразно смещенные цепочки шлаковых конусов однотипных субафировых базальтов, вскрывающихся из-под покрова игнимбринов у юго-восточного борта кальдеры и у южного подножия горы Двугорбая (рис. 1 в [20]).

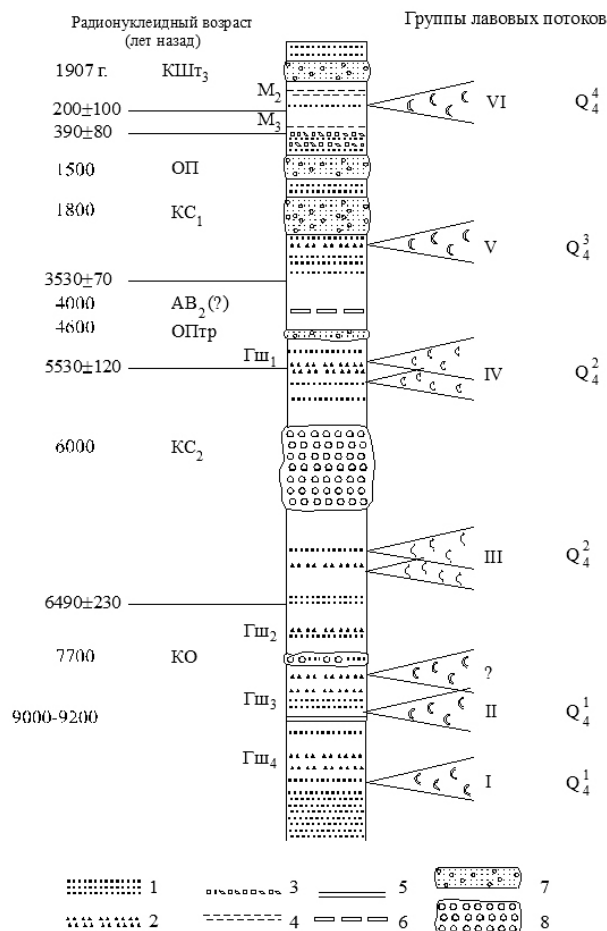
404 Таблица 1

**Региональные маркирующие прослойки пеллов в голоценовом почвенно-пирокластическом чехле района вулкана Горелый [10]**

Вулкан-источник	Индекс [25]	Прежний индекс [18]	Радиоуглеродный возраст, $^{14}\text{C}$ -лет назад*	Описание	Валовой химический состав**	Особенности состава
Ксудач, конус Штубеля	КШт <sub>3</sub>	Ксд	1907 г.	Вулканический песок цвета «соль с перцем» с примесью гравия пемзы	A	Низкое содержание $\text{K}_2\text{O}$ , отсутствие роговой обманки
Опала, кра-тер Бараний Амфитеатр	ОП	Оп	1500	Белый или желтый вулканический песок с гравием и лапилли пемзы	Р-РД	Повышенное содержание $\text{K}_2\text{O}$ , наличие биотита
Ксудач, кальдера V	КС <sub>1</sub>	Хд	1800	Желтый или серый вулканический песок с гравием и лапилли пемзы	Д	Низкое содержание $\text{K}_2\text{O}$ , отсутствие роговой обманки
Авачинский(?)	АВ <sub>2</sub>	ТР <sub>1</sub>	4000	Белый или желтый вулканический песок	A	Низкое содержание $\text{K}_2\text{O}$
Район вулкана Опала	ОП <sub>тр</sub>	ТР <sub>2</sub>	4600	Ярко-желтый тонкий пепел с включением гравия и единичных лапилли пемзы	Р-РД	Повышенное содержание $\text{K}_2\text{O}$
Ксудач, кальдера IV	КС <sub>2</sub>	ТР <sub>3</sub>	6000	Бежевый, зеленоватобежевый гравий и лапилли пемзы с включением темно-серого гравия	A	Низкое содержание $\text{K}_2\text{O}$ , отсутствие роговой обманки

Кальдера Курильское озеро-Ильинская	КО	ТР <sub>1</sub>	7700	Светло-желтый вулканический песок с примесью гравия пемзы	Д	Содержание К <sub>2</sub> О между низким и умеренным, наличие роговой обманки
?	-	-	9000–9200	Бледно-серый тонкий пепел	А	Низкое содержание К <sub>2</sub> О

Примечание: Пеплы перечисляются сверху вниз по разрезу (от молодых к более древним). \* Средний радиоуглеродный возраст пеплов, округлен до сотен лет. \*\* А, Д, РД, Р – соответственно андезит, дацит, риодацит, риолит. Валовой химический состав пеплов в районе вулкана Горелый может отличаться от состава данного пепла вблизи вулкана-источника вследствие эоловой сепарации минералов [13]. Градации содержания К<sub>2</sub>О по данным работы [15]



**Рис. 1. Схематический сводный разрез голоценового почвенно-пирокластического чехла района вулкана Горелый и стратиграфическое положение лав вулкана относительно региональных маркирующих прослоев пеплов [10]. Тефра вулкана Горелый: 1 – вулканические пески, 2 – лапилли и гравий шлака, 3 – взрывные отложения. Отдельные прослои тефры вулкана Мутновский: 4 – стратифицированные черные вулканические пески. Маркирующие прослои тефры: 5 – светло-серый тонкий пепел; 6 – линзовидный прослой желтого мелкозернистого вулканического песка; 7 – гравий и лапилли пемзы с примесью вулканического песка; 8 – гравий и лапилли пемзы. Радиоуглеродный возраст маркирующих прослоев пеплов [1,13] округлен до сотен лет. Индексы тефры вулканов Горелый и Мутновский и радиоуглеродные даты по данным работы [6]. Индексы возрастных групп лавовых потоков соответствуют таковым на карте рис. 1 в [20]**

Кальдера образовалась в результате многократного, видимо, обрушения кровли крупного магматического очага, внедренного в земную кору, – как реакции на его опустошение серией грандиозных извержений газонасыщенной андезитовой и дацитовых магмы. Порожденные ими пемзопавы и высокоподвижные пирокластические потоки сформировали многослойный покров пемзовых туфов и, главным образом, игнимбритов (четыре остывшие единицы,  $Q_3^3$  на рис. 1 в [20]). Пирокластические потоки распространились на расстояние до 25–30 км от центра извержений, затапливая и нивелируя древний рельеф до уровня 1100 м вблизи кальдеры, с постепенным снижением на удалении. Площадь ареала их распространения оценивается в 600 км<sup>2</sup>, мощность в понижениях палеорельефа – до 400 м, объем ~100 км<sup>3</sup> [4]. Над поверхностью слабонаклонного пемзо-игнимбритового плато «островами» выступают превышающие его уровень останцы докальдерных сооружений.

Образование кальдеры, как отмечалось, датировано тефростратиграфическим методом (~38–40 тыс. лет назад) по соотношениям гореловских игнимбритов с аналогичными и субодновременными им отложениями кальдеры вулкана Опала на западе [7]. Однако приведенные в начале работы прямые  $Ar^{40}/Ar^{39}$ -датировки нижних единиц игнимбритовой толщи района [18], пространственно тяготеющих к кальдере, удревняют, возможно, начало процесса кальдерообразования до среднего неоплейстоцена.

Последним в серии кальдероформирующих извержений был выброс крупной порции дацитовых пемз. Они отложились в пределах кальдеры и в основном на внешних склонах у северо-западной половины ее периметра (хотя, как обсуждалось выше, некоторые исследователи [8, 11] относят к ним и пемзы, связываемые с кальдерой Мутновского-3). Их плащеобразный покров ( $Q_3^3$  на рис. 1 в [20]), ныне расчлененный эрозией, имел мощность до 30 м (в среднем 12–15 м). Отложения относятся к фации пирокластических потоков. Судя по эродированности подстилающих игнимбритов, извержение пемз было значительно оторвано во времени от основного этапа кальдерообразования и, возможно, начинало очередной, описывае-

мый ниже ранний посткальдерный этап вулканизма Гореловского центра. Предполагается, что этот выброс пирокластики мог сопровождаться небольшой дополнительной просадкой северо-западной половины кальдерного днища. В северной части структуры сохранился участок облекания молодыми пемзами ее игнимбритового борта, с падением их под внутрикальдерные вулканы и пролювиально-озерные отложения (см. разрез на рис. 1 в [20]).

Высота ограничивающих кальдеру уступов над современным уровнем заполняющих ее впадину отложений достигает 250–300 м, истинная глубина обрушения, несомненно, значительно превышает эти величины. Границы структуры при общей их округлости местами имеют прихотливые фестончато-заливчатые очертания, отличающие кальдеру вулкана Горелый от многих подобных структур с обычными округло-воронкообразными формами; для последних можно предполагать комбинированный взрывопробный механизм образования. Кальдера вулкана Горелый – типичная структура обрушения типа Кракатау, ограниченная крутопадающими дугвыми разломами-сбросами. Подтверждением этому является магматическая проницаемость отдельных участков граничного шва кальдеры, вдоль которых позднее произошли прорывы магмы опсываемого ниже раннего посткальдерного комплекса, с образованием цепочек экструзий и шлаковых конусов с потоками лавы.

Сформированная кальдера длительное время представляла собой бессточный озерный водоем, а позднее, в эпоху последнего оледенения (25–10 тыс. лет назад), – крупное вместилище льда. Через пониженные участки борта ледовый панцирь растекался длинными языками по долинам, крупнейшие из которых прорезали игнимбритовое плато к югу и северо-западу от кальдеры.

#### **Ранний посткальдерный комплекс**

По завершении формирования кальдеры новый этап активности Гореловского центра выразился многовыходным вулканизмом, пространственно жестко связанным с кальдерой и дифференцированным по составу от базальтов до дацитов. По времени эта деятельность совпала с началом второй фазы



позднеплейстоценового оледенения. Ныне ее производные представлены прерывистой цепью моногенных вулканических аппаратов: базальт-андезитовых шлаковых конусов с потоками или (чаще) без них, дацитовых экструзий, жерловин и потоков, располагающихся прямо на гребне кальдерного уступа или на небольшом от него удалении на внешних склонах кальдеры (сопка Красная и др.,  $Q_3^{3-4}$  на рис. 1 в [20]).

Активность указанного этапа во времени и пространстве следовала близко за извержением описанных выше пемз: большая часть аккумулятивных построек подстилается рыхлыми пемзами, испытавшими лишь минимальное эрозионное расчленение, и почти все аппараты извержений располагаются у северо-западной половины кольцевого борта кальдеры, к которой прилегают и поля пемз. Любопытно и «нагребневое», зачастую у самой бровки кальдерного уступа размещение многих шлаковых конусов, хотя с гидродинамических позиций, казалось бы, гораздо легче прорывы магмы могли происходить у основания уступа. Объяснение такой локализации конусов, по-видимому, следует связывать с фактом их образования в эпоху оледенения, когда кальдера до краев заполнялась ледником, ликвидировавшим потенциальные преимущества прорывов на более низких гипсометрических уровнях и, возможно, своим давлением способствовавшим образованию магмовыводящих трещин, субпараллельных кальдерным сбросам. С внедрением под ледник может быть связана туюеобразная форма ряда дацитовых экструзий в юго-западной и западной частях борта кальдеры, характеризующихся видимой закаленностью их стекловатых пород и местами хорошо развитой столбчатой отдельностью.

### **Вулкан Горелый-1**

Вулкан Горелый начал действовать также в ледниковое время, сквозь ледник. По-видимому, с этим обстоятельством связано своеобразное оформление двух его ранних конусов – западного (Горелый-1) и среднего (Горелый-2), – имеющих у подножий крутые обрывистые уступы высотой 80–100 м, частично залитые лавами молодых извержений. Предполагается, что их происхождение обусловлено напозданием фронтальных частей лавовых потоков на медленно растекавшийся и сносивший их ледник.

В обрывах видно переслаивание относительно маломощных, зачастую облекающих уступ лавовых потоков и крупноблоковой глыбовой лавы с признаками резкого переохлаждения и закалки. В плане уступ древнего подножия имеет неправильные заливчатые очертания. Отдельные его выступы выдвинуты близко к борту кальдеры, причем для некоторых из них очевидна связь с повышенным количеством побочных прорывов в соответствующих им секторах вулканической постройки. На юго-западном фланге вулкана, в полосе трещин и моногенных конусов его рифтовой зоны, высокое подножие постройки примыкает к уступу кальдеры, полностью его нивелируя.

Образования западного, древнейшего конуса Горелый-1 (комплекс  $G_1$  на рис. 1 в [20]) в составе общей постройки вулкана перекрываются полным голоценовым чехлом его тефры и, таким образом, относятся к концу позднеплейстоценового периода ( $Q_3^4$ ). Конус сложен породами базальт-андезитового ряда. Объем постройки  $\sim 14$  км<sup>3</sup>. Ее открытая западная половина умеренно эродирована, одновозрастные ему аппараты побочных извержений на склонах отсутствуют, – за исключением воронок фреатических взрывов на андезитовом потоке его северо-западного подножия. Деятельность вулкана Горелый-1 завершилась крупным пирокластическим извержением, покрывшим его склоны бугристым плащом бомбово-глыбового андезитового агломерата-агглютината мощностью до 25–30 м, местами спекшегося до образования лавоподобных разностей. По-видимому, с этим извержением связано образование венчающего конус крупного ( $\sim 0,7 \times 1,4$  км) овального кратера (вершинной кальдеры?) со скошенной к востоку кромкой. Более низкая восточная половина его гребня и днище перекрыты вулканиками конуса Горелый-2. Подковообразный останец западной части гребня возвышается над днищем на 80–90 м, его максимальная абсолютная высота 1763 м. В уступе под покровом агглютината обнажаются андезитовые потоки в переслаивании с умеренным количеством пирокластического материала, в середине «подковы» – секущее тело (жерловина) андезитов, а у подножия уступа – более поздний разрушенный одноактный конус, сложенный шлаками оливинных андезибазальтов.

### **Вулкан Горелый-2**

Жерло вулкана Горелый-2 (комплекс  $G_2$  на рис. 1 в [20],  $Q_4^1 - Q_4^4$ ) заложилось у низкого восточного края описанного кратера вулкана Горелый-1. Современная высота его 1829 м, объем  $\sim 9 \text{ км}^3$ .

Древнейшие из обнажающихся на поверхности потоков его основного конуса и некоторых побочных прорывов перекрыты почвенно-пирокластическим чехлом, который лишь немногим моложе чехла, перекрывающего морену и отвечающего всему голоцену. В нижней части он содержит бледно-серый тонкий пепел с возрастом 9000–9200 лет, а иногда и залегающие под ним несколько горизонтов тефры вулкана Горелый, включая шлак  $G_{ш4}$  (рис. 1). Излияния лав этой группы можно отнести ко времени 9200–9500 лет назад.

Вторая группа лав вулкана Горелый-2 относится к концу раннего голоцена (8000 лет назад), поскольку залегает непосредственно под маркирующим прослоем пепла КО (рис. 1, табл. 1). Эта группа выделена пока предположительно по одному разрезу в северной части кальдеры, что не исключает вероятности несохранения (размыва) здесь более древних пеплов и, в таком случае, принадлежности этих лав к первой группе.

Вулкан Горелый-2, таким образом, формировался в основном в конце последней фазы оледенения и в начале послеледниковой, голоценовой эпохи. На этой, уже зрелой стадии развития вулкана Горелый-2 сопровождалось множеством побочных и эксцентричных прорывов магмы на его склонах и у подножий, а также через отмершую постройку вулкана Горелый-1 и за пределами кальдеры, вдоль заложившейся в это время трещинной (рифтовой) зоны (рис. 1 в [20]). С его формированием в развитии всей постройки установилась тенденция возвратно-поступательного перемещения центра ее активности. Для самого вулкана Горелый-2 это выразилось в удлиненной, овальной в плане форме его многократерной постройки, в которой неясно различимы три тесно слившихся стратоконуса (рис. 2 (см. Приложение, стр. 301)). Он возобновил свою деятельность после образования вулкана Горелый-3 и остается активным до ныне. Соответствующие производные его активности отмечены далее при описании более молодых элементов структуры вулкана.

Состав пород вулкана Горелый-2 варьирует от базальтов до андезиодацитов, с резким преобладанием промежуточных, андезибазальтовых разностей. К возникновению вулкана Горелый-2 приурочена смена петрографического и генетического типов пород вулкана, отражающая, по-видимому, изменения в структуре и механизме функционирования его магмопитающей системы. Она выразилась в появлении средне- и крупнопорфировых гибридных вулкаников с неравновесными, смешанными ассоциациями фенокристаллов и, в частности, с характерными таблитчатыми вкрапленниками лабрадора, подобно мезо- и мегаплагиофировым лавам Ключевского дола. Вулканики этого типа преобладали в позднейшей истории вулкана. Во всем диапазоне их составов (52–58 %  $\text{SiO}_2$ ) фактически отсутствуют несмешанные породы «чистой линии» эволюции, их представляют лишь редкие более кислые андезиты (59–64 %  $\text{SiO}_2$ ), петрографически подобные развитым на вулкане Горелый-1, в до- и синкальдерном комплексах.

Постройку вулкана Горелый-2 венчает компактная группа гнездовых кратеров, последовательно возникавших один внутри другого или налагавшихся на предшествующие с большим или меньшим смещением (рис. 2). По соотношениям форм их гребней с комплексами заполняющих отложений выделяются шесть крупных кратеров диаметрами 500–700 м, два небольших кратера провала и ныне действующий узкий (80–90 м) колодеобразный кратер, телескопически «вложенный» в более обширный ранний. Самый восточный кратер глубиной 200 м содержит холодное озеро.

Остатки комплексов заполнения более ранних кратеров наглядно демонстрируют циклический характер деятельности вулкана Горелый-2 на стадии достижения им предельной высоты и прекращения роста. Поверх слоев, облегающих днища и основания стенок этих кратеров, залегают горизонтально-слоистые пачки обломочного материала и лав, представляющих остатки некогда существовавших здесь лавовых озер. По-видимому, деятельность озер, часто бессточных, обычно завершалась прорывами на склонах постройки с оттоком магмы из вершинного кратера и обрушением его стенок. Так, в частности, завершилась последняя терминальная эффузия на вулкане Горелый, описываемая далее.

Эти соотношения свидетельствуют о резко контрастном характере динамики вулканизма позднего этапа: каждый цикл начинался мощной эксплозивной деятельностью и обрушениями, формировавшими чашу кратера, после чего наступал период чередования чисто эффузивной активности с длительными этапами более слабых эксплозивных извержений и постепенным заполнением кратера. Последнее, однако, не только не восстанавливало первичную высоту конуса, но даже не достигало краев кратера; более того, уровень заполнения каждого последующего из них оказывался ниже, чем у предыдущего (единственное исключение – практически не заполнявшийся, вмещающий лишь небольшой шлаковый конус молодой восточный кратер). Таким образом, в условиях предельной высоты конуса вулканизм продолжается как чередование его деструктивной (разрушение части постройки) и конструктивной (частичное восстановление) составляющих с преобладанием деструкции. Другой способ «выживания» вулкана – смещение его магмовыводящего жерла на более низкий высотный уровень, т.е. миграция канала.

Описанная цикличность вулканической деятельности отражает крупномасштабное перераспределение газовых компонентов магмы в питающей системе вулкана, действующей как сепаратор газоматической смеси. В течение длительных периодов покоя газы обогащают ее верхние уровни, обуславливая бурное эксплозивное начало каждого цикла с последующим более спокойным извержением нижних, обедненных газами порций магмы.

Такой вывод в известной мере альтернативен определению исторических вершинных извержений Горелого как преимущественно фреатических, движущей силой которых являются не столько собственные газы магмы, сколько парообразование при ее контакте с грунтовыми водами. По-видимому, правильнее их квалифицировать как ультравулканские, имея в виду основную роль все-таки магматических газов. Нет оснований предполагать наличие под вулканом сколько-нибудь обширного постоянного резервуара подземных вод [3], поскольку в недавнем прошлом вершинные эксплозивные извержения чередовались с чисто эффузивными. Подтверждением этому является и

тот факт, что эксцентричные и побочные извержения, происходившие в наиболее обводненных зонах подножий вулкана, формировали обычные шлаковые конусы, без характерного для гидромагматизма выноса раздробленных пород фундамента и без образования таких типичных для него форм, как маары. Прямым подтверждением магматической, ювенильной по преимуществу природы источаемых вулканом газов явилась деятельность жерла, возникшего в июне 2009г. у подножия северо-восточной стенки одного из вершинных кратеров вулкана Горелый-2 (кратер 9 на рис. 2), из которого происходила интенсивная, но практически безэксплозивная эмиссия газов с температурой 870 – 900°. В составе смеси содержалось около 93,5 % H<sub>2</sub>O, 2,6 % CO<sub>2</sub>, 2,2 % SO<sub>2</sub>, 1,1 % HCl, 0,3 % HF, 0,2 % H<sub>2</sub>. ее расход достигал 11 тонн в день [12]. Термальное озеро, существовавшее в смежном кратере 8 (рис. 2) и, очевидно, обеспечившее указанную в анализе долю воды своей фильтрацией в зону истечения газов, к 2012 г. полностью иссушилось.

### **Вулкан Горелый-3**

Очередной, третий конус (комплекс G<sub>3</sub> на рис. 1 в [20] Q<sub>4</sub><sup>2</sup>) образовался на юго-восточном склоне вулкана Горелый-2. Это самый низкий (1698 м) и малообъемный (~2 км<sup>3</sup>), как бы недоразвившийся конус в составе общей постройки вулкана. Он сложен пирокластикой и лавами андезибазальтового – андезитового состава, относящимися к третьей возрастной группе (рис. 1, табл. 1). Они перекрыты почвенно-пирокластическим чехлом, содержащим в низах маркирующий слой тефры KС<sub>2</sub> с возрастом ~6000 лет и горизонт супеси. Излияния, возможно, происходили в две стадии, поскольку некоторые потоки перекрыты еще и горизонтом шлаков. Все лавы извергались в интервале 6200–6500 лет назад, на что указывает дата 6490 + 230 лет, полученная ниже по разрезу, и тот факт, что потоки не перекрываются шлаком Гш<sub>2</sub>. Помимо лав собственно конуса вулкана Горелый-3, в группу указанного возраста входят потоки ряда побочных прорывов на его склонах, а также на склонах и у северного подножия вулкана Горелый-2 (рис. 1 в [20]).

На вершине вулкана Горелый-3 имеется кратер диаметром 500 и глубиной до 180 м. Внешние и отчасти внутренние

склоны кратера почти сплошным покровом облекает пласт лавоподобного андезибазальтового агглютината. Это любопытное образование представляет результат фонтанирования лавы последнего извержения, связанного с указанным кратером. Днище кратера занимает холодное озеро, однако его восточная и северная стенки в верхних частях прогреты и выделяют из трещин едва заметные струи пара с температурой 30–50°C.

По-видимому, вулкан Горелый-3 полностью сформировался в течение описанного цикла активности; позднее он мог проявлять лишь слабую эксплозивную деятельность в связи с активизацией рифтовой системы вулкана. Лавы следующей, четвертой возрастной группы установлены только на северо-западном и юго-западном склонах вулкана Горелый-2, частью также обнаруживая связь с развитием трещинной зоны (рис. 1 в [20]). Они перекрыты чехлом, содержащим в низах маркирующий горизонт тефры  $Op_{тв}$  (4600 лет назад) и горизонт супесей; на некоторых из них залегает и прослой шлаков  $Gш_1$  (рис. 1). Излияние этих лав происходило 5500 лет назад, как показывает дата  $5530 \pm 120$  лет, полученная под шлаком  $Gш_1$ .

В последующей истории вулкана Горелый крупнейшие эффузивные извержения, хотя и протекавшие при активности его вершинных кратеров, были непосредственно связаны с развитием рифтовой системы, ставшей ведущим элементом магмопроводящей структуры вулкана.

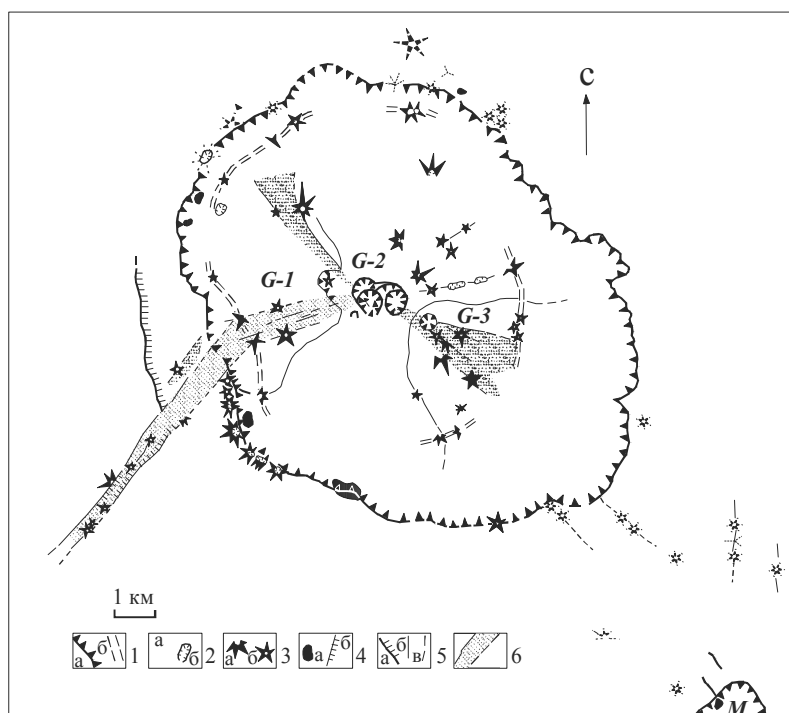
#### **Побочные прорывы и рифтовая зона вулкана**

Магмопроводящая структура вулкана Горелый относится к сложному типу, сочетающему центральный и трещинный типы. Первый, как предполагается, представляет систему трубообразного канала с возможными очагами-раздувами, формирующуюся на первичном трещинном магмоводе. Являясь наиболее устойчивой к теплопотерям, такая система длительное время сохраняет изменяющую свой состав магму и, следовательно, способность к ее проводимости. Тем самым обеспечивается многократность извержений из пространственно стабильных центров и рост вулканических конусов до предельного (гидростатического) уровня подъема магмы. С приближением к нему новые пополнения глубинной магмой системы очаг-канал все чаще создают трещинообразующие напряжения в постройке, реализуемые побочными

прорывами. Из-за быстрого отвердевания магмы в тонких трещинных проводниках они, как правило, действуют однократно, и новые прорывы происходят через новые трещины.

Анализ структурной позиции аппаратов побочных (эксцентричных, латеральных) прорывов дает информацию о строении и функционировании верхнего яруса магмопитающей системы вулкана.

Распределение прорывов на поверхности и у подножий постройки (рис. 1 в [20] и рис. 3) неравномерное. На вулкане Горелый-1 не наблюдается синхронных ему аппаратов побочных



**Рис. 3. Структурная схема Гореловского вулканического центра:** 1 – контур кальдеры вулкана Горелый по бровке уступа (а) и очертания блока предполагаемой дополнительной просадки, маркируемые ансамблем эксцентричных прорывов; 2 – кратер (а) и лавовые бокки (б); 3 – шлаковые конусы прорывов докальдерного и ранне-посткальдерного комплексов (а), побочных прорывов вулкана Горелый (б); 4 – экструзии (а) и дайки (б); 5 – разломы: с выраженным смещением блоков (а), безамплитудные (б), погребенные и предполагаемые (в); 6 – рифтовая система вулкана; G-1–3 – конусы вулканов Горелый 1–3 в составе общей постройки; М – вулкан Мутновский



извержений; возможно, они имели место, но погребены толщей агглютинатов его последнего терминального извержения. Все наблюдаемые аппараты молодых прорывов, в том числе и расположенные на склонах вулкана Горелый-1, относятся ко времени деятельности двух последних конусов вулкана, начиная со стадии зрелости и прекращения роста вулкана Горелый-2 (начало голоцена).

По структурной позиции все прорывы могут быть разделены на три группы (рис. 3): 1) эксцентричные, приуроченные к кольцевому шву кальдеры; 2) собственно побочные («паразитические»), расположенные на открытых склонах вулкана Горелый-2; 3) приуроченные к пересекающей весь вулкан разветвленной трещинной (рифтовой) зоне.

Прорывы первой группы образуют цепочку у подножия северо-западной части кальдерного уступа, повторяющую его очертания в плане и, по-видимому, связанную с молодыми подвижками днища кальдеры. Другой возможный вариант их структурного контроля – расположение на нижних окончаниях радиальных к центральной постройке трещин, утыкавшихся в борт кальдеры, – не находит видимых структурных подтверждений (реальных трещин не наблюдается), в то время как тангенциальная ориентировка магмовода проявилась на примере сдвоенного шлакового конуса у северного борта кальдеры. Определенным подтверждением связи этой цепочки прорывов с субкольцевым кальдерным разломом является и тот факт, что она фактически дублирует аналогичную по форме и протяженности цепь описанных выше ранне-посткальдерных прорывов вне кальдеры, на гребне кальдерного уступа.

На юго-востоке обсуждаемый дугообразный ряд шлаковых конусов как бы замыкается в кольцо подобной же цепочкой прорывов, максимально удаленных от вершины вулкана, но расположенных также и на значительном удалении от кальдерного уступа, у подножий построек вулканов Горелый-2 и -3. Эта группа прорывов фиксирует северо-западную границу амагматичной, непроницаемой для молодых прорывов зоны между вулканами Горелый и Мутновский. Зона, таким образом, включает и часть кальдерного днища, в пределы которой не проникали радиальные трещины и где, по-видимому, не

происходило новых просадок. Часть указанных побочных конусов располагается не на самых низких уровнях подножия вулкана, а на краю его высокого уступа.

В целом описанный субкольцевой ансамбль прорывов замыкает весь внутрикальдерный ареал их распространения в северо-западной части структуры. Можно предположить, что именно здесь по намечаемому прорывами контуру произошло подновление кальдерной просадки при извержении постигнимбритовых пемз и, по-видимому, на эту часть кальдеры позднее проецировался пульсирующий в объеме очаг вулкана в периоды наибольшего разрастания.

Побочные прорывы в подавляющем большинстве или даже исключительно связаны с деятельностью наиболее высокого и зрелого конуса вулкана Горелый-2. В основном они располагаются на открытых склонах восточной половины его постройки, хотя, возможно, часть более ранних из них погребена под толщей пород вулкана Горелый-3. Среди них наблюдаются как одиночные шлаковые конусы, так и группы прорывов, связанные с протяженными радиальными трещинами, иногда со шлаковыми конусами в их верхней части и чисто лавовыми бокками ниже по склону. Из-за малой высоты и непродолжительной активности «недоразвитого» вулкана Горелый-3 едва ли с ним можно связывать какие-либо из шлаковых конусов на его склонах; крупнейшие из них имеют несомненную связь с системой рифтовых трещин. Столь же маловероятной представляется и непосредственная связь их с вулканом Горелый-2 – по причине явной энергетической невыгодности прорыва магмы через лишнюю толщу пород и необходимости ее подъема на большую высоту.

Прорывы, приуроченные к трещинной системе, располагаются на склонах недействующих вулканов Горелый-1 и 3, а также за пределами вулкана и кальдеры. Они локализованы вдоль пересекающей весь вулкан с юго-запада на юго-восток дугообразной системы трещин, а также ее короткого северо-западного ответвления на склоне вулкана Горелый-1 (рис. 1 в [20] и рис. 3). Юго-восточный отрезок системы, сближающейся по направлению с линией вулкан Мутновский – вулкан Горелый, ранее контролировал смещение канала и хребтообразную форму последнего.

Обычно такое смещение происходит последовательно в одном направлении, а формирующийся вулканический хребет погребает трещинную систему, подновляющуюся лишь эпизодически на отдельных отрезках. Своеобразие вулкана Горелый – в омоложении и нарастающей «просвечиваемости» трещинной зоны сквозь постройку, включая ее отмершие элементы, а также в возвратном перемещении по ней главного канала вулкана после образования вулкана Горелый-3. Характерная особенность развития трещинной системы на поздних этапах – одновременность активизаций в противоположных ее ветвях и эффузивные извержения по всей ее длине. Показателен также линейный характер разрастания и активизации теплового поля на вершине вулкана перед его современными эксплозивными извержениями центрального типа. На рис. 2 показано зафиксированное И.Т. Кирсановым [3] положение термальных площадок вулкана на одном из максимумов их активности, перед извержением 1980 г. Очевидно, подъем магмы к центральному каналу сопровождается растяжением постройки по трещинам рифтовой зоны, вновь становящихся проводниками магматических эманаций.

В плане наиболее активная часть системы имеет вид угловатой дуги с резкими изломами в местах пересечения борта кальдеры и у вершинных кратеров вулканов Горелый-1 и 2 (рис. 3). У восточного подножия вулкана Горелый-3 она резко прерывается, утыкаясь в амагматичную зону между вулканами Горелый и Мутновский.

Начало развития трещинной зоны в описанной конфигурации относится к доголоценовому времени. Оно, в частности, отмечено любопытной постройкой (прорыв Динозавр) на внешнем юго-западном склоне кальдеры — крутосклонной пилообразной грядой из шлаково-бомбового агглютината со следами нескольких кратеров, возникшей, по всем признакам, в результате трещинного извержения внутри ледникового покрова [4].

Позднее, в первой половине голоцена, в полосе простирания трещинной системы произошло до десятка существенно эффузивных извержений. Их аппараты представлены шлаковыми конусами как за пределами кальдеры, так и внутри нее, у западного подножия вулкана Горелый-1 и на склоне вулкана

Горелый-3 (рис. 3). Роль трещинной системы как элемента магмопроводящей структуры вулкана возрастала с течением времени, и если на ранних этапах извержения в трещинной зоне еще чередовались с эпизодами независимой деятельности вершинных кратеров (в том числе возникшего вулкана Горелый-3) и образованием побочных прорывов в иных местах постройки, то два последних эпизода обильных лавовых излияний (пятая и шестая группы потоков) связаны исключительно с трещинной зоной.

Крупнейшие, близкие по химическому и минеральному составу андезибазальтовые потоки пятой возрастной группы ( $Q_4^3$ , рис. 1 в [20]) излились фактически одновременно в северо-западной и юго-восточной ветвях рифтовой системы. На северо-западе это широкий поток урочища мыса Кекурный, распространившийся на 9 км за пределы кальдеры. Аппарат извержения — крупный, разделенный надвое шлаковый конус у нижнего конца двухкилометровой трещины, расщелившей склон вулкана Горелый-1 от самой вершины. На юго-востоке обширный многорукавный поток излился на склоне вулкана Горелый-3 из размытого лавой подковообразного конуса. Оба потока занимают одинаковое положение в разрезе почвенно-пирокластического чехла и имеют возраст ~3000 лет, как показывают датировки нижележащего прослоя почвы ( $3500 \pm 70$  лет назад) и маркирующего горизонта  $KC_1$  (~1800 лет назад) в перекрывающих слоях тефры. Суммарный объем лав оценивается в ~0,25 км<sup>3</sup>.

Последняя, шестая серия лавовых излияний ( $Q_4^4$ , рис. 1 в [20]) и геолого-структурная обстановка их проявления наиболее информативны для понимания функционирования трещинной системы вулкана и ее взаимодействия с системой очаг-канал. Извержения датируются XVIII веком. На этот раз активизировались по всей длине юго-восточная и юго-западная ветви рифта. Излияниями лавы была охвачена вся постройка вместе с вершинным кратером. Крупные потоки характерных мегаплагиофировых андезитов и андезибазальтов вытекали из зияющих трещин на склонах вулканов Горелый-1 и -3, из упоминавшегося лавового озера в вершинном юго-западном кратере вулкана Горелый-2 и особенно обильно — в закальдерной

части юго-западной ветви трещинной зоны. Единство структуры, идентичность состава лав из разных пунктов истечения и единообразие их петрографического облика свидетельствуют, что это было фактически одно длительное извержение из расчлененной магматической камеры. В перекрывающем его лавы почвенно-пирокластическом чехле содержится горизонт тефры (извержение конуса Штюбеля в 1907 г.), подстилаемый прослоями вулканического песка вулкана Мутновский и слабогумусированной супеси. Ниже под лавами получена датировка почвы  $200 \pm 100$  лет (рис. 6, [21]). Из почвы под двумя разными потоками этой группы сотрудником Гавайской геофизической обсерватории Дж. Локвудом были отобраны веточки кустарника, показавшие возраст  $560 \pm 45$  и  $420 \pm 50$  лет. Древесина, однако, не была обуглена потоками, и её возраст, очевидно, отвечает предшествующему времени формирования почвы, определенному интервалом 200–650 лет [6]. Таким образом, тефрохронологические данные также не противоречат выводу, что излияние всех лав описываемой группы происходило близко/одновременно около 200–250 лет назад.

Последовательность событий может быть реконструирована на основе логического предположения, что первыми извергались более кислые вулканы и что в общем извержение развивалось от вершинной части постройки к ее подножиям. Оно началось с раскрытия трещины и излияния оливинсодержащих мегаплагиофировых андезитов на восточном склоне вулкана Горелый-3 на высоте от 1650 до 1500 м, а затем на западном склоне вулкана Горелый-1 – двумя потоками из нижних частей трещин, последовательно раскрывшихся на высотах 1550–1375 и 1450–1350 м. Это было фактически чисто эффузивное извержение: только с первым потоком связаны небольшие валы разбрызгивания непосредственно у трещины.

По-видимому, умеренные эксплозии в это время «прочистили» кратер на вершине вулкана Горелый-2, и следующий этап извержения начался заполнением его озером лавы оливиновых мегаплагиофировых андезибазальтов. Оно переливалось крупным потоком на южный склон постройки. Затем продолжилось развитие трещин у ее западного подножия, в месте пересечения погребенного борта кальдеры (где лава не появилась) и далее, с изменением направления (рис. 3), на внешнем юго-

западном склоне кальдеры. Здесь последовательно возникло шесть прорывов: одиночный конус из бомбового агглютината; пара сближенных конусов, с нижним из которых связан короткий поток андезибазальтов с чертами промежуточного состава; небольшой эффузивный купол без следов пирокластики; два более крупных конуса в самом низком месте (~900 м) зоны прорывов, у подножия небольшого средне-позднеплейстоценового вулкана Ягодный (в 9 км от вершинного кратера вулкана Горелый-2). С последними конусами связан крупнейший поток всего извержения, распространившийся на ~20 км по долинам руч. Ключ Кекурный и р. Левая Опала. Состав всех лав, участками близких к типу пахоэхое, аналогичен андезибазальтам вершинного кратера, лишь в некоторых кумулятивных разностях (в упомянутом эффузивном куполе) он уклоняется до базальтового. Возможно, с этим излиянием были связаны спуск лавового озера и обрушения, сформировавшие ныне наблюдаемый провальный кратер, вмещающий действующий эксплозивный. Суммарный объем лав ~0,2 км<sup>3</sup>. Судя по формированию шлаковых конусов на местах прорывов, андезибазальтовая магма была более газонасыщенной, чем андезитовая передовых порций извержения.

Весьма интересен структурный аспект внекальдерного извержения. С ним здесь связано оформление рифта как именно вулканогенного грабена протяженностью 5,5 км и шириной 200–500 м с амплитудой опускания поверхности окружающего пемзового поля до 6–8 м. Просадка при этом четко локализована вблизи описанных прорывов, затухая как вверх по внешнему склону кальдеры, так и на вершине вулкана Ягодный. Последний был фактически единственным положительным элементом рельефа на трассе раскрытия трещины и внедрения питавшей прорывы дайки (см. далее рис. 6), который, однако, преодолен ими не был. Такая зависимость от рельефа свидетельствует скорее о приповерхностном и латеральном распространении дайки, чем о раскрытии и заполнении трещины магмой снизу, непосредственно от очага. По-видимому, имело место внедрение так называемой лезвиеобразной (bladed [18]) наклонной дайки на уровне нейтральной плавучести магмы, – вероятно, в верхах толщи неогеновых и раннечетвертичных базальтоидов фундамента докальдерной постройки. Дайка, по-

видимому, утыкалась в плотное ядро (жерловину) вулкана Ягодный, образовав раздвиганием стенок подобие напорного артезианского бассейна (вторичный очаг). Дренажное его прорывами и обусловило возникновение просадки.

Неясно, все ли прорывы внекальдерного участка трещинной зоны формировались путем латеральных интрузий. Некоторые из них могли питаться крутовосходящими дайками. Могли быть и множественные скрытые внедрения лезвиеобразных даек, не завершившиеся прорывами на поверхность. В любом случае, однако, существенны принадлежность пород вулкана и далеко удаленных прорывов одному источнику и расположение прорывов в одной полосе растяжения строго заданной ориентировки.

Термин «вулканический рифт» (рифт на вулкане) здесь используются в понимании исследователей гавайских вулканов, описавших возникновение на склонах зрелых построек тройных, расходящихся от вершинного кратера (кальдеры) систем трещинообразования, просадок и преимущественной концентрации побочных прорывов [5]. Активными обычно остаются лишь две ветви такой системы, в то время как третья бывает угнетенной и может отмереть.

По очевидной связи таких зон с центральными постройками надо полагать их природу вулкано-тектонической. Однако, в отличие от структур типа «горячих точек», в линейных островодужных структурах подобные рифтовые зоны на вулканах обнаруживают единообразие ориентировки. На Камчатке она соответствует простиранию вулканических цепей и региональному плану дислокаций (вдоль конвергентных границ литосферных плит), и рифтовые зоны смыкаются в единые трансвулканические и транскальдерные системы. Такова, например, общая система магмоконтролирующих трещин Восточной Камчатки, протягивающаяся с коленчатыми изломами и кулисными смещениями к северо-востоку от района южнее вулкана Академии Наук через кальдерные комплексы и вулканы Карымский, Малый Семячик, Большой Семячик к кальдере Узон и вулкану Крашенинникова [9].

Видимое структурное единство и протяженность таких региональных систем ставят вопрос: являются ли они действительно едиными и сквозькоровыми? По фактам устойчивости пространственного положения вулканических центров (вдоль

зоны не формируется сплошной вулканический хребет), приуроченности моногенных прорывов и наиболее существенных просадок именно к вулканическим центрам определенных (зрелых) стадий развития представляется более вероятным, что подобные системы состоят из отдельных рифтовых зон. Они развиваются как элементы магмопроводящих структур вулканических центров на верхних уровнях земной коры, подчиняясь региональному плану зон растяжения и крупных коровых структур, и опосредованно маркируют положение общей глубинной области магмогенерации и цепи венчающих ее диапиров. Подтверждением этому является петрогеохимическое родство продуктов извержений в рифтовых системах и в порождающих их вулканических центрах. Источником конкретно реализуемых растягивающих напряжений и магматического вещества таких зон являются, скорее всего, приповерхностные очаги, периодически подпитываемые глубинной магмой, но все хуже дренируемые центральным каналом вулкана по мере достижения им пределов своего роста и вследствие ограничения кальдерами возможностей латеральной миграции их каналов.

На вулкане Горелый молодая рифтовая система, по гавайскому образцу, также имеет три ветви, одна из которых (северо-западная) менее развита. Из двух наиболее развитых ветвей близка к общекамчатской северо-восточной ориентировке вулканических цепей лишь закальдерная юго-западная ветвь, простирающаяся в направлении сейсмоактивного грабена на вулкане Асача [3] и молодых вулканов у северного подножия его массива (рис. 2 в [20], рис. 3). Восточнее, после изломов у борта кальдеры и вершинных кратеров вулкана Горелый, рифтовая система, как отмечено, разворачивается в сторону вулкана Мутновский, утыкаясь в разделяющую их, ныне амагматичную зону. Последняя, однако, была проницаемой для прорывов магмы в позднем плейстоцене, да докальдерной стадии развития Гореловского центра, а на древнейшем конусе вулкана Мутновский аналогично этим прорывам ориентирован рой близких им по возрасту базальт-андезитовых даек. Локализация вулкана Мутновский фиксирует, как отмечалось, второй разворот в Z-образном изгибе региональной магмоконтролирующей структуры, ранее продолжавшейся в этом качестве Северо-Мутновской зоной разрывов.



### **Цикличность вулканизма и прогноз активности вулкана Горелый**

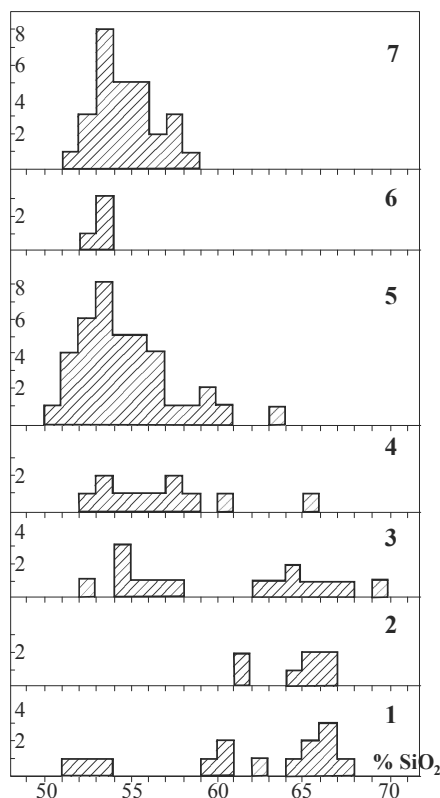
Подводя итог описанию развития вулкана, подчеркнем, что относительно детальному расчленению и датированию оказался доступным лишь верхний, голоценовый «покров» уже зрелой, в основном ранее сформировавшейся постройки, отражающий режим последнего, конструктивно-деструктивного этапа ее развития.

Для существенно лавового сооружения, каким является вулкан Горелый, серии сближенных во времени излияний отмечают, очевидно, этапы максимальной напряженности вулканического процесса – наиболее интенсивного выноса тепла и вещества. Они перемежаются длительными периодами чередования состояний покоя (фумарольной активности) и умеренных эксплозивных извержений – пирокластических, фреатомагматических, фреатических (ультравулканских). Циклы активности такого рода, измеряемые длительностью периодов от одной до другой вспышки эффузивной деятельности, обнаруживают определенную направленность в изменении режима вулканизма вулкана Горелый в голоцене, связанную с перестройкой его магмопроводящей системы. Если крупные эффузии первых трех циклов датированной истории вулкана происходили с интервалами 700–1800 (в среднем 1250) лет, то с установлением ведущей роли рифтовой зоны в разгрузке магматического вещества два последних цикла имели вдвое большую продолжительность – 2500 и 2750 лет. При устойчивости намеченной тенденции следующее крупное эффузивное извержение на вулкане Горелый может произойти в рифтовой зоне через ~2000 лет.

### **Эволюция и вероятное строение магмопитающей системы вулканического центра**

Имеющиеся на сегодня геофизические, геолого-структурные и петрологические данные позволяют сделать ряд ориентировочных предположений о развитии магмопитающей системы Гореловского центра в эволюционном, историческом подходе.

На рис. 4 показано распределение составов пород в выделенных возрастных комплексах и структурных элементах Гореловского вулканического центра.



**Рис. 4. Распределение составов пород в возрастных комплексах Гореловского вулканического центра:** I – докальдерный комплекс; II – синкальдерный; III – ранний посткальдерный комплекс; IV – вулкан Горелый-1; V – вулкан Горелый-2; VI – вулкан Горелый-3; VII – вулканисты рифтовой системы. На вертикальной оси – число анализов

Судя по проявлению базальтов уже на стадии деятельности существенно дацит-андезитового вулкана пра-Горелый, вулканизм центра изначально был связан с базальтовой магмой, и нет оснований отождествлять его очаг с предполагаемым кислым интрузивом в недрах Гореловского блока, – скорее всего более древним и консолидированным. Представляется вероятным вне-

дрение базальтовой магмы в расслоенный плутон на уровень ее нейтральной плавучести, между более основной нижней частью и гранитной верхней, возможно с частичной ассимиляцией последней.

Для современного вулкана Горелый наличие кальдеры и широкое развитие гибридизма в продуктах его деятельности делают достаточно очевидным присутствие под ним непосредственно питающего его, относительно малоглубинного магматического резервуара – периферического очага. Он мог сохраняться как остаточный от этапа кальдерообразования – в резко сокращенном объеме, «сплюснутый» обрушением кровли. Последующее извержение постигнимбритовых пемз следует, видимо, связывать с пополнением очага крупной порцией глубоинной базальтовой магмы, частично вытолкнувшей остаточ-

ный кислый расплав, частично с ним смешавшейся и проэволюционировавшей с образованием дацит-базальтового спектра магм ранне-посткальдерного комплекса.

Ориентировочная оценка глубины расположения очага этого времени и температуры пемзообразующего расплава была сделана по чувствительному к  $P_{H_2O}$  отношению в пемзах нормативных количеств плагиоклаза и пироксенов в сравнении с экспериментально определенными параметрами соответствующих котектик [16]. Оптимальным для этого метода является использование составов стекла свежих пемз с небольшим (первые проценты) содержанием равновесных ему вкрапленников. Валовые анализы дают несколько завышенные значения давления, однако в рассматриваемом случае они предпочтительнее: в подвергшихся диагенезу пемзах Горелого микрозондовым анализом стекла выявлено неравномерное распределение щелочей с вариациями составов от корунд- до акмит-нормативных. На диаграмму (рис. 5) нанесено плагиоклаз-пироксеновое отношение по валовым составам пемз и по одному из «нормальных», качественно соответствующих реальной минералогии микрозондовых анализов (табл. 2). По приведенным данным можно оценить глубину положения верхней кромки очага в 3–5 км.

Таблица 2

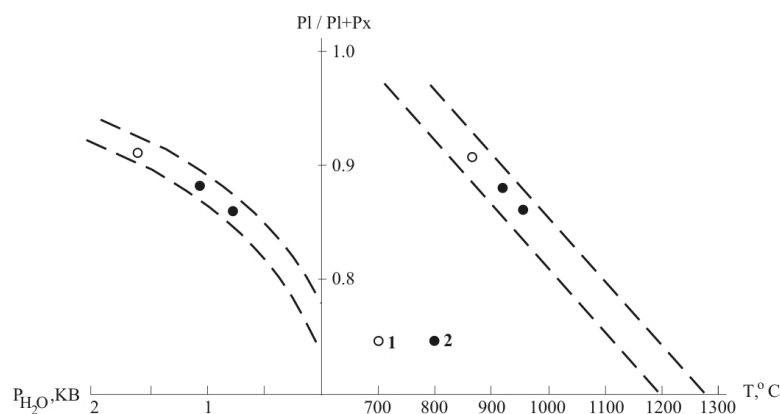
**Химический и нормативный состав пемз Гореловского центра**

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
SiO <sub>2</sub>	66,00	66,28	68,17
TiO <sub>2</sub>	0,79	0,71	0,70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,48	15,54	15,88
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,91	0,56	0,86
FeO	3,01	2,95	1,59
MnO	0,10	0,14	0,05
MgO	1,55	1,50	0,45
CaO	2,99	3,43	3,22
Na <sub>2</sub> O	4,96	4,67	4,59
K <sub>2</sub> O	3,03	3,03	4,39
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,18	0,19	0,15
Q	15,68	17,71	18,13
Or	17,91	17,91	25,94
Ab	41,97	39,52	38,84

Окончание табл. 2

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
An	13,66	12,49	9,76
Di	–	2,70	4,33
C	0,04	–	–
Hu	1,52	5,62	0,10
Mt	1,32	2,26	1,25
Il	1,50	1,35	1,35
Ap	0,42	0,44	0,35
$\frac{PL}{PL + P_x}$	0,88	0,86	0,92

Примечание: 1, 2 – валовые составы пемз; 3 – состав стекла. Аналитики: Т.Г. Осетрова, Т.М. Философова.



**Рис. 5. Соотношение состав –  $P_{H_2O}$  –  $T$  для пемз Гореловского вулканического центра, по [16]: 1 – валовый состав пемзы; 2 – состав её стекла**

Для ранних этапов развития вулкана Горелый-1 проекцией очага на дневную поверхность можно считать северо-западную часть кальдеры, оконтуриваемую извне субкольцевым ансамблем конусов посткальдерных прорывов. Очаг, вероятнее всего, имел форму округлого в плане силла или, скорее, лакколита с апикалью под жерлом вулкана Горелый-1 и поперечник 8–10 км. В дальнейшем очаг функционировал в режиме чередования следующих состояний: 1) относительной закрытости (в периоды покоя), сокращения объема и изменения формы за счет кристаллизации магмы в краевых частях и накопления придонных кумулатов; 2) новых пополнений его основной магмой с

приращением объема резервуара или частичным опустошением его извержениями. Сравнительно малая распространенность смешанных пород в постройке вулкана Горелый-1 и видимое преобладание «чистых» андезитов показывают, что небольшие объемы пополнений его очага чаще просто выталкивали магму апикальной зоны, дифференцируясь затем у подошвы.

Вероятно, наиболее существенные приращения размеров и изменения геометрии очага происходят в связи с затрудненностью его дренирования извержениями при достижении предельной высоты вулкана и обеспечивают необходимую перестройку его магмопроводящей системы. Такое событие имело место перед возникновением вулкана Горелый-2; с ним могло быть связано мощное заключительное извержение вулкана Горелый-1 и образование его обширного кратера (вершинной кальдеры?).

Судя по размерам субкольцевого комплекса внутрикальдерных эксцентричных прорывов, породы которых аналогичны развитым на вулкане Горелый-2, поперечник очага в это время вновь достигал 8–9 км. С этого рубежа среди продуктов его деятельности резко преобладающими стали вулканиды смешанного, гибридного характера, причем фактически одного типа смещения – с образованием макроскопически однородных пород, но с неравновесными ассоциациями фенокристаллов (миктиты). Смешанные породы полосчатого типа или с долеритоподобными базитовыми включениями (минлиты) редки.

Со стороны пространственно-геометрических параметров очага такому стилю его функционирования должны способствовать малый объем и возможно менее глубинное расположение, со стороны вещественных характеристик — возможно меньший контраст составов смешивающихся магм [17]. Данные по составам пород и минералов и анализ возможных линий смещения показывают, что одним из конечных членов смесей являются андезиты (57–60 %  $\text{SiO}_2$ , в том числе мегаплагиофировые) с парагенезисом вкрапленников плагиоклаз  $\text{An}_{50-60}$  + клинопироксен + ортопироксен + титаномагнетит, проявленные в немногочисленных потоках. Второй крайний ингредиент – не извергавшаяся в чистом виде базальтовая магма. Большинству смешанных пород свойственна значительная вариабельность состава минералов базальтового парагенезиса, показы-

вающая, что часто ингредиентами смесей были магмы разных стадий дифференциации.

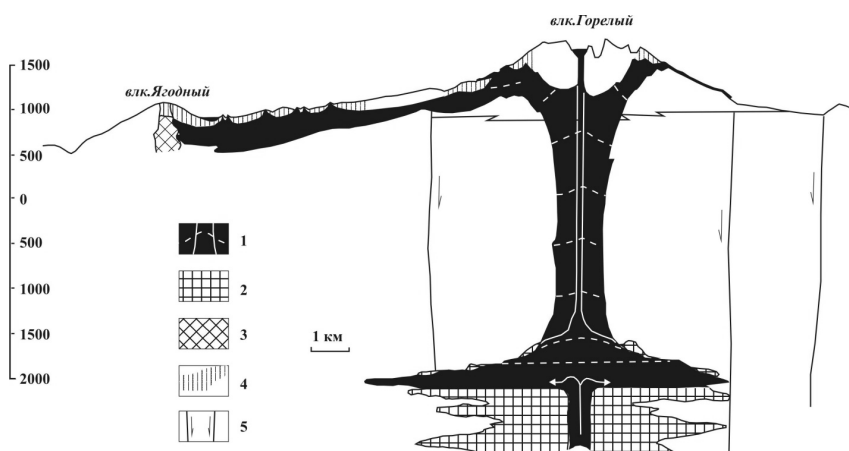
Сохранность вещественных и структурных признаков гибризма (неравновесность вкрапленников, обратная зональность, окаймление ортопироксена клинопироксеном и т.п.) свидетельствует о быстром развитии процесса смешения и кратковременности периода (дни – месяцы) от первого контакта ингредиентов до извержения смеси на поверхность [17]. В динамическом аспекте такой процесс может развиваться в результате высокоскоростной инъекции горячей базитовой магмы в объем более кислого расплава со вскипанием и извержением смеси. Другой вариант – пополнение очага более газонасыщенной основной магмой, образующей придонный слой и дифференцирующейся до уравнивания ее плотности с перекрывающей магмой за счет, главным образом, везикуляции с последующим перемешиванием и извержением [14]. Отсутствие в лавах вулкана Горелый включений кристаллических кумулатов свидетельствует в пользу варианта менее стремительного развития процесса.

Даже минимальный перерыв во времени от начала пополнения очага до извержения смеси предполагает увеличение его размеров. Это же следует и из отмеченного факта преобладания смешанных пород на описываемом отрезке истории вулкана. Постоянное проявление гибризма требует столь же регулярного воспроизводства андезитового компонента смесей и, следовательно, сокращения объема очага при дифференциации исходной магмы (при базальтовом ее составе – не менее чем вдвое за один цикл). Без периодического восстановления (приращения) объема очага (не обязательно в связи с извержениями) это привело бы к быстрому его вырождению. Такое приращение объема должно происходить путем внедрения порций глубинной магмы поверх слоя придонных кумулатов, с возможным силлоподобным распространением за пределы очага. Накопление кумулатов и внедрение силлов формируют постоянно повышающийся местный уровень нейтральной плавучести базальтоидной магмы в окружении менее плотных пород и обуславливают постепенное «всплытие» очага [19].

В плане изложенных построений представляется возможным связать независимые геофизические данные о положении

верхней границы «аномального объекта» [2] или «кровли плутона» на глубине 2 км с положением верхней кромки современного очага вулкана Горелый. Предполагается лакколитообразный резервуар в пределах кальдеры мощностью в первые сотни метров, удлиненный вдоль рифтовой зоны, с апикалью под кратерным комплексом вулкана Горелый-2.

Схему функционирования очага и взаимодействия центрального и трещинного элементов магмопроводящей структуры вулкана (рис. 6) удобно показать на примере его последнего эффузивного извержения, описанного выше. После пополнения очага базальтовой магмой смешение ее с андезитовой не захватило весь объем последней, — возможно, из-за частичной ее дегазации у вершины камеры. В ходе извержения возникшая стратификация в целом сохранялась, что позволяет изобразить его динамику в виде последовательности положений перемещавшейся границы раздела андезитовой и гибридной андезибазальтовой магм при их дифференциальном течении в дайке.



**Рис. 6. Предполагаемое строение магмопитающей системы вулкана Горелый и схема развития его последнего эффузивного извержения (разрез в плоскости питавшей его дайки): 1 – магма в очаге, в дайке и потоках, контуры канала в плоскости дайки и граница раздела магмы андезитовой (вверху) и андезибазальтовой (внизу) состава; 2 – породы краевых групп и кумулаты; 3 – жерловина вулкана Ягодный; 4 – плоскости трещин; 5 – кальдерные сбросы. См. текст**

На рис. 6 показан гипотетический разрез магмопроводящей структуры вулкана в плоскости питавшей это извержение дайки и центрального канала. В условиях закупорки последнего и, возможно, продолжавшейся подпитки очага началось раскрытие трещины и формирование дайки от его апикальной части с последующим веерообразным расщеплением на уровне вулканической постройки. Магма мегаплагифирических андезитов была «вытолкнута» на ее склоны вскипавшей андезибазальтовой магмой, достигшей вслед за тем вершинного кратера. После недолгой деятельности лавового озера продолжилось раскрытие трещины вниз по юго-западному склону постройки с выходом за пределы кальдеры, образованием наклонной лезвиеобразной дайки и серии прорывов в рифтовой зоне.

Изложенные данные об истории и закономерностях развития Гореловского вулканического центра суммируются в следующих выводах:

1. Вулканизм Гореловского центра развивался на участке разуплотнения земной коры, проявленного отрицательной гравитационной аномалией. Структура и состав пород центра эволюционировали от крупного дацит-андезитового массива вулкана пра-Горелый с эпизодическим проявлением базальтов, через образование кальдеры с извержением больших объемов дацит-андезитовой пирокластики, образование субкольцевого комплекса многовыходного дацит-базальтового вулканизма – к формированию существенно базальтоидной, линейно-хребтообразной внутрикальдерной постройки вулкана Горелый и рифтовой зоны на ней.

2. Увеличение доли базальтоидов в продуктах деятельности центра сопровождалось преобразованием его магмопроводящей структуры от глубоко- и крупноочаговой центральной к центрально-трещинной с относительно небольшим малоглубинным очагом и связанной с ним рифтовой зоной. Предполагается постепенное «всплытие» очага (очагов) на формируемой базальтовой магмой призме кумулатов и силлов – как механизм, специфический для развития базальтового магматизма и вулканизма в среде относительно низкой плотности.

3. Механизм подачи магмы на поверхность меняется от преимущественно последовательного «проталкивания» магм-дифференциатов и продуктов возможного синтексиса, с редкими эпизо-



дами обхода базальтами экранирующих кислых масс, к предэруптивному смещению базальтовой магмы с ними. Это намечает тенденцию к ее транзитному, без задержек в очагах поступлению на поверхность в дальнейшем и, соответственно, к преобразованию магмопроводящей структуры в простую «прямоточную» в виде магматической колонны и (или) системы трещин.

4. Рифтовые системы, подобные развитой на вулкане Горелый, генетически связаны с периферическими очагами и опосредованно маркируют положение региональных глубинных зон магмогенерации и растяжения земной коры. Рифтовая система вулкана Горелый фиксирует крутой разворот Южно-Камчатской региональной зоны к океану, обнаруживая влияние крупной коровой структуры – Малко-Петропавловской зоны поперечных дислокаций.

Данная статья входит в цикл работ, посвященных строению, веществу и близповерхностным магматическим очагам вулканов Мутновский и Горелый (Мутновский геотермальный район, Камчатка) [20, 21, 22].

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брайцева О.А., Сулержицкий Л.Д., Пономарева В.В., Мелекесцев И.В. Геохронология крупнейших эксплозивных извержений Камчатки в голоцене и их отражение в Гренландском ледниковом шите // Докл. РАН. 1997. Т. 352. № 4. С. 516–518.
2. Зубин М.И., Мелекесцев И.В., Таракановский А.А., Эрлих Э.И. Четвертичные кальдеры Камчатки // Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971. С. 55–56.
3. 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.
4. Кирсанов И.Т., Мелекесцев И.В. Вулкан Горелый // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 294–317.
5. Макдональд Г. Вулканы. М.: Мир, 1975. 431 с.
6. 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 тейфрохронологических исследований) // Вулканология и сейсмология. 1987. № 3. С. 3–18.
7. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. Возраст и динамика формирования действующих вулканов Курило-Камчатской области // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1990. № 4. С. 17–31.
8. 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.

9. *Сандимиров И.В., Пампура В.Д., Сандимирова Г.П., Гудкова В.Н.* Возраст золото-полиметаллического оруденения Жировского вулcano-рудного центра (Южная Камчатка) // *Докл. АН*. 1993. Т. 329. № 5. С. 637–639.

10. *Селянгин О.Б., Пономарева В.В.* Строение и развитие Гореловского вулканического центра, Южная Камчатка // *Вулканология и сейсмология*. 1999. № 2. С. 3–23.

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. *Aiuppa A., Giudice G., Liuzzo M., Tamburello G., Allard P., Calabrese S., Chaplygin I., McGonigle A.J.S., and Taran Y.* First volatile inventory for Gorely volcano, Kamchatka // *Geophysical Research Letters*. 2012. V. 39.L06307. P. -5.

13. *Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D. et al.* Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // *Quaternary Res*. 1997. V. 47. P. 125–139.

14. *Eichelberger J.C.* Vesiculation of mafic magma during replenishment of silicic magma reservoirs // *Nature*. 1980. V. 228. P. 446–451.

15. *Gill J.* *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Berlin: Springer-Verlag, 1981. 390 p.

16. *O'Hara M.J.* Geochemical evolution during fractional crystallization of a periodically refilled magma chamber // *Nature*. 1977. 266. P. 503–507.

17. *Sakuyama M.* Magma mixing and Magma Plumbing Systems in Island Arks // *Bull. Volcanol*. 1984. V. 47. № 4(1). P. 685–703.

18. *Seligman A., Bindeman I., Jicha B., Ellis B., Ponomareva V. and Leonov V.* Multi-Cyclic and Isotopically Diverse Silicic Magma Generation in an Arc Volcano: Gorely Eruptive Center, Kamchatka, Russia // *Journal of Petrology*. 2014 1. P. 1–33.

19. *Walker G.P.L.* Gravitational (density) controls on volcanism, magma chambers and intrusions // *Austral. J. Earth Sci*. 1989. V. 36. P. 149–165.

20. *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..

21. *Селянгин О.Б.*, Строение, вещество и близповерхностные магматические очаги вулканов Мутновский и Горелый (Мутновский геотермальный район, Камчатка). II. Вулкан Мутновский // *ГИАБ № 11, Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3»*. – 2016. С. 365–400.

22. *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). III. GORELOVSKY VOLCANO CENTRE OF MUTNOVSKY GEOTHERMAL REGION**

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.

---

*The information about the structure, development and composition of the rocks of long-lived Gorelovsky volcanic center, which modern activity stage is represented by multi-cone intracaldera Gorely volcano with a developed fracture (rift) zone is shown. The features of magma activity in the conditions of low density of hosting crustal rocks are discussed. The conjugation of the directional evolution of magmatic material and magma-conductive structure of the volcanic centre with the formation of modern near-surface magmatic chamber of Gorely volcano is represented.*

*Key words: volcanic centre, caldera, magma-feeding structure, rift zone, magma chamber.*

#### **REFERENCES**

1. Брајцева О.А., Сулерзхичкй Л.Д., Пономарева В.В., Мелекесцев И.В. *Geochronology of the largest explosive eruptions in Kamchatka during the Holocene and their reflection in the Greenland glacier shield* // Dokl. RAN. 1997. T. 352. No 4. pp. 516–518.
2. Zubin M.I., Melekescev I.V., Tarakanovskij A.A., Jerlih Je.I. *Chetvertichnye kal'dery Kamchatki* (Quaternary calderas of Kamchatka) // Vulkanizm i glubiny Zemli. Moscow: Nauka, 1971. pp. 55–56.
3. Kirsanov I.T., Ozerov A.Ju. *Sostav produktov i jenergeticheskij jeffekt izverzenija vulkana Gorelyj v 1980–1981 gg.* (Composition of products and energy effect of the eruption of the Gorely volcano in 1980–1981) // Vulkanologija i sejsmologija. 1983. No 1. pp. 25–42.
4. Kirsanov I.T., Melekescev I.V. *Vulkan Gorelyj // Dejstvujushhie vulkany Kamchatki* (Active volcanoes of Kamchatka). T. 2. Moscow: Nauka, 1991. pp. 294–317.

5. Makdonald G. *Vulkany* (Volcanoes). Moscow: Mir, 1975. 431 p.
6. Melekescev I.V., Brajceva O.A., Ponomareva V.V. *Dinamika aktivnosti vulkanov Mutnovskij i Gorelyj v golocene i vulkanicheskaja opasnost' dlja priliegajushhih rajonov (po dannym tefrohronologicheskikh issledovanij)* (Dynamics of activity of Mutnovsky and Gorely volcanoes in Holocene and volcanic hazard for adjacent areas (according tephrochronological studies)) // *Vulkanologija i sejsmologija*. 1987. No 3. pp. 3–18.
7. Melekescev I.V., Brajceva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhickij L.D. *Vozrast i dinamika formirovanija dejstvujushhih vulkanov Kurilo-Kamchatskoj 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.
8. Plechova A.A., Portnjagin M.V., Ponomareva V.V., Derkachev A.N. *Petrohimicheskaja karakteristika pemz vulkanicheskogo centra Gorelyj (Kamchatka) kak osnova dlja ih korreljacii s tefroj iz kolonok severo-zapadnoj Pacifiki* (. 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 Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (Shkoly) po morskoi geologii*. 2013. Tom 1. Moskva: izd-vo «GEOS». pp. 249–253.
9. Sandimirov I.V., Pampura V.D., Sandimirova G.P., Gudkova V.N. *Vozrast zoloto-polimetallicheskogo orudenenija Zhirovskogo vulkano-rudnogo centra (Juzhnaja Kamchatka)* (The age of gold-polymetallic mineralization zhirovskie volcano-ore centre (southern Kamchatka)) // *Dokl. AN*. 1993. T. 329. No 5. pp. 637–639.
10. Seljagin O.B., Ponomareva V.V. *Stroenie i razvitie Gorelovskogo vulkanicheskogo centra, Juzhnaja Kamchatka* (Structure and development of Gorelovsky volcanic center, southern Kamchatka) // *Vulkanologija i sejsmologija*. 1999. No 2. pp. 3–23.
11. Topchieva O.M., Mostovaja T.V., Pokrovskij V.A. *K voprosu o genezise pemzovyh otlozhenij rajona gor Tarbagan'ja i Pemzovaja 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. Vyp.3(24). pp. 8–18.
12. Aiuppa A., Giudice G., Liuzzo M., Tamburello G., Allard P., Calabrese S., Chaplygin I., McGonigle A.J.S., and Taran Y. First volatile inventory for Gorely volcano, Kamchatka // *Geophysical Research Letters*. 2012. V. 39.L06307. P. -5.
13. Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D. et al. Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // *Quaternary Res.* 1997. V. 47. P. 125–139.
14. Eihelberger J.C. Vesiculation of matic magma during replenishment of sicilic magma reservoirs // *Nature*. 1980. V. 228. P. 446–451.
15. Gill J. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Berlin: Springer-Verlag, 1981. 390 p.
16. O'Hara M.J. Geochemical evolution during fractional crystallization of a periodically refilled magma chamber // *Nature*. 1977. 266. pp. 503–507.
17. Sakuyama M. Magma mixing and Magma Plumbing Systems in Island Arks // *Bull. Volcanol.* 1984. V. 47. No 4(1). P. 685–703.
18. Seligman A., Bindeman I., Jicha B., Ellis B., Ponomareva V. and Leonov V. Multi-Cyclic and Isotopically Diverse Silicic Magma Generation in an Arc Volcano: Gorely Eruptive Center, Kamchatka, Russia // *Journal of Petrology*. 2014 1. P. 1–33.
19. Walker G.P.L. Gravitational (density) controls on volcanism, magma chambers and intrusions // *Austral. J. Earth Sci.* 1989. V. 36. P. 149–165.
20. Seljagin O.B. *Stroenie, veshhestvo i blizpoverhnostnye magmaticheskie ochagi vulkanov Mutnovskij i Gorelyj (Mutnovskij geotermal'nyj rajon, 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, Special'nyj vypusk No 31 «Kamchatka-3». 2016. pp. 348–364..

21. Seljagin O.B. *Stroenie, veshhestvo i blizpoverhnostnye magmaticheskie ochagi vulkanov Mutnovskij i Gorelyj (Mutnovskij geotermal'nyj rajon, Kamchatka). II. Vulkan Mutnovskij* (Structure, substance and subsurface magma chambers of the volcanoes Mutnovsky and Gorely (Mutnovsky geothermal area, Kamchatka). II. The Mutnovsky volcano) // GIAB No 11, Special'nyj vypusk No 31 «Kamchatka-3». 2016. pp. 365–400.

22. Seljagin O.B., *Stroenie, veshhestvo i blizpoverhnostnye magmaticheskie ochagi vulkanov Mutnovskij i Gorelyj (Mutnovskij geotermal'nyj rajon, Kamchatka). IV. Puti i mehanizmy jevoljucii magm vulkanov Mutnovskij i Gorelyj. Geologicheskij i jenergeticheskij aspekty* (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, Special'nyj vypusk No 31 «Kamchatka-3». 2016. pp. 438–452.