

УДК 551.21

## СТРОЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ГОРЕЛОВСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА, ЮЖНАЯ КАМЧАТКА

© 1999 г. О. Б. Селянгин\*, В. В. Пономарева\*\*

\* Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

\*\* Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

Поступила в редакцию 25.05.98 г.

Гореловский вулканический центр располагается в пределах интенсивной отрицательной гравитационной аномалии. Его развитие включает формирование дацит-андезитовой докальдерной постройки, образование крупной кальдеры при извержении  $>100 \text{ км}^3$  игнимбритов и пемз, формирование субкольцевого комплекса многовыходного дацит-базальтового вулканизма и сложной внутрикальдерной базальтоидной постройки современного вулкана Горелый с рифтовой системой на нем. По данным детальных геолого-петрологических и тефрохронологических исследований освещаются закономерности развития центра и его магмопитающей системы, меняющейся от глубоко- и крупноочаговой центральной к центрально-трещинной с небольшим приповерхностным очагом при возрастании доли базальтоидов в продуктах деятельности центра.

Вулкан Горелый – один из двух (вместе с вулканом Мутновский) действующих вулканов Мутновского геотермального района, ближайший к г. Петропавловск-Камчатский с юго-запада. Он находится в относительно доступной местности в 70 км от города и в 25 км от берега Тихого океана. Расстояние между вулканами 15 км.

Вулкан Горелый расположен в обширной кальдере и представляет современный этап развития долгоживущего вулканического центра, включающего образование докальдерного сооружения, кальдеры, комплекса многовыходного посткальдерного вулканизма и формирование сложной современной постройки.

В рамках геотехнологического проекта освоения химических и энергетических ресурсов магматических систем современных вулканов выполнено новое геолого-петрологическое изучение центра. Цель настоящей работы – получение более детальных сведений о структуре, предыстории и закономерностях развития вулкана Горелый, а также возможных данных о строении и тенденциях эволюции его магмопитающей системы. Основа работы – детальная геологическая съемка масштаба 1 : 25 000 – 1 : 50 000 всего центра и тефрохронологические исследования на вулкане. По целям, методам и территориально эта работа продолжила аналогичные изыскания на вулкане Мутновский [23], что дает возможность описания вулкана Горелый с определенными элементами сравнительного анализа.

**Обзор предыдущих исследований.** Геолого-вулканонологические исследования. Благодаря своей активности вулкан Горелый известен в литературных источниках с начала прошлого века [6], однако ранние сообщения путешественников со-

держат в основном сведения феноменологического и географического характера. С началом целенаправленных краеведческих и вулканонологических исследований в 30-х годах нынешнего столетия краткие сведения об активности и элементах геологического строения вулкана сообщались в работах П.Т. Новограбленова [20], В.С. Кулакова [16], В.И. Влодавца [4], А.Н. Заварицкого [7], А.Е. Святловского [21].

Первые основательные данные о геологическом строении и развитии вулкана Горелый принадлежат И.Т. Кирсанову [9, 14], описавшему кальдеру вулкана и связанные с ней пемзово-игнимбритовые отложения, строение и вещественный состав докальдерной постройки и современного вулкана Горелый. С 1959 г. И.Т. Кирсановым с соавторами велись наблюдения за активностью вулкана и описаны все последние его извержения [10–13].

Позднейший этап изучения вулкана Горелый связан с исследованием территории Мутновско-Гореловского района на рудное сырье и геотермальные ресурсы. В 1974–1977 гг. на этой площади выполнена геологическая съемка масштаба 1 : 50 000<sup>1</sup>. В результате проведенных работ получены подробные сведения о строении фундамента района. В аспекте перспектив геотермальной энергетики Гореловский вулканический центр описан в работе [3], с позиций формационно-фациального анализа – в работе [5]. С целью прогноза вулканической опасности для проектировавшейся Мутновской геотермальной электростанции на

<sup>1</sup> Лоншаков Е.А. (отв. исп.). Отчет о групповой геологической съемке масштаба 1 : 50 000, проведенной в бассейне рек Вилюча, Жировая, Фальшивая, Мутная в 1974–1977 гг. Камчатское ТГУ, ГСЭ, Петропавловск-Камчатский, 1977. Фонды Камчатгеолкома.

вулкане Горелый проведены тефрохронологические исследования, позволившие реконструировать его эксплозивную активность в голоцене [18]. С учетом указанных данных сделано новое краткое описание вулкана Горелый с приведением его геологической и геоморфологической карт [13].

*Геофизические исследования.* В районе вулкана в разное время выполнен комплекс геофизических исследований – гравиметрических, магнитных, сейсмических, электроразведочных, магнитотеллурических и тепловых. Данные по ним синтезированы в отчетах сотрудников Центральной комплексной тематической экспедиции ПГО “Камчатгеология” Я.Б. Шварца<sup>2</sup>, В.В. Ардашева и В.А. Волкова<sup>3</sup>.

В отношении глубинной структуры района и вероятного строения корневой зоны вулканического центра наиболее существенны данные гравиметрии. По ним на территории района выделены два крупнейших структурных элемента (рис. 1): градиентная зона (с амплитудой до 80 мГал и градиентом до 5 мГал/км) у западного ограничения Южно-Камчатского горст-антиклинория (скадчато-глыбовой зоны Берегового хребта Южной Камчатки), трактуемая как система крутопадающих сбросов, и примыкающая к ней с запада крупная отрицательная гравитационная аномалия, называемая Толмачевско-Гореловской депрессией или Гореловским опущенным блоком. Амплитуда ограничивающей ее гравитационной ступени достигает 18–20 мГал. Вулкан Горелый и Мутновский располагаются в ее пределах, причем последний – одновременно и в градиентной зоне. Кальдера вулкана Горелый занимает лишь небольшую часть депрессии и сколько-нибудь сходного по интенсивности отражения в гравитационном поле не имеет. Сама депрессия никак не выражена в приповерхностной геологической структуре, за исключением участка ее юго-западной границы, совпадающего с соответствующей частью кальдерного уступа.

В работе [8] глубина до верхней кромки гравитирующего объекта Толмачевско-Гореловской аномалии оценивается более чем в 12 км; аномалия на кальдере вулкана Горелый характеризуется как сложная, но “в целом отрицательная”, с глубиной залегания аномального объекта ~2 км.

<sup>2</sup> Шварц Я.Б. (отв. исп.). Отчет о проведении детальных поисковых геофизических работ на участке “Дачный”, поисковых геофизических работ на западных флангах Мутновского месторождения парогидротерм и работ по обобщению геофизических материалов по Мутновскому геотермальному району в 1987–1990 гг. Елизово, Камчатская обл., 1990. Фонды Камчатгеолкома.

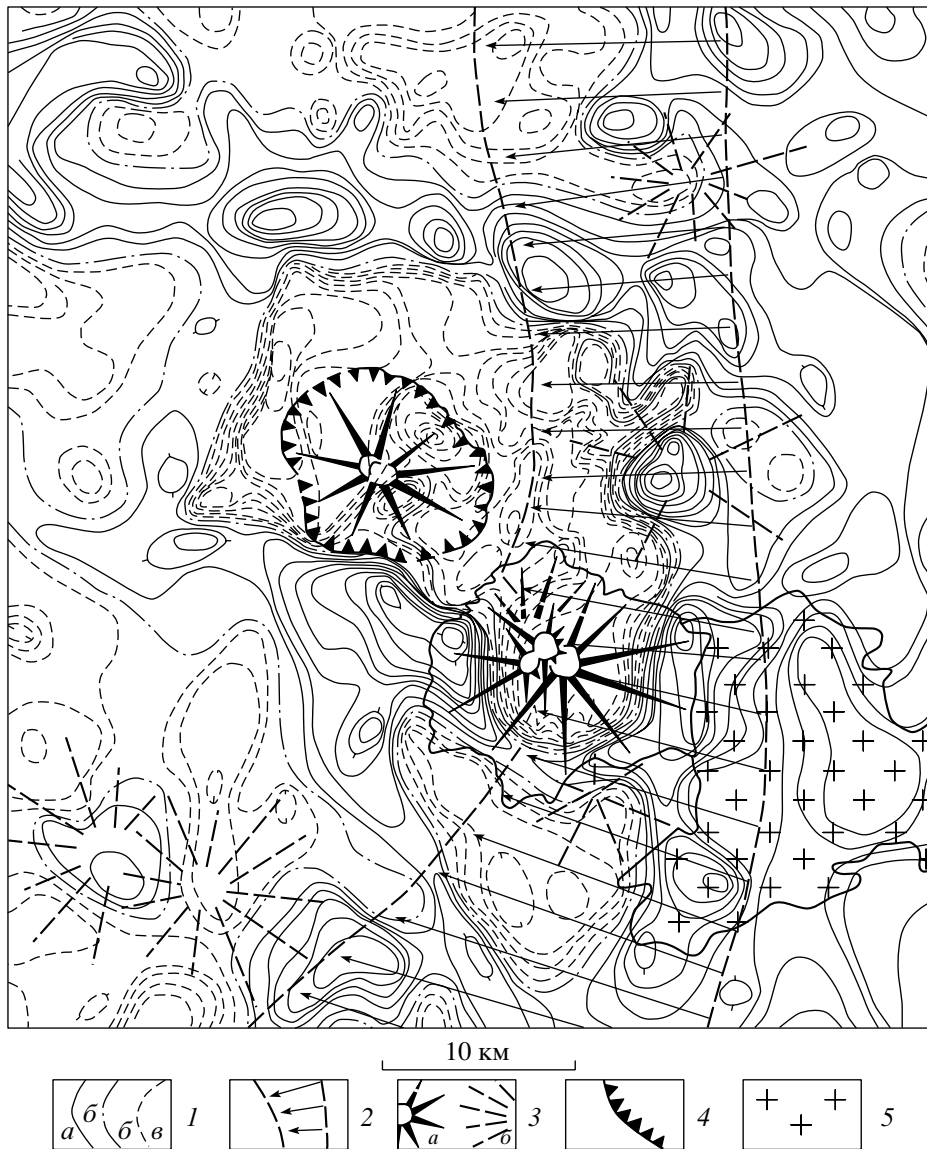
<sup>3</sup> Ардашев В.В., Волков В.А. Отчет о результатах опытно-методических работ по разработке объемных геолого-геохимических и геофизических моделей основных золотосеребряных месторождений Камчатки в 1987–1991 гг. Кн. III. Геофизические модели. Елизово, Камчатская обл., 1990. Фонды Камчатгеолкома.

Геологическая интерпретация гравитационной аномалии предполагает опускание кровли мелового фундамента района от 3 км на западе до 1.5 км на востоке. Предполагается, что она соответствует крупной погребенной (миоценовой?) кальдере. Опускание, однако, не исчерпывает рассчитанного дефекта массы, поэтому наблюдаемое разуплотнение интерпретируется внедрением корового очага-интрузива кислого состава, с которым связывается плиоцен-четвертичная вулканическая деятельность, новейшее структурообразование, гидротермы и известное в районе золотосеребряное оруденение.

По данным МТЗ, под всем опущенным блоком фиксируется зона повышенной проводимости на глубинах от 4–5 до 20 км, т.е. в пределах коры, мощность которой в районе составляет 30 км. По сейсмическим данным в пределах этой зоны устанавливаются две разобщенные области “пластичных пород” с отношением скоростей продольных и поперечных волн  $k = 1.85$ , прослеживаемые до глубины ~10 км: нечетко выделяемый Гореловский очаг под современной кальдерой вулкана и несколько севернее ее и Мутновский очаг, простирающийся на глубинах 7–10 км от центра постройки вулкана Мутновский до 10–12 км к северу при ширине 5–6 км. Расчетное положение “кровли плутона” у восточного подножия вулкана Горелый около –2 км.

На геоэлектрическом разрезе Гореловского блока выделяются пласты высокой проводимости в верхних частях разреза и вертикальные проводящие зоны, уходящие на глубину 3–5 км и более. Они истолковываются как система приразломных каналов и зон растекания глубинного теплоносителя, поднимающегося от магматического очага. В тепловом поле термоаномалии вулканов Горелый и Мутновский, локализованные в их прикратерных зонах, на всю доступную исследованию глубину разобщены.

Приведенные интерпретации результатов геофизических работ, конечно, спорны. Выше отмечена выраженность Толмачевско-Гореловской депрессии в реальной геологической структуре района. Другой пример видимого противоречия в понимании природы этой аномалии как очагово-интрузивной представляет ее восточная часть, примыкающая к Ахомтенскому интрузиву: при существенно гранитоидном составе последний тем не менее образует крутую положительную ступень в поле силы тяжести, ограничивающую аномалию с востока (рис. 1). Возможно, это свидетельствует о пластовой форме и малой мощности интрузива, подстилаемого высокоплотными породами. Не выглядит убедительным и выделение столь обширного очага вулкана Мутновский: с гидродинамических позиций трудно представить, что его магма, поднимавшаяся до 1800 м к



**Рис. 1.** Схема локальных аномалий  $\Delta g$  и положение основных структурных и магматических элементов Мутновско-Гореловского района: 1 – изолинии значений силы тяжести положительных, нулевых, отрицательных ( $a$ – $b$  соответственно); 2 – региональная гравитационная ступень; 3 – крупнейшие постройки вулканов действующих ( $a$ ) и угасших ( $b$ ); 4 – уступ кальдеры вулкана Горелый; 5 – гранитоиды Ахомтенского интрузива. Составлена по данным В.В. Ардашева и В.А. Волкова.

действующему кратеру вулкана, не проявила себя ни одним молодым прорывом на низких уровнях в тектонически активной полосе своего залегания.

Важнейший контраргумент представлениям о наличии в пределах депрессии кислых магматических очагов – существенно базальтоидный состав продуктов деятельности современных вулканов. Одновременно это выдвигает и проблему – каким образом тяжелая базальтовая магма поднимается в среде низкой плотности. Наиболее вероятным источником гравитационной аномалии представляется крупный, вероятно расслоенный, плутон гранит-диоритового состава, закристаллизовав-

шийся до эффективно-жесткого состояния, но, возможно, еще не полностью остывший.

**Геологическое строение и история развития Гореловского вулканического центра.** Структурная позиция и строение фундамента вулканического центра. Гореловский вулканический центр располагается у северной оконечности Южно-Камчатского звена Восточно-Камчатского вулканического пояса, наложенного на миоценовую складчатую структуру Южно-Камчатского прогиба. С юго-востока прогиб ограничивается складчато-глыбовой зоной (асимметричным горст-антиклинорием) Берегового хребта, сло-

женной дислоцированными осадочными и вулканическими отложениями палеоген-неогенового возраста, прорванными миоценовыми гранитоидами. В свете мобилистской концепции эта структура рассматривается как “тело эоцен-олигоценной островной дуги”. К северо-востоку от вулкана Горелый система отмеченных элементов региональной структуры, имеющих общекамчатское северо-восточное простирание, прерывается горстовой структурой Малко-Петропавловской зоны поперечных (северо-западного простирания) дислокаций. Гореловский вулканический центр, таким образом, локализован в своеобразном “структурном углу”, создаваемом указанными положительными мегаструктурами. Это область мощной вулканической аккумуляции, развивавшейся фактически непрерывно с миоценового времени.

Основание вулканического центра слагают дислоцированные ранне-среднемиоценовые отложения кислых вулканитов березовской свиты, верхи которой обнажаются севернее центра, в бассейне р. Паратунка (нижний структурный ярус), и толща контрастных, базальтоидных и кислых вулканитов позднемиоцен-плиоценового возраста – алнейская серия. В ближайших к Гореловскому центру выходах ее отложения представлены переслаиванием лав и туфов андезитобазальтового (до андезитового) состава, прорываемых серией экструзивных куполов биотитроговообманковых риолитов. Мощность алиейской серии от 1000 до 1400 м. Выше по разрезу в основании центра залегают локально развитые базитовые вулканиты раннечетвертичного возраста, имеющие невыдержанную мощность от первых метров и десятков метров в сравнительно протяженных лавовых горизонтах до первых сотен метров в реликтах палеовулканов. Непосредственное основание внутрикальдерного сооружения вулкана Горелый слагает, очевидно, мегабрекчия дна кальдеры (обломки бывшего свода частично опустошенного магматического очага), перекрытая пирокластическими, водно-ледниковыми и пролювиально-озерными отложениями (рис. 2).

Постройки вулканов Мутновский и Горелый ориентированы близко к одной линии северо-западного направления, сопрягаясь в короткий ряд, поперечный основному северо-восточному простиранию вулканических цепей Камчатки. Это указывает на их связь с некоей общей зоной магматической проницаемости земной коры, в локализации которой достаточно очевидно влияние отмеченной системы поперечных дислокаций. Однако на верхних ее уровнях современные вулканы Мутновской и Горелый разделены узкой непроницаемой, амагматичной зоной, а особенности состава извергаемого ими вещества свиде-

тельствуют о самостоятельности питающих их глубинных магматических источников.

*Строение и развитие центра.* 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. 2) и более чем трех десятков конусов одноактных побочных прорывов. Все сооружение располагается в обширной вулкано-тектонической впадине – кальдере, имеющей овальную, удлинненную 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 после кардинального преобразования его магмопроводящей структуры. Его отличают также существенно меньшая 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 щитовым, 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 абсолютным обогащением железом при подчиненном развитии гибридных известково-щелочных. Вулканиты Гореловского центра известково-щелочные, с умеренным, лишь относительным обогащением железом, заметно повышенным содержанием щелочей (особенно  $K_2O$ ) и широким развитием гибридизма. Однако в родственных его породам включениях габбро-долеритов установлены остаточные стекла состава ферро-андезитобазальтов, содержащие 13.5% FeO.

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 ( $Q_2$ , рис. 2)

размерами  $\sim 12 \times 15$  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 неки дацитов-риодацитов, ряд древних побочных конусов и потоков базальтов и андезитобазальтов. В частности, к докальдерному периоду относится единственный, по-видимому, эпизод прорыва магмы в зоне между вулканами Горелый и Мутновский, образовавший две кулисообразно смещенные цепочки шлаковых конусов однотипных субафировых базальтов. Они вскрываются из-под покрова игнимбритов у юго-восточного борта кальдеры и у подножия горы Двугорбая (рис. 2).

Кальдера образовалась в результате обрушения кровли крупного магматического очага, внедренного в земную кору, как реакции на его опустошение серией грандиозных извержений газонасыщенной дацит-андезитовой магмы. Порожденные ими пемзопады и высокоподвижные пирокластические потоки сформировали многослойный покров пемзовых туфов и главным образом игнимбритов (четыре остывшие единицы,  $Q_3^3$  на рис. 2). Пирокластические потоки распространились на расстояние до 25–30 км от центра извержений, затопившая и нивелируя древний рельеф до уровня 1100 м вблизи кальдеры, с постепенным снижением на удалении. Площадь ареала их распространения оценивается в  $600 \text{ км}^2$ , мощность в понижениях палеорельефа – до 400 м, объем  $\sim 100 \text{ км}^3$  [13]. Над поверхностью слабонаклонного пемзоигнимбритового плато “островами” выступают превышающие его уровень останцы докальдерных сооружений.

Образование кальдеры датировано тефростратиграфическим методом ( $\sim 38$ – $40$  тыс. лет назад) по соотношениям “гореловских” игнимбритов с аналогичными и субодновременными отложениями кальдеры вулкана Опала на западе [19].

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. Подтверждение этому – магматическая проницаемость отдельных участков граничного шва кальдеры,

вдоль которых позднее произошли прорывы магмы с образованием цепочек шлаковых конусов и экструзий с потоками лавы.

Новообразованная 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.

Последним в серии кальдероформирующих извержений был выброс крупной порции дацитовых пемз, отложившихся в пределах кальдеры и в основном на внешних склонах у северо-западной половины ее параметра. Их плащеобразный покров ( $Q_3^3$  на рис. 2), 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, описанный далее 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. 2).

*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. 2).

Активность указанного этапа во времени и пространстве следовала близко за извержением описанных выше пемз: большая часть аккумулятивных построек подстилается рыхлыми пемзами, испытывавшими лишь минимальное эрозионное расчленение, и почти все аппараты извержений располагаются у северо-западной половины кольцевого борта кальдеры, к которой примыкают и

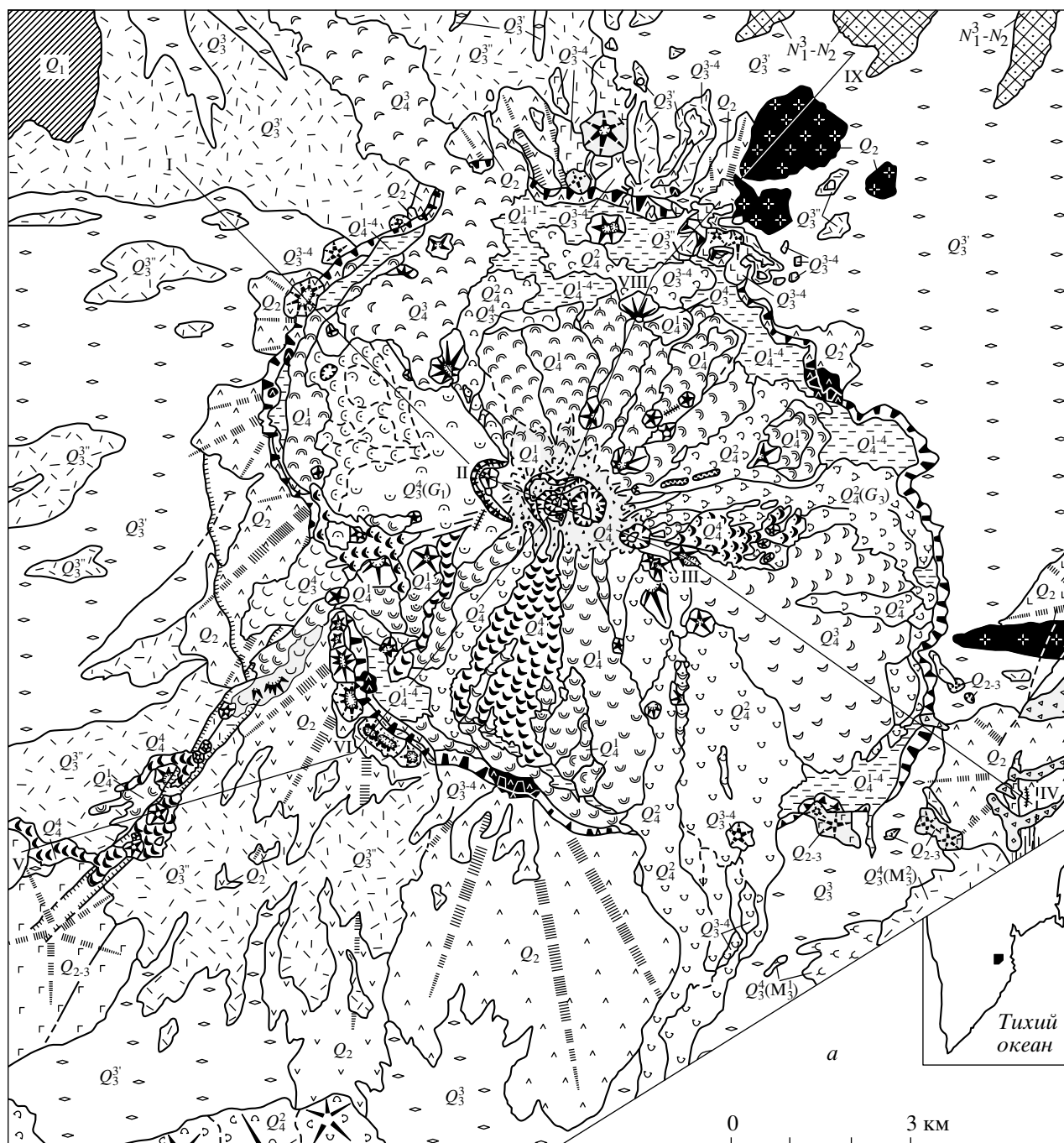
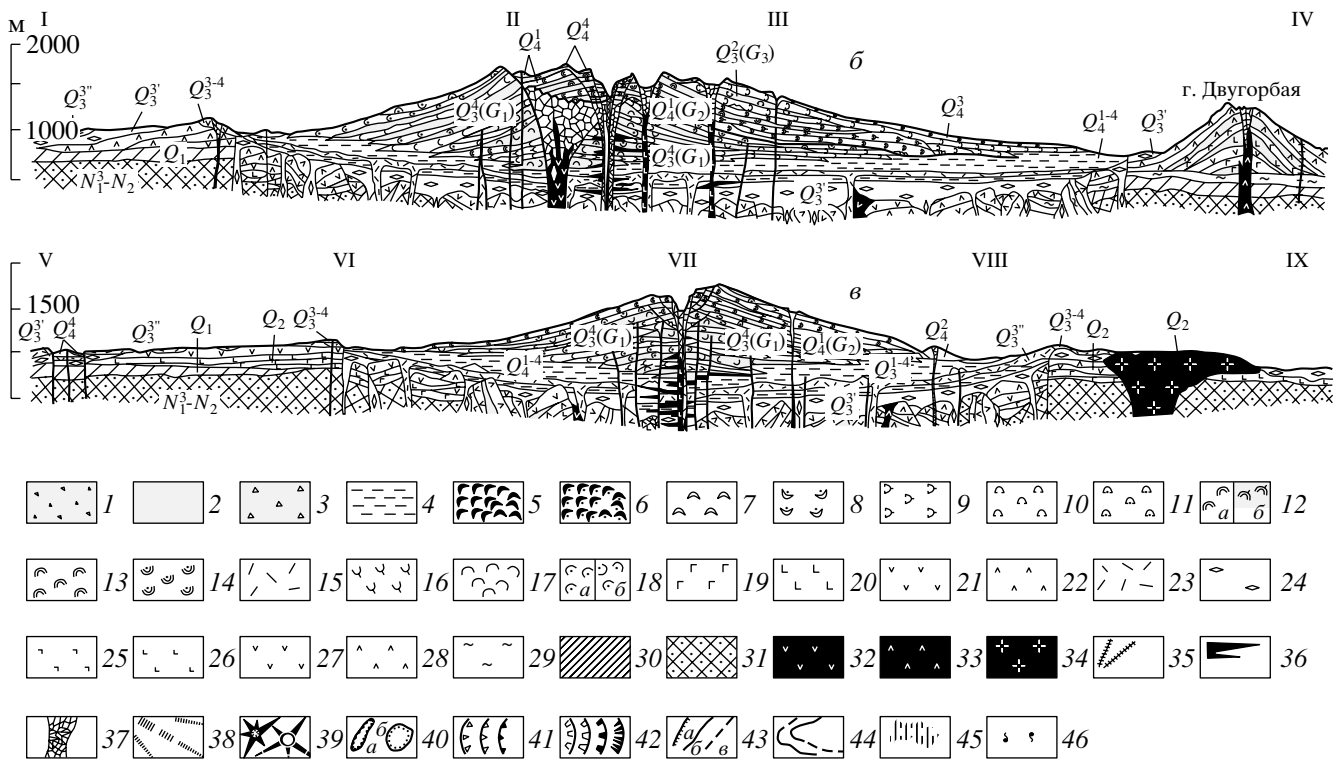


Рис. 2,а

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. Не исключено, что они имели место и там, а теперь просто скрыты внутрикальдерными отложениями. Объяснение такой локализации конусов, по-видимому, следует связывать с фак-

том 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 тьюеобразная форма ряда дацитовых экструзий в юго-



**Рис. 2.** Геологическая карта вулкана Горелый (а) и разрезы по линиям I–IV (б) и V–IX (в). Современные и нерасчлененные позднелайстоцен-голоценовые отложения: 1 – пеплы, глыбы и шлаки последних извержений вулкана; 2 – аллювий; 3 – отложения обвалов, селей, лахаров; 4 – комплекс водно-ледниковых, аллювиально-пролювиальных и озерных отложений с прослоями вулканических пеплов и шлаков ( $Q_3^4 - Q_4^4$ ). Поздний голоцен ( $Q_4^4$ , 2,6 тыс. лет назад – ныне): 5, 6 – соответственно андезитобазальты и андезиты последней серии эффузивных извержений вулкана (XVIII в.). Средний голоцен ( $Q_4^3$ , 5,0–2,6 тыс. лет назад): 7 – андезитобазальты; 8 – андезиты. Ранний голоцен ( $Q_4^2$ , 8,0–5,0 тыс. лет назад): 9 – базальты; 10 – андезитобазальты; 11 – андезиты. Древний голоцен ( $Q_4^1$ , 11,0–8,0 тыс. лет назад): 12 – лавы (а) и шлаки (б) базальтов; 13 – андезитобазальты; 14 – андезиты. Верхи позднего плейстоцена ( $Q_3^4$ ): 15 – пемзы и пемзовые туфы вершинной кальдеры вулкана Мутновский-III ( $M_3^2$ ); 16 – базальты; 17 – андезитобазальты; 18 – андезитовые лавы (а) и агломераты-агглютинаты (б). Поздний плейстоцен ( $Q_3^{3-4}$ ), комплекс ранне-посткальдерных моногенных вулканических аппаратов и продуктов их деятельности: 19 – базальты; 20 – андезитобазальты; 21 – андезиты; 22 – дациты. Поздний плейстоцен ( $Q_3^3$ ): 23 – дацитовые пемзы заключительного этапа кальдероформирующих извержений ( $Q_3^{3''}$ ); 24 – дацитовые, андезиодацитовые и андезитовые пемзы и игнимбриты главного периода кальдерообразующих извержений Гореловского центра ( $Q_3^3$ ). Средний плейстоцен ( $Q_2$ ), породы докальдерного комплекса пра-Горелого и соседних вулканов: 25 – базальты; 26 – андезитобазальты; 27 – андезиты; 28 – дациты. Ранний-средний плейстоцен ( $Q_{1-2}$ ): 29 – дацитовые игнимбриты (на разрезе I–IV). Ранний плейстоцен ( $Q_1$ ): 30 – лавовые покровы (базальты – андезитобазальты) и останцы стратовулканов (базальты – андезиты). Поздний миоцен – плиоцен ( $N_1^2 - N_2$ ): 31 – слабодислоцированная толща контрастных, базальтоидных и кислых вулканитов с экструзиями биотит-роговообманковых риолитов (алнейская серия). Породы экструзий: 32 – базальты; 33 – дациты; 34 – риолиты; 35 – дайки; 36 – силлы (на разрезах); 37 – эруптивные брекчи жерловин; 38 – останцы древних разрушенных вулканов; 39 – шлаковые конусы, молодые и частично разрушенные ранние; 40 – лавовые блоки (а) и воронки фреатических взрывов (б); 41 – гребни кратеров (от древних к молодым); 42 – гребни и бровки кальдерных уступов (от ранних к молодым); 43 – разрывные нарушения (а – с установленным смещением, б – безамплитудные, в – затухающие и погребенные); 44 – геологические границы между возрастными комплексами и отдельными телами (внутриформационные); 45 – зоны измененных пород; 46 – термальные источники и парогазовые струи. Членение голоцена – в соответствии с климатической периодизацией и  $^{14}C$ -датировками границ [26].

**Таблица 1.** Региональные маркирующие прослои пеплов в голоценовом почвенно-пирокластическом чехле района вулкана Горелый

Вулкан-источник	Индекс [25]	Прежний индекс [18]	Радиоуглеродный возраст, $^{14}\text{C}$ -лет назад*	Описание	Валовой химический состав**	Особенности состава
Ксудач, конус Штюбеля	КШТ <sub>3</sub>	Ксд	1907 г.	Вулканический песок цвета “соль с перцем” с примесью гравия пемзы	А	Низкое содержание $\text{K}_2\text{O}$ , отсутствие роговой обманки
Опала, кратер 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	А	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, зеленовато-бежевый гравий и лапилли пемзы с включением темно-серого гравия	А	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 $\text{K}_2\text{O}$ между низким и умеренным, наличие роговой обманки
?	–	–	9000–9200	Бледно-серый тонкий пепел	А	Низкое содержание $\text{K}_2\text{O}$

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 именно в районе вулкана Горелый может отличаться от состава данного пепла вблизи вулкана-источника в результате золотой сепарации минералов [24]. Градации по содержанию  $\text{K}_2\text{O}$  по данным работы [27].

западной и западной частях борта кальдеры, характеризующихся видимой закаленностью их стекловатых пород и местами хорошо развитой столчатой отдельностью.

*Современный вулкан Горелый.* 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 напользанием фронтальных частей лавовых потоков на медленно растекавшийся и сносивший их ледник, а с его таянием – погружением перемещенных фрагментов и погребением их современными озерными отложениями. В обрывах видно переслаивание относительно маломощных, зачастую облекающих уступ лавовых потоков и круп-

ноблоковой глыбовой лавы с признаками резкого переохлаждения и закалки. В плане уступ древнего подножия имеет неправильные заливчатые очертания. Отдельные его выступы-мысы 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.

Возрастное расчленение постройки вулкана Горелый проведено на основе детального картирования и тефрохронологических исследований, позволивших впервые датировать его голоценовые эффузивные образования. Достаточно высокогорное расположение вулкана, связанная с этим суровость климата и угнетенность или длительное отсутствие на нем растительного покрова

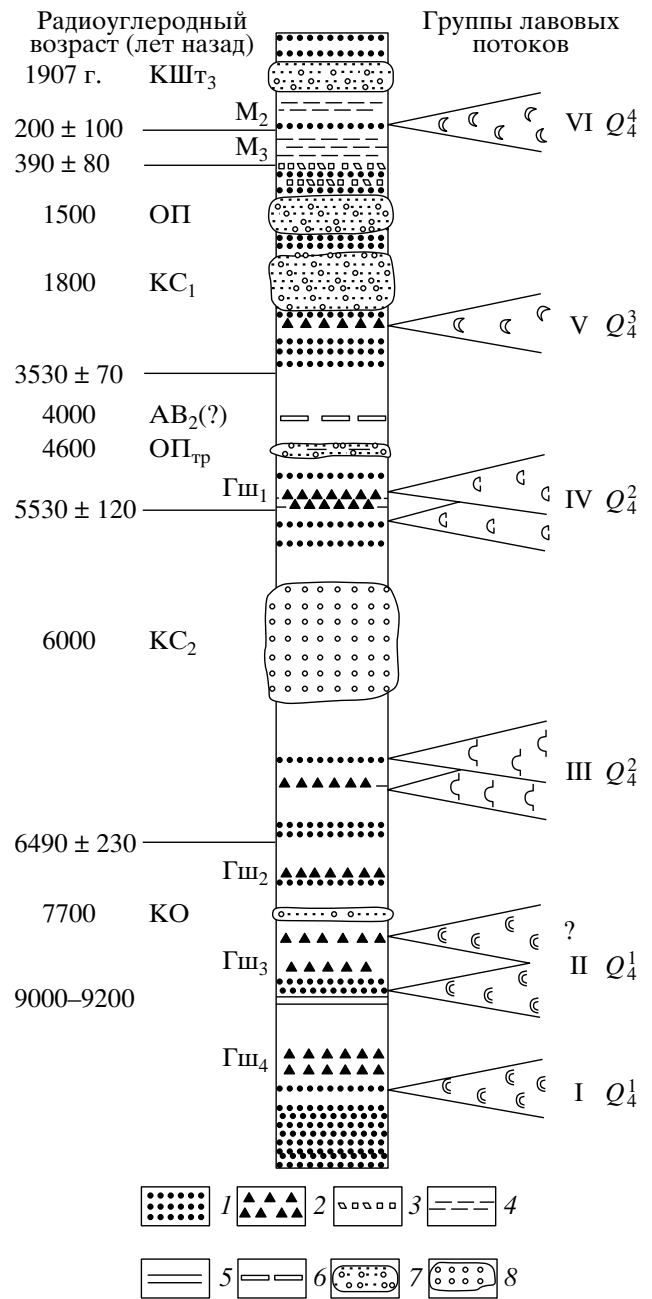


обусловили бедность его голоценового почвенно-пирокластического чехла погребенной органикой. В более низких местах окрестностей вулкана, где растительность могла развиваться, уже выклиниваются горизонты тефры, объемы которой даже при крупнейших извержениях существенно лавового вулкана Горелый не превышали 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. Основные методы их датирования – 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. 3 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 на то, что извержения каждого из периодов массового излияния лав были тесно сближены во времени.

Вулкан Горелый-1. Образование западного, древнейшего конуса в составе постройки вулкана перекрываются полным голоценовым чехлом его тефры и, таким образом, относятся к концу позднеплейстоценового периода ( $Q_3^4$ ).

Вулкан Горелый-1 (комплекс  $G_1$  на рис. 2) сложен породами базальт-андезитового ряда. Объем постройки ~14 км<sup>3</sup>. Ее открытая западная половина умеренно эродирована, одновозрастные аппараты побочных извержений на склонах отсутствуют, за исключением воронок фреатических взрывов на андезитовом потоке 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 конуса крупного (~0.7 × 1.4 км) овального кратера (вершинной кальдеры?) со скошенной к востоку кромкой. Более низкая восточная половина его гребня и дни-



**Рис. 3.** Схематический сводный разрез голоценового почвенно-пирокластического чехла района вулкана Горелый и стратиграфическое положение лав вулкана относительно региональных маркирующих прослоев пеплов. 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 [2, 24] округлен до сотен лет. Индексы тефры вулканов Горелый и Мутновский и радиоуглеродные даты по данным работы [18]. Индексы возрастных групп лавовых потоков соответствуют таковым на карте рис. 2.

ще перекрыты вулканитами вулкана Горелый-2. Подковообразный останец западной части гребня возвышается над дном 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 (дерловина) андезитов, а у подножия уступа – более поздний разрушенный одноактный конус, сложенный шлаками оливинных андезитобазальтов.

Вулкан Горелый-2. Жерло вулкана Горелый-2 (комплекс  $G_2$  на рис. 2,  $Q_4^1-Q_4^4$ ) заложилось у низкого восточного края описанного кратера вулкана Горелый-1. Современная высота его 1829 м, объем ~9 км<sup>3</sup>.

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  $G_4$  (рис. 3). 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), залегая сразу под маркирующим прослоем пепла КО (рис. 3, 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 развитие 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. 2). 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 многократерного, некогда трехглавого конуса. Он возобновил свою деятельность после образования вулкана Горелый-3 и остается активным донныне. Соответствующие производные его активности отмечены далее при описании более молодых элементов структуры вулкана.

Состав пород вулкана Горелый-2 варьирует от базальтов до андезитоацитов, с резким преобладанием промежуточных, андезитобазальтовых разновидностей. 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 вулканитов с неравновесными, смешанными ассоциациями фенокристаллов и, в частности, с характерными таблитчатыми вкрапленниками лабрадора, подобно мезо- и мегаплагиофировым лавам Ключевского дола. Вулканиты этого типа преобладали в позднейшей истории вулкана. Во всем диапазоне их составов (52–58% SiO<sub>2</sub>) фактически отсутствуют несмешанные породы “чистой линии” эволюции, их представляют лишь редкие более кислые андезиты (59–64% SiO<sub>2</sub>), 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, облекающих 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 запол-

нением 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 – пока вовсе не заполнявшийся 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 оператор 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. Глубокая дегазация расплава, сопровождаемая эксплозиями, может быть также следствием смещения магм.

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. На взгляд авторов, нет оснований предполагать наличие под вулканом сколько-нибудь обширного постоянно резервуара подземных вод [12], 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.

Вулкан Горелый-3 (комплекс  $G_3$  на рис. 2,  $Q_4^2$ ) 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. Конус сложен пирокластикой и лавами андезитобазальтового состава, относящимися к третьей возрастной группе (рис. 3, табл. 1). Они перекрыты почвенно-пирокластическим чехлом, содер-

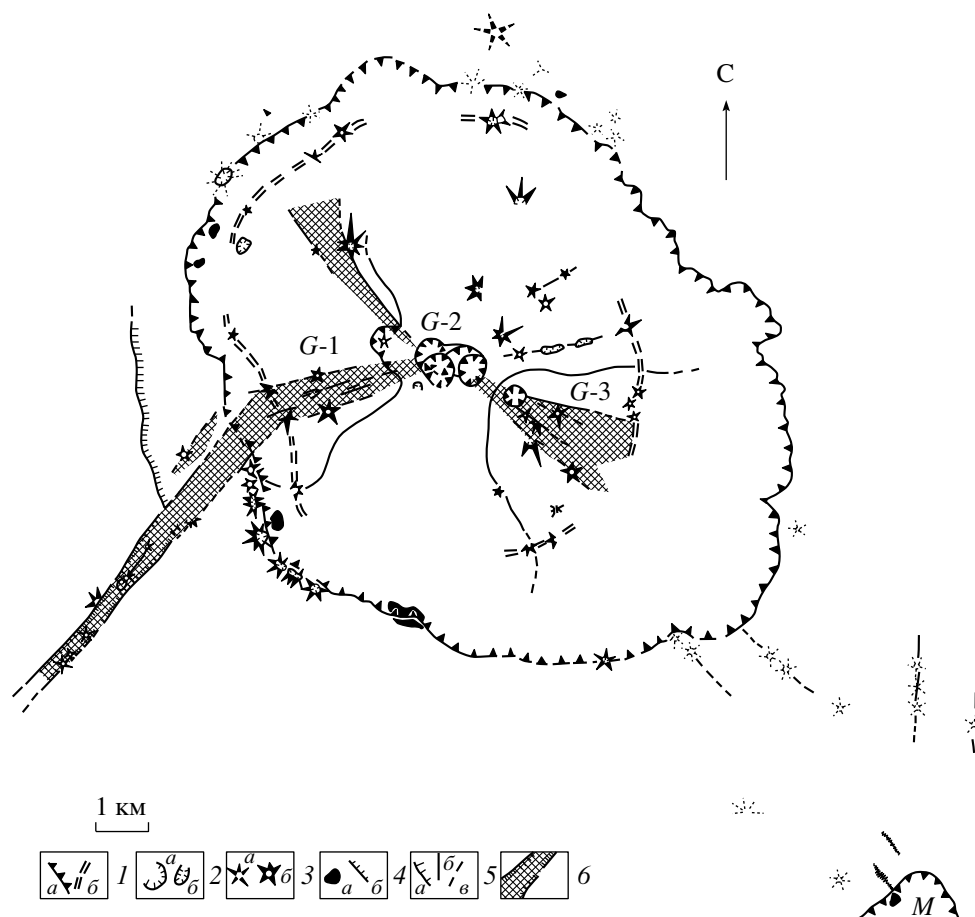
жащим в низах маркирующий слой тефры  $KC_2$  с возрастом ~6000 лет и горизонт супеси. Излияния, возможно, происходили в две стадии, поскольку некоторые потоки перекрыты еще и горизонтом шлаков. Все лавы извергались в интервале 6200–6500 лет назад, на что указывает дата  $6490 \pm 230$  лет, полученная ниже по разрезу, и тот факт, что потоки не перекрываются шлаком  $G_{ш2}$ . 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. 2).

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 андезитобазальтового 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. 2). Они перекрыты чехлом, содержащим в низах маркирующий горизонт тефры  $Op_{тр}$  (4600 лет назад) и горизонт супесей; на некоторых из них залегают и прослойки шлаков  $G_{ш1}$  (рис. 3). Излияние этих лав происходило 5500 лет назад, как показывает дата  $5530 \pm 120$  лет, полученная под шлаком  $G_{ш1}$ .

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 известно, 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 изверже-



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

ний 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 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. 2 и 4) неравномерное. На вулкане Горелый-1 не наблюдается синхронных ему аппаратов побочных 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, и вулкана Горелый-2 (начало голоцена).

По структурной позиции все прорывы могут быть разделены на три группы (рис. 4): 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 дна 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 верху 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 вулканитов 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 подъема на большую высоту.

Как правило, у большинства вулканов не происходит побочных прорывов и через ранее отмершие части сложных построек или древние сооружения (горные массивы), на склонах или у подножий которых они заложены. Это, на взгляд авторов, подтверждает, что механизм обычных, “паразитических” прорывов на склонах вулканов определяется избыточным (против прочности построек и сверх общего, фонового подпора из очага) давлением магмы, более или менее высоко поднятой в центральном канале над фундаментом вулкана. Система питания таких извержений имеет, по-видимому, флагообразную форму с каналом-“древком” и “полотнищем”-дайкой, локализованной в толще материнской постройки. Вероятно, непроницаемость для таких даек отмерших (или чужеродных) сооружений, облекаемых вулканом, обусловлена главным образом структурным фактором: если в действующем вулкане нагнетание магмы в его центральный канал генерирует растягивающие периклиналь конуса напряжения (известное “разбухание” построек), то в рядом расположенном массиве – скорее сжимающие.

На гораздо более низком и пологом вулкане Горелый-2, тесно сближенном с вулканом Горелый-1, аналогичный “обход” прорывами этой отмершей постройки более далек: прорывы, как отмечалось, расположены лишь на склонах восточной половины постройки, где поверхность древнего конуса находится на низких уровнях, а мощность перекрывающих его отложений вулкана Горелый-2 превышает 200 м. Ясно, что для прорыва магмы ближе к отмершей части вулкана и в более тонком месте материнской постройки требовалось бы ее подъем в канале до более высоких уровней, к привершинной части, где давление расплава на стенки канала минимально, а терминальное извержение оказывается равно- или более вероятным, чем боковой прорыв.

Прорывы, приуроченные к трещинной системе, располагаются на склонах недействующих вулканов Горелый-2 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. 2 и 4). Юго-восточный отрезок системы, сближающейся по направлению с линией вулкана Мутновский – вулкан Горелый, ранее контролировал смещение канала и хребтообразную форму последнего.

Обычно такое смещение происходит последовательно в одном направлении, а формирующий 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 извержения по всей ее длине.

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. 4). 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 [13].

Позднее, в первой половине голоцена, в процессе простирания трещинной системы произошло до десятка существенно эффузивных извержений. Их аппараты представлены шлаковыми конусами как за пределами кальдеры, так и внутри ее, у западного подножия вулкана Горелый-1 и на склоне вулкана Горелый-3 (рис. 4). 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 с возникновением 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 андезитобазальтовые потоки пятой возрастной группы ( $Q_4^3$ , рис. 2) 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, расщепившей 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  $КС_1$  (~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. 2) 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, и, возможно, к этим событиям восходит одно из местных названий вулкана – “Горелый хребет”. Крупные потоки характерных мегаплагиофировых андезитов и андезитобазальтов 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 расслоенной магматической камеры. В перекрывающем его лавы почвенно-пирокластическом чехле содержится горизонт тефры  $КШТ_3$  (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. 3). Из почвы под двумя разными потоками этой группы сотрудником Гавайской геофизической обсерватории Дж. Локвудом отобраны веточки кустарника, показавшие возраст  $560 \pm 45$  и  $420 \pm 50$  лет. Веточки, однако, не были обуглены потоками, и их возраст, очевидно, отвечает предшествующему времени формирования почвы, определенному интервалом 200–650 лет [18]. 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 прочищали кратер на вершине вулкана Горелый-2, и следующий этап извержения начался заполнением его озером лавы оливиновых мегаплагиофировых андезитобазальтов. 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, 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 андезитобазальтов 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, близких к типу пахоэхое, аналогичен андезитобазальтам 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, андезитобазальтовая 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), который, однако, преодолен

ими не был. Такая зависимость от рельефа свидетельствует скорее о приповерхностном и латеральном их распространении, чем о раскрытии и заполнении трещины магмой снизу, непосредственно от очага. По-видимому, имело место внедрение так называемой лезвиеобразной (bladed [33]) наклонной дайки на уровне нейтральной плавучести магмы, вероятно, в верхах толщи неогеновых и раннечетвертичных базальтоидов фундамента докальдерной постройки. Дайка, возможно, 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. В частности, скорее так образовались раннеголоценовый, нарушенный описанным грабеном (рис. 2) конус с потоком оливиновых андезитобазальтов, содержащих включения более примитивных кумулятивных базальтов, а также высокоэксплозивный прорыв Динозавр. 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.

Говоря о вулканическом рифте (рифте на вулкане), авторы используют этот термин в понимании исследователей гавайских вулканов [17], описавших возникновение на склонах зрелых построек тройных, расходящихся от вершинного кратера (кальдеры) систем трещинообразования, просадок и преимущественной концентрации побочных прорывов. 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 вулканотектонической. 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)<sup>4</sup>, и рифтовые зоны смыкаются в

<sup>4</sup> Следует отметить, что по этому признаку Камчатка выпадает из утверждаемой в работе [29] закономерности преимущественной ориентировки зон трещиноватости и концентрации побочных прорывов на вулканах Тихоокеанского кольца субперпендикулярно вулканическому фронту (примерно параллельно направлению сжимающего стресса).

единые трансвулканические и транскальдерные системы. Такова, например, общая система магмоконтролирующих трещин Восточной Камчатки, протягивающихся с колечкатыми 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 [22].

Видимое структурное единство и протяженность таких региональных систем ставят вопрос: являются ли они действительно единственными 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 магмопроводящей структуры центров на верхних уровнях земной коры, подчиняясь региональному плану зон растяжения и крупных коровых структур [1], и опосредованно маркируют положение общей глубинной области магмогенерации и цепи венчающих ее диапиров. Подтверждение этому – петрогеохимическое родство продуктов извержений в рифтовых системах и в порождающих их вулканических центрах.

Размеры, линейный трансвулканический характер и отмеченные особенности развития рифтовых зон на вулканах, в том числе и на вулкане Горелый, показывают, что источником конкретно реализуемых растягивающих напряжений и магматического вещества таких зон являются, конечно, объекты более крупные и глубокие, чем вулканические каналы. Скорее всего это приповерхностные очаги, периодически подпитываемые глубинной магмой, но все хуже дренируемые центральным каналом вулкана по мере достижения им пределов своего рода 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 [15] и молодых вулканов у северного подножия его массива. 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 амагматическую зону. Послед-

няя, однако, была проницаемой для прорывов магмы в позднем плейстоцене, на докальдерной стадии развития Гореловского центра, а на древнейшем конусе вулкана Мутновский аналогично этим прорывам ориентирован рой близких им по возрасту базальт-андезитовых даек.

В связи с изложенным надо отметить, что в линейный ряд южнокамчатских вулканов от вулкана Желтовский через вулканы Ксудач, Ходутка и Асача вписывается именно вулкан Горелый, в то время как вулкан Мутновский существенно смещен восточнее, к океану. Имея в виду возможную маркирующую роль рифтовых систем на вулканах, следует отметить, что именно вулкан Мутновский замыкает здесь ряд вулканов восточной вулканической подзоны Южной Камчатки, фиксируя изгиб и тупиковое окончание региональной магмоконтролирующей структуры (развивавшийся в середине позднего плейстоцена вулканотектонический грабен на северном склоне вулкана Мутновский, возможно, маркировал продолжение структуры к Вилючинскому вулкану).

Цикличность вулканизма и прогноз активности вулкана Горелый. Подводя итог описанию развития вулкана, подчеркнем, что относительно детальному расчленению и датированию оказалась доступным лишь верхний, голоценовый “покров” уже зрелой, в основном ранее сформировавшейся постройки, отражающей режим последнего, конструктивно-деструктивного этапа ее развития.

Для существенно лавового сооружения, каким является вулкан Горелый, серии сближенных во времени излияний отмечают, по-видимому, этапы максимальной напряженности вулканического процесса – наиболее интенсивного выноса тепла с 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.

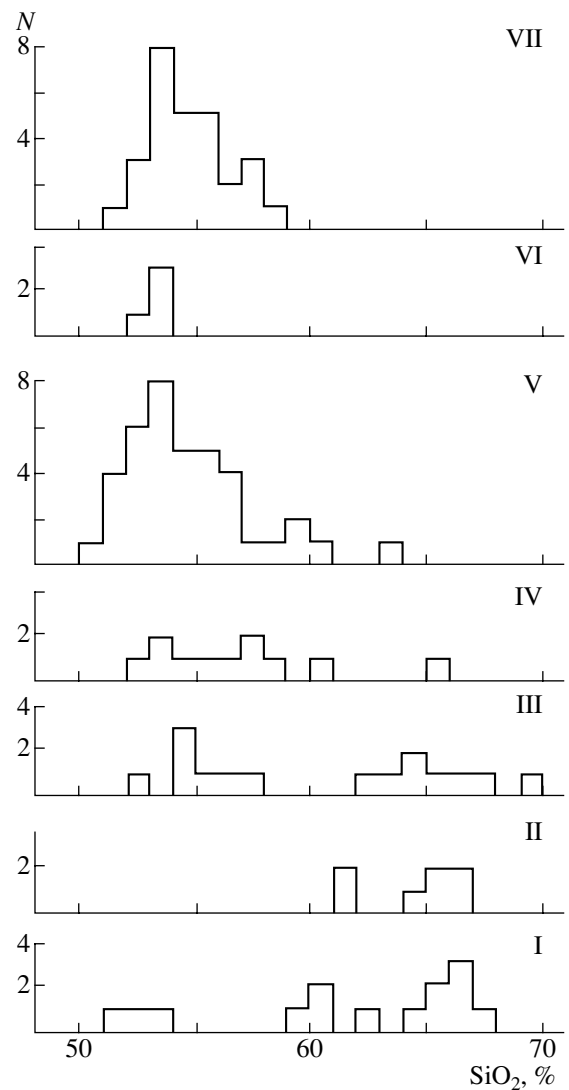


**Эволюция и вероятное строение магмопитающей системы вулканического центра.** Для сколько-нибудь точного определения геометрии системы очаг–канал необходимо выполнение прецизионных геофизических работ. Однако имеющиеся на сегодня геофизические, геолого-структурные и петрологические данные позволяют сделать на этот счет ряд ориентировочных предположений в эволюционном, историческом подходе.

На рис. 5 показано распределение составов пород в выделенных возрастных комплексах и структурных элементах Гореловского вулканического центра. 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 внедрение 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 постигнубритовых пемз следует, видимо, связывать с пополнением очага крупной порцией глубинной базальтовой магмы, частично вытолкнувшей остаточный 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 [32]. 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 микронзондовым анализом стекла выявлено неравномерное распределение щелочей с вариация-



**Рис. 5.** Распределение составов пород в возрастных комплексах Гореловского вулканического центра: I–III – докальдерный, синкальдерный и ранний посткальдерный комплексы соответственно; IV – вулкан Горелый-1; V – вулкан Горелый-2; VI – вулкан Горелый-3; VII – вулканы рифтовой системы. На вертикальной оси – число анализов.

ми составов от корунд- до акмит-нормативных. На диаграмму (рис. 6) нанесено плагиоклаз-пироксеновое отношение по валовым составам пемз и по одному из “нормальных”, качественно соответствующих реальной минералогии микронзондовых анализов (табл. 2). По приведенным данным можно оценить глубину положения верхней кромки очага в 3–5 км.

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

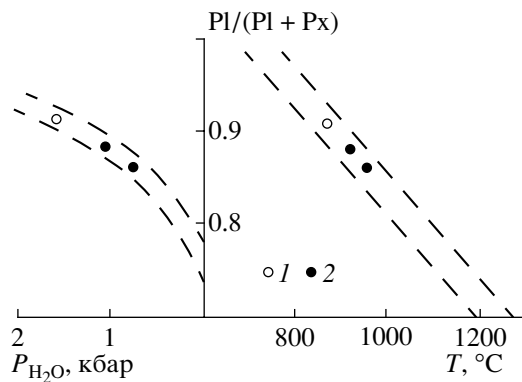


Рис. 6. Соотношение состав –  $P_{H_2O}$  –  $T^{\circ}C$  для пемз Гореловского вулканического центра [31]: 1 – валовой состав пемзы; 2 – состав ее стекла.

или, скорее, дакколита с апикалью под жерлом вулкана Горелый-1 и поперечников 8–10 км. В дальнейшем, можно полагать, очаг функционировал в режиме чередования следующих состояний: 1) относительной закрытости (в периоды по-

Таблица 2. Химический и нормативный составы пемз Гореловского центра

Компонент	1	2	3
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	1.56	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
An	13.66	12.49	9.76
Di	–	2.70	4.33
C	0.04	–	–
Hu	7.52	5.62	0.10
Mt	1.32	2.26	1.25
Ппп	1.50	1.35	1.35
Ap	0.42	0.44	0.35
Pl/ (Pl + Px)	0.88	0.86	0.92

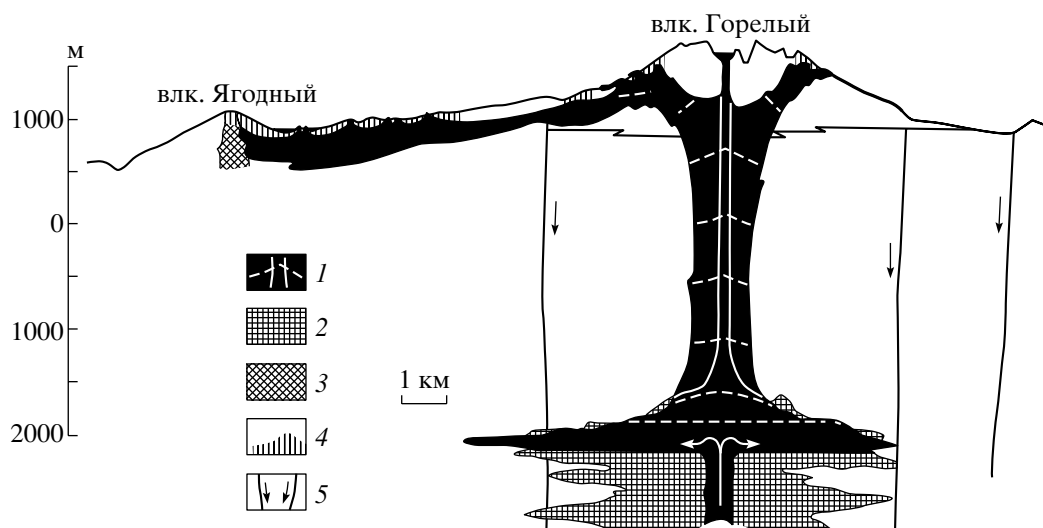
Примечание. 1, 2 – Валовые составы пемз; 3 – состав стекла. Аналитики Т.Г. Осетрова и Т.М. Философова.

коя), 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 приращение 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 внутрикратерных 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 вулканы смешанного, гибридного характера, причем фактически одного типа смещения – с образованием макроскопически однородных пород, но с неравновесными ассоциациями фенокристаллов. Миктиты полосчатого типа или с долеритоподобными базитовыми включениями 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 [32]. Данные по составам пород и минералов и анализ возможных линий смешения показывают, что одним из конечных членов смесей являются андезиты (57–60% SiO<sub>2</sub>, в том числе мегаплагиофировые) с парагенезисом вкрапленников плагиоклаз An<sub>50–60</sub> + клинопироксен + ортопироксен + титаномагнетит, проявленные в немногочисленных потоках. Второй крайний ингредиент – не извергавшаяся в чистом виде базальтовая магма с равновесным парагенезисом плагиоклаз An<sub>88</sub> + + оливин Fo<sub>83</sub> + клинопироксен ± хромистая шпинель. Большинству смешанных пород, однако, свойственна значительная вариабельность состава минералов базальтового парагенезиса, показывающая, что чаще ингредиентами смесей были магмы разных стадий дифференциации, возможно из разных горизонтов резервуара расслоенной



**Рис. 7.** 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 андезитового (вверху) и андезитобазальтового (внизу) состава; 2 — породы краевых групп и кумуляты; 3 — жерловина вулкана Ягодный; 4 — плоскости трещин; 5 — кальдерные сбросы. Пояснения см. в тексте.

по составу магмы или из промежуточного очага. В наиболее распространенных андезитобазальтовых лавах вулкана Горелый доля андезитового компонента составляет 20–60%.

Сохранность вещественных и структурных признаков гибридности (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 [30]. 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 [25]. Отсутствие в лавах вулкана Горелый включений кристаллических кумулятов свидетельствует в пользу второго, менее стремительного варианта развития процесса.

Даже минимальный перерыв во времени от начала подпитки 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 гибридности требует столь же регулярного воспроизводства андезитового компонента смесей и, следовательно, сокращения объема очага при дифференци-

ции 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 кумулятов с возможным силлоподобным распространением за пределы очага. Накопление кумулятов и внедрение силлов формируют постоянно повышающийся местный уровень нейтральной плавучести базальтоидной магмы в окружении менее плотных пород и обуславливают постепенное “всплытие” очага [33].

В плане изложенных построений представляется возможным связать независимые геофизические данные о положении верхней границы “аномального объекта” [8] 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. 7) 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. Примесным компонентом в андезитах является лишь оливин в микрообломках доле-

ритоподобных включений, мобилизованный, по-видимому, конвекцией из пограничного слоя [28]. В ходе извержения возникшая стратификация в целом сохранялась, что позволяет изобразить его динамику в виде последовательности положений перемещавшейся границы раздела андезитовой и гибридной андезитобазальтовой магм при их дифференциальном течении в дайке.

На рис. 7 показан гипотетический разрез магмопроводящей структуры вулкана в плоскости питающей 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 мегаплагифирированных андезитов была “вытолкнута” на ее склоны вскипавшей андезитобазальтовой 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.

**Выводы.** 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 большого объема дацит-андезитовой пирокластики, образованием 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 глубокой и крупноочаговой центральной к центрально-трещинной с относительно небольшим мало-глубинным 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 эпизодами 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.

5. Деятельность вулкана Горелый на последнем датированном отрезке его истории имела циклический характер, выраженный чередованием длительных периодов покоя и умеренных эксплозивных извержений с короткими мощными вспышками эффузивного вулканизма. Установлено изменение циклического режима в связи с преобразованием магмопроводящей структуры вулкана. Сделан прогноз его эффузивной активности.

Настоящая работа выполнена частично при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Авторы благодарят Дж. Локвуда, участвовавшего в полевых работах на вулкане Горелый, за предоставленные датировки образцов древесины, отобранных им под самыми молодыми лавовыми потоками, а также Н.И. Самылова, Е.М. Газзаеву и О.В. Болочагину за оказанную помощь.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Апрелков С.Е., Попруженко С.В.* Особенности глубинного строения Восточно-Корякского вулканического пояса // Тихоокеанская геология. 1984. № 3. С. 68–73.
2. *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 щите // Докл. РАН. 1997. Т. 352. № 4. С. 516–518.
3. *Вакин Е.А., Леонов В.Л., Овсянников А.А.* Мутновский геотермальный район // Активные вулканы и геотермальные системы Камчатки. Путеводитель научных экскурсий. Петропавловск-Камчатский, 1985. С. 164–197.
4. *Влодавец В.И.* Горелый хребет // Бюл. вулканол. станций. 1957. № 25. С. 68–70.
5. Геологическое строение зон активного кайнозойского вулканизма / Под ред. Шеймовича В.С., Патока М.Г. М.: Недра, 1989. 207 с.
6. *Дитмар фон К.* Поездка и пребывание в Камчатке в 1851–1855 гг. Ч. 1. СПб., 1901. 156 с.
7. *Заварицкий А.Н., Пийт Б.И., Горшков Г.С.* Изучение вулканов Камчатки // Тр. лаб. вулканол. 1954. Вып. 8. С. 18–57.

8. *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.
9. *Кирсанов И.Т.* Вулкан Горелый, его геологическое строение, последние извержения и состав продуктов // Вулканическая деятельность, ее механизм, связь с геодинамикой, прогноз извержений и землетрясений. Петропавловск-Камчатский, 1985. С. 32–33.
10. *Кирсанов И.Т.* Состояние вулканов Мутновского и Горелого за период с октября 1959 по октябрь 1960 г. // Бюл. вулканол. станций. 1964. № 35. С. 34–43.
11. *Кирсанов И.Т., Огородов Н.В., Чирков А.М.* Состояние вулканов Мутновского и Горелого за период с ноября 1960 по июнь 1961 г. // Бюл. вулканол. станций. 1964. № 36. С. 39–47.
12. *Кирсанов И.Т., Озеров А.Ю.* Состав продуктов и энергетический эффект извержения вулкана Горелый в 1980–1981 гг. // Вулканонология и сейсмология. 1983. № 1. С. 25–42.
13. *Кирсанов И.Т., Мелекесцев И.В.* Вулкан Горелый // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 294–317.
14. *Кирсанов И.Т., Федоров М.В.* Игнимбриты вулкана Горелого // Проблемы вулканизма. Материалы ко II Всесоюз. вулканол. совещ. Петропавловск-Камчатский, 1964. С. 45–47.
15. *Кожемяка Н.Н., Литасов Н.Е., Вадеевская А.А.* Асачинская группа вулканов на Камчатке // Вулканонология и сейсмология. 1984. № 3. С. 14–24.
16. *Кулаков В.С.* Вулканические наблюдения на Камчатке // Природа. 1936. № 10. С. 53–54.
17. *Макдональд Г.* Вулканы. М.: Мир, 1975. 431 с.
18. *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 тephрохронологических исследований) // Вулканонология и сейсмология. 1987. № 3. С. 3–18.
19. *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.
20. *Новограбленов П.Т.* Каталог вулканов Камчатки // Изв. Гос. геогр. о-ва. 1932. Т. 64. Вып. 1. С. 88–99.
21. *Святловский А.Е.* Южно-Быстринский хребет на Камчатке // Тр. лаб. вулканол. 1956. Вып. 12. С. 110–190.
22. *Селянгин О.Б.* Карымская группа вулканов. Вулканы Карымский и Малый Семячик // Вулканы и геотермы Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 1974. С. 107–137.
23. *Селянгин О.Б.* Новое о вулкане Мутновский: строение, развитие, прогноз // Вулканонология и сейсмология. 1993. № 1. С. 17–35.
24. *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.
25. *Eihelberger V.C.* Vesiculation of mafic magma during replenishment of silicic magma reservoirs // Nature. 1980. V. 228. P. 446–451.
26. *Dahl S.O., Nesje A.* A new approach to calculating Holocene winter precipitation combining glacier equilibrium-line altitudes and pine-tree limits: a case study from Hardangerjokulen, central southern Norway // The Holocene. 1996. V. 6. № 4. P. 381–398.
27. *Gill J.* Orogenic Andesites and Plate Tectonics. Berlin: Springer-Verlag, 1981. 390 p.
28. *Huppert H.E., Sparks R.S.J., Turner J.S.* Effect of volatiles on mixing in clac-alkaline magma system // Nature. 1982. V. 297. P. 554–557.
29. *Nakamura K.* Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation – principal and proposal // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1977. V. 2. P. 1–16.
30. *Sakuyama M.* Magma mixing and Magma Plumbing Systems in Island Arks // Bull. Volcanol. 1984. V. 47. № 4(1). P. 685–703.
31. *Sekine T., Aramaki S.* Physical condition of felsic magma constrained by experimentally-determined phase relations // Geochem. J. 1992. V. 26. P. 279–290.
32. *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.
33. *Walker G.P.L.* Gravitational (density) controls on volcanism, magma chambers and intrusions // Austral. J. Earth Sci. 1989. V. 36. P. 149–165.

## Gorelovsky Volcanic Center, Southern Kamchatka: Structure and Evolution

O. B. Selyangin\*, V. V. Ponomareva\*\*

\*Research Center for Geotechnology, Far East Division, Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia

\*\*Institute of Volcanic Geology and Geochemistry, Far East Division, Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia

The Gorelovsky volcanic center is located within a high-magnitude negative gravity anomaly. Its eruptive history includes the growth of a pre-caldera dacite-andesite cone, the formation of a large caldera during the eruption of >100 km<sup>3</sup> of ignimbrite and pumice, subcircular multivert dacite-basalt volcanism, and the growth of modern Gorelyi Volcano with a rift system on it. The results of detailed geological, petrologic, and tephrochronologic studies revealed the evolution trend of the center and its magma system which varied from a large, deep-seated, central-type magma source to a central- and fissure-type system with a small shallow magma chamber and the increasing volume of basalt in the products of the center's activity.