

УДК 551.4.013:551.24(571.645)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ о. ПАРАМУШИР (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА, РОССИЯ) И ИХ ВЗАИМОСВЯЗЬ С ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МАГМАТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ: 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ РАЗДРОБЛЕННОСТИ

© 2020 г. О. Р. Хубаева^{1,2,*}, О. В. Бергаль—Кувикас^{1,2,3}, М. Д. Сидоров⁴

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
бул. Пийпа, д. 9, 683006, Петропавловск-Камчатский, Россия

²Институт физики земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Б. Грузинская ул., д. 10, 123242, Москва, Россия

³Институт геологии рудных месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии РАН, Старомонетный пер., д. 35, 119017, Москва, Россия

⁴Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН,
Северо-Восточное шоссе, д. 30, а/я 56, 683002, Петропавловск-Камчатский, Россия

*e-mail: grifon03@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.04.2020 г.

После доработки 23.07.2020 г.

Принята к публикации 28.07.2020 г.

В статье рассматривается соотношение разрывных нарушений с вулканической деятельностью и связанных с ней гидротермально-магматических систем. При исследованиях был применен комплекс методов: дешифрирование спутниковых снимков и аэрофотоснимков, метод линейного анализа, а также метод воксельного моделирования тектонической раздробленности исследованного участка земной коры. В качестве основной геологической структуры, обеспечивающей транспортировку тепловой энергии в гидротермально-магматических системах северной части о. Парамушир (Курильские острова), рассматривается силл-дайковый комплекс, сопряженный с системой трещин северо-восточного и субширотного простирания. Формирование разрывных нарушений северо-восточной направленности перпендикулярно простиранию погружающейся плиты и отражает геодинамическую обстановку сжатия в островной дуге. На севере о. Парамушир фиксируются разрывные нарушения субширотного простирания, находящиеся на продолжении регионального разлома, расположенного перпендикулярно оси задугового Курильского бассейна.

Ключевые слова: линейный элемент, трещиноватость, тектоническая раздробленность, интрузивное тело, гидротермально-магматические системы

DOI: 10.31857/S0016853X20060077

ВВЕДЕНИЕ

Современная вулканическая активность и связанная с ней гидротермальная деятельность на о. Парамушир сопряжены с сетью даек, трассирующих разрывные нарушения, являются главными источниками тепла для гидротермальных систем.

Расположение побочных, моногенных конусов на вулканах и субвулканических интрузий контролируется проявлением региональных полей напряжения [36, 37, 42, 47]. На конвергентных границах плит, на фронте островных дуг, чаще всего преобладают обстановки сжатия, генерируемые активностью задуговых бассейнов [41].

В последнее десятилетие была разработана технология, синтезирующая результаты дешифрирования аэрофотоснимков и воксельное моделирование [24, 25, 44], позволяющая дать оценку степени раздробленности земной коры, а также проследить ее взаимосвязь с рудно-магматическими, гидротермальными и вулканическими системами.

Комплексный анализ пространственного положения вулканов Курильской островной дуги впервые был проведен Г.П. Авдейко с соавторами [1]. Характерной чертой расположения вулканов является локализация их в цепочки, косо, под разными углами, ориентированными относительно общего простирания дуги [1]. Однако, рас-

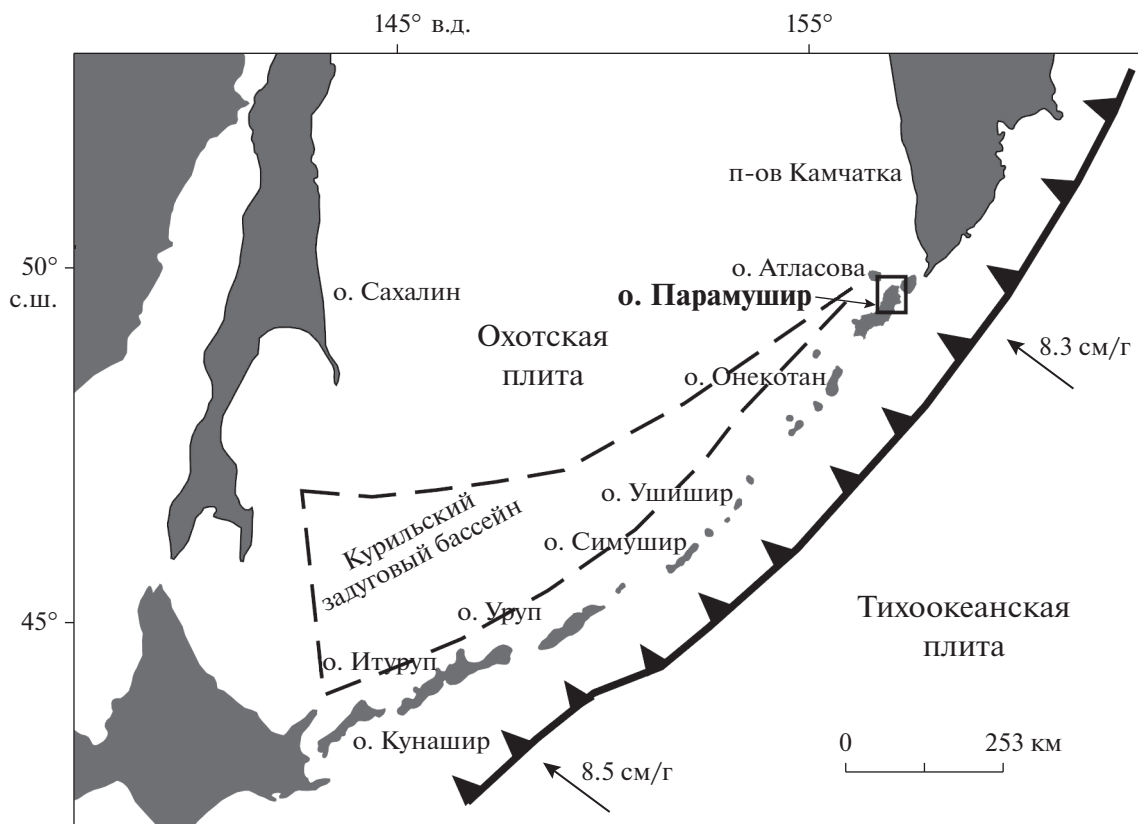


Рис. 1. Карта-схема Курильской островной дуги.

положение вулканов не случайно и их расположение контролируется во многом региональным напряжением в земной коре [1, 4, 24, 25, 36, 37, 44, 47]. Целью статьи является идентификация разрывных нарушений и изучение их связи с вулканизмом и гидротермально-магматическими системами.

ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РЕГИОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Курильская островная дуга (рис. 1) представляет собой классическую субдукционную систему. В пределах дуги выделено 36 активных наземных вулканов и 116 подводных вулканов четвертичного возраста [1, 4]. Гидротермально-магматическая активность проявляется на семи вулканах (Эбеко, Синарка, Кунтоминар, Чиринкотан, Паласс, Берг, Кудрявый, Тятя, Менделеева), расположенных на шести островах (Парамушир, Шиашкотан, Чиринкотан, Кетой, Утур, Итуруп) [45].

В пределах Курильской островной дуги наиболее широко распространены плиоцен–четвертичные вулканические породы субдукционного

(островодужного) типа, состав которых меняется от базальтов до риолитов, однако доли пород разного состава в разных сегментах дуги различны. В целом, преобладают андезибазальты и андезиты (60–70%) [2, 3]. Курильская островная дуга характеризуется высокой современной тектонической и вулканической активностью. Положение вулканов и их состав определяются глубиной до субдуктируемой плиты и расстоянием от вулканического фронта [1]. По концентрации вулканических центров вкост дуги были выделены фронтальная и тыловая вулканические зоны с промежуточной областью ослабления вулканической активности [1].

Остров Парамушир (см. рис. 1) сформирован неогеновыми, преимущественно вулканогенно-осадочными породами, смятыми в пологие складки, вытянутые по простиранию островной дуги, что не характерно для других островов Большой Курильской дуги [21]. В рельефе о. Парамушир выделяются три вулканических хребта: Вернадского, Левинсон-Лессинга и Карпинского. Северная часть острова сложена верхнемиоцен–плиоценовыми, четвертичными и современными породами. Фундамент составляют вулканогенно-

осадочные породы парамуширского комплекса свит. В плейстоцене и голоцене формировались покровные андезитовые лавовые потоки хребта Вернадского на юго-западе о. Парамушир (вулканическая группа Чикурачики, Татаринова, Ломоносова, Пик Фусса) и вулканическая группа Эбеко на севере [27]. По данным И.В. Мелекесцева [19], возраст эруптивных центров, локализованных вдоль крупных линейных зон север–северо-восточного простирания (хр. Карпинского и Вернадского), установлен в интервале от 350–300 до 60–50 тыс. лет. Для самых молодых форм хр. Вернадского (вулканические центры группы вулк. Эбеко) возраст определяется в 2400–2500 лет. На основе локализации вулканизма, микроскопического описания пород и геохимического анализа были установлены отличительные геологические и петрологические признаки вулканогенных образований трех основных зон Парамуширского сегмента Курильской островной дуги: фронтальной, промежуточной и тыловой зон. Формирование выделенных тектонических зон вулканических вкост простирания дуги зависит от дегидратации плиты во фронтальной зоне и плавления осадков в тыловой зоне [32].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для идентификации разломов на земной поверхности был применен комплекс методов, широко распространенный в геологии. Дешифрирование спутниковых и аэрофотоснимков в сочетании с методом линеаментного анализа, позволило выделить зоны повышенной проницаемости для паро-гидротерм, метод воксельного моделирования использовался для выявления зон тектонической деструкции.

С целью определения проницаемых для паро-гидротерм зон в северной части о. Парамушир на основе дешифрирования топографической карты 1 : 50000, а также аэро- и космических снимков различной детальности были построены схемы линеаментной сети. В распределении линеаментов проявляются скрытые разрывные нарушения и строение глубинных (корневых) частей гидротермально-магматических систем.

Линейные гетерогенные глубинные неоднородности представлены в структуре земной коры:

- валами и валообразными поднятиями;
- грабенами и грабенообразными понижениями;
- зонами повышенной трещиноватости;
- флексурами и флексурно-разрывными зонами;
- разрывами и разломами разных глубин заложения;

- поясами линейно ориентированных складок;
- зонами повышенной магматической проницаемости;
- цепочками интрузивных тел, потухших и действующих вулканов.

По протяженности наблюдаются линеаменты – локальные, региональные, трансрегиональные, или суперлинеаменты и глобальные (планетарные) [13]. Часто линеаменты обнаруживаются в упорядоченности эрозионной сети (эрозионного расчленения земной поверхности), что позволяет интерпретировать их как ослабленные, или проницаемые, зоны. Пространственное распределение, а также плотность и количество пересечений линеаментов на единицу площади являются ключевыми факторами для выделения высокопроницаемых зон, служащих путями миграции вещества [23].

3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ РАЗДРОБЛЕННОСТИ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ о. ПАРАМУШИР

Для построения 3D модели тектонической раздробленности северной части о. Парамушир использовались карты трещинной тектоники, построенные в результате дешифрирования аэро- и космических снимков различной детальности, а также разномасштабные топографические карты.

Цифровая обработка аналоговых карт проведена с использованием технологии географических информационных систем. Пространственная привязка и векторизация результатов дешифрирования выполнялась с использованием программ ArcMap [44] и ArcView [48]. По векторизованным данным создана единая цифровая карта линеаментов северной части о. Парамушир.

Количественно оценить раздробленность геологической среды можно по величине удельной длины линеаментов [18]. Удельная длина линеаментов для выявления зон тектонической деструкции представлена в виде 3D матрицы, из которой формируется объемное изображение раздробленности исследованного блока.

“Тектоническая раздробленность” кубического блока определяется отношением объема всех трещин внутри блока к его объему. Объем (V) трещин определяется как сумма произведений длины (l), ширины раскрытия (b) и глубины проникновения (h) отдельных трещин:

$$V = \sum lbh.$$

Для блока кубической формы с ребром a , в котором одной из граней является дневная поверх-

ность, коэффициент тектонической раздробленности будет равен

$$\Sigma lbh/a^3.$$

По фотоизображению невозможно определить величины b и h , но для конкретной локализованной территории, ширину трещин b можно считать постоянной: $b = \text{const}$. Также, учитывая эмпирически установленное правило, что трещиноватость одной грани кубика породы адекватно отражает степень трещиноватости всего образца [18], и, основываясь на принципах подобия, можно аппроксимировать это правило и для отдельных блоков земной коры. Тогда глубину проникновения трещин h можно принять равной ребру a . Таким образом, определяя степень раздробленности как значение удельной длины линеаментов равной $\Sigma l/a^2$ верхней грани блока и увеличивая последовательно размер элементарной ячейки (куба), можно проследить раздробленность на глубину.

Считая реологические свойства среды в ячейке однородными, вычисленные таким образом значения удельной длины линеаментов относятся к центру куба на глубине $a/2$. Подробно алгоритм описан в работах [22, 24, 25].

Построение модели проводилось в несколько этапов. Сначала на карту линеаментов накладывалась квадратная сетка, с размером ячейки 1 км^2 , в пределах каждой клетки подсчитывалась суммарная длина линеаментов, нормировалась на площадь клетки, полученные значения относились к центрам кубов. Ребро каждого куба составляло 1 км . Так была составлена матрица удельной длины линеаментов для глубины 0.5 км . За нулевую отметку принимался уровень моря. Потом вводилась поправка за рельеф (высоту центра верхней грани каждого элементарного куба), т.к. верхняя грань каждого куба находится на земной поверхности.

На следующем этапе расчетов размер ребра элементарного куба увеличивался на 200 м и вся процедура повторялась. Изучение трещиноватости последовательно проведено до глубины 3 км . Полученные данные по всем глубинным уровням соединены в одну 3D матрицу (X, Y, Z и УДЛ), которая использована для объемной визуализации. Удельная длина линеаментов выражена в км^{-1} . Такая размерность вытекает из расчетной формулы (см. выше).

Для объемного изображения применен стандартный модуль Oasis Montaj (Geosoft) [49], но могут быть использованы другие программы, поддерживающие форматы объемных растров.

На геотермальных системах хребта Вернадского с 2003 г. проводился комплекс работ по выявлению

соотношения магматических и гидротермальных процессов в зонах активного вулканизма с источниками теплового питания, местами их локализации и связи с разрывными нарушениями. Пространственная привязка отдельных интрузивных тел, воронок взрыва, геотермальных проявлений, а также оконтуривание гидротермально-измененных пород проведены при помощи GPS мониторинга. Полученные данные редактировались, переносились в ArcGis [48] и комбинировались с космическими снимками [50] и аэрофотоснимками, а также с топографической картой масштаба $1 : 50\,000$.

Для оценки активности вулканов Курильской островной дуги, в том числе о. Парамушир, были использованы расчеты продуктивности вулканов и их пространственные положения относительно глубоководного желоба [8]. Проведенное авторами статьи обобщение данных о разрывных нарушениях в северной части о. Парамушир, а также наблюдения за вулканической активностью и температурным режимом гидротермальных систем острова позволили оценить связь разломов с проявлениями вулканической активности и гидротермально-магматической деятельностью.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ

Для уточнения проницаемых зон верхней части земной коры для северного сектора о. Парамушир была построена схема линеаментной сети (рис. 2) и 3D модель тектонической раздробленности блока пород. По результатам замеров ориентировки линеаментов были построены диаграммы направлений зон локальной тектонической трещиноватости по секторам (см. рис. 2, см. рис. 3). Диаграммы позволили установить общие закономерности в простираниях линеаментов. Полученные данные свидетельствуют о том, что северо-восточное направление линеаментов является преобладающим во всех секторах. Однако в северном сегменте выделяется дополнительное субширотное направление разрывных нарушений (см. рис. 3, е).

Возможным объяснением преобладания северо-восточного направления линеаментов может служить действие регионального тектонического напряжения. По сейсмическим данным, фокальным механизмам землетрясений, характеру осадконакопления, морфологии вулканических построек в Курильской островной дуге преобладает обстановка сжатия [30, 31]. Следовательно, выявленное преобладание северо-восточного направления региональных нарушений можно объяснить классической моделью образования ослаб-

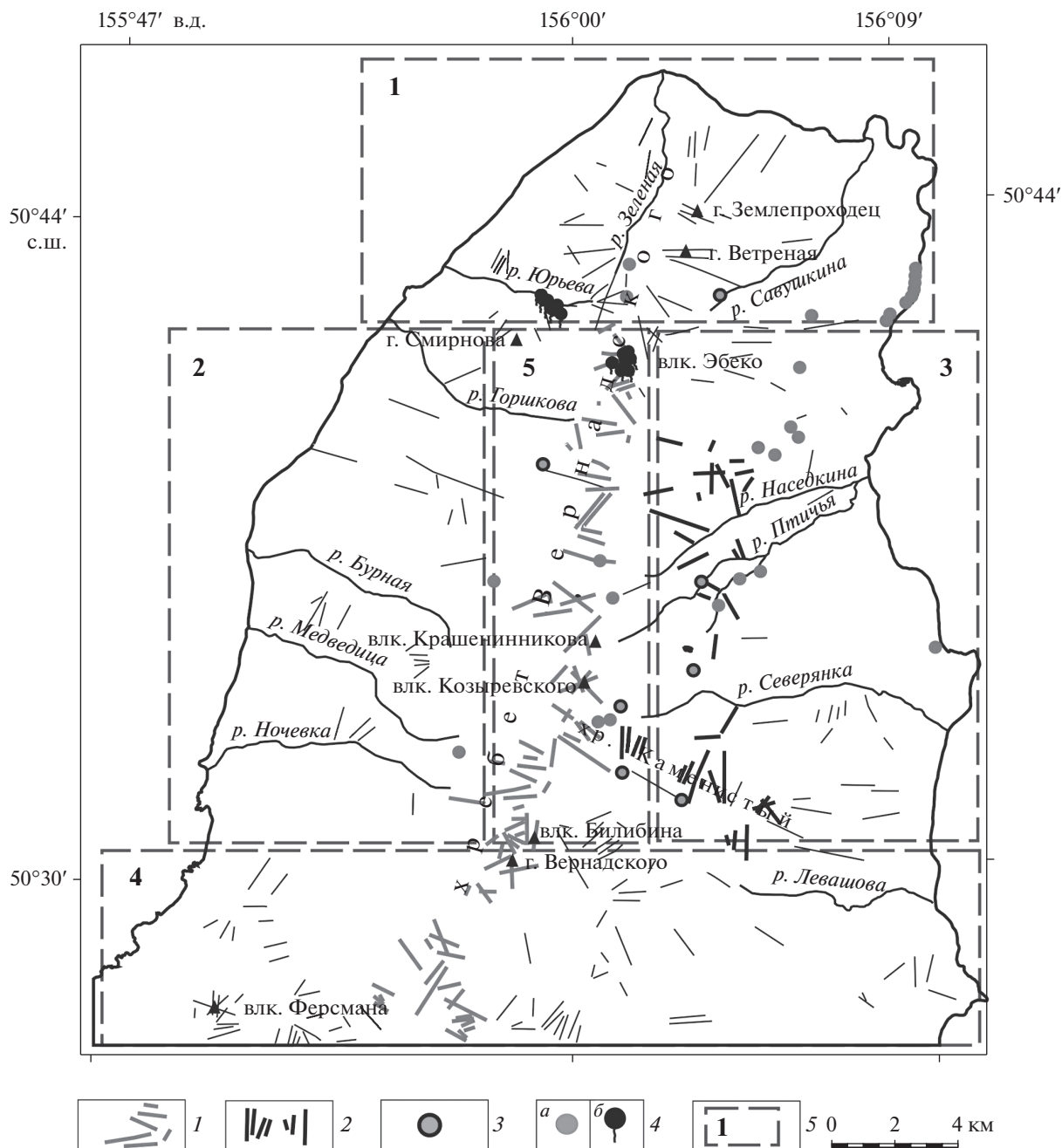


Рис. 2. Схема линейной сети северной части о. Парамушир. 1 – осевая субмеридиональная зона в рисунке линейной сети; 2 – восточная зона проницаемости; 3 – источники с лимонитовыми конусами; 4 – источники: а – холодные, б – горячие; 5 – границы секторов

ленных зон ориентированных перпендикулярно оси сжатия [40]. Полученные данные согласуются с фактическим материалом о доминировании разломов северо-восточного направления в пределах Курильской островной дуги [12].

На севере острова выделяется как субмеридиональные, так и субширотные разрывные нарушения [29]. Субширотные направления раз-

рывных нарушений отмечается многими авторами. Б.В. Баранов с соавторами [30] предполагали, что многочисленные моногенные конуса вулкана Алаид, расположенные в северо-западном– юго-восточном направлении [27], маркируют край Курильского задугового бассейна и связаны с разрывными нарушениями субширотного направления. Возможно, динамика задугового бассейна

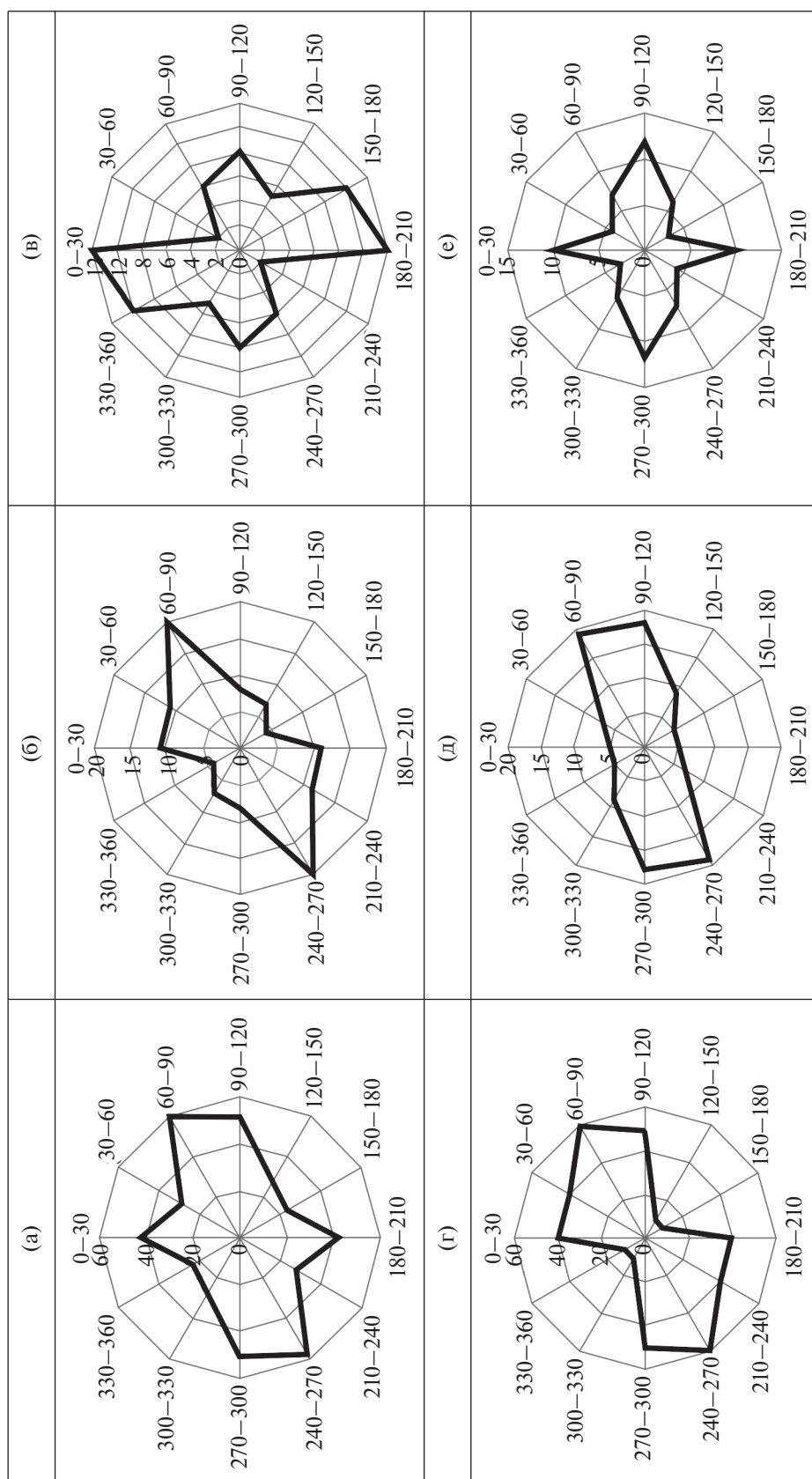


Рис. 3. Направление зон тектонической трещиноватости.

(а) – общая диаграмма направления зон тектонической трещиноватости северной части о. Парамушир;

(б)–(е) – направление зон тектонической трещиноватости в секторах: (б) – южный, (в) – восточный, (г) – западный, (д) – центральный, (е) – северный.

распространяется как на тыловые вулканы Алаид и подводный вулкан Григорьева, так и на фронт дуги на о. Парамушир.

Таким образом, расположение о. Парамушир в обстановке сжатия и динамика задугового бассейна формируют основные направления разрывных нарушений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Тектоническая трещиноватость может распространяться на большие глубины, образуя пути для восходящих потоков нагретых вод глубокой циркуляции к поверхности Земли. Также зоны повышенной тектонической трещиноватости служат индикаторами разломных зон и крупных разрывных нарушений. Например, современная вулканическая и связанная с ней гидротермальная деятельность Исландии, Гавайских, Курильских островов, а также Камчатки и Северной Америки, несмотря на разный генезис, нередко сопряжены с сетью даек [5, 11, 33, 35, 42], являющихся главными источниками тепла для гидротермальных систем.

На схеме линеаментной сети (см. рис. 2), а также на горизонтальных срезах трехмерной модели тектонической раздробленности блока пород для северной части о. Парамушир (рис. 4) видно, что наибольшая деструкция характерна для осевой части хр. Вернадского и его окончаний, к которым приурочена вся позднеплейстоцен–голоценовая вулканическая деятельность. Осевая зона ареального вулканизма отражает раздробленный участок коры, на котором происходило внедрение даек, образующих линейно-гнездовой тип вулканизма, по [10].

Продуктивность моногенных вулканов, сформированных в плиоцен–четвертичное время, расположенных на разрывных нарушениях северо-восточного направления, варьирует от 3 до 7 км³ [8], где наиболее ярко проявляется зона высокой раздробленности пород (см. рис. 4), сконцентрированы все высокотемпературные источники и активная фумарольная деятельность. По геологическим данным [4], в этом районе устанавливается разлом север–северо-восточного простирания. На вертикальных срезах трехмерной модели тектонической раздробленности (рис. 5, а–в) хорошо прослеживаются зоны деструкции, уходящие на глубину более 3 км. Такие зоны видны под вулканическими постройками и, очевидно, отражают положение питающих магматических систем вулканов на глубине.

В осевой части хр. Вернадского частично вскрыты древние магмоподводящие системы (воронки взрыва, система даек и некков базальтово-

го, андезибазальтового и андезитового составов) древних вулканов Ветровой (современная долина р. Зеленой), Влодавца (современная долина р. Юрьева) и Богдановича (центральная зона хр. Вернадского) (рис. 6). Примечательно, что субвулканические тела (некки и дайки) в северной части о. Парамушир сопряжены с зонами распространения гидротермально-измененных пород в результате протекавшей здесь ранее активной гидротермальной деятельности (см. рис. 6) и совпадают с узлами аномальной раздробленности пород (см. рис. 4).

В отличие от вулканов, приуроченных к арельной зоне северо-восточного направления, вулкан Эбеко, находящийся на пересечении разрывных нарушений север–северо-восточного, северо-восточного и северо-западного [29] направлений имеет больший объем вулканической постройки (~13 км³) и большую частоту фумарольной и эксплозивной активности в исторический период наблюдений, по сравнению с другими вулканами северной части о. Парамушир [7, 8]. Форма вулканической постройки ориентирована относительно основных направлений линеаментов. Вулкан Эбеко представляет собой конус с относительной высотой 200–220 м (абс. отметка 1037 м), сильно удлинённый в меридиональном направлении, с тремя соприкасающимися кратерами на вершине, которые вытянуты цепочкой с севера на юг [10]. Размеры кратеров примерно одинаковые:

- диаметр по гребню ~300–350 м;
- диаметр дна ~200 м;
- суммарный размер вершинного кратера – 350 × 800 м.

На восточном и западном склоне вулкана Эбеко находятся два открытых амфитеатра, представляющих, по-видимому, боковые эксплозивные кратеры, сильно расширенные эрозией. Такой же кратер меньшего размера с небольшим озерком имеется на северном склоне вулкана Эбеко [10]. На основе литолого-минералого-петрографических исследований кратерно-озерных отложений, Г.Г. Храмовой [28] было показано, что для вулкана характерны чередование периодов покоя с накоплением сернисто-опаловых отложений и фреатическая и фреато-магматическая активность. Выделено шесть этапов повышенной активности вулкана Эбеко продолжительностью по 200–300 лет, разделенных периодами относительного покоя такой же длительности. Установлено, что извержение ювенильного материала (лав и пирокластики) происходило только в I этапе (420–200 гг. до н. э.). По историческим сведениям, дополненным тефрохронологически-

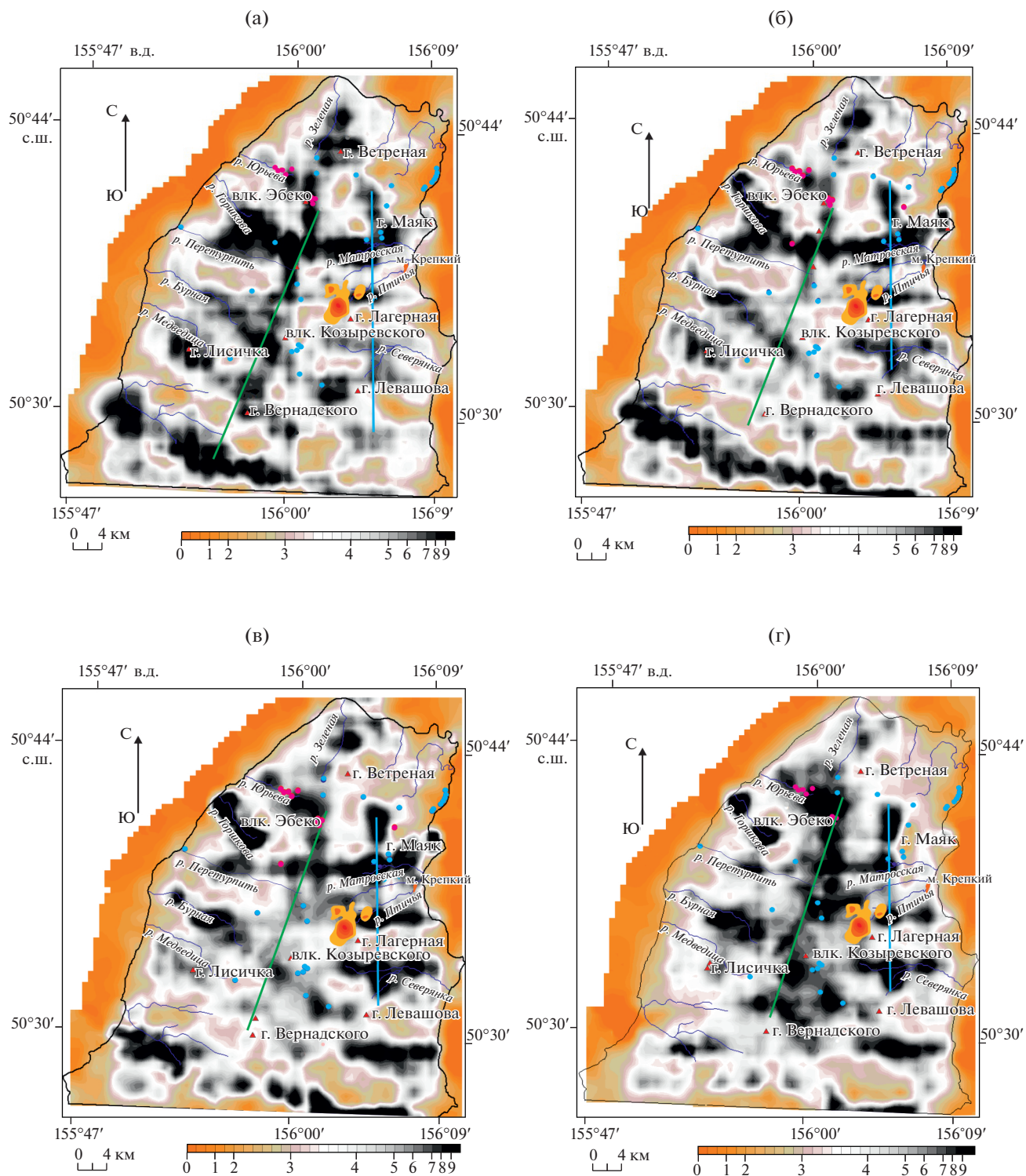


Рис. 4. Горизонтальные срезы с 3D модели тектонической раздробленности блока пород для северной части о. Парамушир на глубинах исследования.

Срез на глубине: (а) – уровень моря 0.5 км ниже уровня моря; (б) – 1 км ниже уровня моря; (в) – 1.5 км ниже уровня моря; (г) – 2 км ниже уровня моря.

Показано (цвет) распределение удельной длины линеаментов (УДЛ) (км^{-1}); осевая зона хр. Вернадского (зеленая линия); скрытое разрывное нарушение на восточном склоне хр. Вернадского (синяя линия); источники: холодные (голубые точки), термальные (красные точки); 4 – интрузивные тела на р. Птичья (оранжевый и желтый).

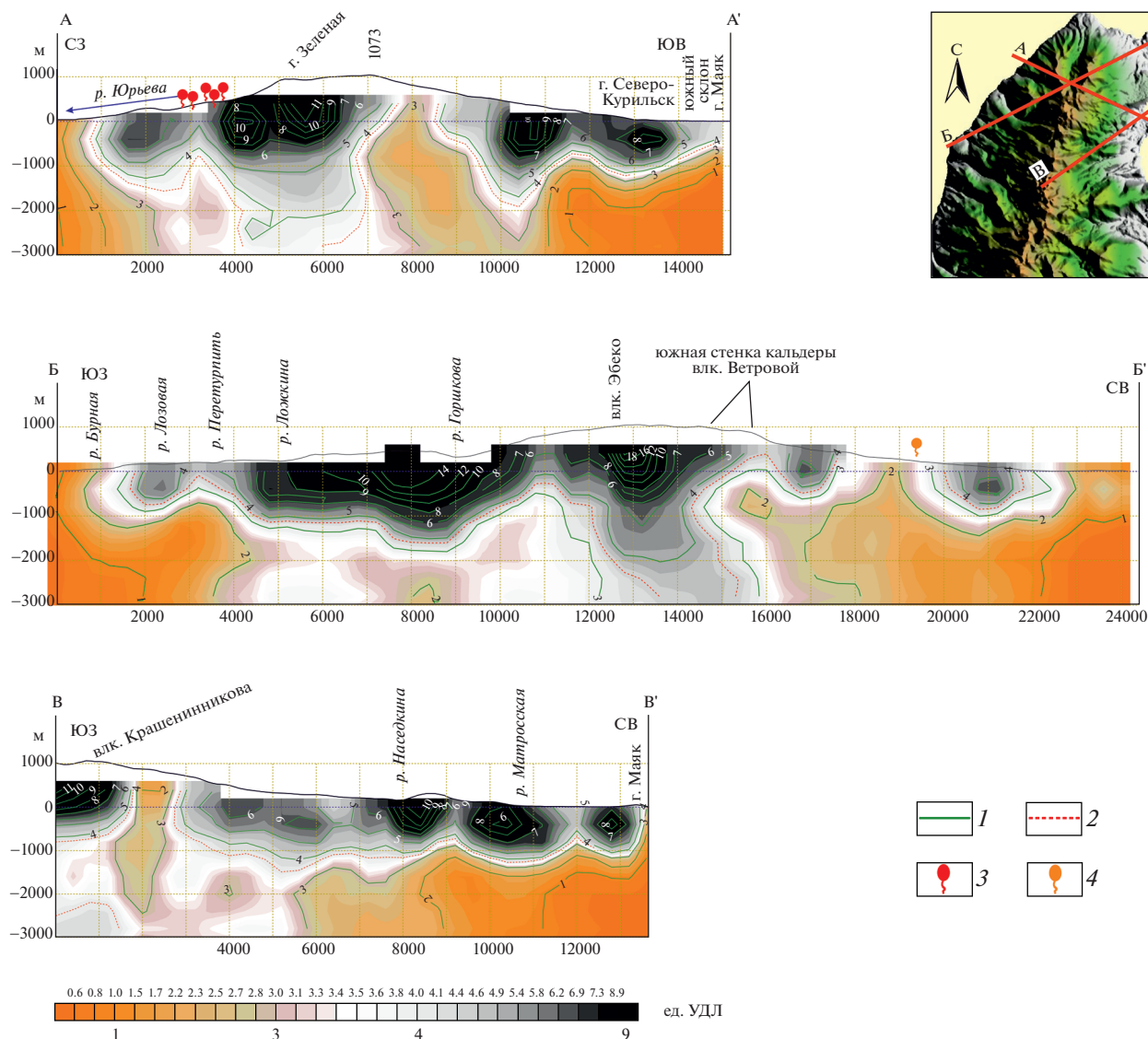


Рис. 5. Вертикальные разрезы 3D модели тектонической раздробленности северной части о. Парамушир по линиям А–А', Б–Б', В–В'.

Линии А–А', Б–Б', В–В' обозначают представленные на рисунке разрезы.

1 – изолинии удельных длин линеаментов (УДЛ), км⁻¹; 2 – изолиния удельных длин линеаментов (УДЛ) средней (фоновой) раздробленности в северной части острова; 3 – высокотемпературные термальные источники; 4 – высокоминерализованные источники с температурой 11–24°C

ми исследованиями, выявлено, что все извержения были фреатическими и условно фреатомагматическими с источником теплового питания в виде дайково-силлового комплекса объемом более 1 км [16, 17]. Находки лавовых бомб, типа “хлебной корки”, вблизи активных воронок может указывать на внедрение мафического вещества в постройку вулкана и формирование фреатомагматической активности [39]. Низкотемпературные, HCl, S (pH < 1) газогидротермы вулкана Эбеко локализованы на Северо-Восточном и

Южном фумарольных полях, кратерных озерах, источниках в верховьях руч. Лагерный [9, 34]. Отличительной чертой газогидротерм является переменчивость составов и локализаций выходов [15]. Так, в период наблюдений с 1963 по 1985 гг. изменение температур, вариаций содержания H₂O/CO₂, CO₂/H₂, S/C, F/Cl, S/Cl позволили выделить периоды активизации и подготовки к фреатомагматическому извержению 1967 г. [39] и 2010–2011 гг. [14].

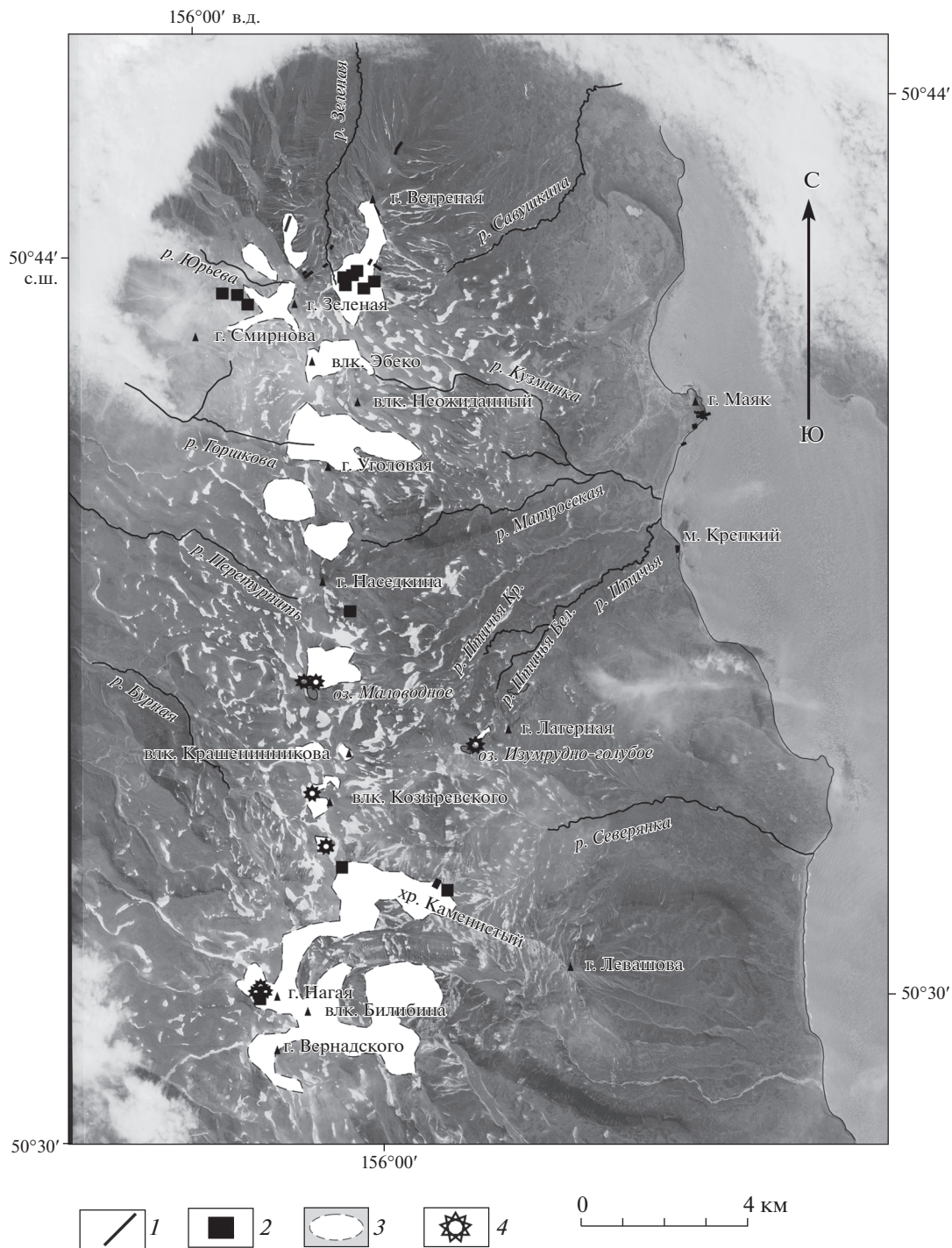


Рис. 6. Карта зон распространения гидротермально-измененных пород (по данным [19] и наблюдениям авторов). 1 – дайка; 2 – некк; 3 – границы распространения гидротермально-измененных пород; 4 – воронки взрыва

Активное действие разрывных нарушений субширотного простирания проявляется в формировании долин рек Матросская (на восточном склоне хр. Вернадского) и Пертурпуть (на западном склоне хр. Вернадского). По геологическим данным установлен разлом субширотного простирания

[4]. На модели тектонической раздробленности (см. рис. 4, см. рис. 5, а, в) эта зона наиболее ярко проявлена на глубинах 0.5–1 км, ее ширина местами составляет более 2 км. Наличие здесь крупного разрывного нарушения подтверждают данные полевых наблюдений. Так, температура в

средней части основного русла р. Перетурпить в августе 2004 г. составляла 13.3°C, в то время как среднемесячная температура воды в поверхностных водотоках в северной части о. Парамушир в этот период не превышает 5–9°C. Такие значения температур в основном русле реки могут свидетельствовать о разгрузках термальных вод в этом районе.

По последним данным [20], между устьями рек Птичь и Матросская обнаружено крупное интрузивное тело андезитового состава. Вероятно, выделенное интрузивное тело связано с выходящим на поверхность силло-дайковым комплексом г. Маяк и м. Крепкий, существование которого объясняет обширную зону высоких значений раздробленности пород на данном участке.

На западном склоне вулкана Эбеко расположена река Юрьева, долина которой ориентирована в субширотном направлении. На вертикальном разрезе модели тектонической раздробленности (см. рис. 5, а) на глубине 1000 м под источниками р. Юрьева выделяется аномальная для данного участка зона, со значениями удельной длины линеаментов 3.0, 3.1. Зона пространственно совпадает с выделенным в этом месте субвулканическим интрузивным телом [6], связанным с деятельностью разрушенного вулканического центра Влодавца. Гидротермальная активность проявляется в долине реки в интервале высот от 280 до 560 м [26]. Термоминеральные источники, в отличие от вулкана Эбеко, характеризуются высокотемпературными (~87°C), ультракислыми (рН 1–2) SO₄-Cl водами. Состав и температуры стабильны и не меняются от активности вулкана Эбеко [34]. Гидротермально-магматическая система долины реки Юрьева уникальна и ежедневно поставляет около 80 тонн хлора в Охотское море. После вулкана Йеллоустон в США и вулкана Домусе в Аргентине источники долины реки Юрьева занимают третье место в мире по выносу хлора [46].

Вдоль всего восточного склона хр. Вернадского наблюдаются узлы аномальной раздробленности пород (см. рис. 4). Эта зона хорошо проявлена также на карте линеаментной сети северной части о. Парамушир (см. рис. 2). Вероятно, здесь трассируется скрытое разрывное нарушение север–северо-восточного простирания, которое перекрыто многочисленными лавовыми потоками и потому плохо читается в рельефе.

Наше предположение подтверждает большое количество разгрузок на дневную поверхность холодных и термальных источников подземных вод (см. рис. 2), даек и некк андезитового состава на хр. Каменистом (см. рис. 6), а также располо-

женные в южном борту оз. Изумрудно-Голубое и приуроченные к зоне тектонического дробления скопления воронок взрыва (см. рис. 6), сосредоточенных вдоль узлов пересечения разломов север–северо-восточного простирания с разломами северо-западного простирания.

Кроме того, в верховьях рек Птичь и Наседкина выявлена положительная локальная аномалия поля силы тяжести. По мнению исследователей [20], аномалия связана с залегающим на глубине (2.5 км) интрузивным телом, основного или среднего состава, внедренным в зоне разлома. Это подтверждается и наличием здесь высокой деформации (см. рис. 5, б), образующейся над интрузивными телами.

Сравнивая расположение выходящих на поверхность интрузивных тел, воронок взрыва на хр. Вернадского (см. рис. 6), характер вулканической активности и местоположение разгрузок термальных вод с созданной моделью тектонической раздробленности северной части о. Парамушир, можно предположить, что тепловое питание гидротермально-магматических систем осуществлялось небольшими интрузивными телами (дайками, некками и т.д.), сосредоточенными в зонах высокой тектонической раздробленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных работ, на основе компиляции данных 3D моделирования тектонической раздробленности, расположения выходов разгрузки вод, анализа проявления вулканической деятельности севера о. Парамушир изучена связь разрывных нарушений с питанием гидротермально-магматических систем.

1. Установлено доминирующее северо-восточное направление разрывных нарушений с ареальным вулканизмом и гидротермально-магматическими системами хр. Вернадского. Вулкан Эбеко, отличный от других вулканов продуктивностью, характером и частотой извержений, расположен на пересечении северо-восточных и субширотных разломов. Вулканическая активность вулкана Эбеко в исторический период наблюдений и периодическое изменение состава термоминеральных вод, скорее всего, связаны с внедрением малообъемных интрузивных тел, типа силлов и даек.

2. Выявленная связь тектонической раздробленности и проявления гидротермально-магматической активности северной части о. Парамушир отражают общую обстановку сжатия в регионе и трещиноватость северо-восточного направления.

3. На севере Курильской островной дуги расположение моногенных, шлаковых конусов вулкана Алаид, форма вулканической постройки вулкана Эбеко, каньон реки Юрьева подчеркивают субширотное направление разрывов, сформированных в результате развития задугового Курильского бассейна.

Финансирование. Сбор полевого материала проводился в ИВиС ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский, Россия) в рамках научно-исследовательских работ по теме: “Эволюция современных гидротермально-магматических рудообразующих систем Курило-Камчатской островной дуги” (номер государственной регистрации № 01.2.00 106353).

Работа выполнена при поддержке мегагранта Минобрнауки РФ № 14.W03.31.0033.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авдейко Г.П., Антонов А.Ю., Вольнец О.Н., Цветков А.А.* Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги / Ю.М. Пушаровский (ред.). М.: Наука, 1992. 527 с.
2. *Авдейко Г.П., Попруженко С.В., Палуева А.А.* Тектоническое развитие и вулcano-тектоническое районирование Курило-Камчатской островодужной системы // Геотектоника. 2002. № 4. С. 64–80.
3. *Авдейко Г.П., Савельев Д.П., Попруженко С.В., Палуева А.А.* Принцип актуализма: критерии для палеотектонических реконструкций на примере Курило-Камчатского региона // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о земле 2003. Вып. 1. № 1. С. 32–59.
4. *Атлас Курильских островов* / В.М. Котляков, П.Я. Бакланов, Н.Н. Комедчиков, Е.А. Федорова (ред.). (РАН, ИГ РАН, ИТИГ ДВО РАН) М.–Владивосток: ДИК, 2009. 515 с.
5. *Белоусов В.И.* Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма. М.: Наука, 1978. 176 с.
6. *Бернштейн В.А., Сивожелезов С.С., Федорченко В.И., Шилов В.Н.* Геофизические наблюдения на некоторых вулканах хребта Вернадского / С.И. Набоко (ред.). Южно-Сахалинск, 1966. (Тр. СахКНИИ, 1966. Вып. 16. С. 44–65).
7. *Бергаль-Кувикас О.В.* Особенности пространственного проявления вулканизма Парамуширской группы, Курильская островная дуга // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2012. Т. 20. № 2. С. 194–207.
8. *Бергаль-Кувикас О.В.* Объемы четвертичных вулканитов Курильской островной дуги: анализ пространственного расположения и связь с зоной субдукции // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34. № 2. С. 103–116.
9. *Бортникова С.Б., Бессонова Е.П., Трофимова Л.Б., Котенко Т.А., Николаева И.В.* Гидрогеохимия газогидротермальных источников вулкана Эбеко (о-в Парамушир) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 39–51.
10. *Горшков Г.С.* Вулканизм Курильской Островной Дуги. М.: Наука, 1967. 288 с.
11. *Ефимов А.Б., Ершова Т.Я.* О термомеханическом режиме системы, окружающей магматический канал // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4–5. С. 88–102.
12. *Журавлев А.В.* Геологические структуры и развитие Южной-Охотского (Курильского) бассейна // Структура и позиция осадочного бассейна в северо-восточной части Пацифики / Туесов И.К. (ред.). Владивосток: ДВГИ, 1982. С. 23–33.
13. *Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф.* Основы линеamentной тектоники. М.: Недра, 1986. 140 с.
14. *Котенко Т.А., Котенко Л.В., Сандимирова Е.И., Шапарь В.Н., Тимофеева И.Ф.* Эруптивная активность вулкана Эбеко (о. Парамушир) в 2010–2011 гг. // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2012. Вып. 19. № 1. С. 160–167.
15. *Мархинин Е.К., Сидоров С.С.* Систематическое описание гидротермальных проявлений вулканов Эбеко и Влодавца по состоянию на 1959–1960 гг. // Опыт комплексного исследования района современного и новейшего вулканизма (на примере хр. Вернадского о. Парамушир) / С.И. Набоко (ред.) Южно-Сахалинск, 1966. (Тр. СахКНИИ, 1966. Вып. 16. С. 135–147).
16. *Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирьянов В.Ю., Курбатов А.В., Несмачный И.А.* Вулкан Эбеко (Курильские острова): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Ч. I // Вулканология и сейсмология. 1993. № 3. С. 69–81.
17. *Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирьянов В.Ю., Курбатов А.В., Несмачный И.А.* Вулкан Эбеко (Курильские острова): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Часть II // Вулканология и сейсмология. 1993. № 4. С. 24–42.
18. *Нечаев Ю.В.* Линеamentы и тектоническая раздробленность. Дистанционное изучение внутреннего строения литосферы. М.: ИФЗРАН, 2010. 215 с.
19. *Новейший и современный вулканизм на территории России* / Н.П. Лаверов (ред.). М.: Наука, 2005. 604 с.
20. *Подошвин В.Е.* Изучение парогидротерм на высокоутесном и приустьевом участках Северо-Парамуширской гидротермальной системы / Южно-Сахалинск: МП-Электра, 2012. 192 с.
21. *Сергеев К.Ф.* Тектоника Курильской островной системы. М.: Наука. 1976. 240 с.
22. *Сидоров М.Д., Таскин В.В.* Воксельная модель раздробленности коры в районах геотермальных месторождений (Камчатка) // Горный информ.-аналитич. Бюлл. 2017. № S32. С. 336–341.

23. *Таскин В.В.* Краткий обзор зарубежного опыта применения линейного анализа в геологии // Горный информ.-аналитич. Бюлл. 2017. Спец. вып. 32. № 12. С. 138–144.
24. *Таскин В.В., Сидоров М.Д.* Алгоритм создания трехмерной модели тектонической раздробленности в среде ГИС по результатам дешифрирования аэро- и космоснимков, оценка ее достоверности // Геоинформатика. 2015. № 1. С. 21–27.
25. *Таскин В.В., Сидоров М.Д.* Трехмерная модель тектонической раздробленности земной коры, созданная с использованием космической видеоинформации // Соврем. проблемы дистанц. зондир. Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 243–252.
26. *Фазлуллин С.М.* Геохимическая система р. Юрьева (Курильские о-ва): условия поступления и выноса химических элементов в бассейн реки // Вулканология и сейсмология. 1999. № 1. С. 54–67.
27. *Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И.* Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис. М.: Наука, 1989. 238 с.
28. *Храмова Г.Г.* Кратерно-озерные отложения: динамика формирования (на примере вулкана Эбеко). Владивосток: ДВО АН СССР, 1987. 136 с.
29. *Хубаева О.Р., Брянцева Г.В., Сим Л.А.* Новейшие деформации северной части острова Парамушир // Мат-лы XI тект. совещ. “Фундаментальные проблемы геотектоники” 30 янв.–3 февр. 2007, г. Москва. М.: ГЕОС, 2007. Т. 1. С. 109–111.
30. *Baranov B.V., Werner R., Hoernle K.A., Tsoy I.B., van den Bogaar P., Tararin I.A.* Evidence for compressionally induced high subsidence rates in the Kurile Basin (Okhotsk Sea) // *Tectonophysics*. 2002. Vol. 350. № 1. P. 63–97.
31. *Baranov B., Wong H.K., Dozorova K., Karp B., Lüdmann T., Karnaukh V.* Opening geometry of the Kurile Basin (Okhotsk Sea) as inferred from structural data // *Island Arc*. 2002. Vol. 11. № 3. P. 206–219.
32. *Bergal-Kuvikas O.* Geochemical studies of volcanic rocks from the northern part of Kuril-Kamchatka arc: Tectonic and structural constraints on the origin and evolution of arc magma / Ph.D. Diss. (Hokkaido Univ. 2015. pp. 190).
33. *Gudmundsson A.* Infrastructure and mechanics of volcanic systems in Iceland // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1995. Vol. 64. P. 1–22.
34. *Kalacheva E., Taran Y., Kotenko T., Hattori K., Kotenko L., Solis-Pichardo G.* Volcano–hydrothermal system of Ebeko volcano, Paramushir, Kuril Islands: Geochemistry and solute fluxes of magmatic chlorine and sulfur // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2016. Vol. 310. P. 118–131.
35. *Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Usacheva O.O.* Thermal-permeability structure and recharge conditions of the Mutnovsky high-temperature geothermal field (Kamchatka, Russia) // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2018. Vol. 2. P. 36–55.
36. *Lagmay A.M.F., Valdivia W.* Regional stress influence on the opening direction of crater amphitheatres in Southeast Asian volcanoes // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2006. Vol. 158. P. 139–150.
37. *Le Corvec N., Spörli K.B., Rowland J., & Lindsay J.* Spatial distribution and alignments of volcanic centers: clues to the formation of monogenetic volcanic fields. *Earth Sci. Rev.* 2013. Vol. 124. P. 96–114.
38. *Moriya I.* Bandaian eruption and landform associated with it // Collection of articles in memory of retirement of Prof. K. Nishimura from Tohoku University, Faculty of Science, Tohoku University, Sendai, 1980. P. 214–219.
39. *Menyailov I.A., Nikitina L.P., Shapar V.N.* Results of geochemical monitoring of the activity of Ebeko volcano (Kurile Islands) used for eruption prediction // *J. Geodynam.* 1985. Vol. 3. № 3–4. P. 259–274.
40. *Nakamura K.* Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation principle and proposal // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1977. Vol. 2. P. 1–16.
41. *Nakamura K., Uyeda S.* Stress gradient in arc-back arc regions and plate subduction // *J. Geophys. Res.* 1980. Vol. 85. P. 6419–6428.
42. *Nielson D.L., Shervais J. W., Glen J.* Conceptual Model for a Basalts-Related Geothermal System Mountain Home AFB, Idaho, USA // 44th Workshop on Geotherm. Reservoir Engineer. Stanford Univ., Stanford, California, February 11–13, 2019. P. 1–4.
43. *Siebert L.* Large volcanic debris avalanches: characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1984. Vol. 22. Issue 3. P. 163–197.
44. *Sidorov M.D., Taskin V.V.* The Study of the Permeability of the Upper Crust Part on the Photo Image of the Surface in the Area of the Nalychevo Field of Thermomineral Waters (Kamchatka) // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 2018. P. 1–10.
45. *Taran Y., Zelenski M., Chaplygin I., Malik N., Campion R., Inguaggiato S., Fischer T.* Gas emissions from volcanoes of the Kuril island arc (NW Pacific): geochemistry and fluxes // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2018. Vol. 19. № 6. P. 1859–1880.
46. *Taran Y., Kalacheva E.* Role of hydrothermal flux in the volatile budget of a subduction zone: Kuril arc, Northwest Pacific // *Geology*. 2019. Vol. 47. № 1. P. 87–90.
47. *Tibaldi A.* Morphology of pyroclastic cones and tectonics // *J. Geophys. Res. Ser. Solid Earth*. 1995. Vol. 100(B12). P. 24521–24535.
48. ArcGIS Desktop. URL: <https://www.esri.com/> (Accessed 25.04.2014).
49. Geosoft Software, Oasis montaj. URL: <http://www.geosoft.com/ru> (Accessed 12.11.2009)
50. Space image. URL: <https://www.usgs.gov/> (Accessed 01.04.2019)

**Identification of Ruptures and Their Interaction
with Hydrothermal-Magmatic Systems at the Northern Part of Paramushir Isl.
(Kuril Islands, Russia): 3D Modeling of Crustal Fragmentation**

O. R. Khubaeva^{1, 2, *}, O. V. Bergal-Kuvikas^{1, 2, 3}, M. D. Sidorov⁴

¹*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
Piip Boulevard 9, 683006, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

²*Schmidt Institute of the Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
Bolshaya Gruzinskaya 10, 123242, Moscow, Russia*

³*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry,
Staromonetny per. 35, 119017, Moscow, Russia*

⁴*Scientific research geotechnological centre, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
North-East Highway 30, 683002, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

**e-mail: grifon03@yandex.ru*

Correlation of ruptures with volcanic activities, and related hydrothermal-magmatic systems is studied. In our research we used a set of methods that included analysis of satellite data, identification lineaments and voxel modelling of crustal fragmentations. The main geological structure that ensures transportation of thermal energy in the hydrothermal-magmatic systems in the northern part of Paramushir Isl., and the a sill-dyke complex associated with the system of north-eastern and sub-latitudinal fractures is considered. The formation of the northeast oriented ruptures is perpendicular to stretch of the submerged plate and reflects the stress regime in the island-arc setting. In the north of Paramushir Isl. ruptures with sub-latitudinal directions are recorded. The ruptures are located on the extension of the regional fault which is perpendicular to the main axis of the back-arc Kuril basin.

Keywords: lineament, fracture, crustal fragmentation, intrusion, hydrothermal-magmatic systems