

УДК 551.248.2:550.36

ПРОБЛЕМА ФОРМИРОВАНИЯ И ПИТАНИЯ ВЕРХНЕ-ЮРЬЕВСКИХ ТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ (о. ПАРАМУШИР, КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)

© 2022 г. О. Р. Хубаева^а, *, О. В. Бергаль-Кувикас^а, М. Д. Сидоров^б

^аИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

^бНаучно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН,

Северо-Восточное шоссе, 30, а/я 56, Петропавловск-Камчатский, 683002 Россия

*e-mail: grifon03@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.04.2021 г.

После доработки 23.11.2021 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

Верхне-Юрьевские источники являются одними из наиболее продуктивных в мире по выносу хлоридов. В работе рассматривается влияние разломных зон на внедрение магматического материала, обеспечивающего одновременно вулканическую активность и гидротермальную деятельность в исследуемом районе. На основе комплексного анализа геологического строения, изотопно-геохимических и геофизических данных и воксельного (3D) моделирования предложена модель гидротермально-магматической системы Эбеко–Юрьева. В недрах гидротермально-магматической системы, расположенной в районе вулкана Эбеко, существуют различные по времени внедрения субвулканические интрузивные тела, служащие источниками ее теплового питания. Магма поднимается к поверхности по ослабленной зоне разлома СЗ простирания, выходит на поверхность в районе его пересечения с разломом ССВ направления, поддерживая активность вулкана Эбеко. В узлах пересечения разлома СЗ простирания с зонами субпараллельных разломов ССВ простирания магматический материал, не достигший поверхности, образует субвулканические интрузивные тела (силлы, дайки), обеспечивающие тепловое питание гидротермальной системе.

Ключевые слова: тектоническая раздробленность, гидротермально-магматическая система, зоны субпараллельных разломов, субвулканические интрузивные тела, система магматического питания

DOI: 10.31857/S0203030622030038

ВВЕДЕНИЕ

Гидротермально-магматическая система Эбеко–Юрьева, расположенная в северной части хребта Вернадского, уникальна. Ежедневно в Охотское море выносятся 82 ± 20 т Cl и 222 ± 50 т S [Kalacheva et al., 2016]. Источники долины реки Юрьева, после вулканов Йеллоустоун в США и Домуе в Аргентине, занимают третье место в мире по выносу хлора [Taran, Kalacheva, 2019]. Верхне-Юрьевские термальные источники имеют хлоридно-сульфатные, кремнистые, борные воды с высоким содержанием железа и алюминия [Жарков, 2020; Фазлуллин, 1999]. Тем не менее, недостаточная изученность глубинного строения и отсутствие однозначных данных о взаимоотношении вулканической и гидротермальной деятельности на острове Парамушир пока не позволяют точно очертить геологические границы гидротермальной системы в северной части острова, а также области их теплового и водного питания. Так, существуют две взаимоисключающие точки зрения

о формировании Верхне-Юрьевских источников: 1) источники формируются в подземном “озере”, расположенном под кратером вулкана Эбеко [Kalacheva, 2011; Калачева, Котенко, 2013; Kalacheva et al., 2016; Taran, Kalacheva, 2019]; 2) получают тепловое питание от остывающих субвулканических интрузивных тел, расположенных в районе разрушенной постройки древнего вулканического центра Влодавца. Проникающие к поверхности вулканические эманации смешиваются с мощным потоком грунтовых вод, в результате чего происходит формирование высокотемпературных Верхне-Юрьевских источников [Воронова, Сидоров, 1966; Мархинин, Стратула, 1977; Родионова и др., 1966; Бернштейн и др., 1966]. Также высказывались предположения о том, что гидротермальная система, приуроченная к вулканическому центру Эбеко, получает тепловое питание за счет силло-дайкового комплекса, расположенного на небольших глубинах (1.5–2.5 км) в районе вулканов Эбеко и Влодавца [Белоусов и др., 2002; Новейший ..., 2005; Хубаева, 2020]. Однако эта

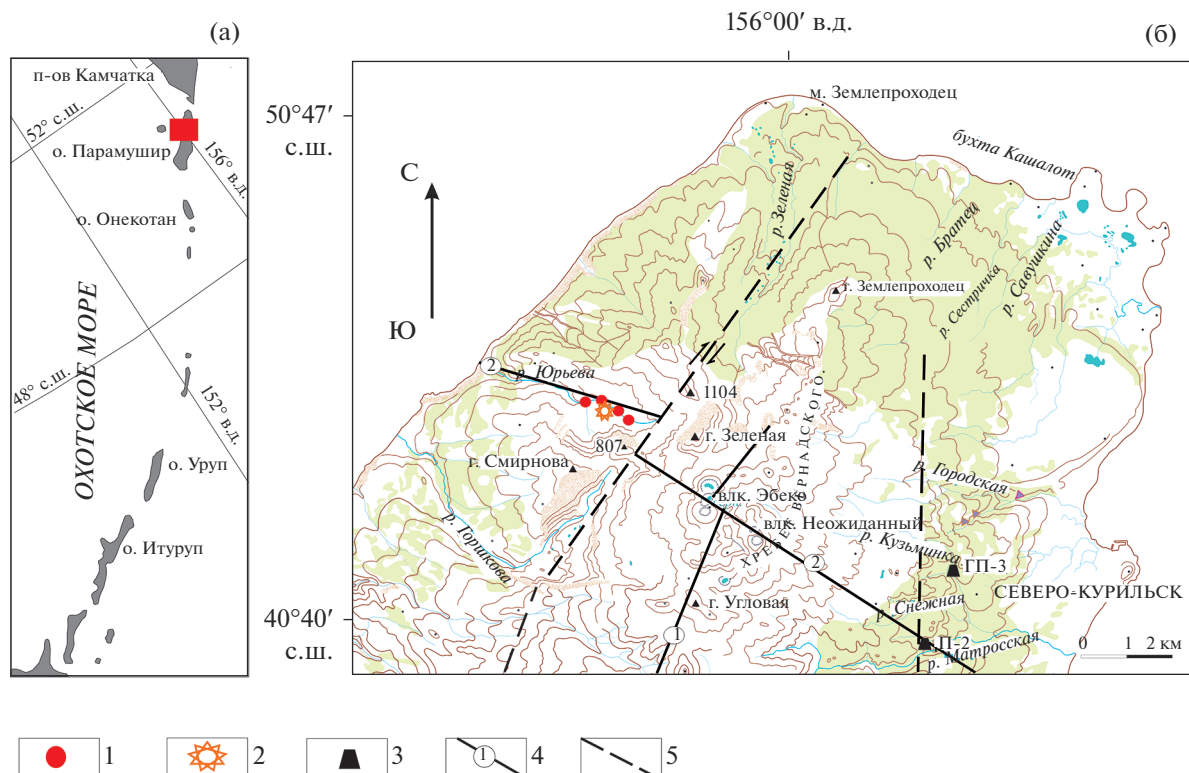


Рис. 1. Северная часть о. Парамушир.

а — географическое положение объекта исследования, б — северная часть о. Парамушир.

1 — Верхне-Юрьевские термальные источники; 2 — жерловая часть вулкана Влодавца; 3 — скважина; 4 — разлом; 5 — предполагаемые зоны субпараллельных разломов осевой части хр. Вернадского.

проблема требует более детального изучения, поскольку вопрос обеспечения г. Северо-Курильска теплом и электроэнергией за счет использования геотермальной энергетики остается актуальным, в связи с этим важно знать, где находятся реальные источники теплового и водного питания гидротермальных систем северной части о. Парамушир.

ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Остров Парамушир расположен на севере Курильской островной дуги (рис. 1), сформирован неогеновыми, преимущественно, вулканогенно-осадочными породами, смятыми в пологие складки, вытянутые по простиранию островной дуги [Сергеев, 1976]. 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 (N_1), а также плохо сортированные конгломераты, брекчии, грубозернистые песчаники океанской

свиты (N_2) [Басилян, 1989; Федорченко и др., 1989; Атлас ..., 2009].

Верхне-Юрьевские источники расположены на западном склоне активного вулкана Эбеко и пространственно приурочены к прижерловой части древнего вулкана Влодавца. В результате деятельности ледников вулкан Влодавца был сильно разрушен и сегодня представляет собой открытую на запад обширную котловину, где берет начало р. Юрьева (см. рис. 1). В верхнем и среднем течении реки обнаруживаются плиоценовые некки и дайки [Федорченко и др., 1989]. Самый крупный некк вулкана Влодавца (точный возраст не установлен) располагается в долине р. Юрьева, в районе слияния ее вершинных притоков, и трактуется исследователями как его жерловая часть [Бернштейн и др., 1966] (см. рис. 1).

Выделяются также несколько доледниковых многоактивных побочных конусов вулкана Влодавца. Первый из них — г. Смирнова, вершина которой представляет собой экструзию, сложенную двупироксеновыми андезитами [Федорченко, Шилов, 1966]. Второй конус, высота 1104 м, расположен между устьями р. Зеленой и р. Юрьева. Третий побочный кратер вулкана Влодавца выде-

ляется в левом склоне р. Юрьева, между г. Смирнова и высотой 807 м (см. рис. 1).

Важно отметить, что вулканы Влодавца и Эбеко пространственно приурочены к крупному разрывному нарушению СЗ простирания, которое смещается разрывным нарушением СВ простирания [Хубаева и др., 2007].

ОБЪЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ РАЗДРОБЛЕННОСТИ БЛОКА ЗЕМНОЙ КОРЫ

Объемное моделирование тектонической раздробленности (трещиноватости) блока земной коры с использованием результатов дешифрирования космических снимков дает возможность приближенно оценить степень его проницаемости для паро-гидротерм.

Особенности подхода при применении метода и принятые допущения.

Подобными считаются объекты, обладающие подобием физических переменных и геометрии. Проявление деформаций макроскопического уровня любого объема земной коры рассматривается как сумма составляющих его деформаций многочисленных объемов [Гзовский, 1975].

Выделяемые при дешифрировании аэро- и космических снимков линеаменты отождествляются с разломами и понимаются как отражение тектонической ситуации всей кристаллической части земной коры [Нечаев, 2010]. Раздробленность геосреды формируется совокупностью трещин, образующихся в зоне динамического влияния разлома. Зоной динамического влияния [Шерман и др., 1983] является часть окружающего разлом пространства. Линеаменты, выделяемые на снимках, отражают пространственное положение осевых линий этих зон. Отдельные трещины, из которых состоят зоны динамического влияния разлома и ширина самих зон, на аэро- и космических снимках не определяется как тип разлома и глубина его проникновения.

Не выделяющиеся на снимках разломы в модели не представлены. Это могут быть, например, древние разломы в фундаменте картируемых на поверхности геологических структур или субгоризонтальные разломы на глубине. Также не учитывается трещиноватость нетектонического происхождения (контракционная, литогенетическая, выветривания и т.п.), так как они, как правило, на снимках использованных масштабов не видны.

Эмпирическое правило, установленное Ю.В. Нечаевым на образцах различных горных пород, — трещиноватость, видимая на одной грани кубика породы, отражает степень трещиноватости всего образца [Нечаев, 2010], а основываясь на принципах подобия, можно с некоторой долей

вероятности применить это правило при модельном рассмотрении кубических блоков земной коры.

Дать количественную оценку проницаемости некоторого объема геологической среды можно с помощью коэффициента тектонической раздробленности. Коэффициент раздробленности (K_p) будет равен отношению общего объема всех трещин в рассматриваемой среде к ее объему. Так, для блока в виде куба с горизонтальной верхней гранью и ребром равным a , объем трещин (V_T), содержащихся в блоке, определяется как сумма произведений длины, ширины раскрытия и глубины проникновения отдельных трещин:

$$V_T = \Sigma lbh, \quad (1)$$

где l , b и h — длина, ширина и глубина проникновения, соответственно. Тогда коэффициент тектонической раздробленности будет равен отношению V_T/a^3 или:

$$K_p = \Sigma lbh/a^3. \quad (2)$$

Если совместить верхнюю грань куба с дневной поверхностью и спроецировать на нее линеаменты, отождествляемые с разломами, дешифрированные на аэро- и космических снимках, тогда эти данные можно использовать для определения коэффициента тектонической раздробленности конкретного исследуемого участка коры. Однако на фотоснимках местности можно определить только длину разлома (l). Ширина разлома (b), за которую принимается ширина зоны динамического влияния, по снимкам не определяется, но может быть принята равной некоторой постоянной средней величине для конкретной территории, например, равной 1 в единицах используемой карты линеаментов. Также полагая, что линеаменты, выделенные на снимках, отражают вертикальные разломы, и их глубина превышает величину a , тогда при $b = 1$ и $h = a$ формула (2) примет вид:

$$\Sigma l/a^2,$$

где в числителе сумма длин линеаментов на верхней грани куба, в знаменателе ее площадь, а вычисляемый по этой формуле параметр равен удельной длине линеаментов (УДЛ). То есть УДЛ показывает степень тектонической раздробленности блока коры кубической формы, одна из граней которого находится на земной поверхности. Учитывая отмеченное выше правило, и считая реологические свойства среды в кубическом блоке относительно однородными, вычисленные для верхней грани УДЛ можно отнести к центру куба. Это позволяет задавать глубину исследования путем изменения длины сторон используемых кубических ячеек [Нечаев, 2010].

Вычисления УДЛ проводились в следующем порядке. Сначала была составлена цифровая карта линеаментов в прямоугольных координатах.

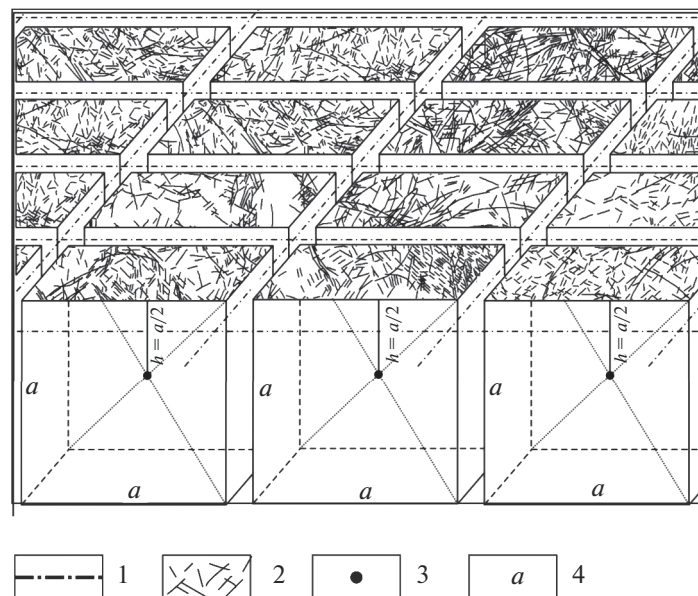


Рис. 2. Схематическое изображение линий сетки и кубов с ребром. Центры кубов — точки пространства, к которым относятся значения УДЛ, по [Таскин, Сидоров, 2014].

1 — линии сетки; 2 — линеаменты; 3 — центры кубов; 4 — ребро куба.

Была использована система координат СК-42. Далее на карту накладывался прямоугольный шаблон-сетка с узлами, расположенными через 1 км. Образованные квадратные клетки являются верхними гранями кубов. В этом случае площадь элементарной ячейки равна 1 км^2 , а центры кубов располагаются ниже верхней грани на расстоянии 0.5 км. Затем, в пределах каждой клетки, подсчитывалась суммарная длина линеаментов и делилась на ее площадь. Полученные УДЛ отнесены к центрам кубов (рис. 2). В результате была составлена матрица УДЛ для глубины 0.5 км, которая представляет собой файл точек с координатами X, Y, Z и значения УДЛ в них. Сначала для определения глубины за нулевую отметку принят уровень моря. Так как исследуемая площадь расположена в горной местности, то очевидно, что верхние грани смежных элементарных кубов расположены на разной высоте. Поэтому была введена поправка на рельеф, которая равна абсолютной отметке в центре верхней грани каждого куба, т.е. Z координаты центров кубов были “приподняты” на соответствующую величину.

После создания матрицы (файла) УДЛ для кубов $1 \times 1 \times 1 \text{ км}$ размер ребра элементарного куба увеличивался и расчеты повторялись. Таким способом была многократно обработана карта линеаментов. Шаг увеличения расстояния между узлами накладываемой квадратной сетки составил 0.2 км, что позволило увеличивать глубину с шагом 0.1 км. Увеличение размеров накладываемой квадратной сетки проводилось от юго-западного угла карты линеаментов. Всего было проведено 26 цик-

лов вычислений УДЛ. Вся цифровая обработка данных проведена в ArcGis 10 (ArcGis Desktop, ESRI. URL: <https://www.esri.com/> (Accessed 25.04.2014)).

В итоге были получены матрицы (файлы), характеризующие раздробленность в интервале от дневной поверхности до глубины 3 км. Далее все файлы были слиты в единый файл базы данных (БД) УДЛ. Эта база данных была использована для создания объемной (воксельной) модели раздробленности коры исследованной площади. Объемная модель получена интерполяцией значений УДЛ всех точек, содержащихся в БД. Интерполяция проведена методом 3D Кригинг стандартным модулем Oasis Montaj (Geosoft Software: Oasis montaj, GM-SYS, Euler 3D. URL: <http://www.geosoft.com/ru> (Accessed 2008/01/28)). Было построено объемное изображение раздробленности с размером вокселя (элементарного изображения куба объема) $2 \times 2 \times 2 \text{ км}$. Из этой 3D модели были получены вертикальные и горизонтальные сечения в виде карт и разрезов (рис. 3, 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для уточнения проницаемых зон верхней части земной коры северного сектора о. Парамушир была построена 3D модель тектонической раздробленности [Хубаева и др., 2020]. На вертикальных разрезах с модели (см. рис. 3), под вулканическими постройками хр. Вернадского, на глубинах от 1000 м проявляются слабо раздробленные блоки, над которыми расположены области аномально высокой плотности трещин горных пород. Блоки

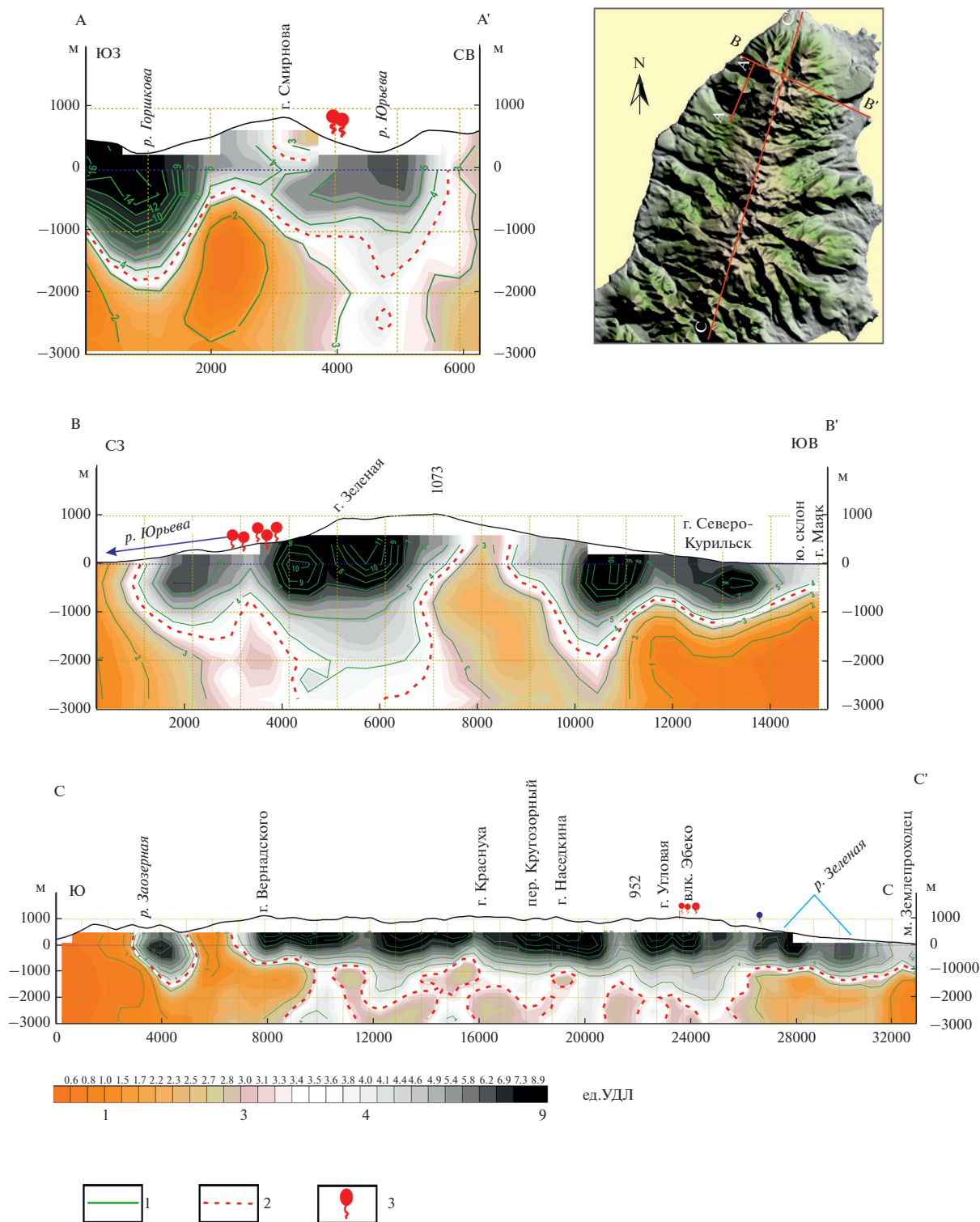


Рис. 3. Вертикальные разрезы 3D модели тектонической раздробленности северной части о. Парамушир по линиям А–А', В–В', С–С'.

1 – изолинии удельных длин линеаментов (УДЛ); 2 – изолиния УДЛ средней (фоновой) раздробленности в северной части острова; 3 – термальные источники.

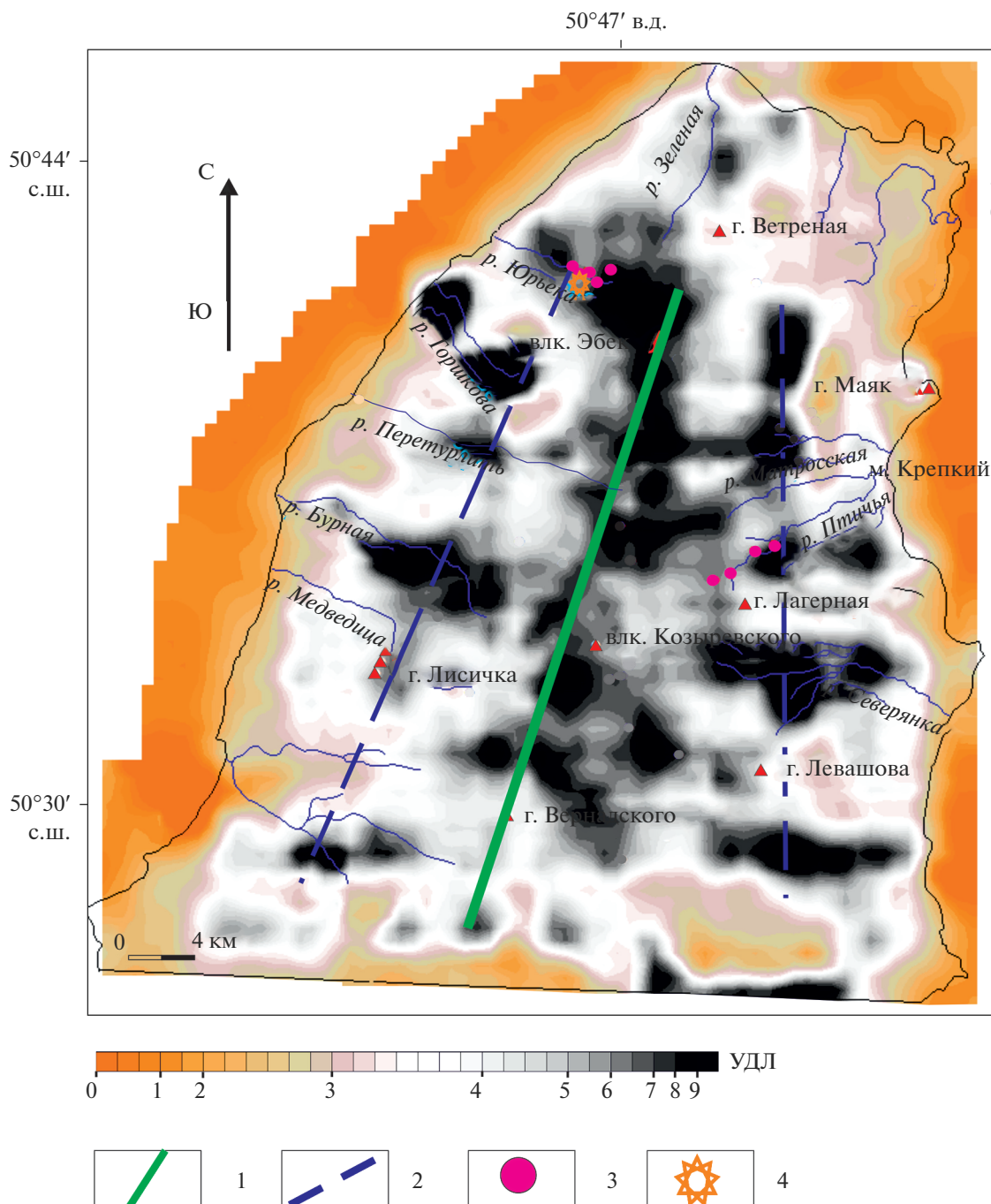


Рис. 4. Горизонтальный срез с 3D модели тектонической раздробленности блока пород для северной части о. Парамушир на глубине исследования 1.5 км ниже уровня моря.

1 — установленный разлом ССВ простирания; 2 — предполагаемые зоны субпараллельных разломов ССВ простирания; 3 — термальные источники; 4 — жерловая часть вулкана Влодавца. Цветом показано распределение УДЛ (км⁻¹).

с низкой степенью деструкции, проявляющиеся на глубине, могут интерпретироваться как интрузивные тела [Таскин, 2016; Сидоров и др., 2016]. На вертикальных разрезах модели отчетливо видно, что области с низкой степенью деструкции горных пород сливаются между собой, образуя некое подобие вулканических подводящих каналов (см. рис. 3). В 1980-х гг. Сахалинская геофи-

зическая партия проводила работы в районе вулкана Эбеко¹. На основе гравиметрических, магнитометрических съемок, а также электроразведочных работ на СЗ склоне вулкана Эбеко было выделено

¹ Богданов А.И. Отчет о результатах геофизических работ по поискам термальных вод на Эбекской площади (о. Парамушир) в 1980 г. Южно-Сахалинск: СГФЭ, 1981. С. 10–38.

крупное магматическое тело на глубине около 2–2.5 км, имеющее диаметр 1.7 км, которое находится недалеко (до нескольких сотен метров) от жерловой части вулкана Влодавца [Бернштейн и др., 1966] (см. рис. 1, 3, В–В'). Похожая картина распределения субвулканических интрузивных тел отмечается на Алеутских островах. В работе [Koulakov et al., 2020] приведена модель земной коры для Аткинского вулканического комплекса (Алеутские о-ва, США), которая была получена на основе сейсмотомографических результатов. На представленной модели видно, что под действующими вулканами Коровин и Ключеф, в верхней коре обнаруживаются два изолированных магматических очага, начинающиеся с глубины 1.5 и 2 км [Koulakov et al., 2020]. Протяженная область аномально высокой плотности трещин проявляется на западном склоне хр. Вернадского и включает в себя верховья рек Горшкова, Ложкина и Перетур-пихи (см. рис. 4).

По данным [Федорченко, Шилов, 1966], в верховьях левого притока р. Горшкова располагается сильно разрушенный ледниково-эрозионными процессами сложный вулканический конус, представляющий собой три слившиеся между собой мелкие постройки, о чем свидетельствует расположение некков, кратерно-озерных отложений и ряд морфологических признаков. Сравнительно хорошо сохранившиеся юго-западные склоны этого сооружения образуют междуречье Ложкина и Горшкова. На горизонтальном срезе с трехмерной модели (см. рис. 4) [Хубаева и др., 2020] в интервале глубин 1500 м видна крупная область с очень низкой тектонической деструкцией. Таким образом, имеющиеся данные указывают на то, что в северном секторе о. Парамушир на глубине ~2.5 км располагаются магматические тела, которые обеспечивают теплом гидротермальные источники и осуществляют питание современных вулканов. Низкотемпературные HCl , S ($\text{pH} < 1$) газогидротермы вулкана Эбеко локализованы на Северо-Восточном и Южном фумарольных полях (рис. 5), кратерных озерах, источниках в верховьях руч. Лагерный [Бортникова и др., 2006]. Их отличительной чертой является переменчивость составов и локализаций выходов [Мархинин, Сидоров, 1966]. Так, в период наблюдений с 1963 по 1985 гг. изменение температур и вариаций содержания $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$, CO_2/H_2 , S/C , F/Cl , S/Cl позволили выделить периоды активизации и подготовки к фреато-магматическому извержению 1967 г. [Menyalov et al., 1985] и 2010–2011 гг. [Котенко и др., 2012]. Термоминеральные Верхне-Юрьевские источники, в отличие от вулкана Эбеко, характеризуются высокотемпературными (~87°C), ультракислыми (pH 1–2) сульфатно-хлоридными водами [Kalacheva et al., 2016]. Наблюдения за геохимией вод источников показали, что в 2016–2017 гг. произошло утяжеление их

изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) с одновременным ростом концентрации Cl^- , SO_4 , что свидетельствовало о поступлении магматического вещества [Калачева, 2020]. Воды, вскрытые скважиной П-2 (см. рис. 1), пробуренной на восточном склоне хр. Вернадского, имеют более легкий изотопный состав, близкий к метеорным водам [Калачева, Таран, 2019].

В одной из последних работ [Хубаева и др., 2020] мы указывали на существование на восточном склоне хр. Вернадского скрытого разрывного нарушения, протянувшегося вдоль осевой части хребта в ССВ направлении. Такое разрывное нарушение может интерпретироваться как зона субпараллельных разломов осевой части хр. Вернадского. Гипотезу о сопутствующих активному действию разлома субпараллельных областей дробления обосновывалось в многочисленных работах [Шерман, 1977, 1983, 2009]. Вторая зона субпараллельных разломов, северная часть которой читается в рельефе [Хубаева и др., 2007], а южная, скрытая под многочисленными лавовыми потоками, расположена на западном склоне хр. Вернадского. Узлы с высокой тектонической деструкцией ярко выражены на горизонтальных срезах 3D модели тектонической раздробленности (см. рис. 4) [Хубаева и др., 2020].

В пользу существования разрывного нарушения на западном склоне хр. Вернадского свидетельствуют расположенные здесь древние разрушенные вулканические постройки, многочисленные субвулканические интрузивные тела (дайки, некки) и термальные источники. Жерловая часть вулкана Влодавца находится на пересечении разлома СЗ простирания, на котором расположены также действующие вулканы Алаид (о. Атласова) и Эбеко [Baranov et al., 2002] (см. рис. 1, разлом 2) и разрывного нарушения ССВ простирания (см. рис. 1, разлом 1). На разлом СЗ простирания (см. рис. 1, разлом 2) обращают особое внимание Ю.И. Блох с соавторами [Блох и др., 2006], которые считают его крупнейшей поперечной (к простиранию островной дуги) сквозной магмоконтролирующей проницаемой зоной. На всем протяжении этой зоны проявляются голоценовые шлаковые конусы, а также современные и новейшие проявления гидротермальной деятельности на вулканах Эбеко, Влодавца и Алаид и экстрезий на вулкане Григорьева. На о. Парамушир этот разлом прорабатывается рекой Юрьева, которая берет начало на склонах современного вулкана Эбеко. Измеренные [Таран, Kalacheva, 2019] значения выноса хлоридов в устьях рек Юрьева (85 т/день), Горшкова (4.8 т/день), Кузьминки (1.3 т/день), Наседкина (6.9 т/день), прорабатывающих разлом СЗ простирания (см. рис. 1, разлом 2), имеют очень высокие показатели по сравнению с другими реками хр. Вернад-

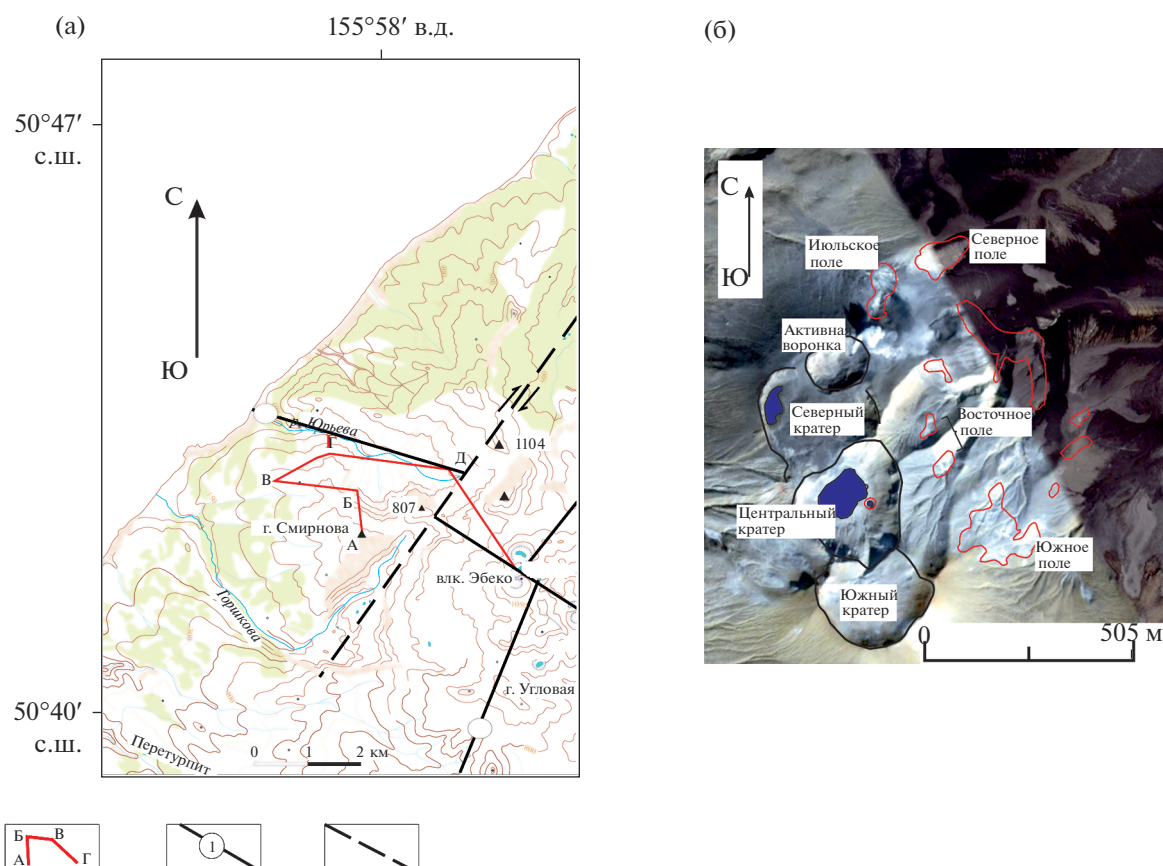


Рис. 5. Кратеры и фумарольные поля вулкана Эбеко.

а – 1 – геоморфологический профиль (см. рис. 6), 2 – разлом, 3 – предполагаемая зона субпараллельных разломов осевой части хр. Вернадского; б – кратеры и фумарольные поля вулкана Эбеко.

ского, что может указывать на генерирующую роль разлома СЗ простирания (см. рис. 1, разлом 2) в формировании гидротермально-магматической системы Эбеко–Юрьева. Важно отметить возможную временную приуроченность некоторых извержений вулканов, находящихся на единой разломной зоне [Федорченко и др., 1989], например, одновременные сильные извержения вулканов Алаид и Эбеко в 1793, 1934 гг. [Бергаль-Кувикас, 2012].

Таким образом, вновь поднимается существующий с 1950-х гг. вопрос о происхождении Верхне-Юрьевских источников. Существует две модели их происхождения.

Первая модель опирается на данные химических анализов воды и геологические данные и указывает на генетическую связь Верхне-Юрьевских источников с постройкой древнего вулкана Влодавца [Иванов, 1957; Воронова, Сидоров, 1966; Мархинин, Стратула, 1977; Родионова и др., 1966 и др.].

Вторая основана на данных химических анализов воды и газов и свидетельствует о том, что Верхне-Юрьевские термальные источники формируются

в прикратерной зоне вулкана Эбеко и выходят на поверхность в виде безнапорных источников в верховьях р. Юрьева [Фазлуллин, 1999; Калачева, 2011; Калачева, Котенко, 2013; Kalacheva et al., 2016; Калачева, Таран, 2019 и др.].

Основой модели, свидетельствующей в пользу формирования Верхне-Юрьевских источников в прикратерной зоне вулкана Эбеко, является работа [Калачева, 2011], где высказывается предположение о том, что озера вулкана Эбеко, существовавшие в кратерах вулкана в разное время, в период извержения уходят под землю, где существует “подвешенный” водоносный горизонт, расположенный в привершинной части вулкана, и где происходит формирование ультракислых рассолов. В пользу этой модели авторы приводят опубликованные материалы [Новейший ..., 2005] о том, что после извержения 1965 г. исчезло 180000 м³ воды из оз. Горячее (Средний кратер вулкана Эбеко), а также ссылаются на геофизические исследования, в результате которых на Северо-Восточном фумарольном поле на глубине до 40 м была подсечена область высокоминерализованных вод.

Ссылаясь на специфические климатические условия в привершинной части вулкана, делается предположение [Калачева, 2011], что на вулкане Эбеко происходит ограниченный сток из подземного “озера” в СЗ направлении, который разгружается на поверхности в виде Верхне-Юрьевских источников [Калачева, 2011]. Также в 2011 г. группой исследователей [Бортникова и др., 2013] были выполнены профили электротомографии на Июльском поле вулкана Эбеко. Длина каждого профиля составляла 235 м. По результатам работ была выделена аномалия низкого сопротивления (0.1–1 Ом м), которая расположена на стороне кратера напротив Активной воронки.

Подтверждением такого предположения является работа [Скрипко и др., 1968], в которой подробно описывается колебание уровня воды в Горячем озере в 1966 г. Озеро наполнялось за счет таяния снега и атмосферных осадков. В этот период происходило постоянное колебание (в пределах 1 м) уровня воды в озере. Примечательным оказался период с 29 сентября по 12 октября, когда в результате сильных осадков водосборные бассейны Среднего и Северного кратеров (см. рис. 5б) наполнились более чем на 6000 т воды, что должно было повысить уровень воды в озере на 0.9 и 0.25 м, но уровень озера в этот период постоянно убывал, а основные пути подземного стока из озера находились в его западной части. В 1966 г. подземный сток из Горячего озера был таким же, как и до фреатического извержения 8 августа 1965 г., о чем свидетельствует уровень воды в оз. Горячее, который был постоянным с 1959 по 1965 гг. [Скрипко и др., 1968].

Тем не менее, доводы в пользу версии о формировании Верхне-Юрьевских источников в прикратерной зоне вулкана Эбеко не кажутся убедительными, так как активность вулкана Эбеко характеризуется частыми фреатическими извержениями, после которых расход Верхне-Юрьевских источников не уменьшается, что должно происходить при условии, что Верхне-Юрьевские источники формируются в прикратерной зоне вулкана Эбеко. Подобный процесс объясняется механизмом гидротермально-магматических взрывов и достаточно подробно рассмотрен в работах многих авторов [Дроздин, 1980; Lorenz, 2003; Buttinelli et al., 2011], а модель гидротермально-магматических взрывов на примере вулканов Камчатки и Курильских островов подробно описывается в работе [Belousov, Velousova, 2016].

В этом случае возникает вопрос об идентичности химического состава Верхне-Юрьевских источников и ручья, дренирующего Июльское поле, образовавшееся на внешнем северо-восточном склоне Активной воронки в период активизации вулкана Эбеко в 2005 г. [Калачева, 2011]. Сходство

сравнимых водопроявлений просматривается в принадлежности одному гидрохимическому типу вод, в полной идентичности количественных характеристик микрокомпонентного состава, а также в соотношении редких щелочных элементов и профиле распределения редкоземельных элементов (рис. 6) [Калачева, 2011].

Подробный анализ и развернутые данные химических составов термальных вод Верхне-Юрьевских источников и кратерных вод вулкана Эбеко приведены также в работе [Иванов, 1957]. Однако здесь автор приходит к выводу о том, что каньон р. Юрьева создает благоприятные условия для образования крупного очага разгрузки высокотемпературных терм, циркулирующих на глубине по периферии вулкана Эбеко.

Эта точка зрения была опровергнута [Калачева, Котенко, 2013], поскольку Верхне-Юрьевские источники являются безнапорными, характеризующиеся низкой газонасыщенностью и могут разгружаться только при наличии гидравлического канала, связывающего область формирования и область разгрузки термальных вод.

Однако перепад высот между кратером вулкана и областью разгрузки источников составляет от 600 до 800 м. При таком перепаде высот источники должны быть напорными. Кроме того, серия термальных источников р. Юрьева расположена в ручье, берущем начало на склонах г. Зеленой, на вершине которой в 1970-х гг. отмечалась фумарольная деятельность [Зеленов, 1972]. В 1960-х гг. исследователи отмечали слабую фумарольную деятельность с небольшим количеством HCl в составе газа [Воронова, Сидоров, 1966] в прижерловой части вулкана Влодавца (долина р. Юрьева), что свидетельствует о восходящем тепловом потоке на этих участках.

В 2007 г. была опубликована карта разрывных нарушений, выявленных на основе геоморфологических методов [Хубаева и др., 2007]. На карте видно, что разрывное нарушение СЗ простирания, на котором расположены вулканы Эбеко и Влодавца, смещается разрывным нарушением ССВ простирания (см. рис. 1, 5а). При такой системе разрывных нарушений термальные воды, дренирующиеся со склонов вулкана Эбеко, должны выходить на поверхность в верховьях р. Горшкова в районе смещения разрывного нарушения СЗ простирания (см. рис. 1, 5а).

В 2013 г. [Калачева, Котенко, 2013] проводился сравнительный анализ химического состава и температурного режима Верхне-Юрьевских источников за период 2005–2010 гг. с результатами ранее проведенных исследований, где авторы указывают на то, что физико-химические показатели вод и их химический состав постоянны на протяжении всего периода наблюдений. Значительные изменения были выявлены только для

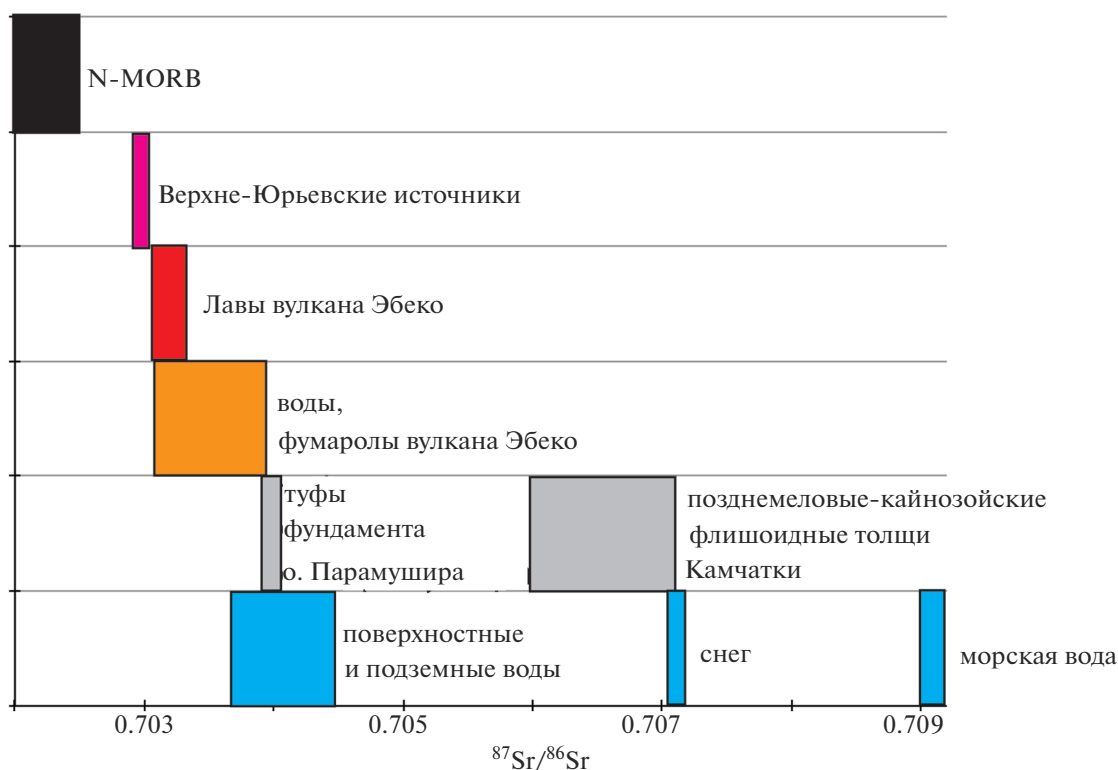


Рис. 6. Сравнение соотношений изотопов стронция в Верхне-Юрьевских источниках, фумаролах, водах и лавах вулкана Эбеко, породах фундамента о. Парамушир, метеорных и морских водах.

График построен на основе данных работы [Kalacheva et al., 2016]; по составам Верхне-Юрьевских источников, фумарол и лав вулкана Эбеко [Мартынов и др., 2010]; туфов фундамента, поверхностных и метеорных вод, снега [Дриль и др., 2005]; морской воды по данным [Кузнецов и др., 2012]; составов флишеидных толщ Камчатки [Коваленко и др., 2010]. N-MORB – нормализованный состав Срединно-Океанического хребта [Sun, McDonough, 1989]. Значения вертикальной шкалы являются условными, смысловой нагрузки не несут.

“Источника № 1”, опробованного рядом исследователей в различные годы [Калачева, Котенко, 2013]. Также авторам не удалось выявить зависимости в изменении концентраций отдельных компонентов от активности вулкана Эбеко [Калачева, Котенко, 2013; Жарков, 2020]. Вместе с тем данные по химическому составу с 1955 по 2014 гг. указывают на снижение концентраций хлоридов и сульфатов в Юрьевских источниках с течением времени [Kalacheva et al., 2016], чего не отмечается на вулкане Эбеко.

В работе [Kalacheva et al., 2016] Верхне-Юрьевские источники рассматриваются как второе термальное поле вулкана Эбеко, приводятся данные основных и трековых элементов воды, изотопных составов Юрьевских источников и озер вулкана Эбеко, а также набор данных по изотопным составам серы и кислорода растворенного сульфата и отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Юрьевских источников, где делается вывод о том, что кислый водоносный горизонт, питающий Юрьевские источники и фумарольные поля Эбеко, представляют собой единую вулcano-гидротермальную систему. К такому выводу авторы приходят, основываясь на пони-

женных значениях δD , $\delta^{18}\text{O}$ метеорных вод, Верхне-Юрьевских источников, скв. П-2 и некоторых источников вулкана Эбеко, а также ссылаясь на работы [Giggenbach, 1974], который считает, что увеличение Mg в “кислой” воде предшествует извержению вулканов и является реакцией на внедрение новой магмы в кислые водоносные горизонты. На основе данных с 1955 по 2015 гг. были построены диаграммы для хлора, сульфата и SO_4/Cl в термальных водах Юрьевских источников и Эбеко [Kalacheva et al., 2016]. Результаты проведенных работ показали, что единственное статистически значимое увеличение относительной концентрации Mg в течение цикла извержений с 2005 по 2011 гг. произошло в 2010 г. Подтверждением предположения о едином водоносном горизонте вулкана Эбеко и Юрьевских источников служат также увеличения SO_2 , CO_2 , H_2 в период активизации вулкана Эбеко (октябрь 2015–сентябрь 2016 гг.) [Калачева, Таран, 2019]. В качестве доказательства такого предположения приводится тройная диаграмма катионов вод озер Эбеко и Юрьевских источников [Kalacheva et al., 2016], которая демонстрирует заметные различия

между этими двумя термальными проявлениями. Воды Юрьевских источников отличаются по концентрации Са от вод вулкана Эбеко, что объясняется осаждением и растворением ангидрита [Kalacheva et al., 2016].

Однако не принимаются во внимание данные буровых скважин (П-1, П-2), пробуренных на восточном склоне вулкана Эбеко, которые указывают на присутствие мощного латерального горизонта бикарбонатных терм². После окончания бурения скв. П-2 начал выпадать CaCO_3 , и скважина быстро заросла. Возникает вопрос: почему на восточном склоне вулкана Эбеко не наблюдается столь же активный процесс осаждения и растворения ангидрита, как на западном склоне?

В работе [Kalacheva et al., 2016] была представлена модель Эбеко-Юрьевской вулcano-гидротермальной системы, где высокие концентрации HCl в низкотемпературных фумаролах и относительно низкие концентрации H_2 и CO в вулканических газах обусловлены наличием водоносного горизонта кипения под вершиной Эбеко. Водоносный горизонт находится в стационарном режиме, уравнивается потоком магматического флюида и метеорных вод с поверхности, выносом фумарольных паров и дренажом Юрьевских источников. Кислые воды находятся на большой глубине, а температура фумарол вулкана Эбеко контролируется двухфазной пароводяной смесью выше водоносного горизонта.

Температура в системе выше, чем температура кипения чистой воды на высоте фумарольных полей вследствие высокой концентрации растворенных веществ [Kalacheva et al., 2016]. Механизм, вызывающий фреатические извержения на Эбеко, заключается в том, что горячие газы поднимаются внезапно при разрушении изолятора. Когда давление горячих газов падает и трещины снова заполняются двухфазными кипящими гидротермами, температура фумарол повторно становится стационарной [Kalacheva et al., 2016].

Однако при условии работы механизма саморегуляции мощность фумарол должна понижаться перед тем, как произойдет фреатическое извержение, в то время как в работах [Котенко и др., 2010; Меняйлов и др., 1988] показано, что фумаролы, наоборот, увеличивают свою разгрузку и температура перед извержением повышается. В газах вулкана Эбеко присутствуют детонационные газы, такие как H_2 , CH_4 , CO и др. Поскольку в период стадии двухфазного потока происходит

понижение уровня термальных вод и обрушение стенок канала, то на глубину до 2 км подсасывается воздух с кислородом [Belousov, Belousova, 2016]. Если в смеси газов присутствует хотя бы 5% водорода, то возможен взрыв, в результате которого происходит сильное дробление, чего при разрушении во время двухфазного потока не наблюдается [Rychagov et al., 2009; Belousov, Belousova, 2016].

Важно отметить, что постройки вулканов Эбеко и Влодавца расположены на одном разломе СЗ простирания (см. рис. 1). Как уже отмечалось, геофизические наблюдения¹ [Бернштейн, 1966] указывают на существование на глубине ~2.5 км под вулканами крупных магматических тел, которые находят отражение и на 3D модели тектонической раздробленности (см. рис. 3). Обращает на себя внимание и наличие трех побочных конусов вулкана Влодавца в левом борту р. Юрьева. На вертикальных срезах с трехмерной модели тектонической раздробленности видно, что каналы, питающие побочные конусы, также сливаются на глубине от 1 до 1.5 км (см. рис. 3).

В 2007 г. были проведены исследования, которые показали, что значениям осей напряжений в очагах землетрясений для района о. Парамушир наилучшим образом соответствует общее поле напряжений с осью растяжения погружающейся по азимуту 205 ± 30 и осью сжатия, ориентированной по азимуту 116 ± 0 , чему не противоречит диагональная система сдвигов [Хубаева и др., 2007]. Таким образом, по разлому СЗ простирания может поступать магматический материал, обеспечивающий питание вулкану Эбеко и вместе с тем поддерживающий гидротермальную активность в районе р. Юрьева, на что указывают также распределение зон высокой тектонической деструкции на 3D модели тектонической раздробленности блока пород (см. рис. 3, 4).

Для проверки гипотезы о влиянии разлома СЗ направления на проявления гидротермально-магматической активности вулкана Эбеко и Верхне-Юрьевских источников были использованы изотопные отношения стронция в фумаролах, водах, лавах вулкана Эбеко, породах фундамента, метеорных водах, снеге и морской воде (см. рис. 6). Полученные данные демонстрируют, что наиболее легкие разности характерны для Верхне-Юрьевских источников и, напротив, фумаролы и воды Эбеко имеют наиболее тяжелые отношения изотопов стронция. Соответственно, идея стока приповерхностных вод вулкана Эбеко к Верхне-Юрьевским источникам маловероятна, так как высокотемпературные, ультра-кислые воды Верхне-Юрьевских источников близки к ювенильным магматическим флюидам, в отличие от низкотемпературных газогидротерм вулкана Эбеко. Соотношения δD и $\delta^{18}\text{O}$ в водах и фумаролах

² Отчет о научно-исследовательской работе по теме: "Мониторинг сейсмичности вулканов, цунами, экзогенных процессов (оползни, обвалы, сели), геотермальных систем и детальное сейсмическое районирование в зонах промышленного и сельскохозяйственного освоения Курильских островов, оценка опасных последствий". Петропавловск-Камчатский, 2001. 140 с.

вулкана Эбеко явно демонстрируют смешение магматических паров и метеорных вод [Калачева, Таран, 2019]. Сравнение, проведенное с привлечением составов пород фундамента о. Парамушир, флишеидных толщ Камчатки и морской воды, объясняет сравнительно тяжелые отношения изотопов стронция в фумаролах и водах вулкана Эбеко (см. рис. 6). Примесь морской воды в гидротермально-магматической системе вулкана Эбеко обсуждалась и ранее [Дриль и др., 2005; Kalacheva et al., 2016], равно как и разбавление атмосферными водами [Shevko et al., 2018]. На основе частотного зондирования, электротомографии и температурной съемки Северо-Восточного фумарольного поля вулкана Эбеко было показано, что простое выщелачивание элементов из пород вулканической постройки, как предполагалось некоторыми исследователями [Kalacheva et al., 2016], не может объяснить весь спектр геохимических вариаций [Панин и др., 2015]. Авторами было высказано предположение, что приповерхностное пространство характеризуется наличием фазовых барьеров (газ–раствор), которые определяют разделение флюида не только по физическим параметрам, но и по химическому составу.

МОДЕЛЬ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МАГМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭБЕКО–ЮРЬЕВА

Изучив работы, посвященные теме нашего исследования, мы пришли к заключению, что две существующие версии происхождения Верхне-Юрьевских источников не являются взаимоисключающими.

К сожалению, комплексные работы, в которых в той или иной степени поднимался вопрос происхождения Верхне-Юрьевских источников [Воронова, Сидоров, 1966; Родионова и др., 1966; Бернштейн и др., 1966; Никитина, 1978; Мархинин, Стратула, 1977] закончились в начале 1980-х гг. В более поздних работах [Калачева, 2011; Калачева, Котенко, 2013; Kalacheva et al., 2016; Taran, Kalacheva, 2019] для объяснения происхождения Верхне-Юрьевских источников использовались в основном данные геохимических анализов воды и фумарольных газов. Однако такой подход может привести к неправильному пониманию истинной картины происходящего. Стараясь найти максимально объективный подход к поставленной задаче, авторы использовали многие исследования предшественников и современников из разных областей знаний, работавших на данном объекте. Созданная авторами база данных на основе геоинформационной системы (ГИС) технологий, а также построенная трехмерная модель тектонической раздробленности блока пород, позволила получить новый материал о глубинной составляющей всего северного сектора о. Пара-

мушир, определить зоны высокой плотности трещин до глубины 3 км, которые нередко служат каналами миграции магматических расплавов в верхней части земной коры. Полученные данные могут служить основой, позволяющей объединять и визуализировать практически любые работы исследователей в области наук о Земле, ведущиеся в районе северной части острова.

Таким образом, дополнив данные предшественников результатами собственных исследований, мы предлагаем новую модель образования Верхне-Юрьевских источников. Для иллюстрации модели глубинного строения гидротермальной системы в районе вулкана Эбеко и р. Юрьева приведено ее схематическое изображение (рис. 7).

По линии А–Б–В–Г–Д–Е (г. Смирнова – некк в левом борту р. Юрьева – высота 632 (побочный конус вулкана Влодавца) – некк в верховьях р. Юрьева – вулкан Эбеко) построен геоморфологический профиль, на который вынесены разгружающиеся термальные источники, фумаролы, разрывные нарушения, зоны циркуляции метеорных и глубинных вод, водоносный комплекс, зона латерального стока, магматические источники тепла, брекчированные зоны. Основой для построения этой схемы послужили данные по строению вулканов Влодавца и Эбеко, гравимагнитный профиль через о. Парамушир в субширотном направлении [Бернштейн, 1966], гравимагнитные исследования в районе вулкана Эбеко¹, 3D модель тектонической раздробленности блока пород для северного сектора о. Парамушир [Хубаева и др., 2020], карты разрывных нарушений северного сектора о. Парамушир [Хубаева и др., 2007], а также данные предшественников [Воронова, Сидоров, 1966; Родионова и др., 1966; Мархинин, Стратула, 1977; Фазлуллин, 1999; Rychagov et al., 2009; Калачева, 2011; Калачева, Котенко, 2013; Kalacheva et al., 2016 г.; Калачева, Таран, 2019 и др.].

Гидротермально-магматическая система Эбеко–Юрьева расположена на поднятом блоке, ограниченном с юга разломом широтного простиранья³, и представляет собой типичную островодужную гидротермально-магматическую систему, где главными ландшафтными конструкциями являются андезитовые стратовулканы [Рычагов, 2002; Henley, Ellis, 1983].

Гидротермально-магматическая система Эбеко–Юрьева имеет непосредственную связь с разломом СЗ простиранья (см. рис. 1, разломы 1, 2). На поверхности в зонах пересечения этого разлома с разломами и разрывными нарушениями ССВ простиранья расположена жерловая часть

³ Леонов В.Л. Оценка перспективности г. Северо-Курильска на термальные воды. Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО РАН, 1990. 33 с.

древнего вулкана Влодавца, Верхне-Юрьевские источники, а также активный вулкан Эбеко (см. рис. 1, разломы 2, 3). На глубине от 1.5 до 2.5 км в этих же областях наблюдаются крупные субвулканические интрузивные тела [Бернштейн, 1966]. Магматические расплавы поднимаются к поверхности от единой глубинной системы питания по ослабленной зоне разлома СЗ простирания (см. рис. 1, разлом 2), периодически выходят на поверхность в районе пересечения этого разлома с разломом осевой части хр. Вернадского ССВ направления (вулкан Эбеко). В зонах пересечения разлома СЗ простирания с зонами субпараллельных разломов ССВ простирания (см. рис. 1, разломы 3, 4) на западном и восточном склонах хр. Вернадского [Хубаева и др., 2020], магма не всегда достигает поверхности, образуя субвулканические интрузивные тела (силлы, дайки). Таким образом, в недрах гидротермально-магматической системы Эбеко—Юрьева существуют различные по времени внедрения субвулканические интрузивные тела, служащие источниками ее теплового питания. По активному разлому СЗ простирания [Хубаева и др., 2007] происходит периодическое поступление магматического материала, чем объясняется гидротермальная деятельность в вершинной части вулкана Эбеко и в верховьях р. Юрьева. Верхне-Юрьевские источники формируются в прижерловой части вулкана Влодавца под воздействием высокотемпературных газовых выделений, поступающих от периодически внедряющихся по разломам интрузивных тел. Этим объясняются похожие химические составы термальных вод в кратерных озерах и котлах вулкана Эбеко, а также Верхне-Юрьевских источниках, постоянный дебит Верхне-Юрьевских источников, который остается неизменным в периоды фреатических извержений вулкана Эбеко, а также снижение концентрации хлоридов и сульфатов в Верхне-Юрьевских источниках с течением времени. При этом не исключено, что существует также латеральный сток с вершины вулкана Эбеко в сторону Верхне-Юрьевских источников, который не является определяющим в их формировании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе комплексного анализа геологического строения, изотопно-геохимических и геофизических данных, воксельного (3D) моделирования предложена модель питания гидротермально-магматической системы Эбеко—Юрьева.

Низкие отношения изотопов стронция Верхне-Юрьевских источников относительно лав и гидротермальных вод вулкана Эбеко, ультракислый состав вод, фумарольная деятельность в прижерловой части вулкана Влодавца и на г. Зеленой в 1960—1970 гг., наличие крупных интрузив-

ных тел на глубинах 1.5—2 км в исследуемом районе, указывают на доминирующее питание Верхне-Юрьевских источников высокотемпературными газовыми выделениями, поступающими от периодически внедряющихся субвулканических интрузивных тел в зоне пересечения разломов СЗ и ССВ простирания.

В недрах гидротермально-магматической системы Эбеко—Юрьева различные по времени внедрения субвулканические интрузивные тела служат источниками ее теплового питания, где доминирующая роль разлома СЗ простирания связывает активность вулкана Эбеко и Верхне-Юрьевские источники.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-17-000490.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Курильских островов / Под ред. В.М. Котлякова, П.Я. Бакланова, Н.Н. Комедчикова и др. М.; Владивосток: Изд-во “ДИК”, 2009. 515 с.
- Басилян А.Э. Астарты плиоцена о-ва Парамушир // Бюлл. Комиссии по изучению четвертичного периода. 1989. № 58. С. 145—151.
- Белоусов В.И., Рычагов С.Н., Сугробов В.М. Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая система: геологическое строение, концептуальная модель, геотермальные ресурсы // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 34—50.
- Бергаль-Кувикас О.В. Особенности пространственного проявления вулканизма Парамуширской группы, Курильская островная дуга // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 194—207.
- Бернштейн В.А., Сивожелезов С.С., Федорченко В.И., Шилов В.Н. Геофизические наблюдения на некоторых вулканах хребта Вернадского // Труды СахКНИИ. Вып. 16 / Под ред. С.И. Набоко. Южно-Сахалинск: СахКНИИ, 1966. С. 44—65.
- Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусев А.А. Подводный вулкан Григорьева (Курильская островная дуга) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 17—26.
- Бортникова С.Б., Бессонова Е.П., Гора М.П. и др. Газо-гидротермы активных вулканов Камчатки и Курильских островов: состав, строение, генезис / Под ред. О.Л. Гласкова, А.К. Манштейна. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. 282 с.
- Бортникова С.Б., Бессонова Е.П., Трофимова Л.Б. и др. Гидрогеохимия газогидротермальных источников вулкана Эбеко (о-в Парамушир) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 39—51.
- Воронова Л.Г., Сидоров С.С. Сравнительная характеристика фумарольных газов некоторых вулканов Курильских островов // Труды Второго Всесоюзного вулканологического совещания 3—17 сентября 1964 г.:

- “Современный вулканизм”. Т. 1. М.: Наука, 1966. С. 146–153.
- Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 535 с.
- Дриль С.И., Мартынов Ю.А., Рычагов С.Н. и др. Происхождение четвертичных вулканитов и геохимия гидротермально измененных пород хребта Вернадского (о-в Парамушир) // Материалы Международного полевого Курило-Камчатского семинара 16 июля–6 августа 2005 г.: “Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного и древнего вулканизма”. Петропавловск-Камчатский: Изд-во “ОТТИСК”, 2005. С. 247–256.
- Дроздин В.Л. Физическая модель вулканического процесса. М.: Наука, 1980. 92 с.
- Жарков Р.В. Термопроявления вулкана Эбеко (о. Парамушир, Курильские о-ва) и их рекреационно-туристский потенциал // Геосистемы переходных зон. 2020. Т. 4. № 4. С. 514–525.
- Зеленов К.К. Вулканы как источники рудообразующих компонентов осадочных толщ. М.: Наука, 1972. 213 с.
- Иванов В.В. Современная гидротермальная деятельность вулкана Эбеко на острове Парамушир // Геохимия. 1957. № 1. С. 63–77.
- Калачева Е.Г. Условия формирования Верхне-Юрьевских термальных вод (о. Парамушир) // Тезисы материалов конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”, посвященной Дню вулканолога, 30 марта–1 апреля 2011 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 126–128.
- Калачева Е.Г. Геохимический мониторинг Верхне-Юрьевских термальных источников (1955–2019 гг.) и их связь с вулканом Эбеко (о. Парамушир, Курильские острова) // Материалы конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 171–174.
- Калачева Е.Г., Котенко Т.А. Химический состав вод и условия формирования Верхне-Юрьевских термальных источников (о. Парамушир, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 2. Вып. 22. С. 55–68.
- Калачева Е.Г., Таран Ю.А. Процессы, контролирующие изотопный состав (δD и $\delta^{18}O$) термальных вод Курильской островной дуги // Вулканология и сейсмология. 2019. № 4. С. 3–17.
- Котенко Т.А., Котенко Л.В., Сандимирова Е.И. и др. Состояние вулкана Эбеко в 2009 г. (о. Парамушир, Курильские о-ва) // Материалы конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”, посвященной Дню вулканолога, 29–30 марта 2010 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2010. С. 143–149.
- Котенко Т.А., Котенко Л.В., Сандимирова Е.И. и др. Извержение вулкана Эбеко в январе–июне 2009 г. (о. Парамушир, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 1. Вып. 15. С. 56–68.
- Котенко Т.А., Котенко Л.В., Сандимирова Е.И. и др. Эруптивная активность вулкана Эбеко (о. Парамушир) в 2010–2011 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 1. Вып. 19. С. 160–167.
- Коваленко Д.В., Ставрова О.О., Цуканов Н.В. Изотопные и геохимические характеристики позднемиоценовых и кайнозойских отложений флиша Камчатки и юга Корякии // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29. № 1. С. 3–14.
- Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Горохов И.М. Изотопный состав Sr в водах мирового океана, окраинных и внутренних морях: возможности и ограничения Sr-изотопной хемотратификации // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2012. Т. 20. № 6. С. 3–19.
- Мартынов Ю.А., Ханчук А.И., Рыбин А.В., Мартынов А.Ю. Геохимия и петрогенезис четвертичных вулканитов Курильской островной дуги // Петрология. 2010. Т. 18. № 5. С. 512–535.
- 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) / Под ред. С.И. Набоко. Южно-Сахалинск: СахКНИИ, 1966. Вып. 16. С. 135–147.
- Мархинин Е.К., Стратула Д.С. Гидротермы Курильских островов. М.: Наука, 1977. 212 с.
- Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н. Особенности химического и изотопного состава фумарольных газов в межэруптивный период деятельности вулкана Эбеко // Вулканология и сейсмология. 1988. № 4. С. 21–36.
- Нечаев Ю.В. Линеаменты и тектоническая раздробленность. Дистанционное изучение внутреннего строения литосферы. М.: ИФЗ РАН, 2010. 215 с.
- Никитина Л.П. Миграция металлов с активных вулканов в бассейн седиментации. М.: Наука, 1978. 80 с.
- Новейший и современный вулканизм на территории России / Под ред. Н.П. Лаверова. М.: Наука, 2005. 604 с.
- Панин Г.Л., Гора М.П., Бортникова С.П., Шевко Е.П. Подповерхностная структура Северо-Восточного фумарольного поля вулкана Эбеко (о. Парамушир) по данным геоэлектрических и геохимических исследований // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34. № 4. С. 67–78.
- Родионова Р.И., Сидоров С.С., Федорченко В.И., Шиллов В.Н. Геологическое строение и современная гидротермальная деятельность вулкана Влодавца. М.: Наука, 1966. С. 98–103.
- Рычагов С.Н. Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая система: характеристика глубокого геологического разреза и модель современного минералорудообразования в ее недрах // Вулканология и сейсмология. 2002. № 4. С. 3–21.
- Сергеев К.Ф. Тектоника Курильской островной системы. М.: Наука, 1976. 240 с.

- Сидоров М.Д., Таскин В.В., Вешняков Н.А. Плотностные неоднородности в верхней коре Шанучского рудного района проблема выявления нескрытых никеленосных интрузий (срединный массив, Камчатка) // Региональная геология и металлогения. 2016. № 65. С. 104–115.
- Скрипко К.А., Филькова Е.М., Храмова Г.Г. Режим кратерного озера вулкана Эбеко в 1966 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1968. № 44. С. 52–59.
- Таскин В.В. Сопоставление модели тектонической раздробленности земной коры с результатами гравиметрических исследований // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. Спец. вып. № 31. С. 138–144.
- Таскин В.В., Сидоров М.Д. Трехмерная модель тектонической раздробленности земной коры, созданная с использованием космической видеоинформации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 243–252.
- Фазлуллин С.М. Геохимическая система р. Юрьева (Курильские о-ва): условия поступления и выноса химических элементов в бассейне реки // Вулканология и сейсмология. 1999. № 1. С. 36–45.
- Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И. Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис. М.: Наука, 1989. 237 с.
- Федорченко В.И., Шилов В.Н. Рельеф хребта Вернадского и основные этапы его формирования // Труды СахКНИИ. 1966. Вып. 16. С. 3–28.
- Хубаева О.Р. Тепловое питание гидротермально-магматических систем хр. Вернадского (о. Парамушир, Курильские о-ва) / Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2020. 131 с.
- Хубаева О.Р., Бергаль-Кувикас О.В., Сидоров М.Д. Идентификация разрывных нарушений северной части о. Парамушир (Курильские острова, Россия) и их взаимосвязь с гидротермально-магматическими системами: 3d моделирование тектонической раздробленности // Геотектоника. 2020. № 6. С. 77–90.
- Хубаева О.Р., Брянцева Г.В., Сим Л.А. Новейшие деформации и гидротермальные поля северной части острова Парамушир // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2007. № 4. С. 20–23.
- Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. М.: Наука, 1977. 102 с.
- Шерман С.И. Области динамического влияния разломов: результаты моделирования. Новосибирск: Наука, 1983. 111 с.
- Шерман С.И. Тектонофизические параметры разломов литосферы, избранные методы изучения и примеры использования // Современная тектонофизика. Методы и результаты. М.: ИФЗ РАН, 2009. С. 302–317.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов. Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.
- Baranov B., Wong H.K., Dozorova K. et al. Opening geometry of the Kurile Basin (Okhotsk Sea) as inferred from structural data // Island Arc. 2002. V. 11. № 3. P. 206–219.
- Belousov V., Belousova I. Heat transfer in hydrothermal-magmatic systems // 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 22–24, 2016. SGP-TR-209.
- Buttinelli M., Rita D.De, Cremisini C., Cimorelli C. Deep explosive focal depths during maar forming magmatic-hydrothermal eruption: Baccano Crater, Central Italy // Bull. of Volcanol. 2011. № 73(7). P. 899–915.
- Giggenbach W.F. The chemistry of crater lake, Mt. Ruapehu (New Zealand) during and after the 1971 active period // New Zealand J. Sci. 1974. V. 17. P. 33–45.
- Henley R.W., Ellis A.J. Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review // Earth Sci. Rev. 1983. V. 19. P. 1–50.
- Kalacheva E., Taran Y., Kotenko T. et al. Volcano-hydrothermal system of Ebeko volcano, Paramushir, Kuril Islands: Geochemistry and solute fluxes of magmatic chlorine and sulfur // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 2016. № 310. P. 118–131.
- Koulakov I., Boychenko E., Smirnov S.Z. Magma Chambers and Meteoric Fluid Flows Beneath the Atka Volcanic Complex (Aleutian Islands) Inferred from Local Earthquake Tomography // Geosciences. 2020. V. 10. № 6. P. 1–18.
- Lorenz V. Maar–diatreme volcanoes, their formation, and their setting in hard rock or soft rock environments // Geolines. 2003. V. 15. P. 72–83.
- 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. V. 3. № 3/4. P. 259–274.
- Rychagov S.N., Khubaeva O.R., Padilla E.K. et al. Products of maar-diatremes eruptions and mechanism of their formation in areas of acid volcanism in Kamchatka // 3rd International Maar Conference, Malargue, Argentina, April 14–17, 2009. Buenos Aires, Asociacion geologica Argentina, 2009. P. 103–107.
- Shevko E.P., Bortnikova S.B., Abrosimova N.A. et al. Trace elements and minerals in fumarolic sulfur: the case of Ebeko Volcano, Kuriles // Geofluids. 2017. V. 2018. P. 1–16.
- 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, 2018. P. 1–10.
- Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geological Society. Special Publications. 1989. V. 42. № 1. C. 313–345.
- Taran Y., Kalacheva E. Role of hydrothermal flux in the volatile budget of a subduction zone: Kuril arc, northwest Pacific // Geology. 2019. V. 47. № 1. P. 87–90.

The Problem of Formation and Feeding Yurieva Thermal Springs (Paramushir Isl., Kurile Islands)

O. R. Khubaeva^{1, *}, O. V. Bergal-Kuvikas¹, and M. D. Sidorov²

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

*²Scientific Research Geotechnological Center, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
Northeast Highway, 30, post office box 56, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683002 Russia*

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

Unique Yurieva springs are one of the most productive hydrothermal systems of chlorine flux in the World. Presented work has studied the influence of rupture zones and injections of magmatic materials. Results of voxel modelling (3D) of tectonic destructions on the northern sector of Paramushir Isl. on Kuriles are presented. Based on the complex analysis of geological structure, isotopic, chemical and geophysical data created a model of feeding hydrothermal magmatic system of volcano Ebeko and Yurieva springs. From a single deep feeding system, the magmatic melts rise to the surface along the NW strike's weakened zone, come to the surface in the area of its intersection with the NNE fault, maintaining the activity of the Ebeko volcano. At the intersections of the NW strike with the subparallel zones of the NN strike, the magmatic material does not reach the surfaces and form subvolcanic intrusive bodies (sills, dikes) that provide heat supply to the hydrothermal system of Yurieva springs.

Keywords: tectonic fragmentation, hydrothermal-magmatic system, zones of subparallel faults, magmatic feeding system