

На правах рукописи



ХУБАЕВА Ольга Руслановна

**ТЕПЛОВОЕ ПИТАНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ХРЕБТА ВЕРНАДСКОГО
(о. Парамушир, Курильские острова)**

Специальность 25.00.01 «Общая и региональная геология»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

Научный руководитель:	Гордеев Евгений Ильич академик РАН, д.ф.-м.н., зав. лабораторией динамики и строения вулканических систем ИВиС ДВО РАН (г.Петропавловск-Камчатский)
Официальные оппоненты:	Жатнуев Николай Сергеевич д.г.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмопрогноза ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) Кулаков Иван Юрьевич член-корреспондент РАН, д.г.-м.н., зам. директора ИНГГ СО РАН (г. Новосибирск)
Ведущая организация:	Геологический институт РАН (г. Москва)

Защита диссертации состоится «28» мая 2020 года в ___ часов на заседании диссертационного совета Д. 003.022.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры СО РАН по адресу: 664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИЗК СО РАН и на сайте http://www.crust.ru/newsfull_186.html

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять учёному секретарю совета к.г.-м.н. Ю.В. Меньшагину по адресу: 664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128; e-mail:men@crust.irk.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2020 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д. 003.022.02



кандидат геолого-минералогических наук

Ю.В. Меньшагин

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность

Поиск альтернативных экологически чистых источников энергии является одной из актуальных задач современности. К наиболее перспективным возобновляемым источникам энергии в областях активного вулканизма относится геотермальное тепло. Не случайно, больше всего геотермальных электростанций построено на территориях, где имеются современные гидротермальные системы - в Италии, Исландии, США, Новой Зеландии. В России к таким территориям относятся Курильские острова и Камчатка.

Для таких удаленных территорий, как о. Парамушир (Северная группа Курильских островов), проблема выявления экономически выгодных возобновляемых источников энергии стоит особенно остро. На острове расположено несколько действующих вулканов и связанных с ними гидротермальных проявлений. В 1960-1980-е годы геологическими партиями и научными институтами здесь проводились исследования с целью обнаружения геотермальных систем для получения тепловой и электрической энергии для нужд г. Северо-Курильска. В северной части о. Парамушир (хр. Вернадского) была выделена и охарактеризована Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая система, которую связывают с действующим вулканом. Несмотря на большой объем проведенных работ, решить вопросы с экологически чистым энергоснабжением города до настоящего времени не удалось.

Комплексный подход с применением геолого-геоморфологических методов исследования с привлечением гидрогеотермических и других данных в решении вопросов теплового питания гидротермально-магматических систем о. Парамушир позволяет более полно оценить тепловую мощность системы, получить представление об источниках её теплового питания и выработать правильную стратегию оценки геотермальных ресурсов острова.

Россия производит всего около 1% от всей геотермальной энергии мира и потенциал для развития геотермальной энергетики в Курило-Камчатском регионе очень велик.

Цель и задачи исследования

Цель исследования – выявление источников теплового питания гидротермально-магматических систем влк. Эбеко и влк. Крашенинникова, расположенных на хр. Вернадского (о. Парамушир, Курильские острова).

Основные задачи: 1) Выявление системы проницаемых зон, контролирующей размещение проявлений всех типов природных вод, циркулирующих в пределах гидротермально-магматических систем хребта Вернадского, при помощи структурно-геоморфологических методов и полевых наблюдений; 2) Проведение полевого картирования интрузивных тел и геотермальных проявлений хр. Вернадского, а также замеры температур и расход воды в ручьях для составления карты теплового поля очагов скрытой разгрузки термальных вод для центральной части хр. Вернадского; 3) Оценка взаимосвязи выделенных зон повышенной проницаемости с системами интрузивных тел и геотермальными проявлениями; 4) Комплексный анализ структурно-геоморфологических и геолого-геохимических данных для определения источника теплового питания гидротермально-магматических систем северной части о. Парамушир.

Фактическая основа работы

Сбор полевого материала, а также часть камеральных работ проводились в Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук в рамках научно-исследовательских работ по темам: «Эволюция современных гидротермально-магматических рудообразующих систем Курило-Камчатской островной дуги» (№ государственной регистрации 01.2.00 106353),

диссертационная работа выполнена в 2018-2019 гг. в рамках проекта № 14.W03.31.0033 Минобрнауки России «Геофизические исследования, мониторинг и прогноз развития катастрофических геодинамических процессов на Дальнем Востоке РФ» в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

В основу диссертации положен фактический материал, полученный в результате проведения полевых работ в северной части о. Парамушир (2003-2010 гг.) и комплекса камеральных работ с применением геолого-геоморфологических методов исследования. В состав выбранного комплекса методов вошли: 1. Структурно-геоморфологическое дешифрирование топографической карты масштаба 1:50 000; 2. Полевое дешифрирование в сочетании с дешифрированием спутниковых снимков и аэрофотоснимков; 3. Метод линеаментного анализа; 4. Метод трёхмерного моделирования тектонической раздробленности; 5. Гидрогеотермический метод - изучение параметров выноса тепла.

Методы исследования

Для решения поставленных задач использовался комплекс геолого-геоморфологических методов. На полевом этапе применялись методы геологического картирования - нанесение разрывных нарушений и интрузивных тел, разгрузки подземных вод, воронок взрыва, фумарол, оконтуривание гидротермально-изменённых пород. На камеральном этапе применялся метод структурно-геоморфологического картирования для выделения региональных разрывных нарушений, метод линеаментного анализа - для выделения зон повышенной проницаемости для парогидротерм. Метод определения механизмов очагов землетрясения - для подтверждения сдвиговых перемещений по выделенным разрывным нарушениям. Метод трёхмерного моделирования тектонической раздробленности - для выявления зон тектонической деструкции. Гидрогеотермический метод - для построения карты теплового поля очагов скрытой разгрузки термальных вод о. Парамушир (от р. Наседкина до р. Левашова). Для подтверждения данных, полученных в результате применения гидрогеотермического метода, привлекались данные по содержанию хлорид-ионов в поверхностных водах.

Личный вклад автора

В период с 2003 по 2010 гг. в полевых условиях было проведено ревизионное картирование с нанесением разрывных нарушений и интрузивных тел (дайки, силлы, некки), разгрузок подземных вод, воронок взрыва, фумарол, оконтуривание гидротермально-изменённых пород. Особое внимание было уделено картированию зон тектонического дробления и трещинам с видимыми смещениями. В составе полевого отряда проводились замеры температуры и расход воды в ручьях и реках, также автор участвовал в отборе проб воды на общий химический анализ. В камеральных условиях проводилась обработка полевого материала - дешифрирование карт, космо- и аэроснимков, построение карт-схем линеаментной сети, выявление кинематики разрывных нарушений, построение трёхмерной (воксельной) модели тектонической раздробленности, анализ построенных карт-схем - выявление очагов скрытой разгрузки термальных вод с помощью определения параметров выноса тепла.

Основные результаты работы

Проведены комплексные исследования теплового питания гидротермально-магматических систем, приуроченных к вулканам Эбеко и Крашенинникова (хр. Вернадского) в северной части о. Парамушир. Выделены крупные разрывные нарушения и зоны повышенной проницаемости для парогидротерм. Закартированы интрузивные тела и геотермальные проявления. Обнаружены скрытые разрывные нарушения. Построены концептуальные модели гидротермально-магматических систем хр. Вернадского, наглядно демонстрирующих их структуру: температурный режим, циркуляцию вод, восходящий тепловой поток, геологическое строение и пр. Показана взаимосвязь силло-дайкового

комплекса с гидротермальными системами. Сделан вывод, что тепловое питание гидротермально-магматических систем хребта Вернадского обеспечивается системой остывающих интрузивных тел (силло-дайковым комплексом).

Научная новизна работы

До последнего времени оставался нерешённым вопрос теплового питания гидротермальных систем хр. Вернадского (о. Парамушир). Для решения этой задачи впервые показана структурная взаимосвязь между интрузивными телами и гидротермальными системами в исследуемом районе. Было установлено, что для северной части о. Парамушир основной геологической структурой, обеспечивающей тепловое питание гидротермальных систем, является силло-дайковый комплекс, локализованный в трещиновато-пористой среде из вулканокластических отложений хр. Вернадского. Перенос тепла и вещества к поверхности обеспечивают гидротермы, циркулирующие в системе разломов СВ и СЗ простирания. Установлено, что важное значение для существования гидротермально-магматической системы, приуроченной к влк. Крашенинникова, имеет скрытое разрывное нарушение ССВ простирания, выделенное на восточном склоне хр. Вернадского.

Защищаемые положения:

1. *Современная гидротермальная деятельность хр. Вернадского связана с крупным разрывным нарушением осевой части хр. Вернадского ССВ простирания, а также с второстепенными разрывными нарушениями СЗ простирания (р-н вулканического центра Эбеко) и СВ простирания (р-н вулканического центра Богдановича).*

2. *Скрытое разрывное нарушение, обнаруженное на восточном склоне хр. Вернадского, пространственно совпадает с крупным интрузивным телом (основного или среднекислого состава), расположенным на глубине 2,5 км, а также ярко проявляется в трехмерной модели тектонической раздробленности блока пород для северной части о. Парамушир.*

3. *Интрузивные тела (силлы, дайки) являются основным источником теплового питания термальных вод северной части острова Парамушир. Разрывные нарушения, генетически связанные с внедрением магматических тел силло-дайкового комплекса, определяют пространственную локализацию зон разгрузки термальных вод.*

Достоверность результатов

Достоверность результатов работы определяется использованием стандартных геолого-геоморфологических методов исследования; внутренней согласованностью полученных результатов и соответствием с результатами других исследователей; обсуждением результатов исследования на многочисленных российских и зарубежных конференциях и их опубликованием в ведущих российских журналах.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Полученные автором результаты могут помочь в решении вопросов поиска источников геотермальной энергии и строительства промышленных объектов, генерирующих электрическую энергию на территории о. Парамушир. Опубликованные автором материалы (Хубаева и др., 2005; Хубаева и др., 2007; Хубаева, Рычагов 2009; Хубаева и др., 2011) были использованы составителями итогового отчёта «Изучение парогидротерм на высокоутёсном и приустьевом участках Северо-Парамуширской гидротермальной системы», для интерпретации геофизических данных и оценки перспектив территории на ресурсы подземного тепла [Подошвин, 2012]. Кроме того, существует государственная программа Сахалинской области "Социально-экономическое развитие Курильских островов (Сахалинская область) на 2016 - 2025 годы", которая

предусматривает приоритетное использование геотермальной энергии для обеспечения энергетическими ресурсами промышленной и коммунальной деятельности.

Основным прикладным результатом нашего исследования является то, что пространственная ассоциация силло-дайкового комплекса и зон трещиноватости с морфоструктурами центрального типа и гидрохимическими аномалиями может быть использована в качестве индикаторов для поиска термальных ресурсов.

Апробация работы. Основные результаты исследования и положения диссертационной работы представлялись на **7** международных, **4** всероссийских и **3** региональных конференциях: **1.**Международный полевой Курило-Камчатский семинар, 16 июля – 6 августа 2005 г.; **2.** Geothermal resources council. San-Diego, USA. 10.09.06 – 13.09.06; **3.** 6th International Colloquium: magmatism, metamorphism and associated mineralizations, Beni Mellal, Morocco, April 23-24, 2009.; **4.** 3-rd International Maar Conference, Malargue, Argentina, April 14-17, 2009.; **5.** XIV International Clay Conference. Castellaneta Marina (TA) – Italy, June 14-20, 2009.; **6.** Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 30 - February 1, 2012; **7.** 9th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes (JKASP 2016), Fairbanks, Alaska, May 31 – June 3, 2016; **8.** Фундаментальные проблемы геотектоники. Москва, 30.01.07- 03.07.; **9.** Годичное собрание РМО «Онтогенез минералов и ее значение для решения геологических прикладных и научных задач (к 100-летию со дня рождения профессора Д.П. Григорьева), Санкт-Петербург, 06-08.10.2009 г.; **10.** Всероссийская конференция «Поисковые геолого-геохимические модели рудных месторождений», Воронеж, 15-20 февраля 2009 г.; **11.** III конференция "В кильватере большого корабля: современные проблемы магматизма, метаморфизма и геодинамики", г. Черноголовка 23-24 ноября 2018; **12.** Конференция молодых исследователей и специалистов «Современный вулканизм: прогноз, динамика и связанные с ним процессы в недрах Земли и окружающей среде», ИВиС ДВО РАН, 22-23 ноября 2000 года; **13.** Вулканизм и геодинамика: Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии, Петропавловск-Камчатский, 22-27 сентября 2009 г.; **14.** Конференция «Вулканизм и связанные с ним процессы», Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 30 марта - 1 апреля 2011 г.

Опубликовано **2** статьи в рецензируемых журналах, включённых в список ВАК и **2** - в сборнике статей, индексируемых SCOPUS.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, словаря используемых в работе терминов, списка литературы из 136 наименований, включает 2 таблицы, 42 рисунка и занимает 131 машинописные страницы.

Благодарности. Выражаю искреннюю признательность моему научному руководителю академику Е.И. Гордееву за внимание и всестороннюю поддержку в выполнении исследований. Особую благодарность выражаю моему первому научному руководителю к.г.-м.н. И.Ф. Делемену, а также идейному вдохновителю и коллеге к.г.-м.н. В.И. Белоусову, за постоянные консультации, полезные советы и неоценимую поддержку на протяжении всего периода написания работы. Отдельные слова благодарности выражаю д.г.-м.н. С.Н. Рычагову и сотрудникам лаборатории геотермии ИВиС ДВО РАН за возможность участия в экспедициях на о-ве Парамушир и помощь в сборе материалов в период проведения полевых работ.

Автор выражает большую благодарность к.г.-м.н. Г.В. Брянцевой, д.г.-м.н. Л.А. Сим за доброе отношение и совместную работу над статьей, которая легла в основу диссертационной работы. Также автор благодарит: к.г.-м.н. Г.П. Королёву, д.г.-м.н. С.Б. Бортникову за полезные советы и содействие в подготовке диссертационной работы. Особые слова благодарности - д.г.-м.н. А.И. Кожурину за ценные советы и редакционные

замечания, а также всем коллегам за конструктивную критику, ценные советы, практическую помощь и поддержку.

Глава 1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ

Вопросы, связанные с поиском геотермального тепла, источниками теплового питания гидротермальных систем и механизмами образования силло-дайковых комплексов широко обсуждаются в научной литературе. Особенно хорошо изучена в этом отношении территория наиболее молодой части вулканической рифтовой зоны Северной Америки района SnakeRiver (геотермальное месторождение Айдахо, США), где было показано, что тепловое питание гидротермальных систем осуществляется за счет силло-дайкового комплекса базальтового состава [Nielson et al., 2019].

На территории СССР, а затем в РФ первые геотермальные исследования проводились в пределах активных гидротермально-магматических систем Камчатки (Паужетская, Гейзерная (Долина Гейзеров), Узонская (кальдера Узон), Мутновская (Дачные источники, Мутновский вулкан)). Для Мутновского геотермального месторождения подробно изучены области теплового питания [Kiryukhin et al., 2018]. По мнению авторов, источником теплового питания для этого месторождения является дайковый комплекс.

Гидротермально-магматические системы, расположенные на Курильской вулканической дуге, связанные с андезитовым вулканизмом, изучались на островах Кунашир (вулкан Менделеева), Итуруп (вулкан Баранского) и Парамушир (вулканы хребта Вернадского). Вулканы хребта Вернадского группируются в вулканические центры, и характеризуются линейно-гнездовым расположением. Предполагается, что эволюция гидротермально-магматических систем хр. Вернадского связана с многовыходными вулканическими долгоживущими центрами [Горшков, 1967; Федорченко и др., 1989]. Детальные исследования геологического строения хр. Вернадского показали, что извержения магматических расплавов начинались, в основном, с оливиновых базальтов, а образование вулканических построек сосредоточивалось вдоль оси хребта [Родионова и др., 1966; Горшков, 1967; Федорченко др., 1989]. В этой же зоне происходила и гидротермальная деятельность.

Наиболее хорошо изучен район активного влк. Эбеко (хр. Вернадского), у подножия которого расположен город Северо-Курильск. На протяжении последних десятилетий здесь проводятся геолого-геоморфологические; геофизические; вулканологические, гидрогеологические и гидрохимические исследования.

На восточном склоне хр. Вернадского, прилегающего к городу Северо-Курильск, в недрах Северо-Парамуширской гидротермально-магматической системы на основании глубокого бурения и общей оценки выноса тепла было открыто Северо-Курильское геотермальное месторождение с прогнозной мощностью 98 МВт на 100 лет эксплуатации [Белоусов и др., 2002]. Но это лишь небольшая часть геотермального тепла, аккумулированного в горных породах и парогидротермах района [Рычагов и др., 2004; Хубаева и др., 2005]. По мнению некоторых авторов [Рычагов и др., 2002] источником тепла и вещества для Северо-Парамуширской гидротермальной системы являются мощные массивы диоритов и габбро-диоритов, залегающих на глубине более 2,5-3.0 км, апикальная часть которых представлена интрузивными брекчиями в интервале глубин 1-2 км от дневной поверхности. В 2005 г. был издан коллективный труд под редакцией Н.П. Лаверова [Новейший и современный ..., 2005], где высказывается предположение, что главным источником теплового питания фумарол и гидротерм в районе вулкана Эбеко служит комплекс силлов и даек, приуроченный к зоне растяжения. Аналогичное предположение высказывал В.И. Белоусов в 2002 г. [Белоусов и др., 2002].

Однако, несмотря на многочисленные исследования гидротермальных систем и вулканической деятельности в районе хр. Вернадского, до настоящего времени не существует однозначного представления об источниках теплового питания гидротермальных систем о. Парамушир.

Глава 2. ОБЩАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА О. ПАРАМУШИР И ВОПРОСЫ ЭВОЛЮЦИИ ВУЛКАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ

Фундамент острова состоит из вулканогенно-осадочных пород (вулканомиктовые песчаники, туфы, туфогравелиты охотской свиты (N_1)), на которых залегают лавы: четвертичные базальты, андезиты и андезибазальты [Сергеев, 1976].

По данным авторов [Родионова, 1966], интрузии в северной части о. Парамушир по времени внедрения подразделяются на миоцен-плиоценовые, раннечетвертичные и современные образования. Интрузии миоцен-плиоценового возраста делятся на три группы: 1. основного состава (базальты, долериты), 2. среднего состава (андезибазальты, андезиты), 3. кислого сосава (дациты, риодациты). Широкий диапазон в петрографическом составе интрузивных тел исследователи объясняют наличием разломов различного по глубине заложения, по которым расплавы поступали из очагов, расположенных на разных глубинах. Четвертичные и современные интрузивные образования представлены раннечетвертичными андезитами и небольшими современными андезитовыми экструзивными куполами (диаметром от 100 до 1000 м и высотой от 30 до 400 м), расположенными на траверсе и южнее м. Левашова.

Термопроявления на о. Парамушир приурочены к хребтам Карпинского и Вернадского и наиболее ярко проявлены вблизи действующих вулканов. На хр. Карпинского термопроявления наблюдаются у подножия действующего вулкана Чикурачки и вулкана Татаринова в виде паровых струй и термальных источников [Мархинин, Стратула, 1977]. На хребте Вернадского – это паровые струи вулканов Эбеко, Крашенинникова и термальные источники р. Юрьева.

Л.Н. Барабанов в 1976 г. [Барабанов, 1976] выделил Южно-Парамуширскую и Северо-Парамуширскую гидротермальные системы. Тепловую мощность Северо-Парамуширской гидротермальной системы он оценил в 350 ккал/сек. На хр. Вернадского все высокотемпературные термы приурочены к вулканической постройке влк. Эбеко и р. Юрьева, а слаботермальные источники тяготеют чаще к центральной части хр. Вернадского, в большей степени к его восточным склонам.

Образование вулканических построек и извержение магматических расплавов сосредоточено вдоль оси хр. Вернадского. В этой же зоне происходила поверхностная гидротермальная деятельность в виде сольфатар, фумарол, формирования подземных кислых гидротермальных потоков.

В целом, для Курильских островов характерно развитие долгоживущих вулканических центров. Продукты их извержений представлены всеми разновидностями пород - от базальтов до дацитов и риолитов, с преобладанием (до 70—80% общего объема пород) двупироксеновых андезибазальтов и андезитов [Горшков, 1967].

Ранние стадии всех вулканических систем характеризуются развитием роев региональных даек [Walker, 1987; Hill, 1987]. На ранних этапах дайки внедряются из глубинных резервуаров. Внедрение более поздних даек происходит от образованного корового магматического очага [Walker, 1987]. На средних стадиях эволюции кустовых вулканов происходят небольшие газовые взрывы и крупные фреатические извержения [Горшков, 1967]. Между эруптивными фазами этой стадии проявляется интенсивная гидросольфатарная деятельность, сопровождающаяся отложением серы. На поздних стадиях дифференциации в вершинные кратеры внедряются андези-дацитовые экструзии,

а извержения становятся близкими к Пелейскому типу [Белоусов, 1978]. Гидротермальная деятельность локальна. Геологическое строение и морфология эруптивных аппаратов "кустовых" вулканов свидетельствуют о том, что магматическая проводящая система эволюционировала на всем протяжении формирования этих вулканических структур.

Глава 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения поставленных задач использовался комплекс методов.

Метод линеаментного анализа включает в себя выделение и обработку линейных элементов рельефа [Флоринский, 1992]. Выделяемые автором линеаменты обнаруживаются, прежде всего, в упорядоченности эрозионной сети (эрозионного расчленения земной поверхности), что позволяет интерпретировать их как проницаемые, зоны для парогидротерм. Преимущественно линеаменты выделялись в районах, где тальвеги первых порядков, разделенные водоразделом, практически смыкаются, образуя прямую линию, а также спрямленные участки речной сети. Метод линеаментного анализа представляется одним из перспективных методов для определения зон циркуляции высокотемпературных флюидов, смещения гидротермальных растворов с холодными метеорными водами, а также выходов таких термальных вод на дневную поверхность.

Метод структурно-геоморфологического картирования основан на структурно-геоморфологическом дешифрировании топографической карты. Разрывные тектонические нарушения выделены с использованием методики Н.П. Костенко [Костенко, Брянцева, 2004], модернизированной И.В. Флоринским и др. авторами [Курякова, Флоринский, 1991]. Проверка положения разрывных нарушений, выявленных при дешифрировании топографической карты, проводилась по данным анализа комплексных геолого-геоморфологических профилей.

Метод дешифрирования спутниковых снимков и аэрофотоснимков. В комплексе с полевыми геологическими наблюдениями с 2003 по 2010 гг. проводилось дешифрирование спутниковых и аэрофотоснимков. Места локализации отдельных интрузивных тел, воронок взрыва, зон распространения гидротермально-изменённых пород, холодных и теплых источников или их серий, фумарол и тектонических структур определялись при помощи GPS. Полученные данные загружались в компьютер и затем редактировались с помощью программ Map Source и Corel Draw. В дальнейшем переносились в ArcGis и комбинировались с космическими и аэрофотоснимками, а также с топографической картой (масштаба 1:50 000).

Метод трехмерного моделирования тектонической раздробленности. Для построения трехмерной 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. Пространственная привязка и векторизация результатов дешифрирования выполнялась в программах ArcMap и ArcView. По векторизованным данным создана единая цифровая карта линеаментов северной части о. Парамушир.

Количественно оценить раздробленность геологической среды можно по величине удельной длины разломов УДЛ [Нечаев, 2010]. УДЛ представляется в виде трехмерной матрицы, из которой формируется объемное (voxel) изображение раздробленности исследованного блока.

Тектоническая раздробленность кубического блока определяется отношением объема всех трещин внутри блока к его объему. Объем трещин определяется как сумма произведений длины (l), ширины раскрытия (b) и глубины проникновения (h) отдельных трещин. Для блока кубической формы с ребром a , в котором одной из граней является дневная поверхность, коэффициент тектонической раздробленности будет равен $\Sigma l \cdot b \cdot h / a^3$.

По фотоизображению невозможно определить величины b и h , но для конкретной локализованной территории, ширину трещин b можно считать постоянной. Также, учитывая эмпирически установленное правило, что трещиноватость одной грани кубика породы адекватно отражает степень трещиноватости всего образца [Нечаев, 2010] 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 УДЛ относятся к центру куба на глубине $a/2$. Подробно алгоритм описан в работах [Сидоров, Таскин, 2017].

С помощью предложенной методики была построена модель тектонической раздробленности блока земной коры для северной части о. Парамушир.

Гидрогеотермический метод позволяет определять интенсивность питания гидротермальных систем теплом. Метод дает возможность оценить скрытую и сосредоточенную разгрузку в ручьях термальных вод и суммарный вынос тепла в пределах каждого из изученных водосборов. Для этого определяется **модуль стока в водотоке** — объем воды, стекающей с определенной площади бассейна (площади водосбора) в единицу времени. Измеряется в $\text{м}^3/(\text{с} \times \text{км}^2)$, а для малых величин в $\text{л}/(\text{с} \times \text{км}^2)$. Полученное значение умножается на температуру воды в ручье, в результате получается значение модуля теплового питания в водотоках (интенсивности теплового питания) $M = \frac{Q}{F}$, где Q — расход воды, л/с; F — площадь водосбора, км^2 (Геологический словарь, 1978).

Автор не ставил задачей определение точных теплообменных процессов в речном потоке. В работе фиксируется факт неоднородности теплосодержания водных стоков, входящих в рассматриваемые водосборы. В связи с тем, что теплопередача от атмосферных факторов к объемам воды незначительна, по сравнению с зафиксированными показателями изменений температур воды в системе водосбора, автор не учитывал атмосферное влияние на изменение температуры воды в ручьях и реках. Отбор проб воды, а также все необходимые измерения проводились в конце августа – сентябре 2004 г., когда средняя температура воздуха составляет $8-10^\circ\text{C}$. Таким образом, выполнены работы по измерению температуры воды в ручьях и реках, что (с учетом расхода ручьев) позволяет оценить скрытую и сосредоточенную разгрузку в них термальных вод и суммарный вынос тепла в пределах каждого из изученных водосборов.

Полевые исследования. Полевые работы на территории северной части о. Парамушир проводились в период с 2003 – 2010 гг. и включали в себя ревизионное картирование с нанесением разрывных нарушений и интрузивных тел (дайки, силлы, некки), разгрузок подземных вод, воронок взрыва, фумарол, оконтуривание гидротермально-изменённых пород (аргиллитов и опализированных пород). Особое внимание уделялось картированию зон тектонического дробления, трещинам с видимыми смещениями. Основной целью этих работ являлось подтверждение существования зон региональной трещиноватости, выделенных ранее при помощи методов линеаментного анализа и крупных разрывных нарушений, выделенных методом геоморфологического картирования.

Глава 4. СТРУКТУРНЫЕ ПОЗИЦИИ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ХРЕБТА ВЕРНАДСКОГО

4.1. Тектонические структуры и гидротермальные поля северной части о. Парамушир.

Дешифрирование топографической карты масштаба 1:50000 позволило обнаружить линейные региональные разрывные нарушения, выраженные в рельефе северной части острова (рис. 1). Главным разрывным нарушением на этой территории является субмеридиональная зона, состоящая из системы разломов ССВ-го простирания, которая смещается системой левых сдвигов СЗ-го простирания с правосдвиговой компонентой перемещения.

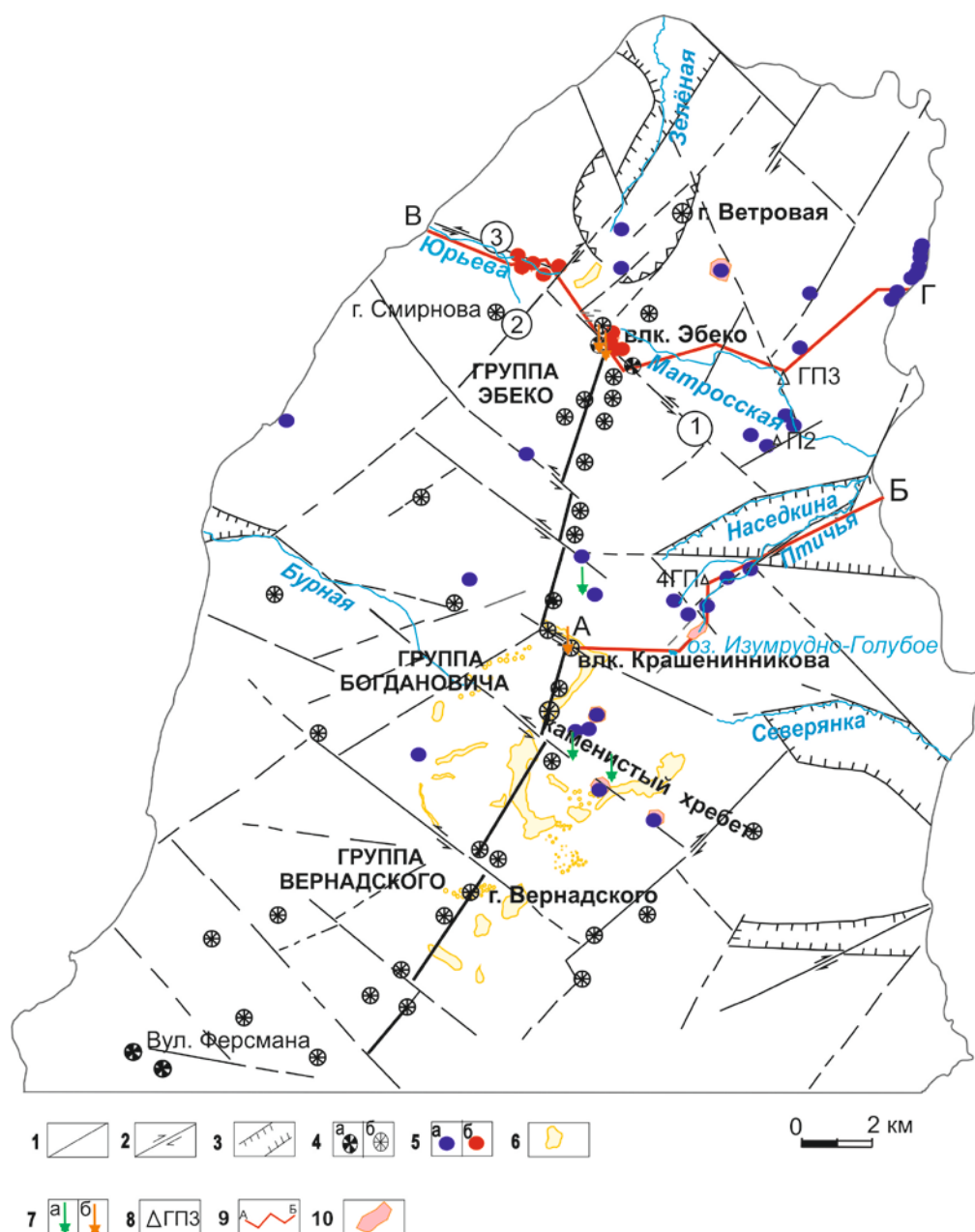


Рис. 1. Карта разрывных нарушений северной части о. Парамушир, выявленных по геоморфологическим данным: 1-3 – разрывные нарушения: 1 – с неустановленной кинематикой, 2 – сдвиги, 3 – сбросы; 4 – вулканические постройки (а – действующие, б – потухшие); 5 – источники (а – холодные, б – горячие); 6 – границы распространения опалитов; 7 – фумаролы (а – потухшие, б – действующие); 8 – обозначения скважин; 9 – линии профилей; 10 – лимонитовые отложения. Цифры в кружочках – номера разломов.

Анализ построенной карты разрывных нарушений северной части о. Парамушир показывает взаимосвязь действующих вулканов с выделенными разрывными нарушениями. Одним из наиболее тектонически напряжённых участков является северная оконечность хребта Вернадского. К этому блоку приурочены вулканические постройки Эбеко, Неожиданный и Незаметный. Субширотному разлому р. Юрьева и кратерной

области влк. Эбеко пространственно соответствуют разгрузки металлоносных кислых высокотемпературных терм (рис. 1).

На основе анализа отдешифрованных разрывных нарушений можно предположить, что разрывное нарушение СЗ простирания (рис. 1, разлом 1) с левосдвиговой компонентой перемещения продолжается со смещением на запад и разрабатывается р. Юрьева (рис. 1, разлом 3). Смещение его может быть вызвано разрывным нарушением СВ простирания (рис. 1, разлом 2). В этом случае группа высокотемпературных источников, соответствующих верховьям р. Юрьева и влк. Эбеко, связаны с единым разрывным нарушением СЗ-ЗСЗ простирания.

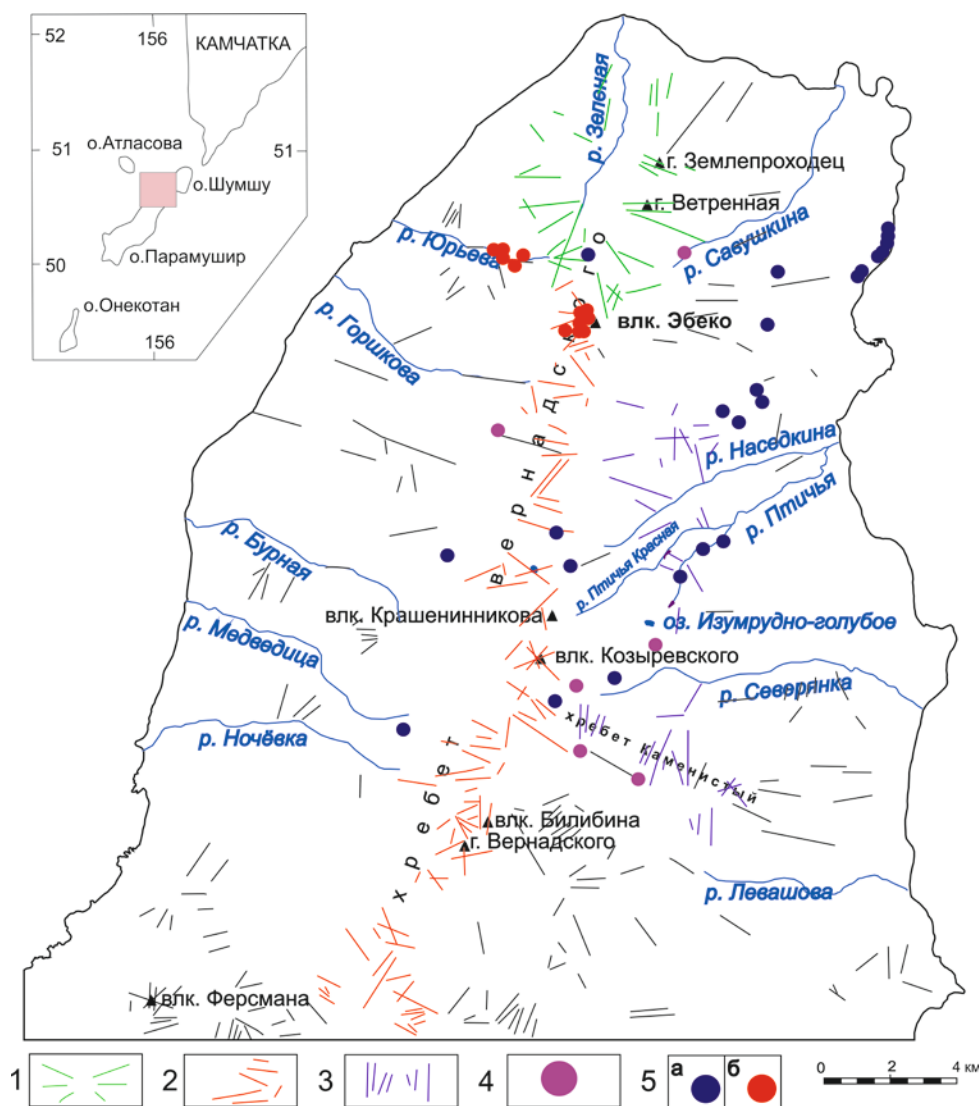


Рис. 2. Схема линеamentной сети северной части о. Пармушир.

- 1 - зона радиальной трещиноватости в рисунке линеamentной сети;
- 2 - осевая субмеридиональная зона в рисунке линеamentной сети;
- 3 - восточная зона проницаемости;
- 4 - Источники с лимонитовыми конусами;
- 5 - источники:
а - холодные,
б - горячие.

4.2. Корреляция интрузивных тел с геотермальными проявлениями хребта Вернадского.

С целью определения проницаемых для парогидротерм зон в исследуемом районе была построена схема линеamentной сети северной части о. Пармушир (рис. 2). Наибольшая плотность линеamentов характерна для осевой части хр. Вернадского и его окончаний (Рис. 2). Именно здесь можно ожидать наибольшее количество проницаемых зон для термальных вод. Зоны высокой тектонической раздробленности для этого участка ярко выражены также в трехмерной модели тектонической раздробленности (рис.3). Высокая плотность линеamentов обнаруживается также в восточной части северного сектора о. Пармушир (рис. 2). Вероятнее всего, выделенные линеamentы трассируют скрытое разрывное нарушение, которое бронируется многочисленными лавовыми потоками и

потому плохо читается в рельефе. Это подтверждается тем, что здесь наблюдается большое количество холодных и термальных источников. Участки высокой плотности линеаментов на восточном склоне хр. Вернадского ярко отображаются на горизонтальных срезах с трехмерной модели тектонической раздробленности блока пород для северной части о. Парамушир (рис. 3), а также подтверждается геофизическими данными.

Так в верховьях рек Птичьей и Наседкина выявлена положительная локальная аномалия поля силы тяжести. Гравиметрическая аномалия и пространственно связанные с ней магнитные аномалии [Краснов, Тузиков, 1968] рассматриваются как проявление в земных полях внедрившегося по зоне разлома и залегающего на большой глубине интрузивного тела, основного или среднего состава [Подошвин и др., 2012].

На основе полевого дешифрирования интрузивных тел и геотермальных проявлений, которое проводилось с 2003 по 2010 гг., в районах палеовулканов Ветровой и Влодавца, г. Маяк и м. Крепкого, а также на хр. Каменистом были закартированы системы интрузивных тел (преимущественно некков и даек) северной и центральной частей хр. Вернадского (рис. 4). Большая часть интрузивных тел, выходящих на поверхность в исследуемом районе, приходится на северную оконечность хр. Вернадского (влк. Ветровой, р. Юрьева) и восточное побережье северной части острова (мыс Крепкий, г. Маяк).

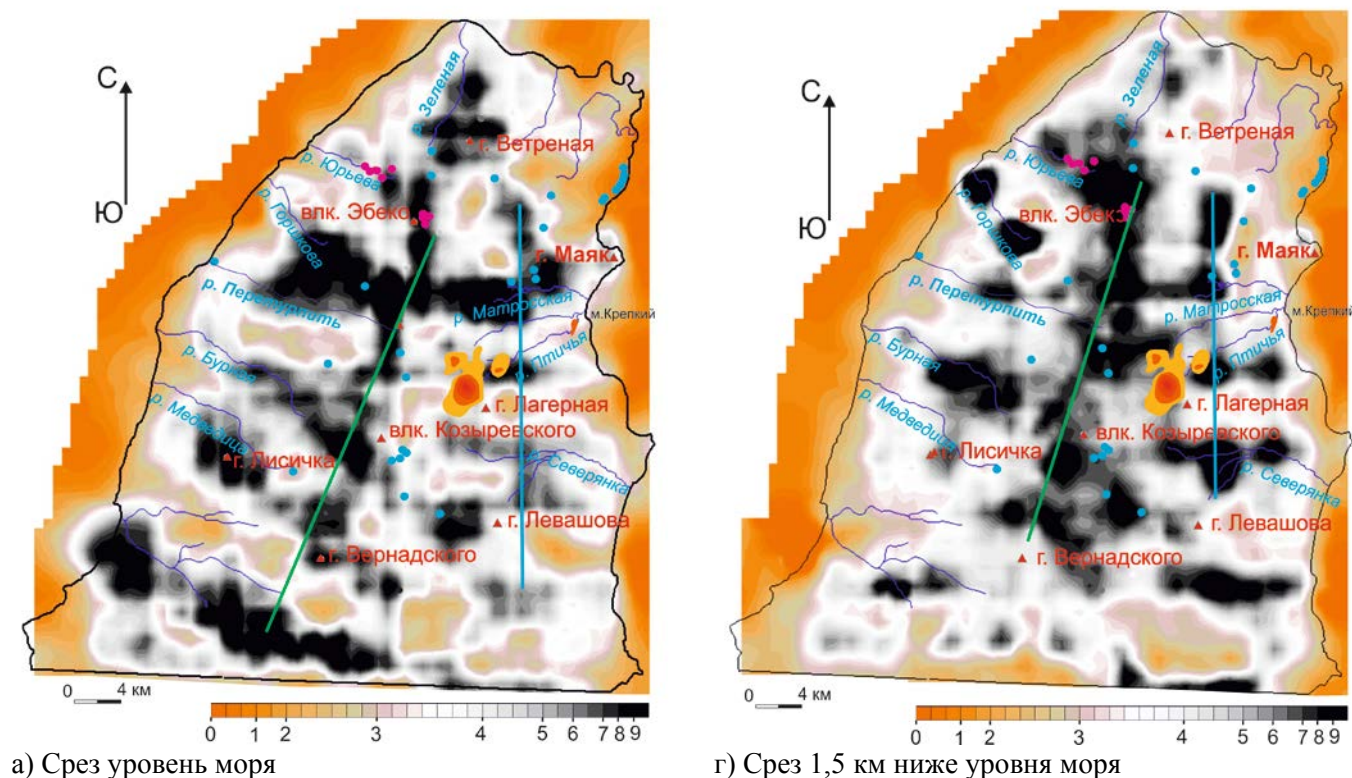


Рис. 3. Горизонтальные срезы с трехмерной модели тектонической раздробленности блока пород для северной части о. Парамушир, с глубин исследования **0, 1,5 км**. Распределение удельной длины линий (выражено в км^{-1} , показано цветом).

1 2 3 4

1 - осевая зона хр. Вернадского; 2- скрытое разрывное нарушение на восточном склоне хр. Вернадского; 3- источники: а- холодные, б- термальные; 4 - интрузивные тела на р. Птичьа (интрузивные тела выделены по данным отчета (Подошвин, 2012)).

Вмещающие породы сильно аргилизированы, в результате протекавших здесь ранее мощных гидротермальных процессов. Дайки имеют различные составы: базальтовый, андезибазальтовый, андезитовый. В центральной части хр. Вернадского,

соответствующей вулканическому центру Богдановича, вскрытые интрузивные тела встречаются гораздо реже. Несколько таких тел андезитового состава расположены на хр. Каменистом, окружающие их вмещающие породы сильно аргилизированы. Однако в центральной части хр. Вернадского обнаруживаются многочисленные воронки взрыва, что может указывать на существование здесь мааро-диатремового вулканизма. Обязательным условием для существования каждого такого вулкана является наличие питающей дайки на глубине [Lorenz, 2003]. Примечательно, что основная масса выделенных интрузивных тел сопряжена с зонами распространения гидротермально-изменённых пород (рис. 4), современной гидротермальной деятельностью, а также с крупными магматическими телами на глубине.

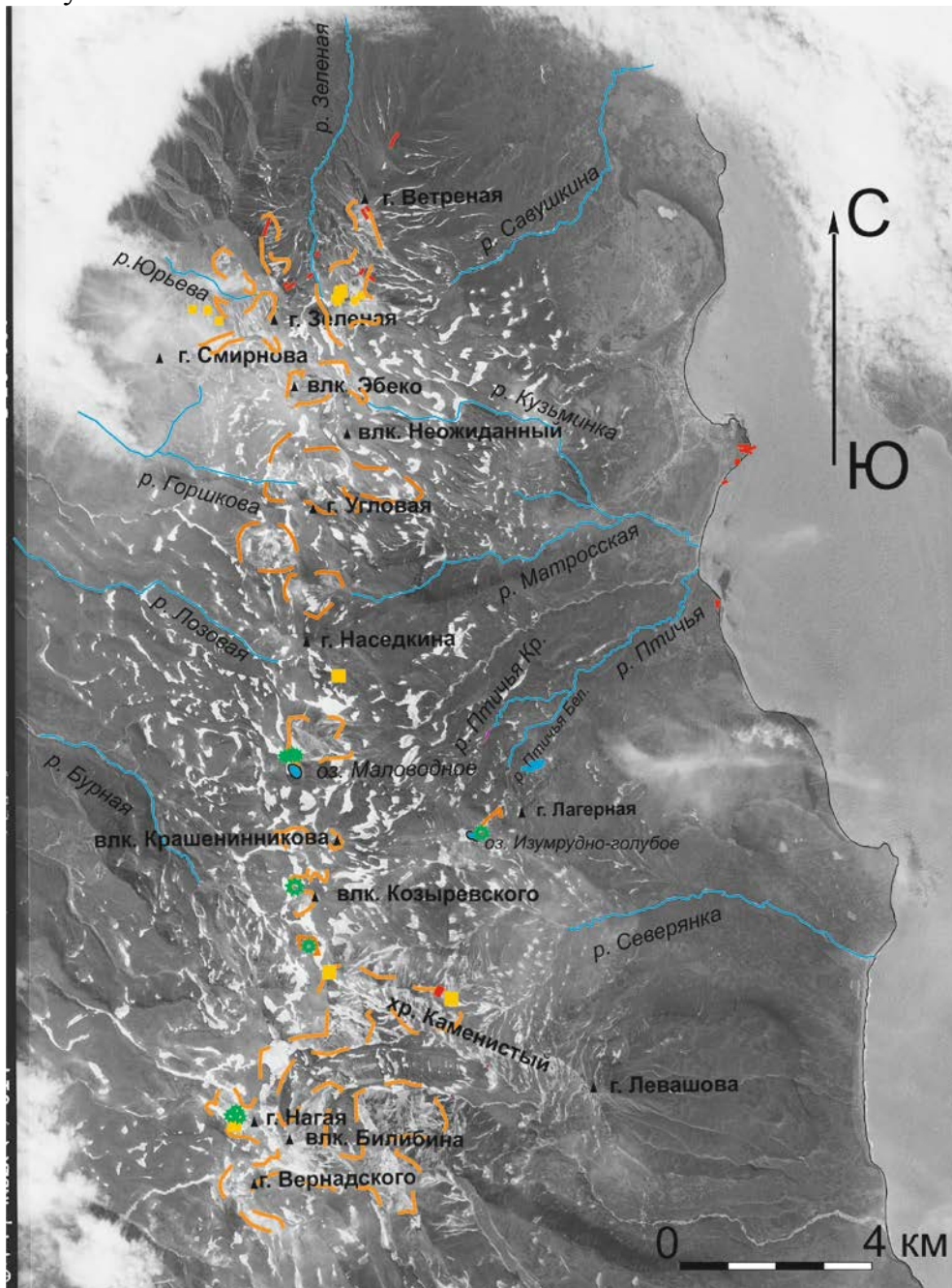


Рис. 4. Зоны распространения гидротермально-изменённых пород

- | | | | | | | | | |
|---|--|---|--|---|--|---|--|--|
| 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 1- дайка; 2 - нект; 3 - границы распространения гидротермально-изменённых пород; 4- воронки взрыва |
|---|--|---|--|---|--|---|--|--|

Глава 5. ТЕПЛОЕ ПИТАНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ХРЕБТА ВЕРНАДСКОГО

Для определения скрытых разгрузок термальных вод центральной части хр. Вернадского (вулканический центр Богдановича) автором была построена карта теплового поля очагов скрытой разгрузки термальных вод (рис. 5).

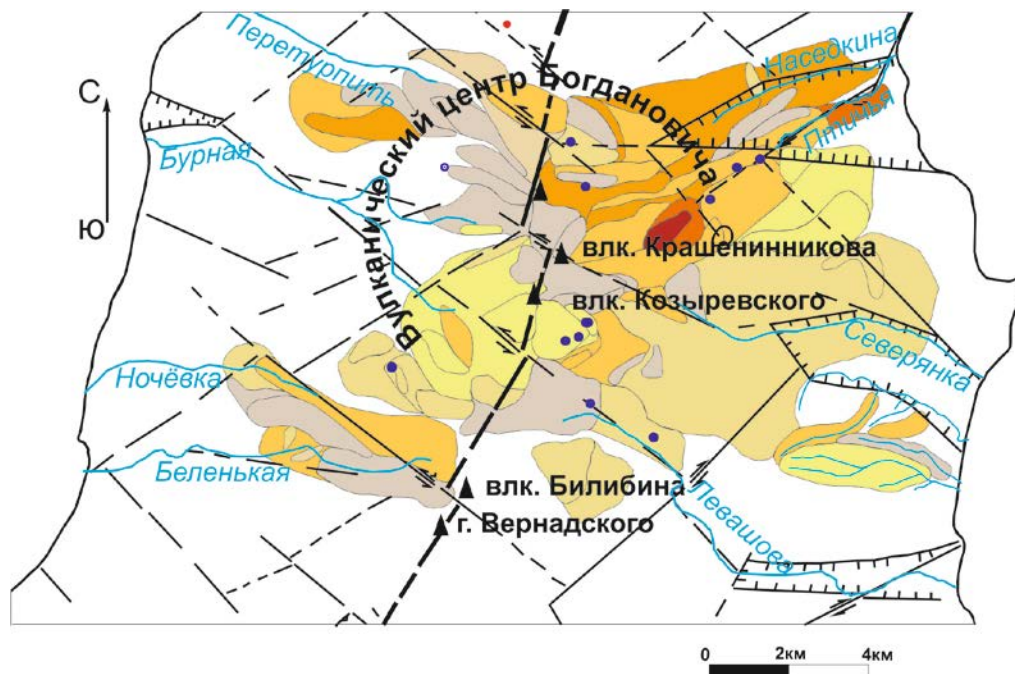
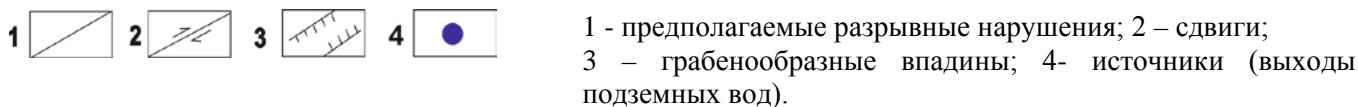
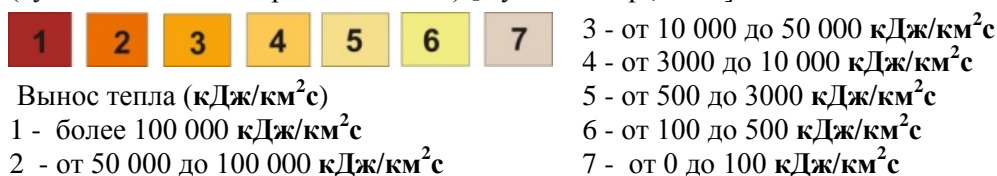


Рис. 5. Карта теплового поля очагов скрытой разгрузки термальных вод в средней части хр. Вернадского (вулканический центр Богдановича) [Хубаева и др., 2005].



На карте видно, что в районе вулканического центра Богдановича обширные участки скрытой разгрузки термальных вод в поверхностные водотоки практически отсутствуют, а наименьший вынос тепла характерен для осевой части хр. Вернадского. Исключение составляет обширный, веерообразный в плане участок в бассейне рек Птичь и Наседкина, дренирующих восточные склоны хребта. К верховьям долины реки Птичь Красная приурочена тепловая аномалия (вынос тепла в этом районе составляет ~100 000 кДж/км²с).

Участки с высокими показателями выноса тепла приурочены к разрывным нарушениям СВ простирания, а также совпадают по значениям с ареалом высоких концентраций хлорид-ионов [Хубаева и др., 2005] в поверхностных водах.

5.1. Глубинное строение активных гидротермально-магматических систем северного сектора о. Парамушир.

Для описания гидротермально-магматических систем хр. Вернадского автором построены геоморфологические профили, на основе которых были составлены схемы гидротермально-магматических систем Крашенинникова и Эбеко. На схемы вынесены

участки гидротермально-изменённых пород, разгружающихся термальных источников и фумарол, разрывные нарушения, зоны циркуляции метеорных и глубинных вод, температурный режим гидротермальных систем, магматические источники тепла. Основой для построения схем послужили данные по опорным скважинам ГП-3 (глубиной 2500 м) [Рычагов и др., 2002] и 4ГП (1274 м) [Бойкова, 2011] (рис. 1), некоторые данные по строению вулканов Влодавца, Эбеко и Крашенинникова, а также геофизические данные [Бернштейн, 1966; Богданов, 1981].

5.2. Тепловое питание гидротермально-магматических систем северного сектора о. Парамушир.

Современные гидротермальные системы вулканических областей сопряжены с сетью даек. Примером этому служат многие гидротермальные системы Исландии, Гавайских и Курильских островов, а также Камчатки, где дайки являются главным источником тепла для гидротермальных систем.

Ранее были высказаны предположения о том, что главным источником теплового питания гидротермальных полей в районе влк. Эбеко служит мощный силло-дайковый комплекс, расположенный на глубине ~ 1 км ниже уровня моря [Белоусов и др., 2002; Новейший и современный ..., 2005]. По данным опорной скважины ГП-3, породы в интервале 1650-1700 м представлены базальт-габбро-базальтами. Предполагается, что это силл или серия даек [Мониторинг ..., 2001].

Проведя картирование и изучив состав интрузивных тел (некков и даек) северной части острова, автор пришёл к выводу, что дайки и некки базальтового, андезибазальтового и андезитового состава, как правило, сопряжены с зонами распространения гидротермально-изменённых пород, а зачастую связаны с современной гидротермальной деятельностью исследуемого района. В то же время выделенные на основе гравиметрической и магнитометрической съемок субвулканические интрузивные тела (предположительно, силлы), расположенные на глубине ~ 2,5 км, пространственно совпадают с выходами термальных источников на дневную поверхность. Географическое положение изучаемых субвулканических интрузивных тел совпадает с зонами высокой тектонической раздробленности (рис. 4) и сопряжено с субмеридионально вытянутыми разрывными нарушениями СВ и СЗ простираения.

В зонах субдукции, в результате исследований долгоживущих вулканических центров, ассоциирующих с современными гидротермальными системами, также отмечается широкое развитие даек. Дайки здесь, как правило, располагаются вдоль общих направлений или же группируются в виде веера вблизи главного эруптивного центра. А.В. Кирюхин [Kiryukhin, 2018] на основе анализа кластеров землетрясений отмечает внедрение даек и силлов, которое происходит на глубине 4-6 км непосредственно под Мутновским геотермальным полем (Камчатка), что подтверждает питание гидротермальных систем посредством интрузивных тел.

В одной из последних работ, посвященной определению потенциала коммерческого развития высокотемпературной геотермии в Айдахо (США), Д. Нэльсон [Nielson et al., 2019] показал, что растяжение приводит к быстрому подъему магмы к поверхности, способствуя формированию даек. В случае поступления больших объемов магмы создаются дополнительные напряжения, способствующие формированию силлов или плутонических тел, которые могут быть эффективными источниками тепла продолжительное время (до 20000 лет).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Организация полевых и камеральных работ, а также представленные в работе методы исследования позволили собрать достаточный объем фактического материала для написания диссертационной работы. Комплекс геолого-геоморфологических методов

исследования в сочетании с полевыми данными позволил выявить зоны повышенной проницаемости для парогидротерм в исследуемом районе, оценить их взаимосвязь с системами интрузивных тел и геотермальными проявлениями, а также выявить взаимосвязь магматизма и гидротермальных процессов в северной части о. Парамушир.

Обобщение полученного материала показало, что выходящий на поверхность дайковый комплекс сопряжен с зонами распространения гидротермально-измененных пород, а выделенные на основе геофизических данных субвулканические интрузивные тела (предположительно силлы), расположенные на глубине ~ 2,5 км, пространственно совпадают с выходами термальных источников на дневную поверхность. Географическое положение выделенных интрузивных тел совпадает с выделенными разрывными нарушениями и зонами высокой тектонической раздробленности пород.

Сделан вывод, что тепловое питание гидротермально-магматических систем хребта Вернадского обеспечивается системой остывающих интрузивных тел (силло-дайковым комплексом), а современная гидротермальная деятельность хр. Вернадского связана с крупным разрывным нарушением осевой части хр. Вернадского ССВ простирания и второстепенными разрывными нарушениями СЗ и СВ простирания.

Полученные данные могут использоваться как основа при дальнейших исследованиях гидротермальных систем северной части о. Парамушир.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. **Khubaeva O.R.**, Briantseva G.V., Sim L.A. Analysis of recent deformations in North-Paramushir geothermal district (the Kuril islands, Russia) // Geothermal resources council, San-Diego, USA. 2006.
2. **Хубаева О.Р.**, Брянцева Г.В., Сим Л.А. Новейшие деформации и гидротермальные поля северной части острова Парамушир // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2007. № 4. С. 20-23.
3. **Хубаева О.Р.** Роль даек в тепловом питании гидротермальной системы вулканического центра Богдановича (о. Парамушир, Курильские острова) // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36. № 2. С. 32-43.
4. **Хубаева О.Р.**, Николаева А.Г. Проблемы теплового питания гидротермально-магматической системы вулкана Эбеко (о. Парамушир, Курильские острова) // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2017. № 4. С. 62-73.

Список основных публикаций и тезисов

1. **Хубаева О.Р.**, Шульга О.В., Котенко Л.К., Котенко Т.А. Морфоструктура и оценка выноса тепла в северной части острова Парамушир // Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма: Материалы Международного Курило-Камчатского семинара, 16 июля – 6 августа 2005 г. Петропавловск– Камчатский: «ОТТИСК», 2005. С. 181–194.
2. **Хубаева О.Р.**, Брянцева Г.В., Сим Л.А. Новейшие деформации северной части острова Парамушир // Материалы XI тект. совещ. «Фундаментальные проблемы геотектоники». М.: ГЕОС, 2007. Т. 1. С. 109-111.
3. **Хубаева О.Р.**, Рычагов С.Н. Построение трехмерной цифровой модели Северо-Парамуширской гидротермально-магматической системы в связи с оценкой разгрузки геотермального тепла // Вулканизм и геодинамика: Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. Т. 2. С. 825-828.
4. **Khubaeva O.**, Boikova I., Nikolaeva A. Local Conceptual Model of the North-Paramushir Hydrothermal System: Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 30 - February 1. 2012.