



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ АПАЧИНСКОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ (КАМЧАТКА)

Сидоров М. Д. ORCID ID 0009-0000-1642-1529

*Научно-исследовательский геотехнологический центр
(Дальневосточное отделение Российской академии наук),
Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация,
e-mail: smd1952z@gmail.com*

Изучена проницаемость земной коры Апачинской геотермальной системы на юге полуострова Камчатка. Целью проведенных исследований является создание объемной модели раздробленности геологической среды, нахождение путей проникновения на глубину атмосферных, циркуляции магматогенных вод и восходящих глубинных флюидов. Район сложен осадочными толщами и отложениями вулканических комплексов. Источником локальных глубинных гидротерм служат питающие каналы кислых субвулканических интрузий карымшинского вулканического комплекса. Из цифровых моделей геофизических полей и радарных снимков рельефа выделены линейменты трещин различного генезиса. В скользящем окне вычислена энтропия и стандартное отклонение во входных данных, проведена линеация и векторизация, построены карты линейментов, которые обработаны по специальной методике. Определен удельный коэффициент раздробленности в кубических блоках. Совокупность блоков образует объемную модель, характеризует проницаемость исследованного участка коры до глубины 3 км. В модели выделены места проникновения атмосферной воды в земную кору, где возможно ее смешение с глубинным горячим флюидом и магматогенными водами: северный склон хр. Гладкий, нижнее течение р. Карымчина, хребет Дальний и верхнее течение р. Ушаган. В модели выделены блоки с интрузиями. В этих блоках по открытым трещинам возможна миграция гидротерм к дневной поверхности. Внутри блоков возможно существование замкнутых систем циркуляции рудоносных растворов и образование золоторудных кварцевых жил. Перспективным представляется юго-восточный фланг выступа меловых пород г. Сопочка. Рекомендована площадь для исследования электропроводности на глубину 3–5 км в комплексе с тепловизионной съёмкой.

Ключевые слова: Камчатка, геотермальная система, субвулканическая интрузия, намагниченность, разлом, модель, линеймент, коэффициент раздробленности

STUDY OF CRUSTAL PERMEABILITY OF THE APACHINSKAYA GEOTHERMAL SYSTEM (KAMCHATKA)

Sidorov M. D. ORCID ID 0009-0000-1642-1529

*Research Geotechnological Center (Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences),
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation, e-mail: smd1952z@gmail.com*

The permeability of the Earth's crust of the Apachinsk geothermal system in the south of the Kamchatka Peninsula has been studied. The purpose of these studies is to create a three-dimensional model of the fragmentation of the geological environment, to find ways of penetration to the depth of atmospheric, circulation of magmatogenic waters and ascending deep fluids. The area is composed of sedimentary strata and deposits of volcanic complexes. The source of local deep hydrotherms is the feeding channels of the acidic subvolcanic intrusions of the Karymshinsky volcanic complex. From the digital models of geophysical fields and radar images of the relief, the lineaments of cracks of various genesis are selected. In a sliding window, the entropy and standard deviation in the input data are calculated, linearization and vectorization are performed, and maps of lineaments are constructed, which are processed using a special method. The specific coefficient of fragmentation in cubic blocks is determined. The combination of blocks forms a three-dimensional model that characterizes the permeability of the studied section of the crust up to a depth of 3 km. The model highlights the areas where atmospheric water penetrates into the Earth's crust, where it may mix with deep-seated hot fluids and magmatogenic waters: the northern slope of the Gladkiy Range, the lower reaches of the Karimchina River, the Dalniy Range, and the upper reaches of the Ushagan River. The model also highlights the blocks with intrusions. In these blocks, hydrothermal fluids may migrate to the surface through open fractures. Inside the blocks, there may be closed systems of ore-bearing solutions and the formation of gold-bearing quartz veins. The southeastern flank of Sopochka Mountain Cretaceous Period outcrop appears to be promising. The area is recommended for studying electrical conductivity to a depth of 3–5 km in combination with thermal imaging.

Keywords: Kamchatka, geothermal system, subvolcanic intrusion, magnetization, fault, model, fragmentation coefficient, lineament

Введение

Апачинская геотермальная система находится в южной части Камчатского полуострова (рис. 16). Перспективная площадь охватывает территорию в междуречье Банная – Шикова – Карымчина, в их нижнем те-

чении. В бассейне р. Шикова расположено Апачинское месторождение термальных вод с выходами группы источников. К востоку и югу от источников пробурены две скважины глубиной 507 и 1205 м. Утвержденные эксплуатационные запасы с температурой

64,9°C составляют 2315,5 м³/сут., прогнозируемые ресурсы 30240 м³/сут. [1; 2, с. 109]. На базе естественных источников функционирует лечебно-оздоровительный профи-

лакторий. Кроме информации, полученной при бурении скважин, о глубинном строении Апачинской геотермальной системы мало что известно.

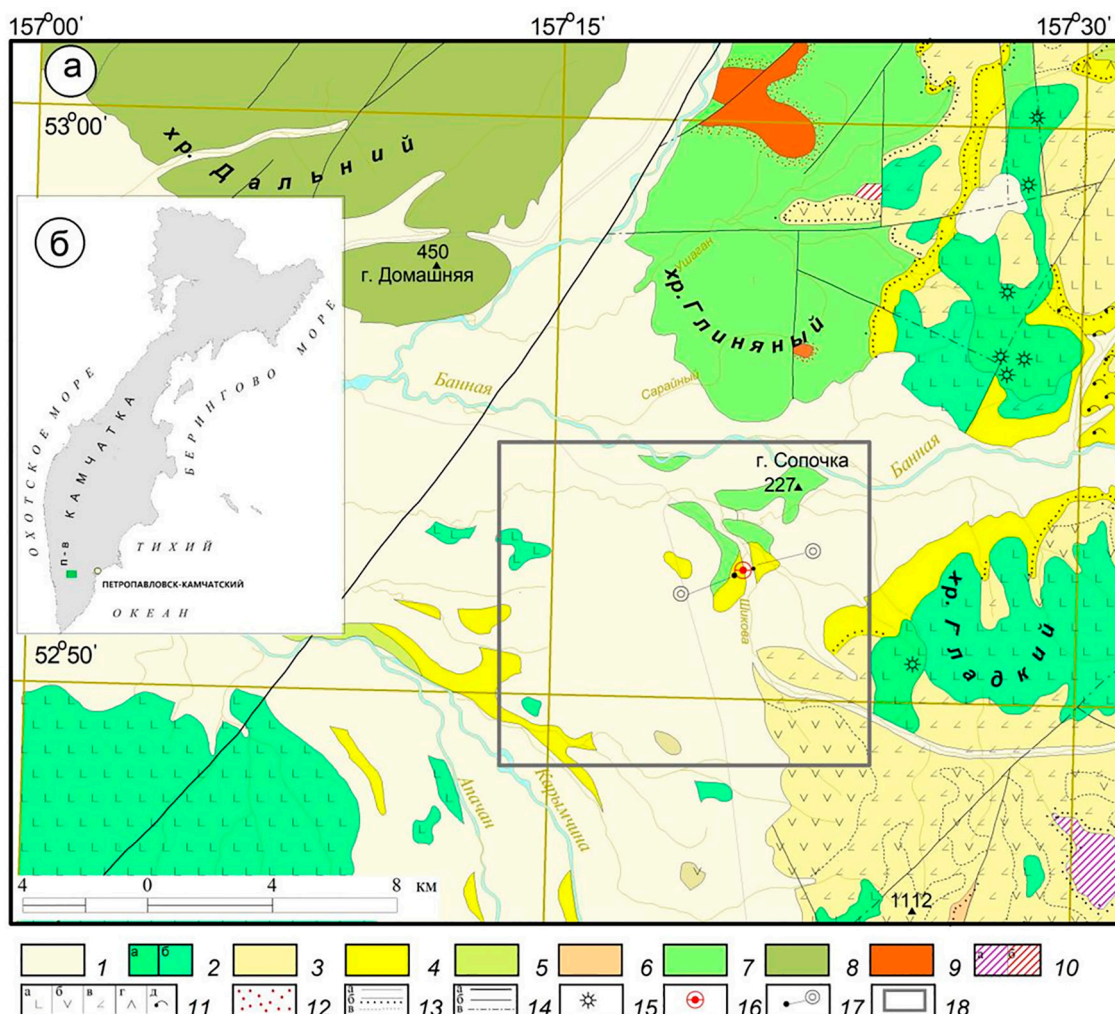


Рис. 1. Геологическая карта (а) [2] и обзорная схема с участком исследований (б). 1 – квартал, рыхлые аллювиальные, пролювиальные, озерные, болотные, ледниковые отложения. Валунники, галечники, щебень, суглинки, пески, глины, торф (до 200 м); 2 – квартал, эоплейстоцен-неоплейстоцен. Сарайненский комплекс базальтовый (а), левоопалинский комплекс базальтовый (б). Покровные образования. Базальты, андезибазальты, их туфы (275 м, 900 м); 3 – кайнозой, плиоцен. Начикинский комплекс базальт-андезибазальтовый. Покровные образования. Андезиты, их туфы, дациандезиты, дациты (800 м); 4 – кайнозой, средний миоцен. Карымишинский комплекс риодацитовый. Игнимбриты, спекшиеся туфы риолитов, дацитов, дациты, риолиты (1000 м); 5 – кайнозой, средний миоцен. Асачинская толща. Песчаники, туфопесчаники, алевролиты, гравелиты (500 м); 6 – кайнозой, палеоген, эоцен. Васильевская толща. Песчаники, алевролиты (750 м); 7 – мезозой, поздний мел. Ирунейская свита, верхняя подсвита. Туфы, туффиты, прослой кремнистых алевролитов, кремней (1500 м); 8 – мезозой, поздний мел. Хозгонская свита. Глинистые сланцы, песчаники, алевролиты (более 3000 м); 9 – мезозой, поздний мел. Левоандриановский комплекс субщелочных габбро, пироксенитов и дунитов. Интрузии монцодиоритов сложного состава; 10 – кайнозой, средний-поздний миоцен. Субвулканические образования андезитов, диоритовых порфиритов южно-быстринского (а), риолитов карымишинского вулканических комплексов (б); 11 – фации вулканических пород: базальты (а), андезиты (б), андезибазальты (в), дациты (г), игнимбриты (д); 12 – контактовые роговики; 13 – геологические границы: согласно (а), несогласно (б) залегания, между фациями (в); 14 – разрывные нарушения: главные (а), второстепенные (б), скрытые под вышележащими отложениями (в); 15 – лавовые и шлаковые конусы; 16 – выходы термоминеральных вод; 17 – буровые скважины; 18 – контур геофизических работ масштаба 1:25000 (Зайцев и др., 1972). Источник: составлено автором на основе [2]

Район сложен осадочными и вулканогенными образованиями, считается перспективным на термоминеральные воды. Проявления гидротерм непосредственно связаны с проницаемостью земной коры, которая во многом является следствием разрывной тектоники. Для оценки тектонической раздробленности обычно анализируют фотоизображение земной поверхности и рельеф. Использование комплекса морфометрических параметров, таких как линии вытянутости водотоков, удельная длина «слабых» зон, кривизна рельефа, рассмотрены в работах [3-5]. Необходимым условием для образования гидротермальных месторождений являются источники тепла, которыми служат магматические тела и их питающие системы. Для прогнозирования месторождений важно знать пути миграции воды внутри коры к источникам тепла и земной поверхности. В данной работе для изучения проницаемости совместно с рельефом рассматриваются данные геофизики: гравиразведки, магниторазведки и электроразведки. Результатом обработки цифровых материалов по специальной методике является 3D-модель раздробленности. Такая модель наглядна, позволяет выявить узлы и зоны проникновения на глубину атмосферных вод, определить вероятные места циркуляции магматогенных вод, восходящих глубинных флюидов, локализовать наиболее перспективные участки для постановки поисковых работ.

Геологическое строение

В геологическом строении [2, с. 15–75] района Апачинской геотермальной системы принимают участие кайнозойские образования различного генезиса и осадочные, вулканогенно-осадочные морские толщи позднего мезозоя (рис. 1а). Меловая система представлена хозгонской и ирунейской свитами. *Хозгонская свита* в описываемом районе сложена терригенными отложениями нижней подсвиты, преимущественно песчаниками с ритмичными пакетами и редкими прослоями алевролитов и глинистых сланцев, линзами конгломератов и гравелитов. На отдельных участках для пород свиты характерен будинаж. Породы свиты практически немагнитные, метаморфизованы в хлорит-мусковитовой субфации зелёносланцевой фации регионального метаморфизма.

Мезозойские толщи являются фундаментом для перекрывающих их вулканогенных отложений кайнозоя. Интрузии мелового возраста представлены одним крупным и одним небольшим массивами на левобережье р. Плотниковой.

Кайнозой на описываемой площади представлен одной осадочной толщей палеогенового возраста и более широко вулканическими комплексами (ВК) неогена и квартера.

Покровные образования *карымшинского ВК* распространены в среднем течении рек Банной и Шиковой, а также в верховьях р. Карымчины. Вулканиты комплекса однообразны по составу и обладают характерным внешним обликом. Субвулканические образования карымшинского ВК приурочены к полям развития покровной фации в виде даек, мелких простых и крупных дифференцированных штоков. В магнитном поле тела отражаются контрастными отрицательными аномалиями. На описываемой площади выходов субвулканических тел нет, но, судя по результатам наземной магнитной съемки, субвулканические интрузии комплекса имеются в междуречье Банная – Шикова, где они перекрыты вышележащими отложениями.

Субвулканические образования *южно-быстринского ВК* представлены на водоразделе Шикова – Карымчина одним телом диоритовых порфиритов. В апикальной части тела породы представляют собой эруптивную брекчию с обломками размером до 15 см.

Начикинский ВК плиоценового возраста распространен в пределах Шиковской вулканической структуры и к северу от нее. Вулканиты залегают несогласно на нижележащих породах карымшинского ВК, в покровной фации характерно преобладание эффузивов. Для начикинского комплекса свойственно дифференцированное, преимущественно положительное магнитное поле с интенсивными максимумами.

Квартер на площади представлен *левоопалинским* и *сарайненским ВК* и рыхлыми отложениями. Покровные фации вулканитов слагают платообразные водоразделы удалённых зон палеовулканов Большая Ипелька и Карымчинского, состоят из базальтов, андезибазальтов, их шлаков и агглютинатов. Фации рыхлых отложений широко представлены в долинах рек Плотникова, Шикова, Карымчина и их притоков, перекрывая мощным до 100 м чехлом другие геологические образования. Генетически это аллювиальные, пролювиальные, пролювиальные континентальных дельт постоянных рек, пролювиальные конусов выноса, ледниковые, водно-ледниковые, болотные отложения. Состав пород многообразен: торфы, илы, глины, супеси, суглинки, пески, гравий, щебень, дресва, галечники, глыбы и валунники.

Таблица физических свойств геологических образований района

Геологические подразделения	Плотность, г/см ³	Магнитная восприимчивость, $n \times 10^{-6}$ ед. СГС	Естественная остаточная намагниченность, $n \times 10^{-6}$ ед. СГС	Удельное электрическое сопротивление, Ом • м
Хозгонская свита	2,66 (2,34-2,70)	24 (2-326)	2 (0-150)	
Ирунейская свита:				
туфы	2,65 (2,10-2,96)	600 (3-4400)	225	
осадочные породы	2,63 (2,31-2,97)	980 (1-3980)	548	
кремнистые породы	2,69 (2,45-2,99)	366 (1-2870)	108	
Васильевская толща	2,54 (2,10-2,75)	320		2800
Асачинская толща	2,41	122	37	750
Южно-быстринский ВК эффузивные породы	2,65 (2,58-2,80)	4100 (90-8200)	1450 (30-4969)	
Карымшинский ВК:				
риолиты	2,2	352 (20-550)	630 (35-2430)	
дациты	2,52	563 (50-1610)	1280 (10-4100)	2200
игнимбриты риодацитов	2,51	230 (15-900)	378 (10-1140)	4500
туфы дацитов	2,41	410 (330-1200)	810 (50-1450)	
Начикинский ВК покровные образования:	-	-	-	
базальты и андезибазальты	2,55 (2,15-2,85)	3041 (36-5100)	1730 (40-17000)	
андезиты	2,48 (1,85-2,86)	1644 (0-5000)	1671 (0-39000)	
дациандезиты	2,42 (1,94-2,65)	1310 (180-2900)	2996 (120-47000)	
дациты	2,46 (2,25-2,65)	843 (26-1600)	1966 (200-28000)	
туфы базальтов	2,18 (1,65-2,67)	1579 (15-2300)	719 (210-2800)	
Левоопалинский и сарайненский ВК	2,53 (2,10-2,74)	1580 (30-3000)	5270 (11-18000)	
Левоандриановский комплекс кварцевые монзониты	2,71 (2,58-2,81)	1808 (18-3900)	118 (1-300)	

Примечания: курсивом показаны средние значения, в скобках диапазон (мин. – макс.). Источник: составлено автором на основе [2, с. 144–146].

Обращает на себя внимание магнитность пород кайнозойских вулканических комплексов (таблица). Кроме магнитной восприимчивости, ответственной за индуктивную намагниченность современным полем, для многих разновидностей пород наблюдается изменяющаяся в большом диапазоне величина естественной остаточной намагниченности (ЕОН), которая формировалась во время образования пород. Если породы намагничивались в периоды с различной полярностью внешнего поля Земли, то суммарный вектор может сильно зависеть от направления вектора ЕОН. Это обстоятельство, вероятно, и отразилось в изменчивости наблюдаемого магнитного поля при наземной съемке.

Влиянием вектора ЕОН, противоположного современному полю, можно объяснить отмечаемые над крупными субвулканическими телами дацитов карымшинского комплекса контрастных отрицательных магнитных аномалий [2, с. 70]. Покровная же фа-

ция комплекса состоит из мелких обломков. Остаточные векторы за счет смещений отдельных обломков (магнитов) разнонаправлены в пространстве, и этот эффект, если и проявился, то незначительно. Поэтому поле над ними более плавное и низкой интенсивности. Описанная особенность магнитных свойств дает возможность по магнитным аномалиям выявить под чехлом рыхлых отложений вероятные на глубине субвулканические тела карымшинского комплекса. Сами интрузии и их питающие системы (каналы) являются источником локальных глубинных гидротерм в районе. Вышесказанное подтверждается магнитным моделированием разрезов.

Апачинская геотермальная система [2, с. 109] состоит из естественных источников и двух скважин, пробуренных вблизи них. Источники находятся на левом берегу реки Шикова, состоят из 15 грифонов, сконцентрированных в трёх группах. Температура основных грифонов 69–72 °С.

Общий дебит естественных выходов 8–14 л/с. В 450 м к востоку от источников пробурена скважина А-1 глубиной 507 м. В интервале 293–507 м вскрыта зона притока термальной воды в вулканогенно-кремнистых породах позднего мела и миоценовых вулканитах. Скважина Г-3 глубиной 1205 м, расположенная в 350 м юго-западнее источников, вскрыла термальные водопритоки в меловых породах начиная с 370 м. Температура повышается с глубиной – от 52 до 77,6 °С. Максимальные водопритоки наблюдаются в наиболее трещиноватых породах. По химическому составу Апачинские гидротермы относятся к хлоридным, гидрокарбонатно-натриевым, азотным, с повышенным содержанием кремнезема, слабощелочным, пресным (Чебыкин, 2002¹).

Собственно Апачинское месторождение расположено в узле пересечения разломов субширотного и северо-восточного направлений. Разломы большей частью предполагаются по данным наземных геофизических исследований методами магниторазведки, электроразведки и сейсморазведки². Циркуляция термальных вод связывается преимущественно с северо-восточными разломами, но не по всей массе вскрытых скважинами пород, а только по отдельным трещинам и трещинным зонам. По аналогии с другими однотипными месторождениями движение термальных вод к поверхности считается восходящим, субвертикальным. Очаг разгрузки расположен в месте расположения источников. Исследования гидрохимическим методом дают основание предполагать, что, кроме известных источников, возможна скрытая разгрузка гидротерм до 30 л/с (Звонцов и др., 1973³).

Существующая концептуальная модель месторождения выглядит следующим образом: водное питание осуществляется атмосферными осадками из области питания, расположенной к юго-востоку от месторождения, в отрогах хр. Гладкого. Из области питания к области разгрузки инфиль-

трационные воды на глубине мигрируют в северо-западном направлении, где они концентрированным потоком перемещаются к дневной поверхности. Нагрев холодных вод, проникающих на глубину, происходит за счет регионального теплового поля, затем за счет локального источника тепла, в качестве которого предполагается высокотемпературный флюид. За источник флюида принимается неглубокий магматический очаг. Также существует мнение, что источником флюида могут служить интрузии габбро-диоритов (Сысоев и др., 1988⁴).

Как видно из изложенного, кроме собственно Апачинского месторождения, несмотря на множество проведенных на поверхности различных исследований, гидрогеологическая модель района базируется на самых общих гипотетических представлениях, особенно в глубинной части. Поэтому целесообразно изучение проницаемости верхней части земной коры вокруг месторождения методами пространственной статистики данных дистанционных съемок. Это позволит добавить определенности в модель, уточнить положение зон и узлов проникновения атмосферных вод на глубину, прогнозировать наиболее вероятные места циркуляции гидротерм.

Целью исследований является создание объемной модели раздробленности верхнего слоя земной коры в районе Апачинской геотермальной системы.

Материалы и методы исследования

Для линеamentного анализа были использованы материалы гравиметрической и аэромагнитной съемок масштаба 1:200 000 [2], радарных космических съемок SRTM [6], ArcticDEM [7]. В качестве инструментов выявления линеamentов в аномальных геофизических полях и радарных снимках рельефа были применены плагины анализа сетки CET из программного комплекса Geosoft Oasis Montaj (разработчики Peter Kovesi, Jason C. Wong, Mike Dentith, and Shih Ching, FuEun-Jung Holden. Geophysics and Image Analysis Group Centre for Exploration Targeting CET The University of Western Australia) [8]. Плагины CET являются инструментом для анализа текстуры и структуры

¹ Чебыкин И. Н. Отчет о результатах работ на термальные воды на Апачинской геотермальной площади в 1995-2001 гг. с подсчетом эксплуатационных запасов термальных вод (по состоянию на 05.05 2001 г.). ООО «Аква», Елизово, 2002.

² Зайцев И. М., Осьмакова А. М., Бубнов В. Д., Матвеев А. Д. Отчёт о комплексных геофизических исследованиях в районе Апачинского термопроявления в 1971. ГФЭ КТГУ, п. Елизово, 1972.

³ Звонцов Ю. Н. (отв. исполнитель). Геологическое строение и гидрогеологические условия района Апачинских гидротерм (часть листа N-57-XXVI). Отчёт о геологосъемочных и гидрогеологических работах масштаба 1:50000 в районе Апачинских гидротерм, проведенных Апачинским гидрогеологическим отрядом в 1971-1972 гг. КТГУ, ГПП, п. Термальный, 1973.

⁴ Сысоев Б. К. Отчет о поисковых геофизических работах в пределах Паратунского месторождения гидротерм и его флангах, а также опытно-методических работах по обобщению геофизических исследований при поисках термальных вод по объектам Камчатской области, проведенных Паратунской партией в 1987-1988 гг. в 2х книгах. Книга 2. Обобщение геофизических исследований при поисках термальных вод по объектам Камчатской области. ЕГФЭ, Елизово, 1988.

сеток (гридов) исходных цифровых данных о рельефе, геофизических аномалиях, определения линеаментов, нахождения границ и пороговых значений областей с различной морфологией и внутренней структурой.

Текстурный анализ. Для исследования текстуры входной сетки данных проводится вычисление энтропии и стандартного отклонения в скользящем окне.

Энтропия. Плагин *энтропия* измеряет в наборе данных статистическую случайность значений окрестности. Сначала данные квантуются в отдельные ячейки, а затем анализируется общее количество различных значений, полученных в результате этого квантования. Для каждой ячейки i в окрестности размером $k \times k$ формируется гистограмма и вычисляется энтропия по формуле:

$$E = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i, \quad (1)$$

где вероятность p получается после нормализации гистограммы n ячеек.

Выходная сетка содержит реальные значения, указывающие величину случайности, проявляемую текстурой в окрестности каждой ячейки. Участки исследуемой территории с высокой статистической случайностью обладают высоким уровнем энтропии, участки с небольшим уровнем случайности имеют низкую энтропию.

Стандартное отклонение. Стандартное отклонение предоставляет оценку локального изменения входных данных. Для каждого местоположения вычисляется стандартное отклонение значений данных в локальной окрестности. Значимые признаки проявляют высокую изменчивость по отношению к фоновому сигналу. Для окна, содержащего N ячеек, среднее значение которых равно μ , стандартное отклонение σ от значений ячейки x_i задается формулой:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (2)$$

В выходных данных значения σ , приближающиеся к нулю, указывают на очень малую вариацию, тогда как большие значения – на высокую вариацию.

На следующем этапе обработки проводится выявление линейных элементов в структуре исследуемых данных – линеация. Для этого используются плагины: *фазовая симметрия*, улучшающая внешний вид линейных элементов, и *соответствие фаз*, которое находит разрывы (или ребра).

Методы обнаружения границ на основе градиента обнаруживают границы ступеней большинства магнитных и гравитационных аномалий, которые представляют собой полосы плавно меняющихся значений. Преобразование *фазовой конгруэнтности* представляет собой метод обнаружения границ, не зависящий от контраста, основан на наблюдении локальных пространственных частот. В методе используется тот факт, что краевые особенности возникают в точках, где компоненты локальной частоты максимально совпадают по фазе. После линеации проводится линейная векторизация.

Для генерации скелетных оценок объектов сетки существуют три способа, реализованные в соответствующих плагинах: *пороговое значение амплитуды*, *скелетонизация*, которые сводят области объектов к тонким линиям; *скелет в векторы*, который экспортирует тонкие линии скелета в векторы. Пороговое значение амплитуды используется для поиска гребней. Низкие значения подавляются, в то время как точки локальных максимумов сохраняются. Для каждой ячейки в сетке анализируются значения на расстоянии r в направлениях, перпендикулярных ориентации локального объекта, которая представляет собой направление «горного хребта» или «долины». Если ячейка имеет значение большее, чем значения по обе стороны от нее, ячейка сохраняется, поскольку это локальный максимум, в противном случае оно устанавливается равным нулю. При использовании порогового значения ячейки в сетке помечаются либо как ячейки «переднего плана», либо как ячейки «фона» в зависимости от того, больше или меньше значение ячейки заданного порогового значения. Определение порога амплитуды применяется к выходным данным о фазовой симметрии и фазовой конгруэнтности, отображающих только линии тренда.

Скелетонизация. Этот плагин создает базу данных Geosoft (.GDB) с координатами точек вдоль каждой скелетонизированной линии и наносит эти линии на карту.

Структурный анализ. Плотность возникновения контактов. Плагин генерирует карту с высокой плотностью структурных контактов, которые включают сочленения и пересечения различных конструкций, где сами конструкции имеют значительные изменения ориентации.

Энтропия ориентации – формируется гистограмма ориентаций, и энтропия вычисляется по формуле (1). Плагин выделяет области, где структуры расположены в широ-

ком диапазоне ориентаций, указывая области потенциальной структурной сложности.

Сжатие динамического диапазона с сохранением фазы. Этот фильтр предназначен для выявления едва заметных особенностей на изображениях с высоким динамическим диапазоном, таких как сетки аэромагнитных полей. Результаты обработки приведены на рис. 2.

После редактирования shape-файлов и удаления заведомо ложных линеаментов, образованных за счет краевых эффектов вдоль рамки исследованной площади синтезирована сводная схема линеаментов. Эта схема далее служила основой для построения объемной модели раздробленности коры по специальной методике (см. ниже).

Для количественной интерпретации геофизических аномалий, построения разрезов и магнитного моделирования были использованы материалы геофизических работ масштаба 1:25 000 на участке «Горячие ключи». Аналоговые карты изодинам ΔZ (рис. 3а) и изолиний ρ_k (рис. 4а) электропрофилирования установкой А300_М100N_300В были

оцифрованы и преобразованы в грид-файлы по сети 100×100 м. Магнитное поле из единиц напряженности (мЭ) переведены в единицы магнитной индукции (нТл).

Грид-файл магнитного поля был использован при анализе аналитического сигнала и определения особых точек. Для нахождения глубин методом деконволюции Эйлера была рассчитана сетка (рис. 3б) аналитического сигнала на основе предварительно построенных сеток (гридов) производных dx , dy , dz . Аналитический сигнал представляет собой квадратный корень из суммы квадратов производных по координатным осям x , y и z . Аналитический сигнал полезен при определении местоположения краев тел магнитных источников, особенно там, где остаточная намагниченность усложняет интерпретацию. Результаты интерпретации вошли в стартовую модель разреза. Все расчеты и построения проведены программным комплексом Geosoft Oasis Montaj и модулем Euler-3D deconvolution. Моделирование проведено программой GM-SYS Profile.

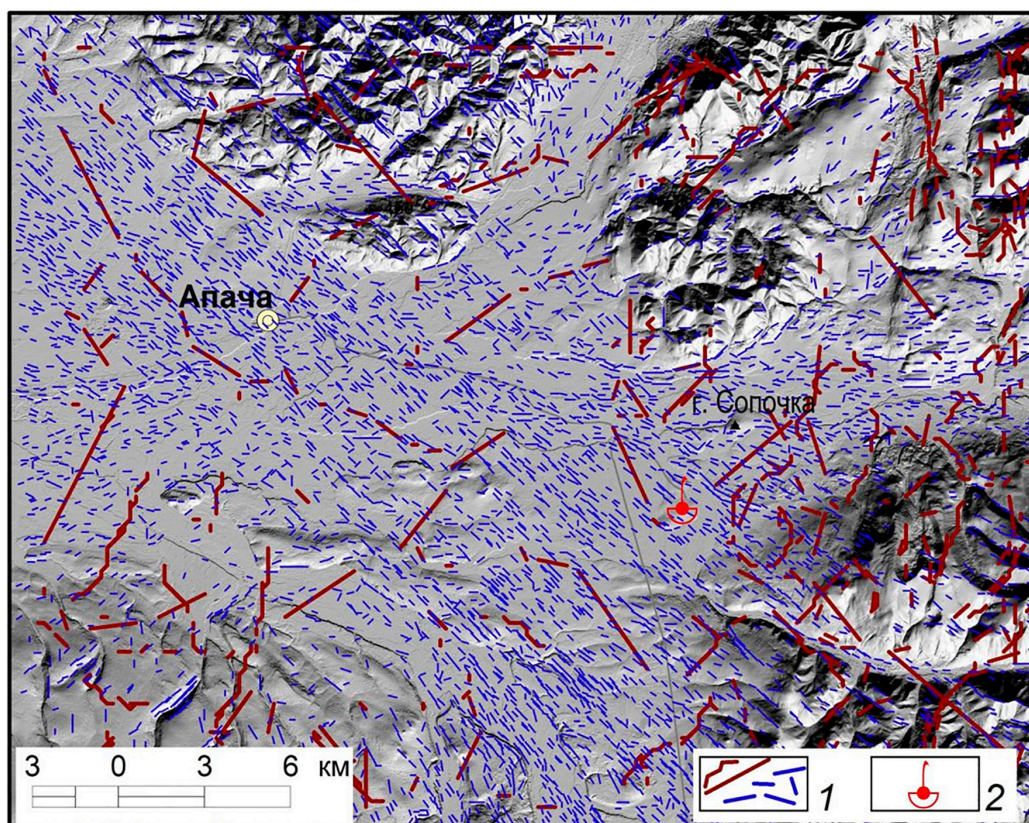


Рис. 2. Схема линеаментов результатов обработки материалов региональных геофизических и радарной съемок: 1 – линеаменты, выделенные по аномалиям Буге и $(DT)_a$ (коричневые линии) и рельефа (синие линии); 2 – выходы термальных вод на дневной поверхности
Примечание: составлено автором по результатам данного исследования

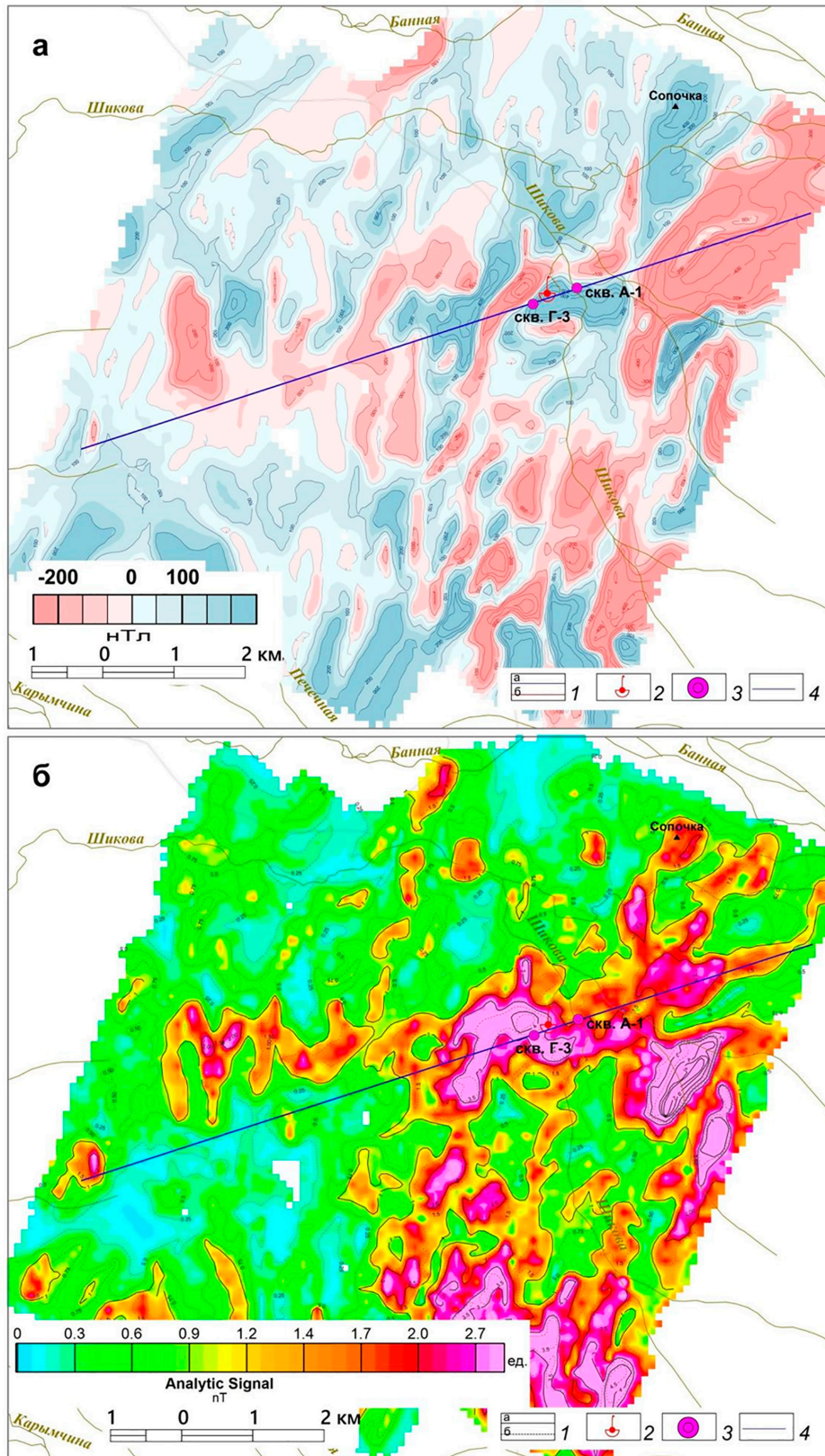


Рис. 3. Карты аномалий магнитного поля (а) и аналитического сигнала (б): 1 – изолинии: на схеме а – положительные (а), отрицательные (б), на схеме б – основные (а), промежуточные (б); 2 – выходы термальных вод; 3 – скважины; 4 – линия разреза
 Источник: составлено автором на основе (Зайцев и др., 1972) и по результатам данного исследования

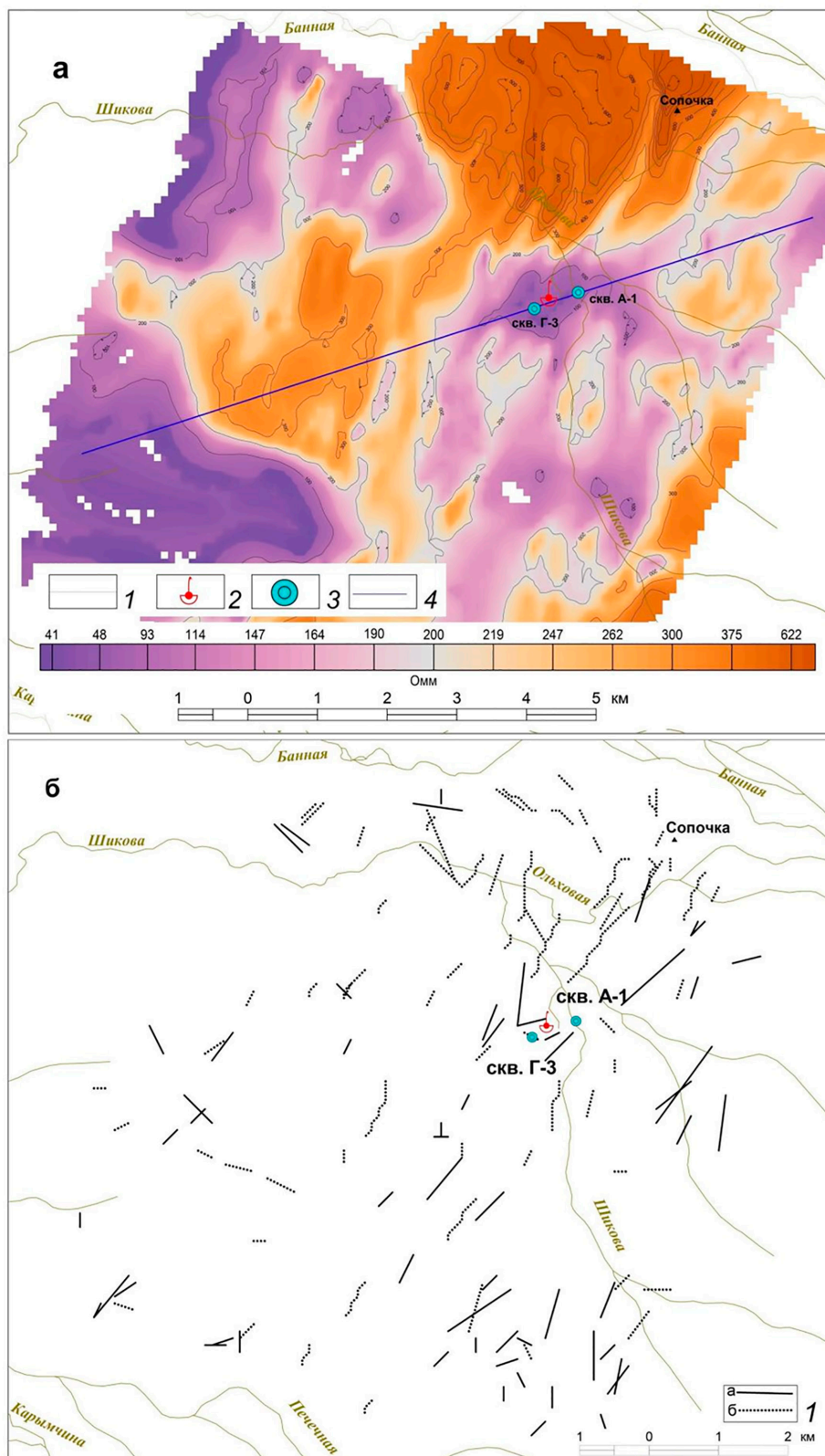


Рис. 4. Карта кажущегося сопротивления симметричного электропрофилирования (а) и линеаментов (б). 1 – изолинии: на схеме а – ρ_a , Ом · м, на схеме б – линеаменты, выделенные по результатам магнитной съемки (а) и электропрофилирования (б); 2 – выходы термальных вод; 3 – скважины; 4 – линия разреза
 Источник: составлено автором на основе (Зайцев и др., 1972) и по результатам данного исследования

Цифровой материал геофизических съемок масштаба 1:25 000 был обработан по вышеописанной методике (рис. 4б), что позволило провести оценку проницаемости самого верхнего слоя геосреды.

Методика объемного моделирования проницаемости земной коры

Особенности подхода 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. Выделяемые на земной поверхности линеаменты отождествляются с разломами и понимаются как отражение тектонической ситуации всей кристаллической части земной коры [9]. Вышесказанное можно распространить и на линеаменты, выделяемые по радарным снимкам рельефа и особенностям геофизических аномалий. Раздробленность геосреды формируется совокупностью трещин, образующихся в зоне динамического влияния разлома. Областью динамического влияния [10, с. 98] является часть окружающего разлом пространства. Линеаменты отражают пространственное положение осевых линий этих зон. Отдельные трещины, из которых состоят зоны динамического влияния, и ширина самих зон не определяются, так же как тип разлома и глубина его проникновения. Скрытые разломы в модели не представлены, кроме разломов по геофизическим аномалиям. Это могут быть, например, древние разломы в фундаменте картируемых на поверхности геологических структур или субгоризонтальные разломы на глубине. В линеаментах может быть частично представлена трещиноватость нетектонического происхождения (контракционная, литогенетическая). «Геофизическими» линеаментами может отражаться трещиноватость на контакте интрузий с вмещающей средой. В совокупности все это формирует проницаемость коры. Если дать количественную оценку линеаментов, то можно определить проницаемость среды и вероятные пути миграции подземных вод. Ниже приведено краткое описание одного из способов такой пространственной количественной оценки.

Эмпирическое правило, установленное Ю. В. Нечаевым на образцах различных горных пород: трещиноватость, видимая на одной грани кубика породы, отражает степень трещиноватости всего образца [9].

Основываясь на принципах подобия, можно применить это правило при рассмотрении кубических блоков земной коры.

Дать количественную оценку проницаемости некоторого объема геологической среды можно с помощью коэффициента тектонической раздробленности. Коэффициент раздробленности (Kp) 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 (Vm) определяется как сумма произведений длины, ширины раскрытия и глубины проникновения отдельных трещин:

$$Vm = \sum lbh, \quad (3)$$

где l , b и h – длина, ширина и глубина проникновения, соответственно. Тогда:

$$Kp = \sum lbh/a^3. \quad (4)$$

Если совместить верхнюю грань куба с дневной поверхностью и спроецировать на нее выявленные линеаменты, то эти данные можно использовать для определения коэффициента раздробленности. Однако измерить можно только длину линеамента (l). Ширина (b) не определяется, но может быть принята равной некоторой постоянной средней величине для локализованной территории, например равной 1 в метрике карты линеаментов. Также предположим, что линеаменты характеризуют разломы и их глубина превышает величину a , тогда при $b = 1$ и $h = a$ формула (4) примет вид:

$$УДЛ = \sum l/a^2, \quad (5)$$

где в числителе сумма длин линеаментов на верхней грани куба, в знаменателе ее площадь. Вычисляемый по этой формуле параметр равен удельной длине линеаментов (УДЛ) и показывает степень раздробленности блока коры кубической формы, одна из граней которого находится на земной поверхности. Учитывая отмеченное выше правило и считая однородными реологические свойства среды для каждого уникального кубического блока, вычисленные для верхней грани УДЛ можно соотнести с центром куба. Это позволяет задавать глубину исследования путем изменения длины сторон кубических ячеек.

Исходными материалами для создания объемной модели проницаемости стали схемы линеаментов, полученных при обработке материалов региональных геофизических (гравиметрической и аэромагнитной) и радарных съемок рельефа (рис. 2). Для ха-

характеристики проницаемости самого верхнего слоя были использованы линеаменты, выявленные по материалам детальных геофизических исследований в масштабе 1:25 000 (рис. 4б). Для этих данных, судя по глубинам до особых точек, определенных методом деконволюции Эйлера, линеаменты характеризуют слой от дневной поверхности до глубины 300–500 м ниже уровня моря.

Вычисления УДЛ проводились в следующем порядке. Сначала была составлена цифровая карта линеаментов в прямоугольных координатах СК-42. На карту накладывался прямоугольный шаблон-сетка с узлами, расположенными через 1 км. Образованные квадратные клетки являлись верхними гранями кубов. В этом случае площадь элементарной ячейки равна 1 км², а центры кубов располагаются ниже верхней грани на расстоянии 0,5 км. Затем, в каждой клетке, подсчитывалась суммарная длина линеаментов и УДЛ по формуле (5) и определялись координаты центров клеток. 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 за нулевую отметку принят уровень моря. Но 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, то есть Z-координаты центров кубов были «приподняты» на соответствующую величину.

После создания матрицы (файла) УДЛ для кубов 1×1×1 км размер ребра элементарного куба увеличивался и расчеты повторялись. Шаг увеличения расстояния между узлами накладываемой квадратной сетки составил 0,2 км, что соответствует масштабу исходных карт (1 мм карты – 200 м), и это позволило увеличивать глубину с шагом 0,1 км. Всего было проведено 30 циклов вычислений УДЛ. Эти параметры обеспечили исследование проницаемости продуктивного слоя, доступного для бурения разведочных скважин. Вся цифровая обработка данных проведена в ГИС ArcView [11].

В итоге получены матрицы (файлы), характеризующие послойно раздробленность в интервале от дневной поверхности до глубины 3 км. Далее все файлы были слиты в единый файл базы данных (БД) УДЛ. Эта база использована для создания объемной

модели раздробленности. Объемная модель построена интерполяцией значений УДЛ всех точек БД. Интерполяция проведена методом «3D Кригинг» стандартным модулем Oasis Montaj Geosoft Software. Так получено объемное изображение раздробленности с размером ребра вокселя (элементарного изображаемого куба объема) 0,2 км. Из 3D-модели получены горизонтальные и вертикальные сечения в виде карт и разрезов.

Глубинность исследования достигается увеличением размера элементарных кубических ячеек, на верхней грани которых определяется УДЛ. Этот прием представляет по своей сути зондирование на глубину. Чем больше размер кубической ячейки, тем больше вклад в УДЛ дают линеаменты (разломы), имеющие региональное и глубинное распространение, а доля небольших «мелких» разломов уменьшается.

Такая же процедура была проделана с картой линеаментов детальных геофизических работ. Была использована шаблон-сетка 0,2×0,2 км, шаг увеличения 0,2 км и 10 циклов вычислений УДЛ. В результате построены модель для самой верхней части исследованной территории и срез на горизонте 100 метров выше уровня моря.

Результаты исследований и их обсуждение

Обзорная объемная модель раздробленности бассейна р. Шикова характеризует проницаемость верхних горизонтов земной коры в междуречье Плотникова – Банная – Карымчина и представляет собой совокупность кубических блоков размером 200×200×200 м с различной величиной УДЛ. Общий вид раздробленности коры представлен на блок-диаграмме (рис. 5а).

Как видно, исследованный район весьма неоднороден по степени раздробленности геологической среды как по латерали, так и на глубину. Это предполагает и значительное различие проницаемости в разных частях территории. Величина УДЛ изменяется в широких пределах – от 0,1 до 7 ед. Абсолютно «целых» блоков нет. Характерно мозаичное чередование разрушенных и относительно целых блоков. Многие наиболее раздробленные блоки на глубине образуют единые проницаемые зоны. Сквозную в модели (более 3 км) глубину проникновения имеют раздробленные блоки в долине р. Банная и блок к востоку от г. Сопочка. Обширная проницаемая зона охватывает северные склоны хр. Гладкий.

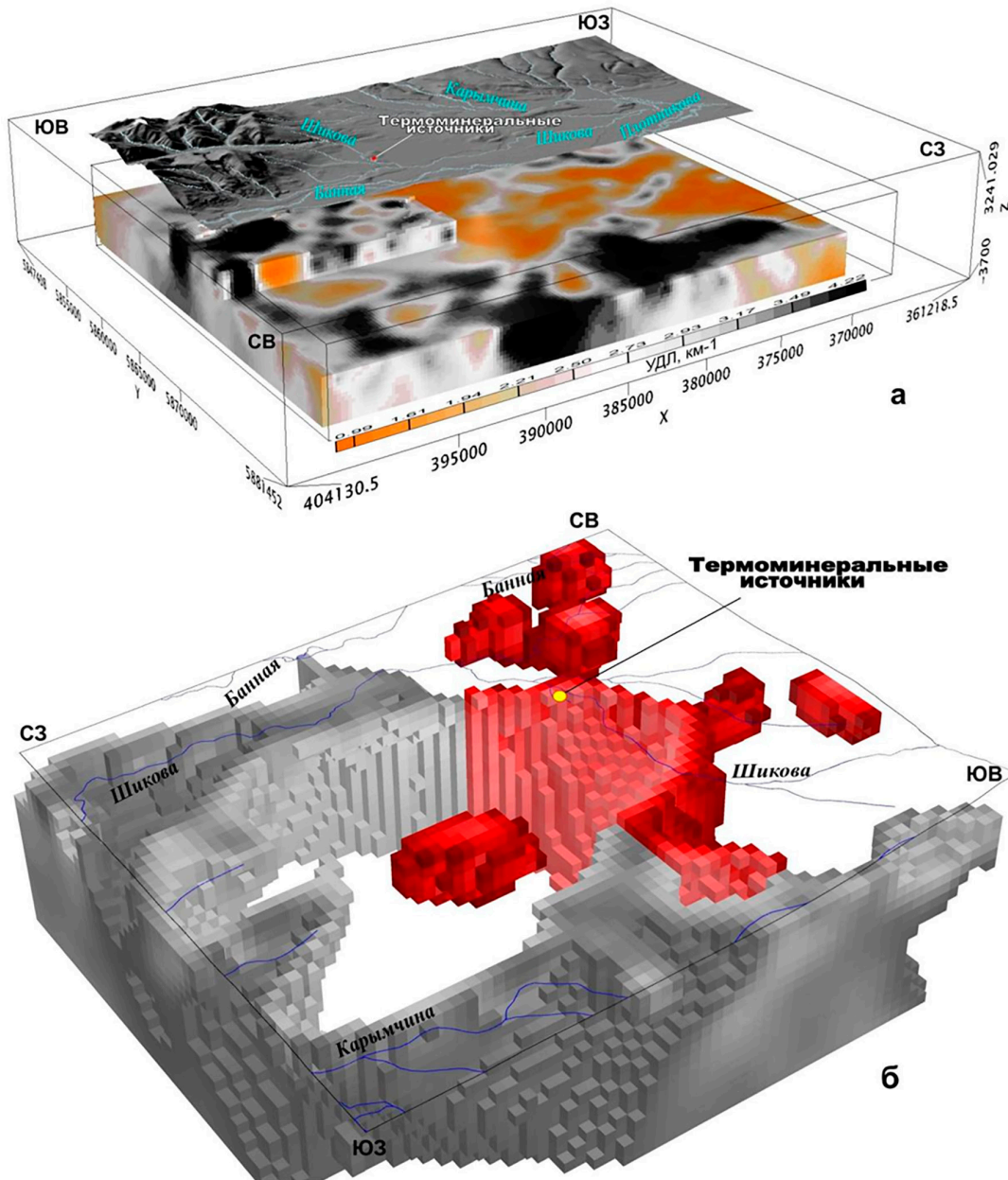


Рис. 5. Общий вид объемной модели раздробленности в бассейне р. Шикова, вид с северо-востока (а), и блоки модели, где наиболее вероятна циркуляция подземных вод, в т. ч. термальных (выделены красным цветом), вид с юго-запада (б). Часть ячеек погашена, размер ребра элементарных кубических ячеек 0,2 км. На диаграмме (а) для наглядности поверхность с рельефом приподнята на 2 км и драпирована изображением радарной съемки
Примечание: составлено автором по результатам данного исследования

Второй глубинный участок с аномальной раздробленностью представлен широтной полосой в северной части исследованной территории: хребет Дальний – верхнее течение р. Ушаган. Еще одна глубинная проницаемая зона, состоящая из двух изометричных узлов, располагается в нижнем течении р. Карымчина. Можно предполагать, что через эти проница-

емые участки атмосферная вода наиболее активно проникает вглубь земной коры, т. е. они являются «питающими» системами холодных метеорных вод. На глубине холодные воды смешиваются с магматогенной водой и, возможно, с глубинным флюидом. Далее горячая вода по открытым трещинам разломов мигрирует к дневной поверхности.

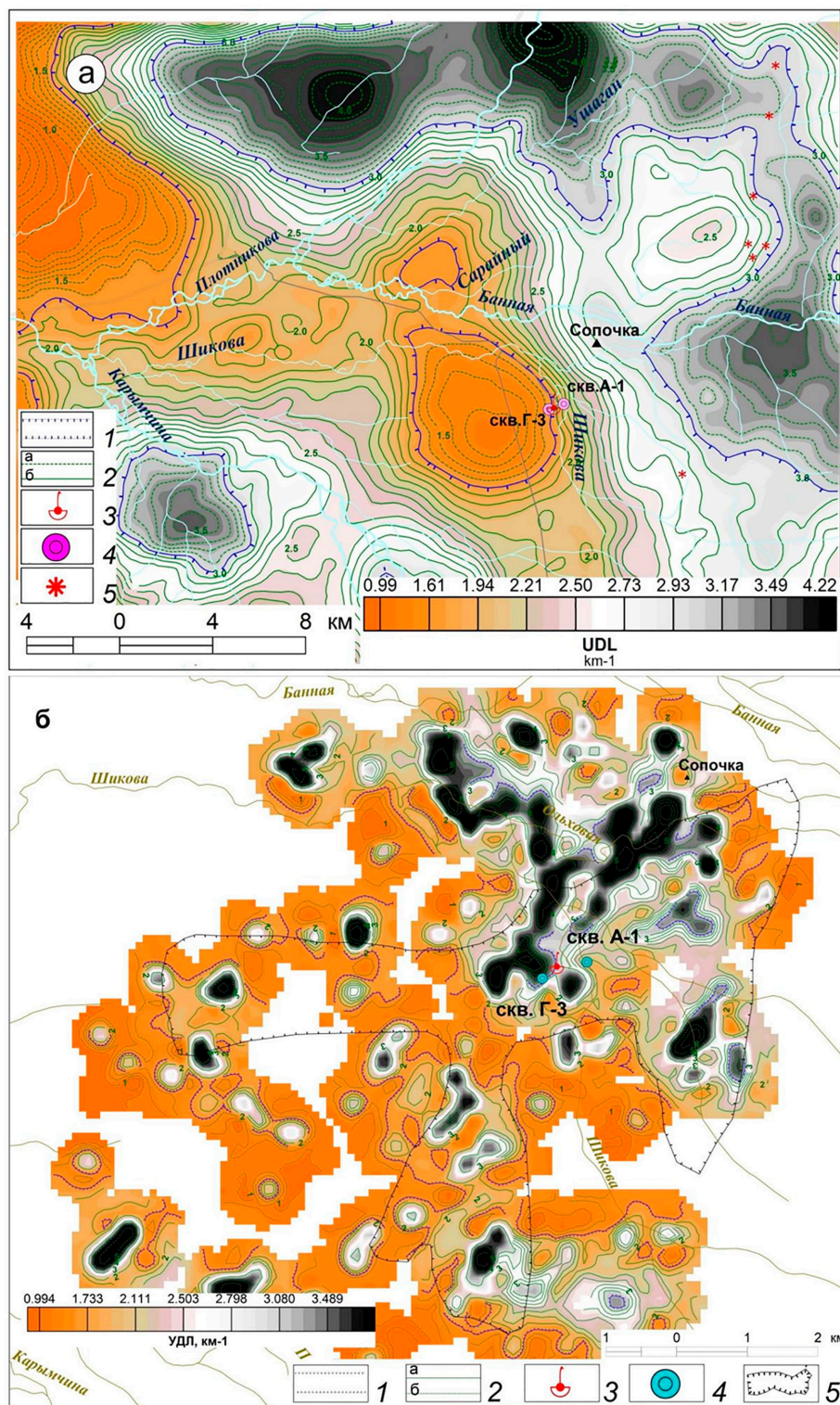


Рис. 6. Горизонтальный срез модели раздробленности коры на горизонтах -3 км (а) и 0,1 км (б). 1 – границы перспективных на термоминеральные воды переходных зон между сильно и слабо раздробленными блоками. Границы проведены по среднему в срезе значению УДЛ \pm дисперсия. Сечение изолиний 0,2 ед. УДЛ; 2 – изолинии УДЛ, км^{-1} внутри перспективных участков (а), за пределами перспективных участков (б); 3 – выходы термальных вод; 4 – скважины; 5 – шлаковые конусы (на схеме а), площадь, рекомендуемая для поисков перспективных аномалий проводимости методами электроразведки (на схеме б)
Примечание: составлено автором по результатам данного исследования

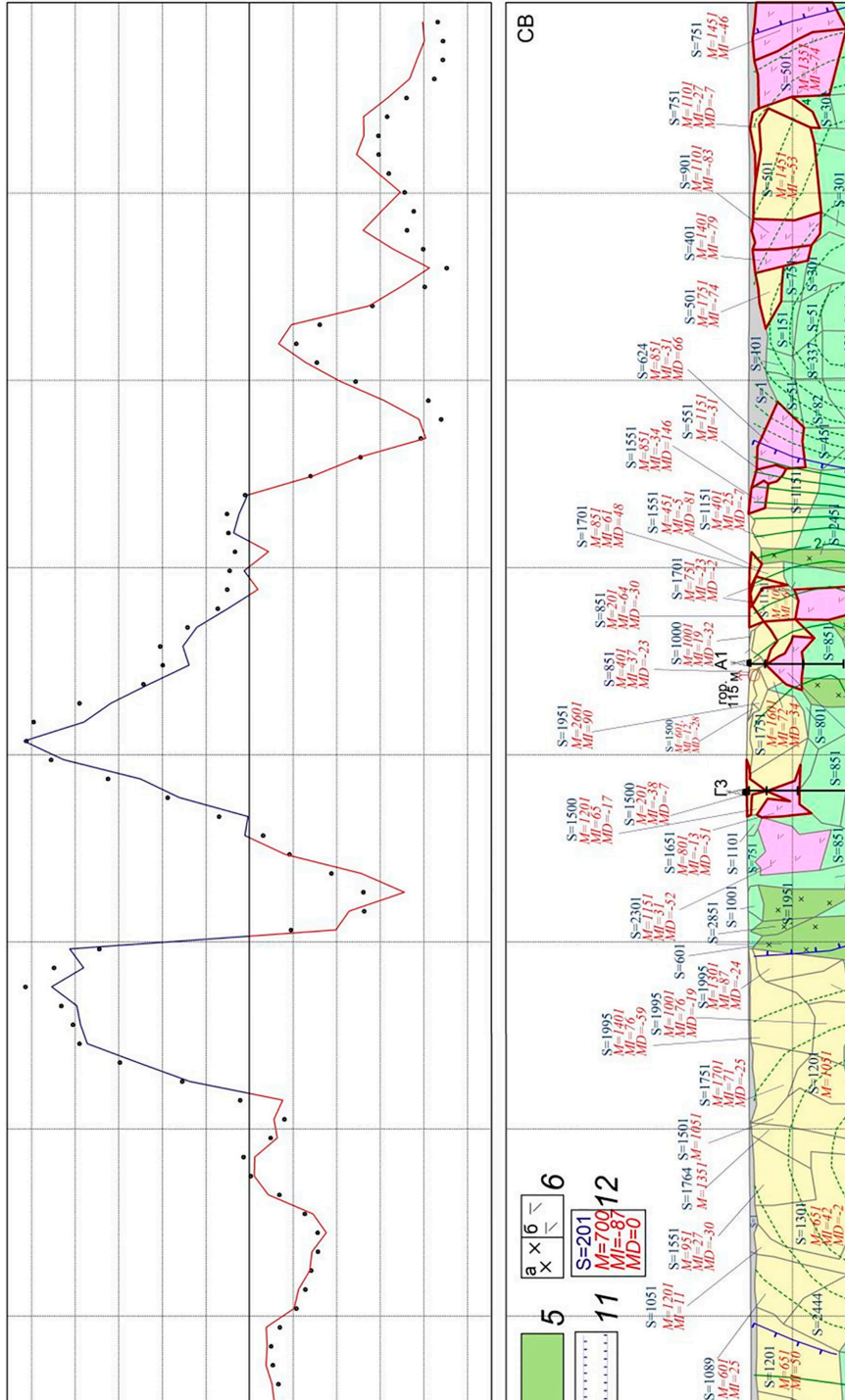


Рис. 7. Геомагнитная модель. 1 – рыхлые четвертичные отложения; 2 – покровная фация вулканогенных и вулканогенно-осадочных отложений кайнозойского возраста (преимущественно карыминского риадитового ВК); 3 – субвулканические тела кислого и среднекислого состава, в ареале развития образований покровной фации карыминского ВК; 4 – вулканогенно-кремнистые отложения позднего мела; 5 – субвулканическая интрузия среднего состава; 6 – преимущественно андезиты, диоритовые порфириты, диориты (а), преимущественно дациты, риадиты (б); 7 – выходы на поверхность термоминеральных вод; 8 – границы блоков модели с разными магнитными свойствами (а), блоки, в которых вектор остаточной намагниченности направлен в верхнее полупространство (б); 9 – график теоретической аномалии магнитного поля; 10 – изолинии УДЛ, км² за пределами перспективных участков (а) и внутри перспективных участков (б); 11 – границы перспективных на термоминеральные воды переходных зон между сильной и слабо разорбленными блоками. Границы проведены по среднему в разрезе значению УДЛ ± дисперсия. Сечение изолиний 0,2 ед. УДЛ; 12 – магнитные параметры, сверху вниз: магнитная восприимчивость (S), остаточная намагниченность (M), наклонение вектора остаточной намагниченности (MD). S и M приведены в ед. тiсто-SGS.
Примечание: составлено автором по результатам данного исследования

Источником магматогенной воды могут служить кислые субвулканические интрузии карымшинского вулканического комплекса и питающие их каналы. Косвенно о наличии таких интрузий свидетельствуют контрастные отрицательные аномалии магнитного поля, выявленные в бассейне р. Шикова (рис. 3а), и повышенное содержание кремнекислоты в воде апачинских гидротерм. Положение наиболее ярких аномалий этого типа хорошо видно на карте аналитического сигнала (рис. 3б). Отрицательные аномалии обязаны противоположным современному полю намагничиванию пород интрузий. Это предположение было проверено магнитным моделированием через район источников. При моделировании методом подбора вычисляется теоретическая аномалия по гипотетическому корректируемому разрезу и сравнивается с графиком, наблюдаемым приборами. Действительно, на участках отрицательных аномалий в разрезе выделяются тела с вектором намагничивания, направленным в верхнее полупространство.

Для этих тел существенный вклад в направление вносит вектор естественной остаточной намагниченности. В разрезах скважин А-1 и Г-3 участки пересечения совпадают с «горизонтом» липаритов-дацитов. Скорее всего, это апофизы от расположенных близи субвулканических тел, которые и моделируются по аномальному полю. Таким образом, можно считать, что в местах интенсивных отрицательных аномалий на глубине есть потенциальные источники тепла в виде корней (питающих каналов) субвулканических интрузий карымшинского комплекса, а в блоках, которые их вмещают, вероятно циркуляция гидротерм (рис. 5б).

Максимально раздроблен самый верхний слой, от поверхности коренных пород до глубины примерно 1000 метров ниже уровня моря. Это объясняется тем, что кроме тектонических трещин разрушения горных пород добавляется еще влияние процессов «выветривания», которые вносят свою долю в раздробленность среды и выявляются как линеаменты при анализе рельефа.

Линеаментный анализ космо- и аэроснимков в бассейне реки Налычева, на востоке Камчатки, обнаружил пространственную закономерность – выходы термальных вод на дневную поверхность расположены в краевых частях блоков с аномально высокой раздробленностью, в зоне перехода к слабо раздробленным блокам [12]. На острове Парамушир такая зависимость

наблюдается для Верхне-Юрьевских термальных источников [13; 14]. В центральной части острова Итуруп также большинство источников расположены в переходной зоне [15; 16]. Относительно «целые» блоки, как правило, содержат внутри интрузии и эктрузии. На Камчатке это тела преимущественно кислого состава, а на Курильских островах – основного. Для оценки ширины зон опытным путем установлено, что большинство выходов гидротерм расположены в полосе шириной \pm дисперсия от среднего значения УДЛ. Следуя этому правилу, на срезах (рис. 6) и разрезе (рис. 7) магнитной модели были проведены границы перспективных участков, где наиболее вероятно обнаружение термоминеральных вод.

Заключение

Методами пространственной статистики изучена проницаемость земной коры Апачинской геотермальной системы. В результате обработки цифровых данных дистанционных зондирований (радарных съемок рельефа, гравиметрической, аэромагнитной съемок, электропрофилеирования и наземной магниторазведки) создана объемная модель раздробленности геологической среды до глубины 3 км ниже уровня моря. Анализ сеток (гридов) аномальных геофизических полей и радарных снимков рельефа выявил линеаменты, которые характеризуют трещины разного генезиса. По длине и плотности линеаментов вычислен удельный коэффициент раздробленности в элементарных кубических блоках переменного размера. Совокупность блоков образует объемную модель исследованного участка земной коры. В модели отчетливо проявились места проникновения атмосферной воды в земную кору на значительную глубину, где возможно ее смешение с горячими магматогенными водами и глубинным флюидом. Области питания метеорными водами расположены на северных склонах хр. Гладкий, в нижнем течении р. Карымчина, на хребте Дальний и в верхнем течении р. Ушаган.

Пути фильтрации локальных глубинных гидротерм служат питающие каналы кислых субвулканических интрузий карымшинского вулканического комплекса. Интрузии не обнажены на исследованной территории, но в магнитном поле отражаются контрастными отрицательными аномалиями. По этому признаку в модели раздробленности выделены блоки, которые содержат интрузии. В блоках наиболее вероятно циркуляция термальных вод и, при

наличии открытых трещин, возможна их миграция к дневной поверхности. Открытые трещины образуются на краях поднятых блоков фундамента. В этой связи одним из перспективных участков представляется юго-восточный фланг выступа меловых пород г. Сопочка. Также внутри блоков на контактах вмещающих толщ с кислыми субвулканическими телами карымшинского вулканического комплекса вполне вероятны замкнутые системы циркуляции горячих рудоносных растворов и образование золоторудных кварцевых жил. Жилы могут быть подобны жилам Порожистого рудного поля, расположенного юго-восточнее в 12–15 км. Исходя из изложенного, рекомендуется провести изучение электропроводности геосреды методом магнитотеллурического зондирования до глубины 3–5 км в комплексе с тепловизионной съёмкой. Примерные границы перспективной площади для исследований показаны на рис. 6б.

Список литературы

1. Черных Е. В., Рычкова Т. В. Апачинские термальные источники как часть экосистемы и их рациональное использование // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2009. № 10. С. 54–60. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15604620> (дата обращения: 12.02.2026). EDN: NDMJOX.
2. Боровцов А. К., Ярыш Г. В., Бархатов Ю. В., Щенко В. И., Хасанов Ш. Г. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия Хангарская. Лист N-57-XXVI (Дальний). Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 181 с. URL: http://geo.mfvsegei.ru/200k/DM/DigitalModel_N-57-XXVI.rar (дата обращения: 12.02.2026).
3. Агибалов А.О., Бергаль-Кувикас О.В., Зайцев В. А., Макеев В. М., Сенцов А. А. Взаимосвязь морфометрических параметров рельефа, характеризующих трещиноватость верхней части литосферы, и проявлений вулканизма Малко-Петропавловской зоны // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. № 2. С. 122–133. DOI: 10.21455/GPB2023.2-5. EDN: JPMLSN.
4. Собисевич А. Л., Агибалов А. О., Бергаль-Кувикас О. В., Зайцев В. А., Зыков Д. С., Макеев В. М., Полепук А. В., Сенцов А. А., Шевченко А. В. Развитие методов комплексного морфометрического анализа рельефа для оценки тектонической раздробленности недр // Вулканология и сейсмология. 2024. № 3. С. 59–69. DOI: 10.31857/S0203030624030056. EDN: JQIETW.
5. Сенцов А. А., Собисевич А. Л., Агибалов А. О., Балашов Г. Р., Макеев В. М., Мануилова Е. А., Пузич И. Н., Славина Л. Б. Оценка тектонической раздробленности земной коры Алтае-Саянской области // Геофизические процес-

сы и биосфера. 2025. Т. 24. № 4. С. 120–129. DOI: 10.21455/GPB2025.4-8.

6. Цифровая модель рельефа SRTM. URL: https://www.okmap.org/srtm/version2_1/SRTM3/Eurasia/N52E157.hgt.zip?_gl=1*_mbobfj*_up*MQ..*_ga*NzU0ODQ3Mzk4LjE3NzUyMTM1NTM.*_ga_T1ENF309H9*czE3NzUyMTM1NTMkzbzEkZzAkdDE3NzUyMTM1NTMkajYwJGwwJGgw (дата обращения: 06.02.2026).
7. Цифровая модель рельефа ArcticDEM. URL: http://data.pgc.umn.edu/elev/dem/setsm/ArcticDEM/mosaic/v3.0/2m/79_25/ (дата обращения: 15.02.2026).
8. Eun-Jung Holden, Dentith M., Kovesi P. Towards the Automatic Analysis of Regional Aeromagnetic Data to Identify Regions Prospective for Gold Deposits // Computers & Geosciences. 2008. Vol. 34. № 11. P. 1505–1513. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/computers-and-geosciences/vol/34/issue/11> (дата обращения: 06.02.2026).
9. Нечаев Ю. В. Линеаменты и тектоническая раздробленность. Дистанционное изучение внутреннего строения литосферы. М.: ИФЗ РАН, 2010. 215 с. URL: https://portal.ifz.ru/elibrary/id=ifz_library_838. ISBN: 978-5-91682-007-2 (дата обращения: 06.02.2026).
10. Шерман С. И. Избранные труды: тектонофизика разломообразования и сопутствующих процессов в литосфере. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2017. 1476 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009512382>. ISBN: 978-5-9908560-1-1 (дата обращения: 08.02.2026).
11. Сидоров М. Д. Создание базы данных для объемного изображения тектонической раздробленности земной коры // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 12 (специальный выпуск 17). С. 60–73. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_17_60. EDN: WSWSCP.
12. 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 Publishing, 2nd International Geothermal Conference, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 249. 2019. 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/249/1/012046.
13. 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. DOI: 10.31857/S0016855X20060077/ EDN: LPEHAE.
14. Хубаева О. Р., Бергаль-Кувикас О. В., Сидоров М. Д. Проблема формирования и питания Верхне-Юрьевских термальных источников (о. Парамушир, Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2022. № 3. С. 43–59. DOI: 10.31857/S0203030622030038.
15. Хубаева О. Р., Сергеева А. В., Хомчановский А. Л., Сидоров М. Д., Батанов Ф. И., Волькин С. С., Назарова М. А. Генезис термального озера в прибрежной зоне о. Итуруп (Курильские острова) // Геодинамика и тектонофизика. 2025. Т. 16. № 1. С. 1–17. DOI: 10.5800/GT-2025-16-1-0813. EDN: QJWVMD.
16. Khubaeva O., Sergeeva A., Khomchanovsky A., Sidorov M., Zakharov S., Degterev A., Novikov U. Hydrothermal-magmatic systems of the central part of Iturup island (The Kuril islands, Russia) // Journal of Volcanology and Geothermal Research. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2026.108565.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.