

ОБЪЕМНАЯ МОДЕЛЬ РАЗДРОБЛЕННОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ В БАССЕЙНЕ РЕКИ КОЗЫРЕВКА (КАМЧАТКА)

Сидоров М.Д.

*Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН,
683002, Петропавловск-Камчатский, Россия
e-mail: smd1952z@gmail.com*

Изучена проницаемость земной коры в одном из геотермальных районов Камчатки. Построена объемная модель раздробленности геосреды в бассейне реки Козыревка. Проведен линеаментный анализ материалов гравиметрической, аэромагнитной съемок, радарных снимков рельефа и фотоизображения местности. Исследована энтропия и стандартное отклонение данных. Применены алгоритмы анализа текстуры, нахождения линеаментов, границ, пороговых значений и степени структурной сложности. Линеаменты характеризуют раздробленность участка коры. Создана послойная база данных удельной длины линеаментов (УДЛ) до глубины 3 км. Величина УДЛ изменяется в широких пределах. Характерно мозаичное чередование разрушенных и относительно целых блоков. Часть раздробленных блоков образуют на глубине единые проницаемые зоны. Наибольшая плотность линеаментов отмечается в долине реки Козыревка. По раздробленным зонам вероятно проникновение метеорных (атмосферных) вод на глубину, также как и встречная миграция глубинных магматогенных вод и флюидов к приповерхностным горизонтам. Источником горячих магматогенных вод может служить интрузия гранодиоритов, окруженная кольцевой проницаемой зоной.

Ключевые слова: Камчатка, линеамент, разлом, энтропия, коэффициент раздробленности, интрузия, модель, термоминеральные источники.

VOLUMETRIC MODEL OF CRUSTAL BREAKUP IN THE KOZYREVKA RIVER BASIN (KAMCHATKA)

Sidorov M.D.

*Research Geotechnological Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
683002, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

The permeability of the Earth's crust in one of the geothermal regions of Kamchatka has been studied. A three dimensional model of the fragmentation of the geoenvironment in the Kozyrevka River basin has been constructed. A lineament analysis was carried out using materials from gravimetric and aeromagnetic surveys, radar images of the relief, and photographic images of the terrain. The entropy and standard deviation of the data were examined. Algorithms for texture analysis were applied, including the identification of lineaments, boundaries, threshold values, and the degree of structural complexity. Lineaments characterize the fragmentation of the crustal section. A layered database of the Specific Length of Lineaments (SLL) has been created up to a depth of 3 km. The SLL value varies within a wide range. A mosaic alternation of destroyed and relatively intact blocks is characteristic. Some of the fragmented blocks form continuous permeable zones at depth. The highest density of lineaments is observed in the Kozyrevka River valley. Penetration of meteoric (atmospheric) waters into the depths is likely along fractured zones, as is the counter migration of deep seated magmatogenic waters and fluids to the near surface horizons. A source of hot magmatogenic waters may be a granodiorite intrusion surrounded by a ring shaped permeable zone.

Keywords: Kamchatka, lineament, fault, entropy, fracturing coefficient, intrusion, model, thermal mineral springs.

Введение

Исследованная площадь расположена в центральной части полуострова Камчатка, охватывает верхнее течение реки Козыревка, пересекающей одноименный хребет (рис. 1). Район сложен различными вулканогенными образованиями неоген-четвертичного возраста, является перспективным на термоминеральные воды. В долине р. Козыревка известны выходы термальных источников. Места термоминеральных проявлений непосредственно связаны с проницаемостью земной коры. Необходимым условием для образования термоминеральных (гидротермальных) месторождений являются источники тепла, которыми являются магматические

тела, и достаточное количество воды как глубинной (ювенильной и магматогенной), так и метеорной (атмосферной). Для прогнозирования таких месторождений важно знать пути миграции вод внутри коры к источникам тепла и земной поверхности. В этой связи необходимо изучение проницаемости коры.

Целью исследований является построение объемной модели раздробленности блока земной коры методом линеаментного анализа данных дистанционных зондирований и нахождение вероятных путей миграции гидротерм.

Под раздробленностью понимается совокупность трещин различного генезиса (тектонических,

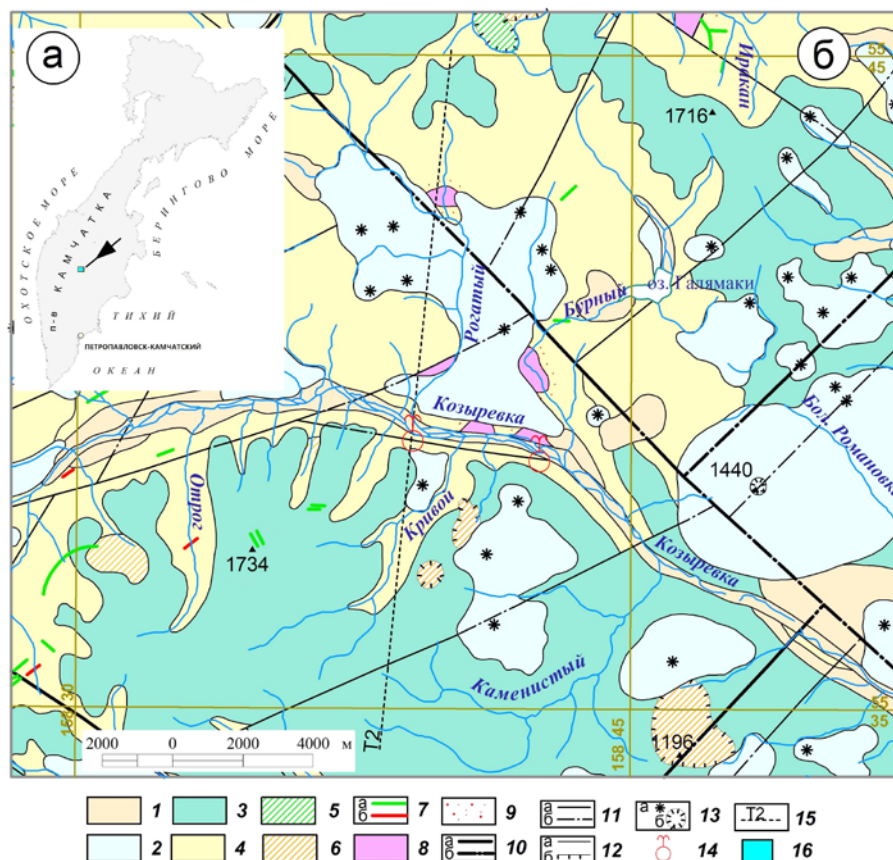


Рис. 1. Обзорная схема (а) и геологическая карта (б) района исследований [1].

1 – квартал, неоплейстоцен, голоцен. Ледниковые, гляциофлювиальные, аллювиальные, пролювиальные, коллювиальные рыхлые отложения. Валуны, галечники, пески, супеси, глины; 2 – квартал, неоплейстоцен, голоцен. Козыревско-сановаямский ВК. Базальты, их туфы (1050 м); 3 – квартал, эоплейстоцен. Срединненский ВК. Базальты, андезибазальты, их туфы, шлаки (600 м); 4 – неоген, плиоцен–миоцен. Крерукский, кахтунский, кававлинский, кимитинский ВК. Андезибазальты, андезиты, дациты, их туфы, игнимбриды (3700 м); 5–6 – субвулканические образования ВК андезитов (5), дацитов, риодацитов (6); 7 – дайки андезитов (а), дацитов (б); 8 – неоген, миоцен. Лавкинский интрузивный комплекс. Интрузии гранодиоритов, гранитов, диоритов; 9 – контактовые роговики; 10–11 – разломы главные (10) прочие (11), выходящие на поверхность (а), скрытые под вышележащими образованиями (б); 12 – геологические границы: согласного залегания (а), экструзий и жерловых образований (б); 13 – шлаковые конусы (а), кратеры (б); 14 – термоминеральные источники; 15 – линия разреза; 16 – площадь исследований (на схеме а)

контракционных, литогенетических, выветривания, микротрещин) в горных породах, обеспечивающих фильтрацию воды, которая в комплексе с пористостью, кавернозностью и другими пустотами характеризует общую проницаемость геологической среды. Объемная модель раздробленности дает возможность выявить места проникновения на глубину метеорных (атмосферных) вод, определить вероятные пути циркуляции магматогенных вод и восходящих глубинных флюидов, локализовать наиболее перспективные участки для поисков гидротерм.

Геологическое строение

Исследованная территория расположена в пределах крупной геологической структуры – Центрально-Камчатского вулканического пояса. Все вулканогенные образования рассматриваются как вулканические комплексы (ВК), объединяющие покровные, субвулканические, экструзивно-жерловые фации (рис. 1). Нижняя часть разреза представлена вулканическими комплексами миоцена: кимитинским, кававлинским и кахтунским. Покровные

фации сложены андезитами, дациандезитами, их туфами, базальтами, андезибазальтами, их туфами, туфами дацит-андезитового состава, туффитами, туфопесчаниками, туфоалевролитами. Покровные образования фациально резко изменчивы по разрезу и латерали. Туффиты и вулканокласто-осадочные породы приурочены к нижним и верхним частям толщ вулканитов. В составе покровной фации кававлинского ВК преобладают дациты, их туфы, игнимбриды. Покровные образования кахтунского комплекса с угловым и стратиграфическим несогласием залегают на более древних кававлинских и кимитинских вулканитах.

Вулканиды плиоценового возраста представлены отложениями крерукского ВК, которые с угловым несогласием и размывом залегают на нижележащих образованиях покровной и субвулканической фаций кахтунского комплекса. Покровная фация представлена андезитами, андезибазальтами, их туфами, дацитами, их туфами и игнимбридами. Вулканические образования квартала представлены

эоплейстоценовым срединненским и неоплейстоцен-голоценовым козыревско-сановаямским ВК. Покровные фации обоих комплексов сложены преимущественно базальтами, андезитобазальтами, андезитами, тефрой и туфами. Суммарная мощность покровных фаций всех вулканических комплексов более 5 км. Рыхлые отложения квартара распространены незначительно в долине р. Козыревки, межгорных впадинах и цирках. Мощность не превышает десятков метров.

Породы субвулканической фации вулканических комплексов представлены субвулканическими, экструзивными, жерловыми и плутоническими образованиями. Они слагают куполовидные тела, штоки, дайки и сосредоточены, главным образом, в центральных частях вулканоструктур и вблизи тектонических нарушений в поле развития соответствующих ВК, а по составу соответствуют породам покровных фаций. Интрузивные породы лавкинско-плутонического комплекса распространены незначительно в среднем течении р. Козыревка в виде однофазных плутонических интрузий, большинство которых – это мелкие простые штоки. Площадь выходов 0.2-0.8 км². В общем объеме пород резко преобладают гранодиориты, меньше кварцевых диоритов и диорит-порфиринов. Вероятнее всего, эти небольшие тела являются апофизами крупной глубинной интрузии, которая отмечается контрастным локальным максимумом Буге амплитудой 6-8 мГал на левом борту р. Козыревка, между ручьями Бурный и Рогатый [1].

Описываемый район перспективен на термоминеральные воды, о чем свидетельствуют их выходы в пойме реки Козыревка. Козыревские источники – это три группы истечений термальных вод на правом берегу с разной температурой в понижениях и ваннах, заполненных водой. Главный выход с температурой 54.5°C имеет рассредоточенный характер. Вдоль русла реки расположена зона растёка вблизи руслового обрыва в виде рассеянных источников с температурой 32-33°C. На левом берегу реки, в пойме, встречены два источника с температурой 17 и 23°C. Они значительно разбавлены водами подруслового стока. Визуально дебит Козыревских источников 2-2.5 л/с, с учётом скрытой разгрузки 7.2 л/с; pH – 7.55. В сухом остатке установлены Cu, Pb, Mo, Ag, Li, Ti, Zr, Sr, Ge. Нижне-Козыревские источники находятся в 4.1 км ниже по реке от Козыревских источников. Суммарные дебиты их 1.0 л/с, температура 22°C, pH 7.4. Воды хлоридно-сульфатные натриево-кальциевые с минерализацией 1.1-1.2 г/дм³, кремнистые (кремнекислоты до 61.1 мг/дм³). В воде обнаружены фтор (до 3 мг/дм³), свинец, молибден, серебро и др. Прогнозные параметры: температура на глубине 2 км – 85°C, потенциальные ресурсы

6.0 тыс. м³/сут¹.

Исходные данные и методы выделения линеаментов

Как известно, линеаментный анализ – это «метод изучения рельефа на континентах и в океане. Состоит в выделении и систематизации линейных элементов при изучении топографических и батиметрических карт. Позволяет прослеживать зоны разломов, границы между разными комплексами горных пород, выделять узлы пересечения дизъюнктивных нарушений и геоблоки, прослеживать «теневые» структуры линейного и кольцевого типа».

(https://karpinskyinstitute/public/sprav/geodictionary/article.php?ELEMENT_ID=78368).

Кроме рельефа зоны разломов отражаются по характерным признакам и в геофизических полях – магнитном и гравитационном, а также видны на фотоизображении местности. В исследовании использован весь имеющийся набор данных для рассматриваемой территории: материалы гравиметрической и аэромагнитной съемок масштаба 1:200 000, космический снимок поверхности Landsat [1], радарные снимки рельефа ArcticDEM [2] и SRTM [3].

Выделение линеаментов в геофизических аномалиях и рельефе проведено с помощью программ CET (Centre for Exploration Targeting) анализа сеток цифровых моделей карт. Программы CET созданы в Geophysics and Image Analysis Group (Группа геофизики и анализа изображений) университета Западной Австралии. Программы встроены в виде плагинов в оболочку Geosoft Oasis Montaj.

Анализ космического снимка Landsat проведен с помощью программы pyLEFA 0.61a (Lineament Extraction and Fracture Analysis), разработчик Шевырев С.Л. (<http://lefa.geologov.net>).

Все входные данные (кроме снимка Landsat) приведены в формат grid с шагом между узлами сетки в соответствии с масштабом съемки. Для радарной съемки ArcticDEM шаг входной сетки разрежен до 10 м.

Плагины CET анализа сетки содержат инструменты для *анализа текстур, определения линеации, векторизации линеации и структурной сложности*. Это универсальные алгоритмы анализа текстуры сетки, определения линеаментов, границ, нахождения пороговых значений и выявления областей по степени структурной сложности. Определение тренда и обнаружение неоднородностей в магнитных и гравитационных данных проводится пошагово, с помощью специального меню. Это меню содержит два разных подхода к оценке тренда (*Текстурные выступы и Края*). Последовательным применением упомянутых выше инструментов анализа грид-файлов для исследуемой территории создаются схемы линеаментов по каждому методу отдельно

¹Барбашинов Г.А. Отчет о гидрогеологической съемке масштаба 1:200 000, проведенной Хинарской партией на восточной половине листа N-57-II и на листе N-57-III в 1977-1979 гг. 1981.

(рис. 2-5). Далее схемы сводятся в единую карту линеаментов (рис. 6), которая используется для создания объемной модели.

Для исследования текстуры входной сетки данных проводится вычисление энтропии и стандартного отклонения в скользящем окне. Энтропия измеряет в наборе данных статистическую случайность значений данных в некоторой окрестности. Сначала данные квантуются в отдельные ячейки (i), а затем анализируется общее количество различных значений, полученных в результате этого квантования, формируется гистограмма и вычисляется энтропия по формуле:

$$E = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i$$

где вероятность p получается после нормализации гистограммы n ячеек.

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

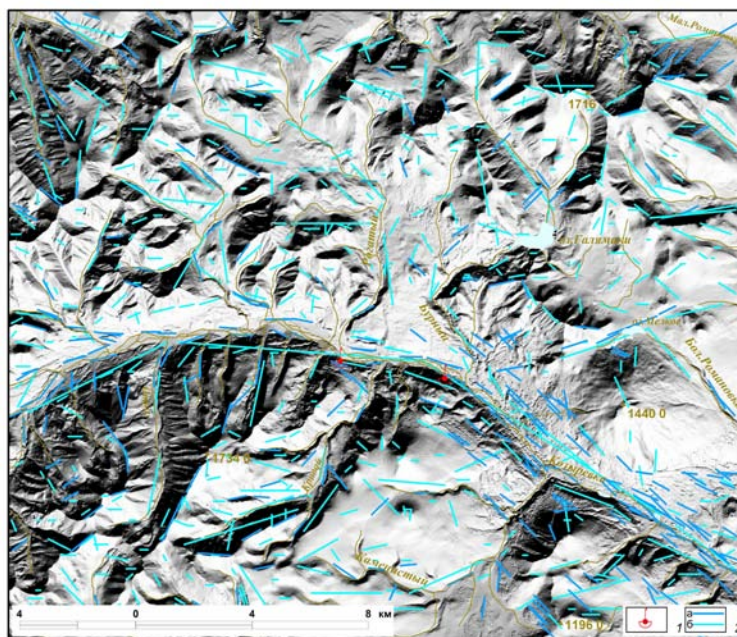


Рис. 2. Линеаменты, выделенные по данным радарных съемок: 1 – термальные источники; 2 – линеаменты: модель рельефа ArcticDEM (а), модель SRTM (б)

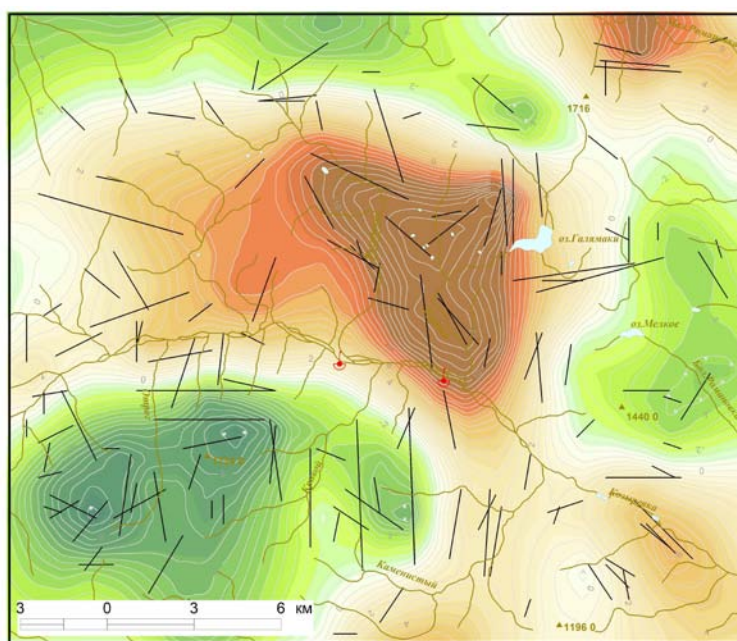


Рис. 3. Линеаменты, выделенные по локальным аномалиям Буге

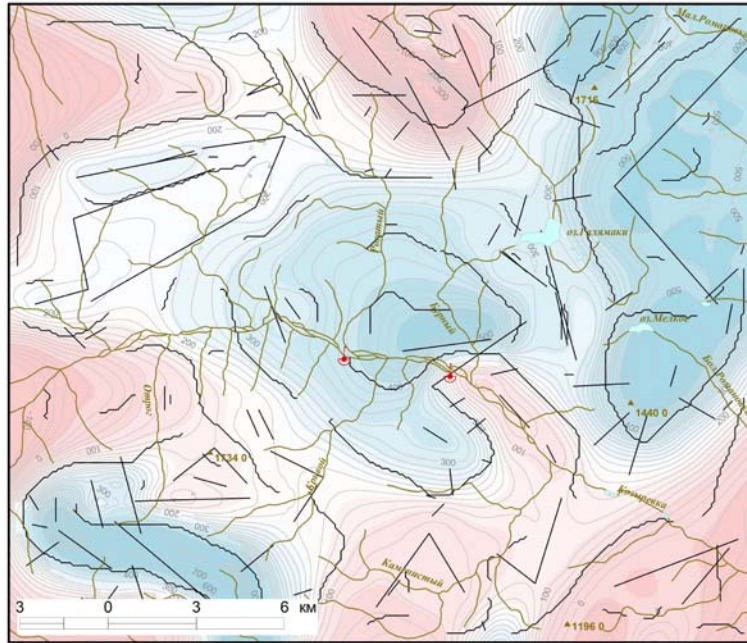


Рис. 4. Линеаменты, выделенные по аномалиям магнитного поля (ΔT)а

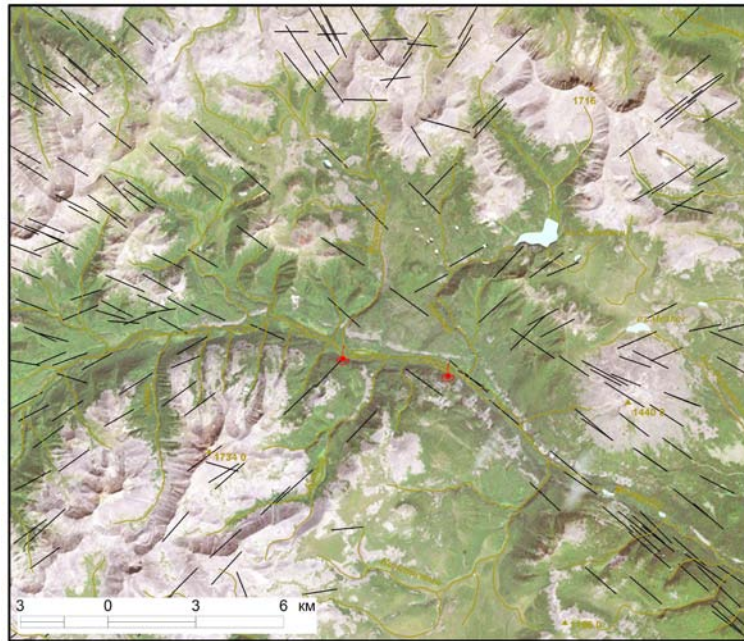


Рис. 5. Линеаменты, выделенные по КС Landsat

Стандартное отклонение предоставляет оценку локального изменения входных данных. Для каждого местоположения вычисляется стандартное отклонение данных в пределах 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 ячеек x_i задается формулой:

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

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

На следующем этапе обработки проводится выявление линейных элементов в структуре исследуемых данных – *линеация*. Т.к. любая линия является симметричной в поперечном направлении, то для обнаружения объектов, похожих на линии, в выходных данных определяются оси симметрии методами фазовой симметрии и фазовой конгруэнтности. Эти методы, основанные на анализе фазы сигнала, обеспечивают обнаружение объектов, не зависящих от контраста. Симметрия сигнала связана с периодичностью его пространственной частоты.

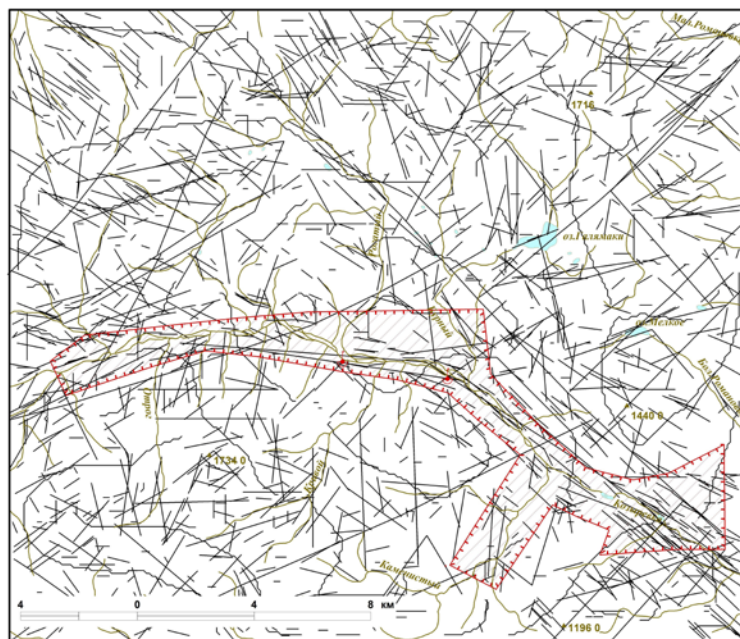


Рис. 6. Обобщенная схема линеаментов. Красной зубчатой линией показана площадь, рекомендуемая для проведения поисковых геофизических исследований

Для нахождения точек симметрии двумерные данные разбиваются на одномерные профили и анализируются по нескольким направлениям в различных масштабах. Фазовая симметрия выделяет зоны, которые, вероятно, содержат оси симметрии, а фазовая конгруэнтность определяет местонахождение вероятных граничных объектов путем определения точек, где локальные пространственные частоты совпадают по фазе (границы ступеней магнитных и гравитационных аномалий).

На следующем этапе проводится *векторизация* выявленных структур методом подбора и создание шейп-файлов линий. Теория и алгоритмы обработки цифровых моделей (сеток) подробно описаны в работах [4,5,6,7,8,9]. Результаты исследования приведены на рисунках 2-5.

Космический снимок Landsat был обработан с помощью программы PyLEFA (Lineament Extraction Fracture Analysis). PyLEFA – аналитическое программное обеспечение дистанционного зондирования с графическим интерфейсом для обнаружения линеаментов и анализа трещин. Эта программа свободного распространения позволяет выявлять на спутниковом изображении местности линеаменты, вычислять параметры пространственного распределения объектов: плотность линеаментов, обнаруживать разломы путем соединения линеаментов и экспортировать объекты в формат shape-файлов для продолжения работы в другом программном обеспечении, например ГИС. Алгоритм и технология обработки снимков приведены в работе [10]. Выявленные линеаменты представлены на рисунке 5.

После редактирования shape-файлов и удаления дублирующих и заведомо ложных линеаментов, образованных за счет краевых эффектов (ограничения

территории исследования скользящим окном) вдоль рамки исследованной площади, была синтезирована сводная схема линеаментов (рис. 6). Дополнительно на схему вынесены разломы, отраженные на геологической карте м-ба 1:200000 [1]. Эта схема далее была использована для построения объемной модели раздробленности коры по специальной методике (см. ниже).

Методика объемного моделирования проницаемости земной коры

Проницаемость геосреды – это «...свойство горных пород пропускать при перепаде давления газы и жидкости благодаря наличию в ней сообщающихся пор, трещин и др. пустот...».

https://karpinskyinstitute.ru/ru/public/sprav/geodictionary/article.php?ELEMENT_ID=83906.

Очевидно, что проницаемость во многом является следствием тектонических процессов, приводящих к образованию трещин, размеров этих трещин и их количества вокруг образующихся разломов. Часть окружающего разлом (магистральный шов) пространства является областью динамического влияния разлома (ОДВР) [11].

Линеаменты, выделяемые на фото и радарных снимках рельефа, геофизических аномалиях, отождествляются с разломами, характеризуют раздробленность участка коры. Отдельные трещины, из которых состоят ОДВР, их ширина не определяется, также как и глубина проникновения разломов. Линеаменты, по сути, отражают только осевые линии ОДВР. В «геофизических» линеаментах могут быть представлены скрытые разломы, например древние разломы в фундаменте или пологие разломы на глубине, трещиноватость на контакте интрузий с вмещающей средой. На радарных снимках

рельефа высокого разрешения линеаменты могут отражать контракционную, литогенетическую трещиноватость. Все вместе это формирует раздробленность исследуемого участка земной коры. На схеме (рис. 6) отображены проекции линеаментов на плоскость, выявленные по разным данным. Количественный пространственный анализ этих линеаментов позволяет прогнозировать вероятные пути миграции подземных вод.

Подробно алгоритм пространственной количественной оценки изложен в [12,13]. Суть метода состоит в разбиении исследуемого блока коры на элементарные кубические ячейки, для которых определяется коэффициент раздробленности геосреды. Деформация макроскопического уровня любого объема земной коры есть сумма деформаций составляющих его многочисленных объемов. Ю.В. Нечаевым [14] на образцах различных горных пород установлено эмпирическое правило – трещиноватость, видимая на одной грани кубика породы, адекватно отражает степень трещиноватости всего образца. Допускаем, что это правило с учетом принципа подобия (объекты, обладающие подобием физических переменных и геометрии подобны), можно применить для количественной оценки трещиноватости кубического блока земной коры, верхняя грань которого расположена на дневной поверхности. Коэффициент раздробленности единичного куба (K_p) равен объему всех трещин внутри него, поделенному на объем куба. Объем трещин равен сумме произведений длины, ширины и глубины проникновения. Из всех отмеченных параметров по линеаментам, отождествляемым с разломами, можно определить только их длину на верхней грани куба. Ширина и глубина остаются неизвестными. Но если для конкретной локализованной (с однотипной геологией) территории принять ширину, равной некоторой постоянной средней величине, например 1, а глубину считать равной величине ребра куба, тогда коэффициент раздробленности будет равен сумме длин линеаментов верхней грани, поделенной на ее площадь. Определенная таким образом величина равна *удельной длине линеаментов* (УДЛ). Также, считая реологические свойства внутри куба однородными, полученная величина УДЛ относится к любой точке внутри заданного объема, в том числе центру куба. Изменяя размер элементарного куба, можно изменять глубину исследований. Определенные таким образом УДЛ для разных горизонтов (кубов разного размера) используются для создания объемной модели раздробленности геосреды изучаемого блока.

Схема нахождения УДЛ выглядит следующим образом: карта линеаментов разбивается на квадраты, которые являются верхними гранями элементарных кубов. Внутри квадратов вычисляется сумма длин отрезков линеаментов и делится на площадь

квадрата. Далее определяются координаты центров верхней грани и глубина центра куба, равная половине длины его ребра. Т.к. исследуемый участок расположен в горной местности, то вводится поправка в координату глубины центра куба на реальную высоту центра верхней грани. Из полученных значений координат и УДЛ создается файл в базе данных. На следующем этапе размер квадратов увеличивается и все процедуры повторяются. Вычисления продолжают до достижения заданной глубины исследования. Все расчеты проводятся в системе плоских координат СК-42. Данные из созданной базы интерполируются методом 3D-кригинга и формируется объемное изображение раздробленности исследованного блока земной коры. Подробно методика расчетов приведена в [15].

Результаты исследований и обсуждение

Объемная модель раздробленности представляет собой совокупность кубических блоков с различной величиной УДЛ. Блок-диаграмма раздробленности исследованного участка земной коры представлена на рисунке 7. На рисунках 8-9 изображены срезы модели на горизонтах 0 и -1000 от уровня моря, а на рисунке 10 разрез по линии Т2. Как видно на представленной графике, изученный район весьма неоднороден по степени раздробленности геологической среды как по латерали, так и на глубину. Это предполагает и значительное различие проницаемости в разных местах территории. Величина УДЛ изменяется в широких пределах – от 0.1 до 7 ед. Абсолютно целых блоков нет. Характерно мозаичное чередование разрушенных и относительно мало раздробленных блоков. Многие наиболее раздробленные блоки расположены в виде цепочек, сливаются на глубине в единые узлы и зоны. Максимальная раздробленность наблюдается в самом верхнем слое от дневной поверхности до глубины примерно 500-700 метров ниже уровня моря. Отчасти это обусловлено тем, что кроме тектонических, магматических факторов разрушения горных пород в верхнем слое добавляется еще влияние процессов «выветривания», которые вносят свою долю в раздробленность среды и проявляются в рельефе как линеаменты. Эта особенность хорошо видна при последовательном просмотре горизонтальных срезов вглубь от дневной поверхности. Наибольшая удельная плотность линеаментов отмечается в долине реки Козыревка, выше и ниже по течению от известных термальных источников. Аномальная раздробленность на этих участках, а также в источках ручья Рогатый прослеживается в вертикальной плоскости более чем на 3 км. По таким зонам вероятно проникновение метеорных (атмосферных) вод на глубину, также как и встречная миграция глубинных магматогенных вод и флюидов к приповерхностным горизонтам. На горизонтальных срезах, особенно на глубине 1 и 2 км ниже уровня моря,

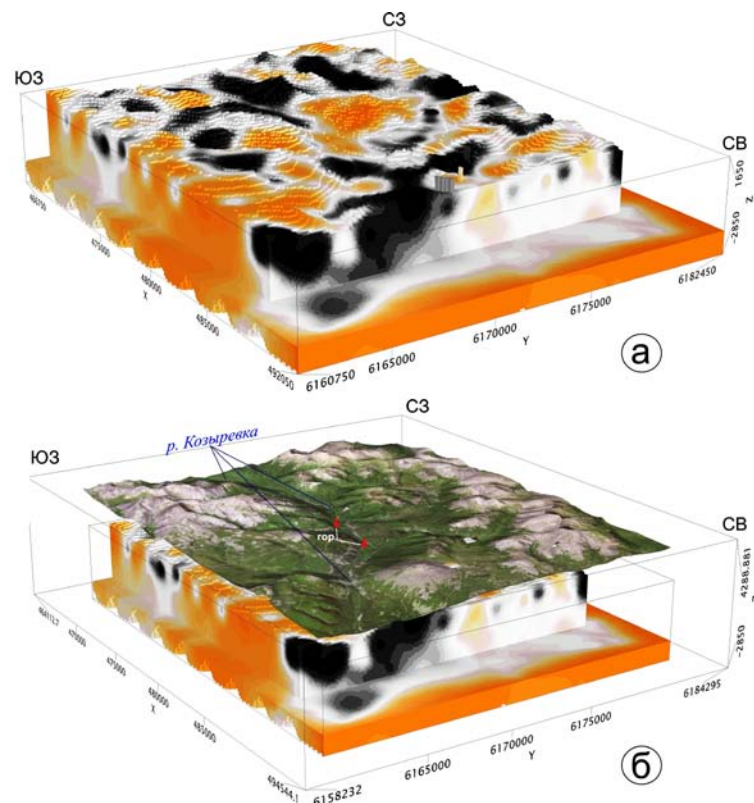


Рис. 7. Общий вид объемной модели раздробленности в верхнем течении реки Козыревка, вид с юго-востока (а), то же с фрагментом КС Landsat (б). Часть ячеек погашена, на рисунке (б) рельеф приподнят на 2 км. Красные точки – термальные источники. Шкала степени раздробленности приведена на рис. 8

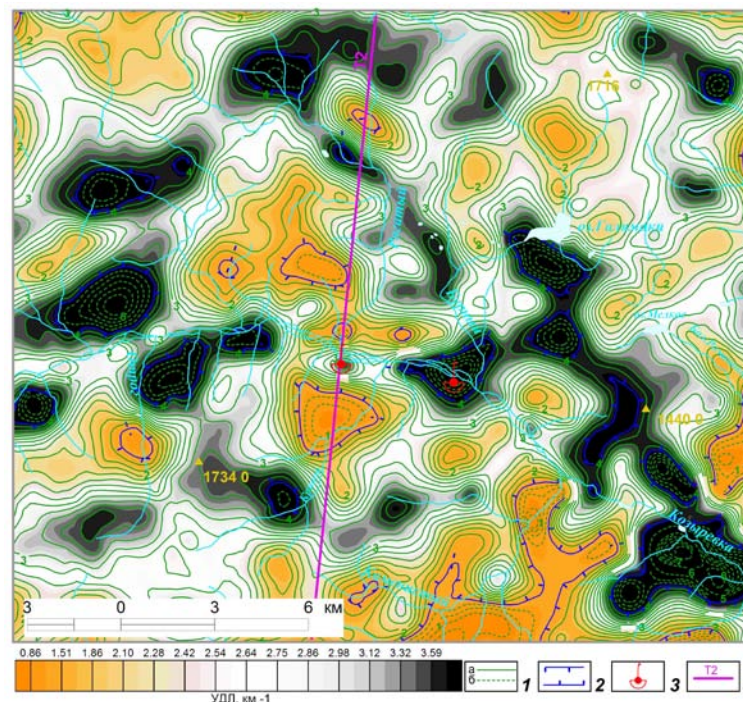


Рис. 8. Горизонтальный срез модели раздробленности коры на уровне моря

1 – изолинии УДЛ, км^{-1} внутри перспективных участков (а), за пределами перспективных участков (б); 2 – границы перспективных на термоминеральные воды переходных зон между сильно и слабо раздробленными блоками. Границы проведены по среднему в срезе (разрезе) значению УДЛ $\pm$ дисперсия; 3 – выходы термальных вод на дневной поверхности; 4 – линия разреза

видно, что раздробленные блоки образуют кольцеобразную структуру, в центре которой расположен относительно «целый» блок овальной формы. В гео-

физических полях этот блок отражается локальным максимумом аномалии Буге и магнитной аномалией интенсивностью 500 нТл (рис. 3-4).

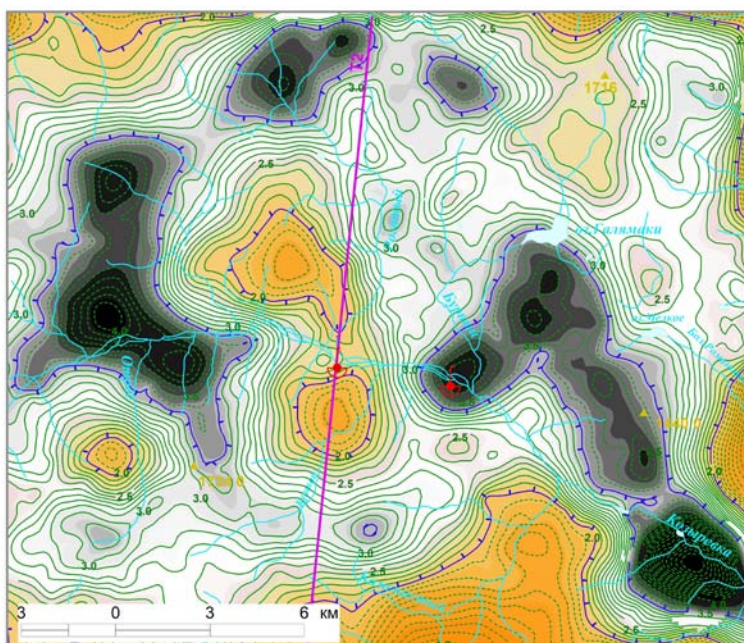


Рис. 9. Горизонтальный срез модели раздробленности коры на горизонте 1000 м ниже уровня моря. Условные обозначения на рис. 8

Такое сочетание аномалий дает основание предположить в этом месте на глубине массивную интрузию. Определение центра масс методом особых точек показывает глубины в интервале 6.5-8.1 км ниже уровня моря. В экзоконтактной зоне этого интрузива и наблюдается повышенная раздробленность геологической среды. Возможно, что интрузив – это «бывший» периферический вулканический очаг, заполненный магмой преимущественно среднего состава. Косвенно об этом свидетельствуют выходы небольшой интрузии диоритов-гранодиоритов лавкинского магматического комплекса (рис. 1). Интрузия, обнаженная севернее известных термоминеральных проявлений, при впадении в реку Козыревку ручьев Рогатый и Бурный, вероятно является апофизой от отмеченной геофи-

зическими аномалиями. Глубинная интрузия является потенциальным источником горячих магматогенных вод, которые фильтруются к поверхности по раздробленным зонам, смешиваются с метеорными водами и образуют известные гидротермы. Вполне возможно, что часть термальных вод разгружается в слое рыхлых отложений в долине р. Козыревка.

Другим источником тепла и горячих магматогенных вод могут служить корневые части (питающие системы) дацитовых экстрезий дыгеренского вулканического комплекса (рис. 1). Экстрезивные купола расположены на правом борту р. Козыревка, южнее термопроявлений, в периферической части Правокозыревского палеовулкана [1].

Вулканоструктура (ВС) расположена в междуречье Козыревка – Сухарики и представляет собой

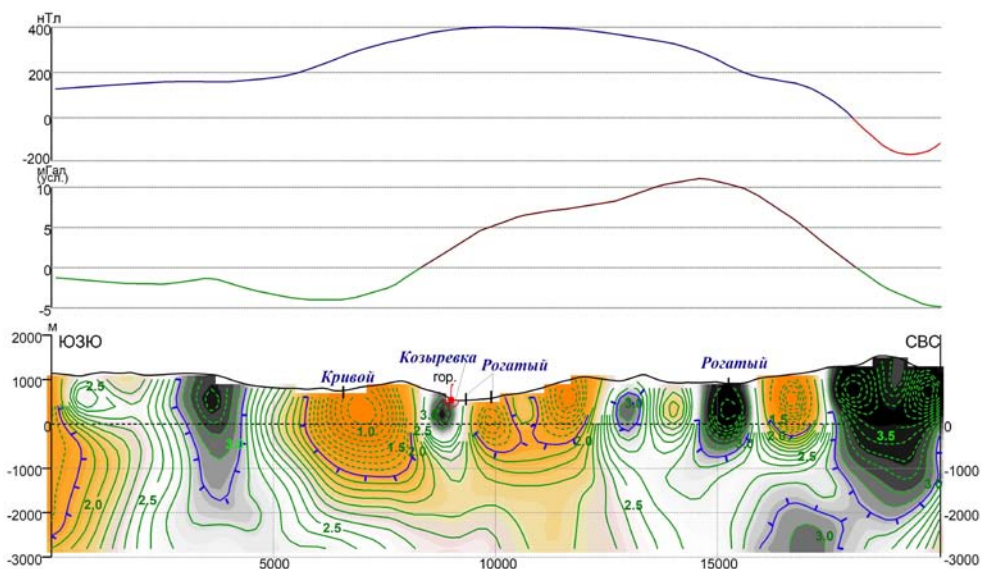


Рис. 10. Разрез модели раздробленности по линии Т2. Условные обозначения на рис. 8

щитовую постройку, сложенную базальтами срединного комплекса. Центр структуры идентифицируется жерловиной базальтовых агглютинатов, находящейся в районе высоты 1734 м (рис. 1). На юго-восточном склоне ВС расположены неоплейстоценовые экструзии дацитов дыгеренского комплекса и многочисленные голоценовые шлаковые конусы базальтового состава [1]. Механизм фильтрации подземных вод аналогичен вышеописанному.

Проведенный линеаментный анализ в других геотермальных районах Камчатки и Курильских островов (бассейны рек Паратунки, Налычева, а также на островах Парамушир и Итуруп [16,17,18] выявил пространственную закономерность – выходы термальных вод на дневную поверхность расположены в краевых частях блоков с аномально высокой раздробленностью, в зоне перехода к слабо раздробленным блокам, которые, как правило, содержат внутри интрузии и экструзии [18]. Была установлена статистическая зависимость – большинство источников на дневной поверхности находятся в зонах с краями, расположенными на расстоянии $\pm$ дисперсия от средних линий (значений) УДЛ. Следуя этому правилу, на срезах (рис. 8-9) и разрезе (рис. 10) объемной модели проведены границы (зубчатая линия) перспективных участков, где наиболее вероятно обнаружение термоминеральных вод. На рис. 7 показаны границы наиболее перспективной площади для исследований электропроводности геосреды методом МТЗ до глубины 3-5 км в комплексе с тепловизионной съёмкой. Такой поисковый комплекс методов позволит локализовать участки для бурения гидрогеологических скважин.

Заключение

Созданная объемная модель раздробленности верхней части земной коры в бассейне р. Козыревка

показала значительную изменчивость геосреды по степени проницаемости. Кора разбита на отдельные блоки, контрастно отличающиеся друг от друга раздробленностью горных пород. Наибольшая раздробленность характерна для приповерхностного слоя. От дневной поверхности до глубины 500-700 м ниже уровня моря в модели наблюдается хаотично-мозаичное расположение раздробленных и относительно целых блоков. В центральной части исследованной территории по мере углубления отдельные блоки постепенно сливаются в единую кольцеобразную раздробленную зону шириной 3-5 км. В середине этой кольцеобразной структуры расположен относительно слабо раздробленный блок овальной формы, который в геофизических полях выражен комплексной аномалией (максимумами) Буге и магнитного поля. Аномалия отражает массивную интрузию гранодиоритов с центром масс на глубине 6.5-8.1 км. Интрузия является источником горячих магматогенных вод, которые по проницаемой кольцевой зоне мигрируют к поверхности, где, смешиваясь с метеорными водами, образуют известные гидротермы.

Другим источником тепла могут служить корневые части (питающие системы) дацитовых экструзий дыгеренского вулканического комплекса, расположенные на правом борту р. Козыревка.

В аспекте поисков термоминеральных вод наиболее перспективными следует считать места сочленения раздробленных и относительно целых блоков в понижениях рельефа – долинах рек и ручьев. Локализация участков для поискового бурения гидрогеологических скважин возможна после проведения электроразведочных исследований методом магнитотеллурических зондирования (МТЗ) до глубины 3-5 км в комплексе с тепловизионной съёмкой.

Список литературы

1. Хасанов Ш.Г., Сидоренко В.И., Боровцов А.К., Сляднев Б.И., Родных Н.А., Николаева В.И. ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Западно-Камчатская. Лист N-57-III (Эссо). СПб., 2007.
2. Digital elevation model ArcticDEM. URL: http://ArcticDEM/mosaic/v3.data.pgc.umn.edu/elev/dem/setsm0/2m/76_25.
3. Digital elevation model SRTM. URL: https://www.okmap.org/srtm/version2_1/SRTM3/Eurasia/N55E158.hgt.zip.
4. 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. V. 34. No. 11. Pp. 1505-1513. URL: www.sciencedirect.com/journal/computers-and-geosciences/vol/34/issue/11.
5. Eun-Jung Holden, M. Dentith and P. Kovesi, «Towards the Automatic Analysis of Regional Aeromagnetic Data to Identify Regions Prospective for Gold Deposits». Computers & Geosciences. V. 34. No. 11. Pp. 1505-1513. 2008.
6. Eun-Jung Holden, P. Kovesi, M. Dentith, D. Wedge, J.C. Wong and S.C. Fu «Detection of Regions of Structural Complexity within Aeromagnetic Data using Image Analysis». Twenty Fifth International Conference of Image and Vision Computing New Zealand. 8-9 November 2010.
7. L. Lam and S.-W. Lee and C.Y. Suen «Thinning Methodologies-A Comprehensive Survey». IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. V. 14. No. 9. Pp. 879. September 1992.
8. Peter Kovesi «Image features from phase congruency». Videre: Journal of Computer Vision Research. Summer 1991. V. 1. No. 3. The MIT Press.
9. Peter Kovesi «Symmetry and asymmetry From local phase». AI'97, Tenth Australian Joint Conference on Artificial Intelligence. 2-4 December 1997.
10. Шевырев С.Л. Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде Matlab // Успехи современного естествознания. 2018. №10. С. 138-143.
11. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов. Новосибирск: Наука. 1983. 112 с.
12. Таскин В.В., Сидоров М.Д. Трехмерная модель тектонической раздробленности земной коры, созданная с использованием космической видеoinформации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. №2. С. 243-252.

13. Таскин В.В., Сидоров М.Д. Алгоритм создания трехмерной модели тектонической раздробленности в среде ГИС по результатам дешифрирования аэро- и космоснимков, оценка ее достоверности // Геоинформатика. 2015. №1. С. 21-27.
14. Нечаев Ю.В. Линеаменты и тектоническая раздробленность. Дистанционное изучение внутреннего строения литосферы. М.: ИФЗ РАН. 2010. 215 с.
15. 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.
16. Хубаева О.Р., Сергеева А.В., Хомчановский А.Л., Сидоров М.Д., Батанов Ф.И., Волюнкин С.С., Назарова М.А. Генезис термального озера в прибрежной зоне о. Итуруп (Курильские острова) // Геодинамика и тектонофизика. 2025. Т. 16. №1. С. 813-830. DOI:10.5800/GT-2025-16-1-0813.
17. Khubaeva O.R., Bergal-Kuvikasa O.V. and Sidorov M.D. The Formation and Recharge of the Verkhne-Yuriev Thermal Springs, Paramushir Island, Kuril Islands. Pleiades Publishing, Ltd. Journal of Volcanology and Seismology. 2022. No. 16(3). Pp. 206-220. DOI:10.1134/S0742046322030034.
18. 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. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/249/1/012046>.

References

1. Khasanov Sh.G., Sidorenko V.I., Borovtsov A.K., Slyadnev B.I., Rodnykh N.A., Nikolayeva V.I. *GOSUDARSTVENNAYA GEOLOGICHESKAYA KARTA ROSSIYSKOY FEDERATSII masshtaba 1:200 000* [State Geological Map of the Russian Federation, Scale 1:200,000]. Second edition. West Kamchatka Series. Sheet N-57-III (Esso). St. Petersburg. 2007.
2. Digital elevation model ArcticDEM. URL: http://ArcticDEM/mosaic/v3.data.pgc.umn.edu/elev/dem/sets/m0/2m/76_25.
3. Digital elevation model SRTM. URL: https://www.okmap.org/srtm/version2_1/SRTM3/Eurasia/N55E158.hgt.zip.
4. 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. V. 34. No. 11. Pp. 1505-1513. URL: www.sciencedirect.com/journal/computers-and-geosciences/vol/34/issue/11.
5. Eun-Jung Holden, M. Dentith and P. Kovesi, «Towards the Automatic Analysis of Regional Aeromagnetic Data to Identify Regions Prospective for Gold Deposits». Computers & Geosciences. V. 34. No. 11. Pp. 1505-1513. 2008.
6. Eun-Jung Holden, P. Kovesi, M. Dentith, D. Wedge, J.C. Wong and S.C. Fu «Detection of Regions of Structural Complexity within Aeromagnetic Data using Image Analysis». Twenty Fifth International Conference of Image and Vision Computing New Zealand. 8-9 November 2010.
7. L. Lam and S.-W. Lee and C.Y. Suen «Thinning Methodologies-A Comprehensive Survey». IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. V. 14. No. 9. Pp. 879. September 1992.
8. Peter Kovesi «Image features from phase congruency». Videre: Journal of Computer Vision Research. Summer 1991. V. 1. No. 3. The MIT Press.
9. Peter Kovesi «Symmetry and asymmetry From local phase». AI'97, Tenth Australian Joint Conference on Artificial Intelligence. 2-4 December 1997.
10. Shevyrev S.L. Lefa software: an automatized structural analysis of remote sensing imagery in matlab environment. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*. 2018. No. 10. Pp. 138-143.
11. Sherman S.I., Boryakov S.A., Buddo V.Yu. *Oblasti dinamicheskogo vliyaniya razlomov* [Zones of dynamic fault influence]. Novosibirsk: Nauka. 1983. 112 p.
12. Taskin V.V., Sidorov M.D. 3-D model of tectonic break of Earth crust created using satellite optical data. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014. V. 11. No. 2. Pp. 243-252.
13. Taskin V.V., Sidorov M.D. The algorithm of three-dimensional model creation in the environment of GIS with results of aerospace image decipherment exploitation, evaluation of it reliability. *Geoinformatika*. 2015. No. 1. Pp. 21-27.
14. Nechayev Yu.V. *Lineamenty i tektonicheskaya razdroblennost'. Distantsionnoye izucheniye vnutrennego stroyeniya litosfery* [Lineaments and Tectonic Fragmentation: Remote Sensing Study of the Lithosphere's Internal Structure]. Moscow: IFZ RAN. 2010. 215 p.
15. Sidorov M.D. Creating a database for three-dimensional image of the earth crust tectonic fragmentation. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2023. No. 12 (spetsial'nyy vypusk 17). Pp. 60-73. DOI:10.25018/0236_1493_2023_12_17_60.
16. Khubaeva O.R., Sergeeva A.V., Khomchanovsky A.L., Sidorov M.D., Batanov F.I., Volynkin S.S., Nazarova M.A., 2025. The Genesis of the Thermal Lake Located Within the Coastal Area of Iturup Island (The Kurils). *Geodinamika i tektonofizika*. 2025. V. 16. No. 1. Pp. 813-830. DOI:10.5800/GT-2025-16-1-0813.
17. Khubaeva O.R., Bergal-Kuvikasa O.V. and Sidorov M.D. The Formation and Recharge of the Verkhne-Yuriev Thermal Springs, Paramushir Island, Kuril Islands. Pleiades Publishing, Ltd. Journal of Volcanology and Seismology. 2022. No. 16(3). Pp. 206-220. DOI:10.1134/S0742046322030034.
18. 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. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/249/1/012046>.

Сведения об авторах Принадлежность к организации

Сидоров Михаил Дмитриевич

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, 683002, Петропавловск-Камчатский, Россия

Information about authors Affiliations

Sidorov Mikhail Dmitrievich

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Scientific Research Geotechnological Centre, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 683002, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Поступила в редакцию 11.08.2026 г.