

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ДИСТАНЦИОННОГО АНАЛИЗА СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННЫХ ПАРАГЕНЕЗИСОВ ЗОЛОТОРУДНЫХ РАЙОНОВ (МНОГОВЕРШИННОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ, ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)

С. Л. Шевырёв

Дальневосточный геологический институт (ДВГИ ДВО РАН)
Дальневосточный федеральный университет (ДФУ), Владивосток

Поступила в редакцию 23 мая 2017 г.

Аннотация: рассматриваются методологический аппарат анализа дистанционных изображений для прогноза благороднометалльных месторождений с учетом региональных особенностей вулканоплутонических поясов территории Дальнего Востока России. Методология включает последовательность расчетов, направленных на выявление тектонических структур и оценки региональной трещиноватости с помощью фрактальной размерности Минковского. На примере Многовершинного золоторудного поля показана связь дешифрируемых структур, разрывной тектоники и магматических комплексов. Сделанные выводы о природе анализируемых структур использованы для оценки потенциала территории.

Ключевые слова: Matlab, дистанционное зондирование Земли, минералогия золота, Сихотэ-Алинская складчатая область.

ALGORITHMIZATION OF REMOTE SENSING OF STRUCTURAL-SUBSTANTIAL ANALYSIS PARAGENESISES GOLD-BEARING DISTRICTS (MNOGOVERSHINNOE ORE FIELD, KHABAROVSK KRAI)

Abstract: article considers methodological apparatus for analysis of remote sensing images for prospecting of gold deposits with taking into account regional peculiarities of volcanic-plutonic belts of Far East Russia. Methodology includes sequence of calculations, directed to identification of tectonic structures and assessment of regional fracturing by fractal Minkowski dimension. Relations between magmatism and detected structures were shown on a sample of Mnogovershinny gold field. Conclusions about nature of extracted structures were used for evaluation of territory potential.

Key words: Matlab, remote sensing of the Earth, minerageny of gold, Sikhote-Alin folded area.

Введение

Сихотэ-Алинское горно-складчатое сооружение представляет собой полигенную тектоническую постройку, локализованную на юге Дальнего Востока России и занимающую существенную часть Хабаровского и большую часть Приморского края. Эта территория, активная в геодинамическом отношении, характеризуется широким развитием разрывных нарушений различной протяженности и ранга и длительными эпохами интрузивного магматизма и вулканизма (мел-квартер).

С активностью Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса (ВСАВП) связано образование многочисленных благороднометалльных месторождений. Задачи наращивания запасов минерального сырья требуют увеличения объемов поисково-разведочных работ. Оптимизировать проведение работ, сосредоточив усилия на наиболее перспективных участках, возможно применением комплекса методов анализа изображений, полученных дистанционным

зондированием Земли (ДЗЗ) и учитывающих региональные особенности территории.

К числу последних относятся: наличие мощного покрова четвертичных отложений и растительности, разветвленная эрозионная сеть, существенные локальные превышения рельефа и неравномерность эрозионного среза. Это накладывает отпечаток на алгоритмы, применяемые для регионального прогнозного исследования с учетом генезиса месторождений минерального сырья, применяемых материалов дистанционных съемок и локализации опосредованных участков.

Генетические особенности благороднометалльных месторождений юга Дальнего Востока России

Юг Дальнего Востока России характеризуется наличием коренных золоторудных, золотосеребряных и комплексных месторождений рудного сырья (с благородными металлами).

Выделяются Нижнеамурский и Кемский металло-

генические пояса. Первый, имеющий позднемеловой-палеоценовый возраст, связан с северным флангом Восточно-Сихотэ-Алинского вулcano-плутонического пояса, образования которого интродуцируют или перекрывают Журавлевско-Амурский и Киселевско-Маноминский аккреционные террейны. Среди месторождений Нижнеамурского металлогенического пояса необходимо выделить эпитермальные жильные месторождения – Белая Гора, Бухтянское и Многовершинное, а также медно-порфировое ($\pm Au$) Тырское месторождение.

Второй из них, Кемский палеоценовый металлогенический пояс ассоциирует с восточной частью Восточно-Сихотэ-Алинского вулcano-плутонического пояса, образования которого интродуцируют и перекрывают Кемский островодужный террейн. Этот пояс объединяет золото-серебряные эпитермальные жильные и Cu-Mo ($\pm Au$, Ag)-порфировых, Cu ($\pm Au$)-порфировых и Mo ($\pm W$, Sn, Bi)-порфировых месторождений.

Генезис эпитермальных месторождений предполагает наличие источника гидротермальных растворов – интрузивных массивов или субвулканических комплексов. Флюиды, отделяющиеся при остывании интрузии или разогретые и насыщенные инфильтрующиеся метеорные воды [1], мигрируют латерально относительно их магматического центра вдоль трещинной инфраструктуры. Это, несомненно, упрощенное и очевидное представление об эпитермальных месторождениях, обосновывает выбор прогнозных критериев и поисковых признаков, ассоциированных с источниками растворов и рудопроводящей инфраструктурой, в качестве дешифрируемых в дистанционном изображении элементов.

Для создания адекватных дистанционных региональных прогнозно-поисковых моделей необходимо углубленное понимание особенностей региональной специфики, включающей черты геологического строения, минерагению искомым видов минерального сырья и содержание изображений ДЗЗ, а также их особенности – пространственное и спектральное разрешение и т.д.

Необходимо особенно подчеркнуть значение дистанционных структурно-геологических исследований для территории юго-востока России, где мощный слой покровных четвертичных образований и расти-

тельность затрудняют определение вещественного состава.

Ключевое значение при создании алгоритмов региональных дистанционных моделей имеют следующие особенности:

- обоснование структурно-вещественной природы выделяемых в дистанционном изображении объектов;
- максимальная автоматизация проведения дешифрирования;
- использование практически апробированных алгоритмов анализа;
- открытость выбранных алгоритмов анализа для конечного пользователя;
- повторяемость результатов исследования для сравнимых параметров ввода и материалов.

Методологический аппарат

Возможный вариант алгоритма структурно-тектонического анализа дистанционных космических материалов рассмотрен ниже.

В рамках анализа потока данных выделяются четыре этапа (рис. 1). На первом из них данные дистанционных съемок, спутниковая цифровая модель рельефа (ЦМР) или спектральное изображение генерализуются с учетом масштаба анализируемых объектов – рудных полей, рудных районов, рудных узлов или отдельных месторождений с созданием серий изображений различного пространственного разрешения – “пирамид”. С этой целью используются как фильтры предварительной обработки – гистограммное выравнивание, подавления шумов (медианный фильтр) так и масштабирование матрицы изображения с применением алгоритма бикубической интерполяции.

Второй этап – анализ “пирамид” изображения. Для масштаба минерагенических поясов и районов анализ производится с выделением элементов – линейных структур (ЛС) и кольцевых структур (КС). Линейные структуры, которые, пройдя проверку коллинеарности, затем объединяются в более крупные структуры – линеаменты, интерпретируемые как крупные тектонические нарушения.

Для этой цели изображение проходит фильтрацию, цель которой – подготовка к вычислениям, направленным на детектирование границ. При подборе алгоритмов определяющую роль играет источник космических данных (рис. 2).

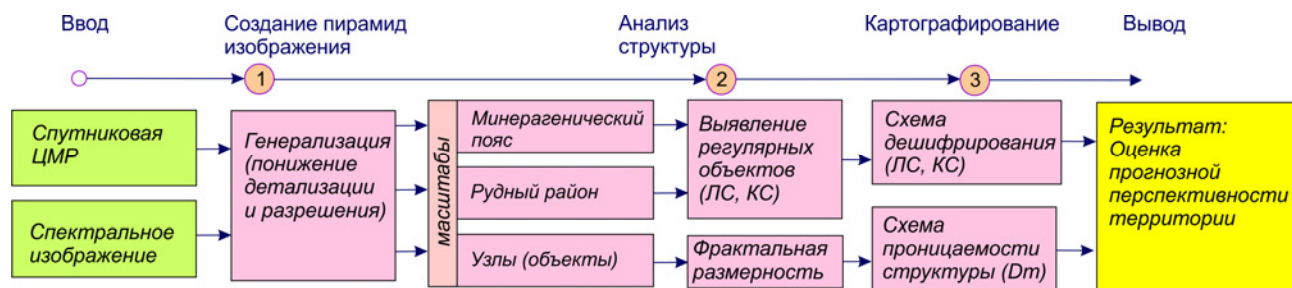


Рис. 1. Поток данных структурно-тектонического анализа материалов дистанционных съемок для регионального прогноза эпитермальной рудоносности.

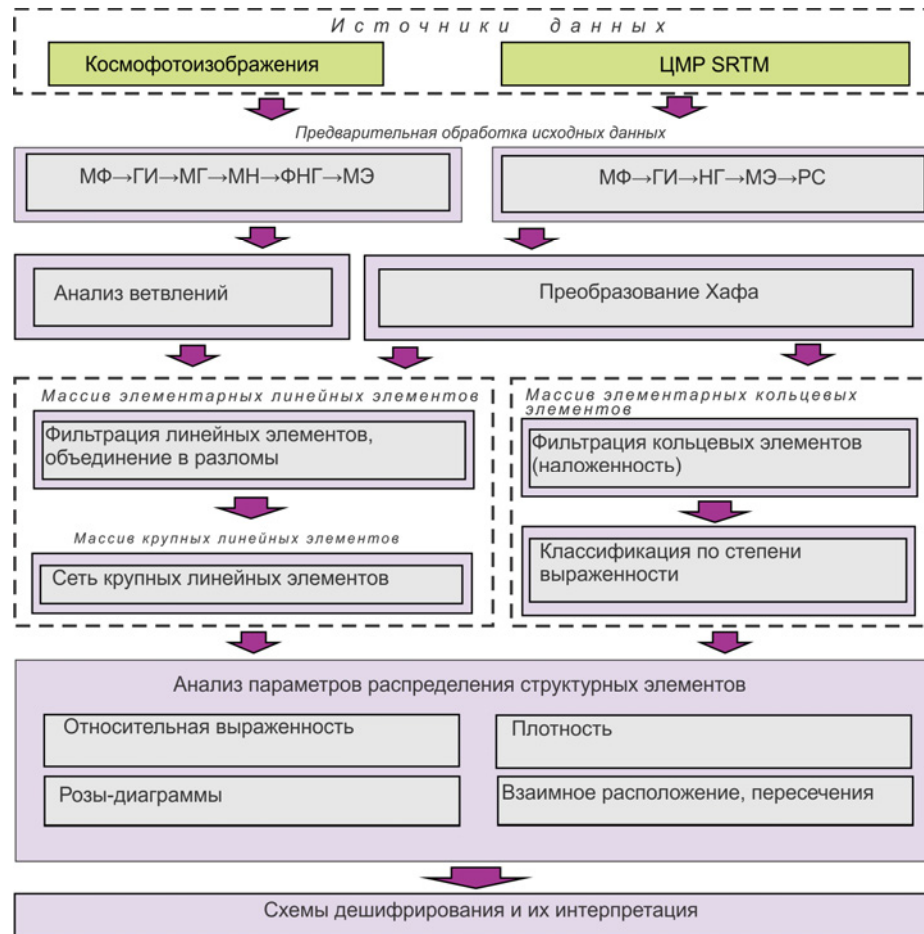


Рис. 2. Выявление регулярных элементов дистанционного изображения и картографирование. Графические фильтры: МФ – медианный фильтр, ГИ – градиент изображения, МЭ – морфологическая эрозия, НГ – нулевой градиент, МГ – магнитуа градиента, МН – матрица направлений, РС – разбиение скелета, ФНГ – фильтрация направлений градиента.

Предварительная обработка изображения включает применение графических фильтров. Для полутоновых изображений космических аппаратов Landsat в качестве дизъюнктивных структур дешифрируются резкие линейные изменения фототона, на ЦМР сопоставимые результаты получаются выделением тальвегов и водоразделов (как областей изображения с субгоризонтальным положением земной поверхности, или, при морфометрических расчетах – околонулевыми значениями градиента высот).

Рассмотрим некоторые применяемые операции и фильтры подробнее.

Фильтрация с помощью медианного фильтра (МФ) в скользящем окне O служит цели удаления небольших неровностей рельефа и артефактов изображения: $M_d(x, y): O \rightarrow M$:

$$M_d(x, y) = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n O(x, y) \quad (1),$$

где x, y – координаты пикселей, входящие в скользящее окно O ; n, m – ширина и высота скользящего окна соответственно. Для всех элементов изображения, попавших в скользящее окно в точке $O(x, y)$, считается среднее арифметическое значений высот, кото-

рое присваивается затем каждой точке изображения.

Фильтр градиент изображения (ГИ) $F(x, y)$:

$$\nabla F = \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} \quad (2),$$

где для слагаемых градиента поверхности $\frac{\partial F}{\partial x}$ и $\frac{\partial F}{\partial y}$

в каждой точке находятся такие значения, что $\nabla F \approx 0$, т.е. водоразделы и поймы рек. Значение градиента изображения в какой-либо точке выражается в магнитуде градиента (МГ):

$$G = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2} \quad (3).$$

Для выделения тальвегов долин и гребней водоразделов изображение бинаризуется, так что если $G \approx 0 \rightarrow G' = 1$.

Морфологическая эрозия (МЭ) – последовательное истончение бинаризованного изображения без разрыва сплошности скелета до толщины 1 пиксель.

Разбиение скелета (РС) – разделение скелета бинаризованного изображения в точках ветвления (бифуркации). В точках ветвления (бифуркации) происходит разбиение скелета кластеров на составляющие,

для каждого из которых выделяется осевая линия. Эта линия в дальнейшем рассматривается как линейный структурный элемент.

Матрица направлений (МН) градиента рассчитывается как:

$$\alpha = \text{atan} \left(\frac{\left(\frac{\partial F}{\partial y} \right)}{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)} \right) \quad (4).$$

Затем скелетные элементы объединяются в кластеры с учетом значений направления градиента – фильтрация направлений градиента (ФНГ).

Оцифровка массива линейных элементов производится либо после операции РС, либо применением преобразования Хафа [2].

Крупные линейные элементы – разломы, получаются в результате объединения нескольких элементов. Для этой цели оценивается пространственная близость этих отрезков и их коллинеарность (сонаправленность, т.е. близость значений коэффициентов их линейных уравнений). В случае не превышения отрезками заданных значений пространственной близости и коллинеарности, производится их объединение в крупные разломы – линеаменты.

Наряду с автоматизированным дешифрированием структурных элементов применялась оценка проницаемости земной коры для мигрирующих флюидов с помощью дистанционной оценки фрактальной размерности Минковского сети трещиноватости [3]. Для бинаризованного изображения фрактальная размерность Минковского d_m рассчитывается как:

$$d_m = -\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \epsilon}, \quad (5)$$

где $N(\epsilon)$ – число квадратов размерностью ϵ , которое потребовалось для покрытия узора трещиноватости. Фрактальная размерность Минковского показывает степень плотности и связности элементов трещинной инфраструктуры и находится для узора, получаемого последовательной фильтрацией сверткой сначала с матрицей Гаусса (гауссианой), затем с матрицей Лапласа. Это фильтр надежно позволяет распознать границы, как линии изменения контраста изображения [4].

Описанные методы анализа изображений реализованы нами в виде специализированного приложения среды научного программирования Matlab, обладающей мощными средствами обработки изображений и вывода дешифрованных элементов в векторных ГИС-форматах (модули Image Processing Toolbox и Mapping Toolbox).

Характеристика района исследований

В качестве полигона исследований выступает территория Нижнего Приамурья, северный сегмент Сихотэ-Алинской аккреционно-складчатой системы, прилегающий к Многовершинному Au-Ag месторождению (узлу). Это месторождение приурочено к Улской ВПС (вулcano-плутонической структуре) в районе пересечения известных региональных разломов меридионального, северо-восточного и широтного направлений. Улская структура находится в зоне гравитационного минимума и высоких градиентов магнитного поля [5].

В пределах полигона исследований выделяются два структурных этажа: нижний, сложенный терригенными породами позднеюрского-верхнемелового возраста (песчаниками, аргиллитами, алевролитами) (рис. 3).

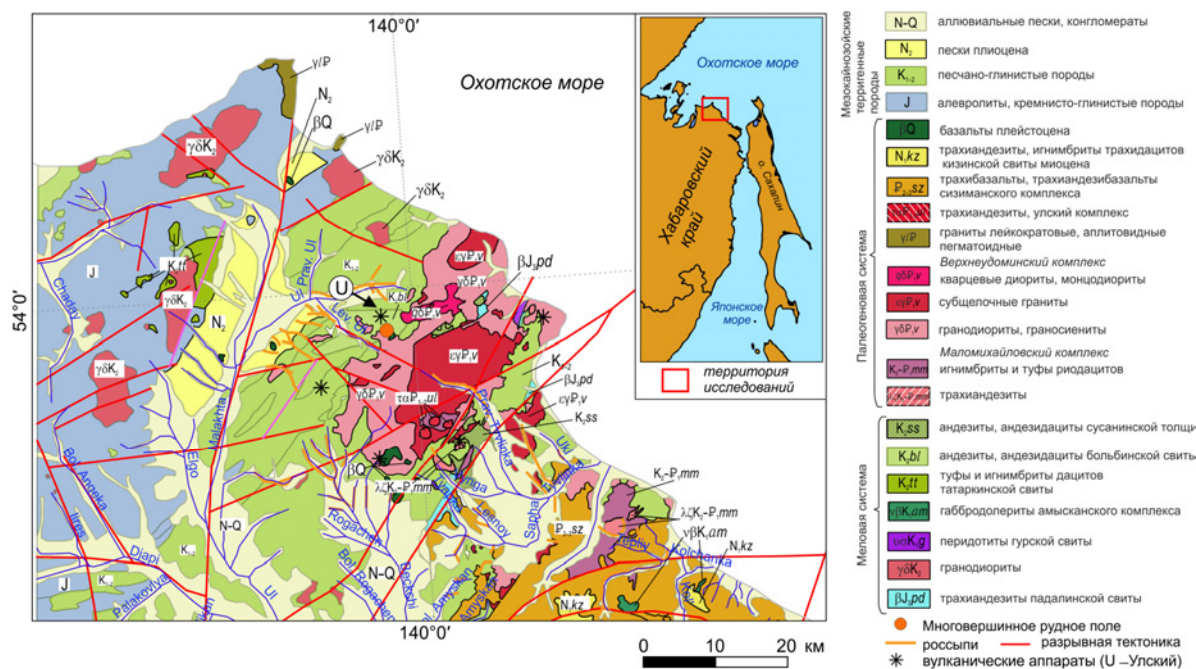


Рис. 3. Схематическая карта района исследований (обрамление Многовершинного рудного поля) (составлено с использованием [5, 6, 7, 8]). Разрывная тектоника вынесена по материалам предшественников.

Верхний структурный этаж представлен палеоценовыми жерловыми и субвулканическими породами – брекчиевыми лавами пироксеновых и роговообманковых андезитов, андезитами и андезидацитами. Оба структурных этажа в пределах рудного поля прорваны Бекчиулским массивом гранитоидов (площадь около 520 км²), на северо-западном фланге которого расположено месторождение Многовершинное [5].

Магматиты сооружения представлены двумя породными ассоциациями: ранней – слабо дифференцированной андезит-гранодиоритовой нормальной щелочности и поздней – заметно дифференцированной монцогранодиорит-гранитной субщелочной. С андезит-гранодиоритовой ассоциацией связано золото-серебряное оруденение, пространственно связанное с Улской андезитоидной вулканоструктурой (см. рис. 3, буква У в кружке), одним из крупных вулканических аппаратов Бекчиулского ВПС. Улская вулканоструктура представляет собой локальную депрессию, вытянутую вдоль северо-западного контакта Бекчиулского гранитоидного плутона. Песчано-алевритовые породы верхнеюрско-нижнемелового возраста, смятые в линейные складки северо-восточного простирания являются фундаментом этой структуры. Вулканиты здесь пропилитизированы с различной степенью интенсивности [8].

Золото-серебряная минерализация Многовершинного рудного поля сосредоточена в протяженных (до 10 км) и мощных (до 100 м) жильно-метасоматических зонах, прослеженных на глубину до 600 м в породах вулканической постройки и фундамента.

Предполагается [8], что крутопадающие рудоконтролирующие разрывные нарушения северо-восточного простирания унаследованы от складчатых деформаций терригенного основания вулканического аппарата и трассируют систему разрывных нарушений, определивших ступенчато-блоковое строение рудного поля с погружением блоков по мере удаления их от Бекчиулского плутона. В соответствии с этим, эродированность блоков уменьшается по мере удаления от ВПС.

Стадийность формирования Бекчиулской ВПС обусловила наличие в пределах Многовершинного месторождения жильно-метасоматических зон различного генезиса и возраста. Так, описаны: метасоматиты кислотного выщелачивания северо-восточного простирания, кварцевые тела, связанные с растяжением северо-восточных разрывных нарушений; участки брекчирования ранее образованного субстрата с кварцевым, адуляр-кварцевым и карбонатно-кварцевым цементом; рудоносные скарноподобные метасоматиты, связанные с внедрением субщелочных интрузивов; рудоносные до- и послескарновые карбонаты; турмалин-кварцевые прожилки, связанные со становлением монцогранодиорит-гранитовой ассоциации [8].

Промышленное оруденение сосредоточено в пределах трех основных жильно-метасоматических зон – Главной, Промежуточной и Медвежьей. Состав этих зон: кварцевый, местами адуляр-кварцевый с приме-

сью серицита, хлорита, карбонатов. Среди рудных минералов доминируют сульфиды (0,5-3% рудной массы). Среди сульфидов преобладает пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, пирротин и арсенопирит. Подчиненную роль играют сульфосоли (блеклая руда, пирсеит-полибазит), теллуриды (гессит, петцит), самородное золото (в виде тонкой и мелкой рассеянной вкрапленности, иногда образующее прожилковые выделения или гнездообразные скопления). Весьма редки: теллуrowисмутит, алтаит, шеелит, селениды (науманнит), теллуроселениды серебра, галенит-клаусталит. Пострудные скарноподобные метасоматиты содержат магнетит и гематит [9, 10].

Рассматривая Многовершинное месторождение, можно говорить о сложной истории развития долгоживущей вулкано-плутоногенной структуры. Разведка Многовершинного месторождения на северо-западном фланге Бекчиулской ВПС позволила существенно расширить представления о закономерностях формирования ее золотосеребряных рудных зон, однако, коренная золотосодержательность остальной площади Бекчиулской структуры и ее обрамления остается неясной. При этом гидросеть территории характеризуется широким развитием россыпных месторождений. Применение дистанционных прогнозных методов может позволить как проследить рудоконтролирующие структуры КФС линейного и центрального типов, так и выделить зоны, перспективные для дальнейшего опосредованного поиска.

Структурно-тектонические парагенезисы территории исследований

Изучение структурно-тектонических парагенезисов (паттернов) территории проводилось с помощью автоматизированного дешифрирования ЛС и КС на подготовленном изображении Landsat 8 (канал 7), а также выделения зон повышенной проницаемости коры (по значениям фрактальной размерности Минковского). Полученные схемы дешифрирования сопоставлялись с положением известных рудопроявлений (на мелкомасштабных схемах) и в различной степени эродированных рудоносных зон (для детальной схемы Многовершинного рудного поля), а также аномалиями магнитного поля.

Дешифрированные кольцевые структуры и разломы (рис. 4а) демонстрируют следующие закономерности. Проверкой коллинеарности коровой трещиноватости установлены разломы субширотного, северо-восточного и северо-западного простираний. Некоторые из этих разломов известны по работам предшественников [5, 6], часть других неясной природы и глубины заложения. В местах пересечения разломов находятся поля развития верхнемеловых и палеоценовых интрузивов кислого состава, включающих Бекчиулский многофазный массив. Это позволяет предположить существенную глубину заложения и длительное время жизни разломов.

Разломы являются рудоконтролирующими, в зоне их влияния находятся золотосеребряные месторожде-

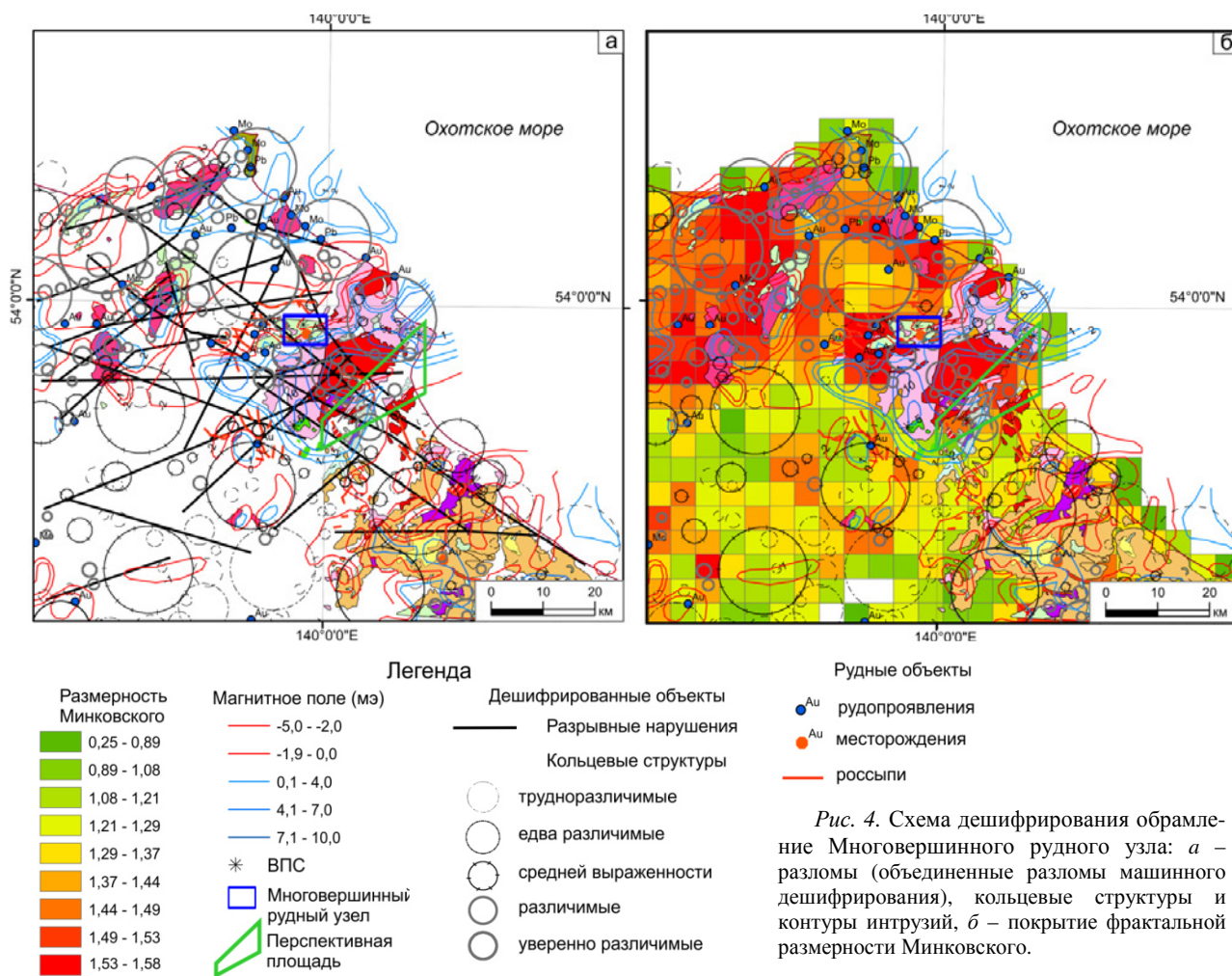


Рис. 4. Схема дешифрирования обрамление Многовершинного рудного узла: а – разломы (объединенные разломы машинного дешифрирования), кольцевые структуры и контуры интрузий, б – покрытие фрактальной размерности Минковского.

ния Многовершинное и Белая Гора (юго-запад территории), а также известные рудопроявления золота, молибдена и полиметаллов.

Анализом дистанционной основы выявлены две генерации кольцевых структур различной степени выраженности, радиусом 10-20 км и радиусом 3-9 км. Крупные КС отличаются центростремительным характером рисунка гидросети и, вероятно, соответствуют межгорным впадинам и кальдерам проседания, что подтверждается наличием субвулканических и вулканогенно-осадочных пород, а также локальных минимумов магнитного поля. Отдельные КС малого радиуса и их цепочки (кластеры) соответствуют плутоническим комплексам – главным образом, гранитоидам мелового и палеоценового возраста. Кольцевые структуры, связанные с кислым магматизмом, выражены положительными формами рельефа и локальными максимумами магнитного поля. В этой связи хотелось бы упомянуть работу швейцарского исследователя [11, р. 292, fig. 17.9], показавшего в своей численной модели соответствие основным маловязким магмам – отрицательных, а высоковязким кислым – положительных форм рельефа.

Существенную информацию о проницаемости коры для магм и рудоносных растворов предоставляют карты фрактальной размерности Минковского, расчи-

танной по окнам площадью 5x5 км (рис. 4б). Фрактальная размерность позволяет описать геометрию дешифрируемых на плоскости структурных элементов, которые не могут быть описаны регулярными элементами. Число классов окон фрактальной размерности Минковского (d_m) подбирается эмпирически, для учета небольших локальных повышений значений размерности. Границы классов устанавливаются с помощью алгоритма естественных границ Дженкса.

Оперение наиболее проницаемыми окнами разломов позволяет говорить об обнаружении с помощью d_m проницаемых нерегулярных структур, связанных с ними. Представленный метод является запатентованным и может быть использован в региональном прогнозе гидротермальных рудных месторождений полезных ископаемых [3]. Максимумы значений фрактальной размерности трещинного узора, являющегося поисковым признаком гидротермальных месторождений, демонстрируют соответствие распределению оруденения. К ним приурочены Многовершинное месторождение, его резерв – законсервированное месторождение Белая гора, находящаяся на юго-западе исследуемой территории, а также ряд рудопроявлений. Также отмечается, что в зонах максимумов d_m также локализованы вулканоплутонические магматические ассоциации.

В качестве потенциально перспективной площади с позиций ДЗЗ, можно выделить зоны на юго- и северо-восточном обрамлении Бекчиулского массива гранитоидов (см. рис. 4). В пользу перспективности этих участков говорят предпосылки, отмечаемые на северо-западном обрамлении, в пределах Многовершинного рудного поля: наличие палеовулканов, разноориентированные разломы, положительные аномалии магнитного поля и повышенные значения d_m . В качестве прямых поисковых признаков нужно упомянуть наличие промышленных россыпей в притоках р. Тывлинка. Негативную роль играет наличие и существенная мощность N-Q осадков, затрудняющих поиски и позволяющих предположить о существенной эродированности коренного месторождения. Более детальные геолого-геофизические работы могли бы ответить на вопрос о наличии коренных Au-Ag месторождений на востоке Бекчиулского массива.

Результаты исследований и выводы

Многовершинное рудное поле – уникальный природный объект, сформировавшийся благодаря влиянию нескольких факторов – процессов магматизма, активной тектоники и инфильтрации флюидов. Автоматизированное дистанционное спутниковое исследование территории по КФС Landsat и ЦМР SRTM позволило подтвердить факты локализации рудных объектов в пределах трещиноватых проницаемых участков территории и уточнить положение и выраженность региональных разрывных структур.

Автоматизированный анализ дистанционных изображений территории в Matlab позволяет получать сопоставимые результаты для различных областей КФС и, таким образом, проводить экспресс-районирование территорий анализа в масштабе анализируемых структур и выявлять закономерности пространственной дифференциации.

Результаты анализа схем автоматизированного дешифрирования космофотоснимков полигона исследований могут быть сведены к следующему:

- рудные зоны Многовершинного рудного узла, ответственны за сдвигам северо-восточного простирания и их ослабленным периферическим зонам;
- ведущая роль в формировании рудных зон принадлежит, вероятно, коровой проницаемости, оцени-

ваемой посредством вычисляемой по дистанционным данным фрактальной размерности Минковского d_m ;

- неотектоническая активность на флангах Бекчиулской структуры, приведшая к вскрытию и эрозии рудных тел, выражается в локальных максимумах карт превышений водоразделов над тальвегами, а также сейсмичности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фатьянов, И. И. Реконструкция рудообразующей системы Многовершинного золото-серебряного месторождения (Нижнее Приамурье) по данным о строении рудоносных зон по изотопным исследованиям / И. И. Фатьянов, В. Г. Хомич, Н. Г. Борискина // Тихоокеанская геология. – 2009. – Том 28. – №1. – С. 21-31.
2. Hough Transform // OpenCV 2.4.8.0 documentation. URL: http://docs.opencv.org/doc/tutorials/imgproc/imgtrans/hough_lines/hough_lines.html (Дата обращения: 23.03.2014).
3. Шевырев, С. Л. Способ проведения прогнозно-поисковых работ месторождений полезных ископаемых на исследуемой площади // Патент RU2603856, дата приоритета: 26.06.2015
4. Jianbo, Shi Computer vision // Penn Engineering. School of engineering and applied science. URL: <http://www.seas.upenn.edu/~cse399b/Lectures/CSE399b-04-edge.pdf> (Дата обращения 23.03.2014).
5. Геологическая карта Российской Федерации N-54-XXI / Под ред. В. А. Кайдалова, В. Г. Роганова // Роснедра. – 2013.
6. Геологическая карта СССР N-54-XIV-XV / Под ред. Р. А. Кочановой, Д. А. Аронсона // ВСЕГЕИ. – 1969.
7. Геологическая карта СССР N-54-XX / Под ред. Р. А. Кочанова, Д. А. Аронсона // ВСЕГЕИ. – 1970.
8. Фатьянов, И. И. Бекчиулское золотоносное вулканоплутоническое сооружение: магматические ассоциации, особенности развития, схема формирования (Нижнее Приамурье) / И. И. Фатьянов, В. Г. Хомич // Тихоокеанская геология. – 1997. – Т.16. – №1. – С. 32-44.
9. Фатьянов, И.И. Нетрадиционный метод типизации руд золотосеребряных месторождений (на примере Многовершинного месторождения, Нижнее Приамурье) / И. И. Фатьянов, В. Г. Хомич, Н. Г. Борискина // Вестник ТПУ. – 2007. – № 304. – С. 211-217.
10. Khomich, V. G. Characteristics and genesis of the Mnogovershinnoe gold-silver deposit, SE Russia. Ore Geology Reviews. – 2017. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.017> (Дата обращения: 23.03.2017).
11. Gerya, Taras Introduction to Numerical Geodynamic Modelling / Cambridge University Press. – 2010. – P. 292

Дальневосточный Федеральный Университет (ДФУ)
Дальневосточный геологический институт (ДВГИ) ДВО
РАН, Владивосток

Шевырёв Сергей Леонидович, к.г.-м.н., доцент ДВФУ, научный сотрудник ДВГИ ДВО РАН
E-mail: shevirev@mail.ru

Far Eastern Federal University (FEFU)
Far Eastern Geological Institute (FEGI) FEB RAS

Shevirev S. L., PhD, associate professor of FEFU, researcher of FEGI FEB RAS
E-mail: shevirev@mail.ru