

О НОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ПРОГНОЗНОЙ ОЦЕНКИ ПАТТЕРНОВ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕТАЕЖНОГО РУДНОГО УЗЛА, ПРИМОРЬЕ

С.Л.Шевырев

Дальневосточный геологический институт
ДВО РАН

Рассматривается проблема создания крупномасштабной прогнозной модели рудных узлов на основе анализа материалов дистанционных съемок. В качестве территории проверки данного метода используется площадь Нижнетаежного рудного узла Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса, имеющего благороднометальную специализацию.

Ключевые слова: прогноз оруденения, методы дистанционного зондирования, рудные узлы, оценка перспективности, Дальний Восток России.

Образование месторождений как рудного, так и нерудного минерального сырья связано с миграцией в земной коре рудоносных растворов, транспортирующих вещества и при наличии определенных факторов формирующих промышленно значимые их скопления. Ключевым является представление о продуктивной гидротермальной палеосистеме – участке земной коры со свойствами трещинной перколяционной структуры, которые позволяют рудоносным флюидам мигрировать и формировать те или иные скопления полезных ископаемых.

Задачи прогноза и поисков таких месторождений – установление закономерностей строения и площадного распространения элементов гидротермальной палеосистемы, включающих источники рудного вещества и инфраструктуру, обуславливающую пути его перемещения и места отложения. Для этого в настоящей статье рассматриваются вопросы формирования комплексной системы оценки территорий, направленной на их классификацию по степени прогнозной перспективности обнаружения гидротермальных месторождений.

Руководящей служит гипотеза о том, что существовавшая в прошлом палеогидротермальная система сохранила свидетельства своей инфраструктуры в современном рельефе, контролируемом мощностью эрозионного среза.

Паттерны трещиноватости и возможности их описания. Нарушения земной поверхности, выделяемые по космодатаснимкам (КФС), так называемые паттерны трещиноватости, представлены структурами различной природы и возраста. В практике дистанционных прогнозных исследований обычно выделяют линейные, кольцевые и дугообразные элементы дистанционного изображения. Линейные элементы, прослеживаемые в ландшафтах, маркируют зоны разломов различного порядка [7]. Но для определения перспективности территории на наличие полезных ископаемых, связанных с миграцией гидротермальных растворов, следует учитывать также иные структурные особенности несплошностей породы, образующих перколяционный кластер. Для возникновения инфльтрации гидротермальных растворов нужно, чтобы система трещиноватости достигла

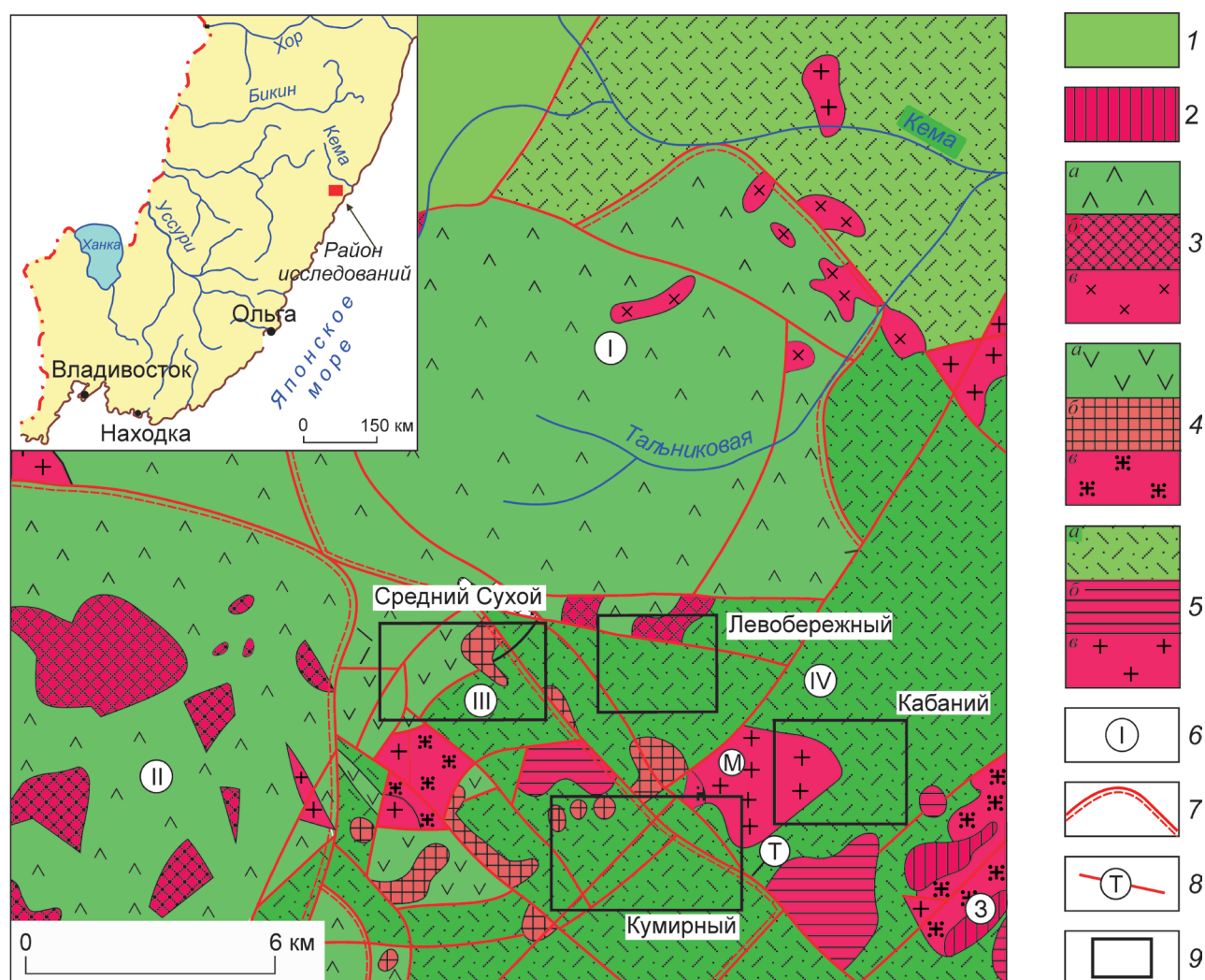


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Нижнетаежного рудного узла, по данным [1]:

1 – нижнемеловые терригенные отложения складчатого основания (фундамента) Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса; вулканические и вулканоплутонические комплексы: 2 – кизинский миоценовый вулканический (субвулканические тела дацитов, андезидацитов), 3 – богопольский маастрихт-датский (а – игнимбриты, туфы риолитов, б – экструзии и некки дацитов, в меньшей степени экструзии андезитов, риолитов, в – гранитоиды богопольской серии), 4 – самаргинский раннемаастрихтский (а – туфы дацитов, риодацитов, в меньшей мере андезиты, туфы андезитов, риолитов, б – экструзии, некки и дайкообразные тела андезитов, андезидацитов, в – гранитоиды самаргинской серии, в том числе массив Заводской (3)), 5 – приморский турон-кампанский (а – туфы риолитов с прослоями игнимбритов, туффигов, туфоалевролитов, туфопесчаников, б – экструзии и некки риолитов, в – гранитоиды приморской серии, в том числе Малиновский массив (М)); 6 – крупные вулканотектонические структуры (I – Тальниковая, II – Шандуйская, III – Носыревская, IV – Монкинское поднятие); разломы: 7 – ограничивающие кальдеры, 8 – прочие, в том числе Таежная зона разрывов (Т); 9 – контуры главных рудоносных площадей

порога протекания – минимально необходимо развития в ней несплошностей, образовавших кластеры. Их формирование обусловлено не только существованием несплошностей в объе-

ме породы, но и их связностью [3]. Отметим, что для формирования палеогидротермальной системы важно наличие источников растворов, одним из которых могло быть магматическое тело.

Алгоритм, направленный на анализ дистанционного строения территории

Этапы	Стадии
1. Автоматизированное дешифрирование кольцевых структур	1. Подбор исходных изображений дистанционных съемок
	2. Визуальная оценка изображений
	3. Задание параметров предварительной обработки изображений (фильтрация и контрастирование границ)
	4. Выбор параметров обнаружения кольцевых структур
	5. Применение преобразования Хафа к дистанционному изображению для распознавания окружностей
	6. Обработка полученного массива структурных элементов и последующий анализ достоверности выделения путем совмещения с реальными объектами, классификация дешифрированных структур по степени выраженности, формирование их кластеров
	7. Картографирование структур и их экспорт в общепотребительном ГИС-формате (ESRI shape)
2. Автоматизированное дешифрирование проницаемых зон	8. Выбор параметров фильтрации изображения для дешифрирования инфраструктуры палеогидротермальной системы
	9. Выбор площади элементов покрытия (окон осреднения) в зависимости от крупности выделяемых объектов
	10. Анализ рисунка трещиноватости с применением фрактальных размерностей
	11. Классификация элементов покрытия площади по значениям фрактальной размерности
	12. Составление прогнозной схемы (кластеры, соответствующие проницаемым участкам и кольцевым структурам)
3. Оценка результатов анализа и прогноз	13. Оценка качества анализа. Сопоставление кластеров, образуемых окнами покрытия с близкими значениями фрактальной размерности известных и предполагаемых геологических структур, а также рудными объектами
	14. Выделение перспективных участков, рекомендуемых для дальнейшего опоскования

Для выявления продуктивных зон требуется аналитически выделить черты гидротермальной системы в дистанционном изображении и рассчитать параметры, описывающие их характеристики. При этом используются распознавание образов с помощью преобразования Хафа и анализ структур палеогидротермальной системы с применением фрактальной размерности Минковского (D_m).

Геологическое строение Нижнетаежного рудного узла. Для анализа отбирались материалы радарных съемок Тернейского района Приморья (SRTM, разрешение 90 м), включающие территорию Нижнетаежного рудного узла (НТРУ) и прилегающие площади. Дистанционный мониторинг последних затруднен из-за практически повсеместного развития поч-

венно-растительного покрова. Рудный узел площадью до 500 м² расположен в Прибрежной зоне Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса (бассейн р. Таежная, примерно в 25 км от побережья Японского моря), характеризуется дифференцированным геологическим строением [1], развитием разрывных нарушений различной выраженности и соподчиненности, а также центров вулканизма (рис. 1).

Стратифицированные образования в пределах узла относятся к двум структурным этапам: нижнему терригенному (K_1), породы которого смяты в крутые складки северо-восточного простирания, и верхнему вулканогенному (K_2), включающему эффузивно-пирокластические накопления богопольской (маастрихт-дат), самаргинской (маастрихт) и приморской (турон-кампан)

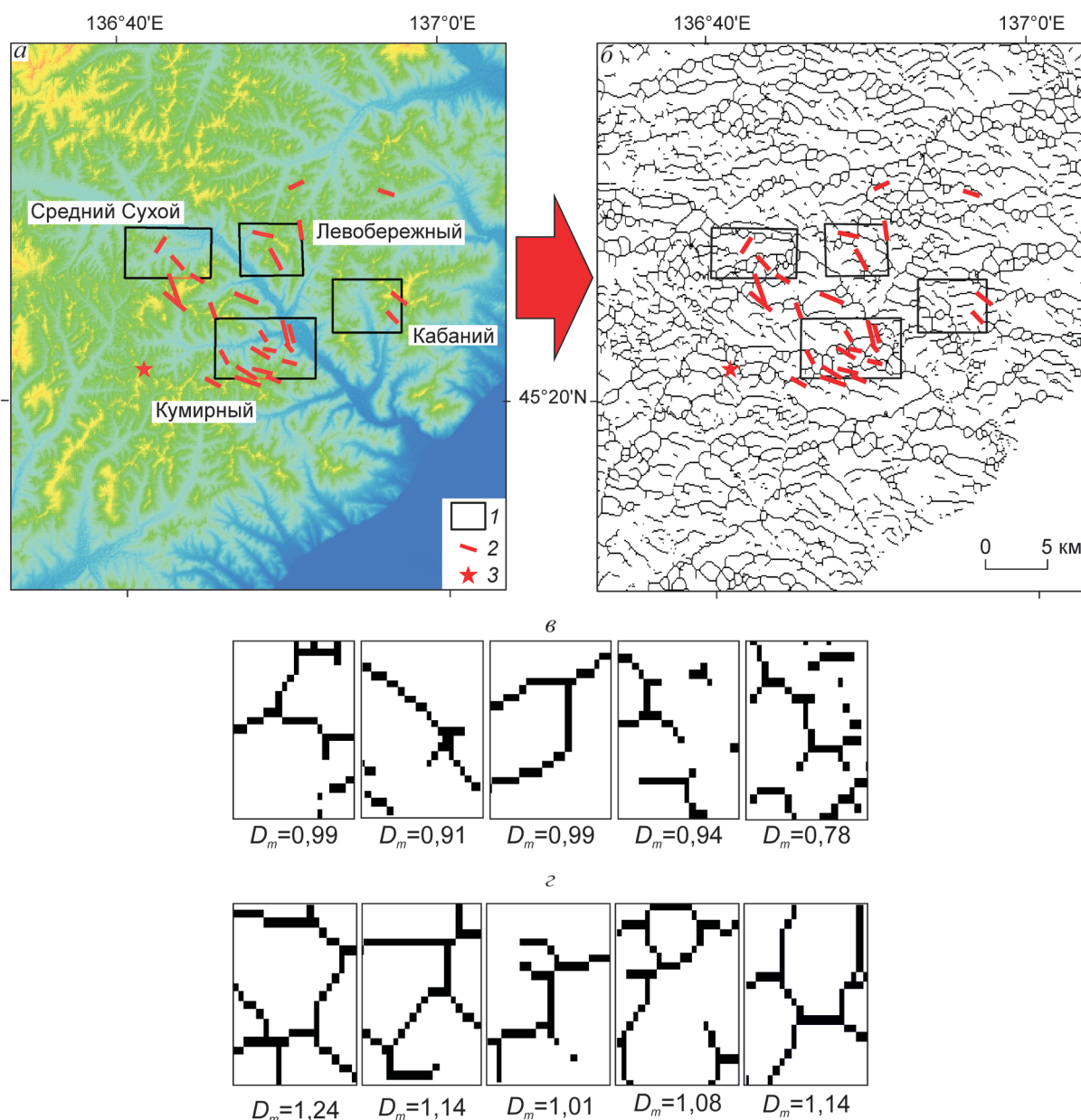


Рис. 2. Анализ паттернов дистанционного изображения Нижнетаежного рудного узла:

а – исходная ЦМР SRTM; *б* – преобразованное изображение; паттерны ($S=4 \text{ км}^2$): *в* – безрудные (в их пределах уменьшена вероятность обнаружения рудных объектов), *г* – наблюдаемые на площадях развития рудоносных зон; 1 – границы участков; 2 – рудные зоны; 3 – рудная зона «Дружба»

толщ, участвующие в строении Носыревской, Тальниковой, Шандуйской кальдер проседания и Монкинского вулканокупольного поднятия.

Наиболее крупные интрузивные и субвулканические тела относятся к самаргинскому и богопольскому вулканоплутоническим комплексам (ВПК). Вместе с более молодыми образо-

ваниями они сосредоточены в локальных очаговых структурах интрузивно-купольного типа. Интрузивы имеют сложное строение, обусловленное стадийностью их формирования. Так, наиболее ранние фазы крупного Малиновского массива сложены преимущественно самаргинскими диоритоидами, в составе кото-

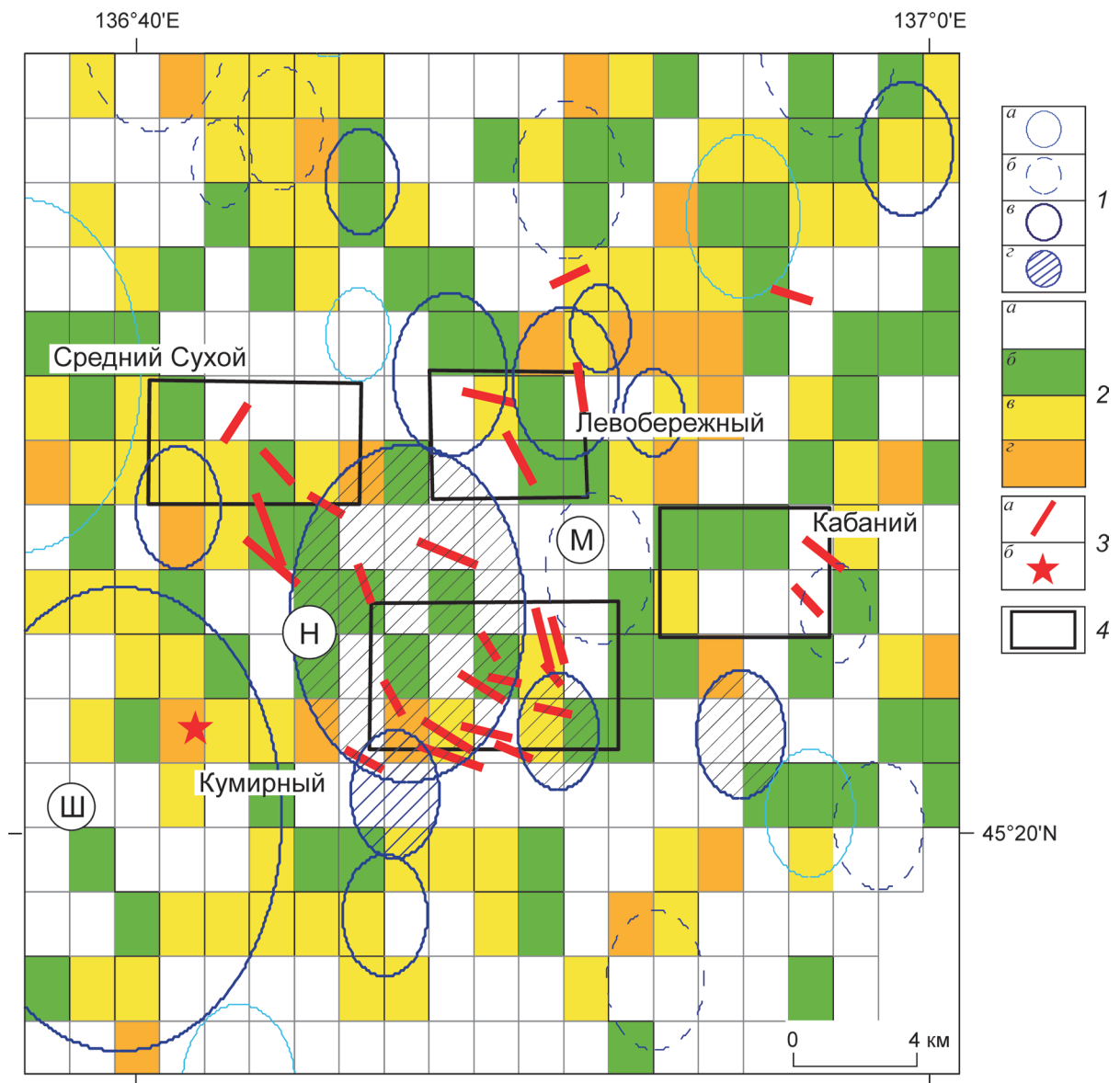


Рис. 3. Прогнозная схема территории Нижнетаежного рудного узла, построена по результатам автоматизированной оценки ЦМР SRTM:

1 – кольцевые структуры от наименее (а) до наиболее (з) выраженных; 2 – паттерны дистанционного изображения (а – «непроницаемые», б – «малопроницаемые», в – «проницаемые», г – «высокопроницаемые»); 3 – рудные зоны (а – известные, б – открытая В.В.Ивиным летом 2014 г. зона «Дружба»); 4 – участки рудного узла; кольцевые структуры: Ш – Шандуйская, Н – Носыревская, М – Малиновская

рых преобладают мелкозернистые биотит-роговообманковые разности. Картируемые в составе этого комплекса биотитовые порфировидные граниты, переходящие в краевых частях массива в гранит-порфиры, вероятно, принадлежат к богоспольскому ВПК [5]. Субвулканические тела последнего – крупнопорфировые ри-

олиты, их кластолавы, а также гранит-порфиры. Среди пород богоспольского ВПК подчиненную роль играют некки дацитов и трахидацитов, иногда переходящих в андезидациты, риодациты и риолиты.

Более поздние, кизинские, образования представлены слабо измененными мелко- и

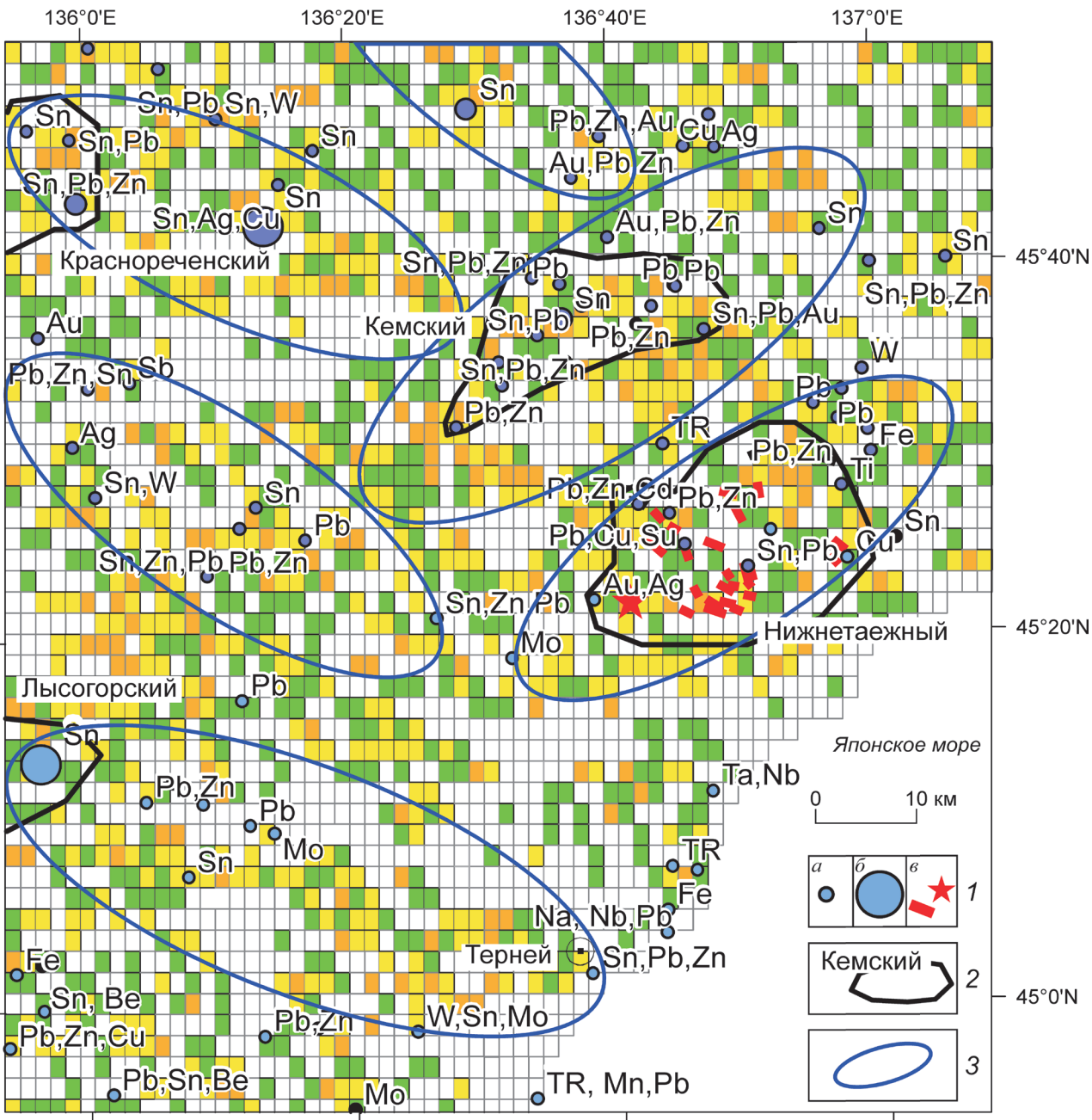


Рис. 4. Схема прогнозной перспективности территорий, прилегающих к Нижнетаежному рудному узлу (проницаемые зоны):

1 – рудные объекты (*a*, *б* – немасштабные рудопроявления и месторождения соответственно, *в* – рудные жилы); 2 – рудные узлы; 3 – кластеры проницаемых паттернов; остальные усл. обозн. см. рис. 3

неяснопорфировыми (часто миндалекаменными) разностями роговообманково-плагиоклазовых андезитов повышенной щелочности, в меньшей степени базальтами и андезибазальтами с шаровой отдельностью.

По данным полевых работ [1] на площади узла широко развиты разрывные нарушения, диагностируемые и при дистанционных космических исследованиях. Нарушения первого порядка имеют преимущественно северо-вос-

точное простираение, согласное с ориентировкой региональных разломов фундамента Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса, контролирующих пространственное положение вулканотектонических структур и центров эксплозивного вулканизма (см. рис. 1).

На площади установлены комплексные геохимические аномалии (потoki рассеяния) Ag, Pb, Zn, Sn, Cu, позволившие выделить рудоносные участки (поля) Кумирный, Левобережный, Кабаний и Средний Сухой. В пределах последних локализованы рудные зоны (>30) преимущественно северо-западной ориентировки с редкометальной, полиметаллической (с серебром), олово-полиметалльно-серебряной, полиметалльно-серебряной и собственно серебряной минерализацией.

Жильно-прожилковые зоны с олово-полиметалльно-серебряным, полиметалльно-серебряным оруденением (Белембинская, Бортовая, Русловая и др.) размещены вблизи Малиновской интрузии и штоков самаргинских диоритов среди ороговированных вулканитов нижней пачки приморской толщи (K_2pr_1). Мощность зон достигает 10–20 м, протяженность 1,5 км и более. Они состоят из сложноветвящихся крутопадающих серебряноносных кварц-сульфидных жил, сопровождаемых прожилково-вкрапленной минерализацией.

Убогосульфидные серебряноносные зоны (Кумирная, Водораздельная, Заманчивая, Ближняя, Неясная, Крайняя, Перевальная, Сентябрьская, Сюрприз и др.) пространственно разобщены с олово-полиметалльно-серебряным оруденением, имеют значительно меньшую мощность (до 3–4 м) и преимущественно приурочены к вулканитам верхней пачки приморской толщи (K_2pr_3), превращенным в кварц-серицит-гидрослюдистые метасоматиты [1].

Методика исследований. Проведенные исследования основаны на следующих работах:

автоматизированном выделении кольцевых (изометрических) структур – ключе определения положения и автоматизированного учета тектономагматических поднятий, центров эксплозивного магматизма, являющихся вероятными источниками гидротермального вещества;

анализе препарированного денудацией рисунка трещиноватости и распознавании его

паттернов с учетом фрактальной размерности, поскольку диссипация эндогенного вещества могла осуществляться посредством инфраструктуры палеогидротермальной системы;

применении автоматизированных методик дешифрирования, основанных на использовании преобразования Хафа [6], наделяющим исследователя методологическим аппаратом распознавания структурных элементов изображения. Для распознавания кольцевых элементов космическое изображение предварительно отфильтровывалось с получением градиентного изображения, вычислением степени контрастности градиента и обнаружением его локальных максимумов, соответствующих контрастным границам [8]. Данные действия полностью автоматизированы.

При подобном подходе субъективная роль исследователя сводится к подбору параметров анализа, а также классификации автоматически выделенных структурных элементов по степени их достоверности.

Для автоматизированной экспертной оценки территории было реализовано несколько этапов анализа, включающих от двух до семи стадий (таблица).

На первом этапе анализировались структуры цифровой модели рельефа и автоматически распознавались кольцевые структуры. Выделенные кольцевые структуры рассматривались в зависимости от степени их выраженности и диаметра и исследовались как наиболее значимые элементы структуры НТРУ: тектономагматические поднятия, кальдеры проседания, вскрытые денудацией интрузии, жерловые субвулканические ассоциации. На втором этапе выявлялась возможная транспортная инфраструктура палеогидротермальных растворов. Выбор параметров фильтрации обусловлен наиболее полным выделением «скелетных» элементов (сопоставимые с реальной ситуацией результаты достигнуты с помощью алгоритма поиска границ на изображении [8]). Затем с помощью покрытия прямоугольными окнами на территории исследования рассчитывались значения фрактальной размерности Минковского (применялся модуль boxcount программы Matlab, автор Ф.Мойси [9]).

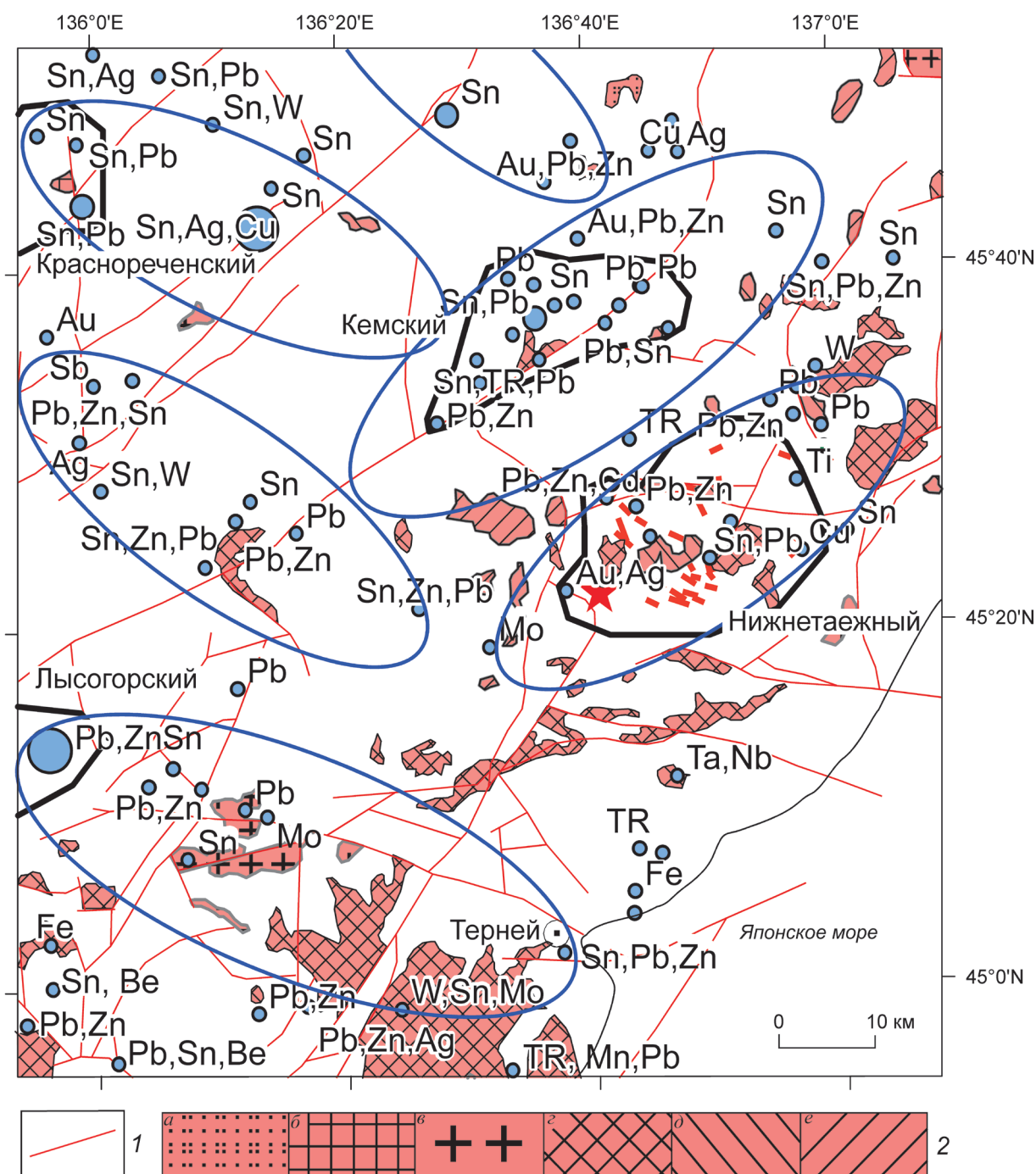


Рис. 5. Положение проницаемых зон по материалам автоматизированного дешифрирования КФС в тектонической структуре территории, по материалам [2]:

1 – разрывные нарушения достоверные; 2 – интрузивные и субвулканические тела (а – гранодиориты и б – граниты бачелазского комплекса, в – гранодиориты и з – граниты приморского комплекса, д – граниты позднемеловые (K_2), е – граниты палеогеновые); остальные усл. обозн. см. рис. 4

Окна покрытия, в пределах которых рассчитывалась фрактальная размерность Минковского, классифицировались с применением алгоритма естественных границ Дженкса. Эта классификация достаточно эффективна, поскольку в каждом классе минимизируется стандартное отклонение членов класса и его среднего значения, а отклонение между различными классами максимизируется. Число классов подбиралось экспериментально. При этом была выявлена естественная латеральная группировка окон покрытия в кластеры, характеризующиеся повышенными и пониженными значениями фрактальной размерности Минковского. Несколько классов с пониженными значениями фрактальной размерности Минковского (эмпирически, $D_m < 1,01$) рассматривались как неперспективные (рис. 2). Из рисунка видно, что паттерны преобразованного изображения с оруденением (см. рис. 2, б) отличаются большим количеством «скелетных» элементов (черный цвет) и лучшей их «связностью».

Выделенные кластеры сравнивались с известными разломными структурами и рудными объектами гидротермального генезиса различного масштаба. Анализировалась выраженность известных объектов в поле значений фрактальной размерности Минковского и осуществлялся прогноз новых перспективных площадей.

Дистанционная оценка гидротермальной палеосистемы Нижнетаежного рудного узла и прилегающих территорий – прогнозные возможности. Прогнозные модели паттернов трещиноватости НТРУ (рис. 3) и прилегающих территорий (рис. 4) составлены с применением методик автоматизированного дешифрирования дистанционной цифровой топографической модели (SRTM). Их сопоставление с геологическими данными (материалы ОАО «Приморгеология») позволило воссоздать по результатам дистанционных исследований закономерности минерализации территории.

Установлено соответствие автоматизированно дешифрированных по КФС кольцевых структур известным вулканическим постройкам (кальдерам проседания, вскрытым денудацией магматическим камерам) и экструзивным массивам. Хорошо выражены как кальдеры просе-

дания (Носыревская, Шандуйская), так и массивы гранитоидов (Малиновский). Для приведенных кольцевых структур кластеры окон покрытия, охарактеризованные значениями фрактальной размерности Минковского, позволяют проследить пути миграции вещества. При наличии геохимических барьеров образовывались зоны его аккумуляции. Эта закономерность прослеживается для участков рудного узла Левобережный, Кумирный, Средний Сухой, причем северо-западное простирание рудных зон совпадает с ориентировкой осевых линий «проницаемых» кластеров покрытия (см. рис. 3). Тенденция приуроченности рудных зон к ослабленным структурам северо-западной ориентировки считается общей для Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса и отражена в работах В.П.Уткина [4]. Однако выявление таких перспективных зон масштаба отдельных рудных узлов представляет собой нетривиальную для исследуемых территорий задачу.

Анализ площадного распределения кластеров показал, что простирание их осевых зон подчиняется закономерностям в целом типичным для тектонического рисунка вулканоплутонического пояса – длинные оси крупных кластеров имеют северо-восточное простирание, оси меньших кластеров – северо-западное. Также выяснено, что возможности линеamentного анализа на сегодняшний день существенно преувеличены. Линеamentы северо-восточного простирания не обязательно соответствуют рудным зонам, а рудоносные кластеры паттернов, выявляемые нами, имеют преимущественно северо-западную, ортогональную, ориентировку.

Для прилегающей к рудному узлу территории прослеживается приуроченность рудных полей и отдельных скоплений полезных ископаемых к диссипативным проницаемым зонам (см. рис. 4). Даже при беглом визуальном осмотре схемы дешифрирования наблюдается приуроченность рудных объектов в осевым линиям кластеров «проницаемых» паттернов (см. рис. 4), тогда как непроницаемые зоны практически лишены рудных объектов. В то же время, не по всем «проницаемым» участкам равномерно распределены рудные объекты, что позволяет рекомендовать площади для доизучения.

Выделенные на снимке кластеры (рис. 5), которые, по нашему мнению, соответствуют наиболее проницаемым зонам земной коры, вскрытым в эрозионном срезе, при дистанционном исследовании должны анализироваться совместно с кольцевыми структурами. Направления поисков корректируются по результатам геофизических и геохимических исследований с учетом историко-минерагенических сведений об этапах тектонической активности и магматизма территории.

Как видно из рис. 4 и 5, простирающиеся длинные оси проницаемых зон, соответствующих кластерам, конформны известным разломам, к которым, в свою очередь, приурочены интрузии, парагенетически связанные с образованием месторождений полезных ископаемых. Таким образом, можно заключить, что аналитическое исследование одной лишь ЦМР SRTM района с выделением «проницаемых зон» позволило дополнить известные выводы о его геологическом строении и минерагенических особенностях.

В полевом сезоне 2014 г. на территории Нижнетаежного рудного узла в пределах «проницаемой» площади (см. рис. 5) сотрудниками ДВГИ проводились дополнительные маршруты. В.В.Ивиным была обнаружена рудная зона «Дружба» – штокверковое тело с кварц-сульфидными прожилками (см. рис. 3). На местности зона представлена обохренными высыпками в выемке грунтовой дороги. Факт такой находки говорит о необходимости возобновления геологоразведочных работ в пределах выделенных по КФС проницаемых зон в целях наращивания запасов и усиления внимания к этому объекту.

В результате выполненного исследования получена информация, которая может использоваться для создания крупномасштабной региональной прогнозной модели гидротермальных месторождений. Узор трещинной сети по космическим снимкам и расчет фрактальной размерности Минковского для оценки прогнозной перспективности можно применять при выделении проницаемых зон существовавшей в геологическом прошлом палеогидротермальной системы.

Автоматизированное выявление кольцевых структур позволяет сузить круг участков опоскования, выделять проницаемые зоны, относящиеся к примыкающим к ним кольцевым объектам дистанционного изображения, как наиболее перспективные для обнаружения скоплений полезных ископаемых гидротермального генезиса. Следует также отметить, что самостоятельное выделение кольцевых структур без учета окружающей их трещинной инфраструктуры малоперспективно.

Ниже предложены два способа реализации предлагаемой методики дистанционного исследования:

самостоятельная методика, использующая исключительно данные дистанционного исследования для выявления кольцевых структур и проницаемых кластеров. Повышение достоверности в данном случае требует заверки природы выделяемых объектов;

вспомогательная методика, дополняющая региональные геологические работы. В этом случае работы комплексированы с прогнозными геологическими данными и служат обоснованием постановки дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Геологическое строение и типы эндогенной минерализации Нижнетаежного рудного узла (Приморье)* / В.В.Ивин, А.Н.Родионов, В.Г.Хомич и др. // Тихоокеанская геология. 2006. Т. 25. № 3. С. 81–87.
2. *Государственная геологическая карта. М-6 1:1 000 000 (новая серия). Лист L-(53), (54) – Кавалерова. Объяснительная записка* / Под ред. Т.В.Брежнева. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 1994.
3. *Тарасевич Ю.Ю.* Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. – М.: Едиториал УРСС, 2002.
4. *Уткин В.П.* Строение, геохронология и структурно-динамические условия вертикального развития Восточно-Сихотэ-Алинского магмо-металлогенического пояса // ДАН. 2005. Т. 404. № 5. С. 659–663.
5. *Хомич В.Г., Ивин В.В., Борискина Н.Г.* Новые определения возраста (К-Аг метод) интрузивных образований Нижнетаежного рудного узла (Северное Приморье) // Вестн. ТГУ. 2010. № 331. С. 214–218.
6. *Шевырев С.Л.* Автоматизированный морфометрический анализ юго-восточной окраины Сибирь-

- ского кратона по космическим изображениям в Matlab // Вестн. ВГУ. 2014. № 3. С. 35–41.
7. Шевырев С.Л., Хомич В.Г. Выявление инфраструктурных элементов рудно-магматических систем Приморья по материалам космического зондирования // Вестн. ВГУ. 2013. № 2. С. 118–128.
8. Jianbo Shi. Computer vision // [Электронный ресурс]: Penn Engineering. School of engineering and applied science. URL: <http://www.seas.upenn.edu/~cse399b/Lectures/CSE399b-04-edge.pdf> (От 23.03.2014).
9. Moisy F. Computing a fractal dimension with Matlab: 1D, 2D and 3D Box-counting // Laboratory FAST, University Paris Sud. URL: <http://www.fast.u-psud.fr/~moisy/ml/boxcount/html/demo.html> (Дата обращения: 11.08.2014).

Шевырев Сергей Леонидович,
кандидат геолого-минералогических наук
shevirev@mail.ru

ON THE NEW POSSIBILITIES FOR LARGE-SCALE PROSPECTIVE ANALYSIS OF REMOTE SENSING PATTERNS OF MINERALIZED OBJECTS (AS EXEMPLIFIED BY NIZHNETAZHNYY ORE CLUSTER, PRIMORSKY KRAY)

S.L.Shevirev

The problem of developing of the large-scale predictive models presenting the ore clusters based on the analysis of remote sensing data is considered. Relevant case histories from the Nizhnetaezhny precious metal ore cluster, the East Sikhote-Alin volcanic-plutonic belt, are presented.

Key words: forecast of mineralization, remote sensing method, ore cluster, evaluation of prospects, Russian Far East.