

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЛЮИДНЫХ РУДОНОСНЫХ ПАЛЕОСИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ КАК НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ПРОГНОЗНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С. Л. Шевырёв^{1,2}, М. Ж. Шевырёва¹

¹ Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ), Владивосток

² Дальневосточный геологический институт (ДВГИ ДВО РАН), Владивосток

Поступила в редакцию 15 августа 2016 г.

Аннотация: на примере Малиновского рудного поля и Нижнетаежного рудного узла Восточно-Сихотэ-Алинского вулcano-плутоногенного пояса предлагается оценка прогнозной рудоносности территорий с помощью комплексного исследования. Анализ включает дешифрирование инфракрасной структуры и гидродинамическое моделирование палеогидротермальных систем, что позволяет выявить вероятные пути транспортировки и отложения рудного вещества.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, перколяционные кластеры, решетка Больцмана, гидродинамическое моделирование, минерогенез.

SIMULATION OF FLUID ORE-BEARING PALEOSYSTEMS WITH REMOTE SENSING OF THE EARTH AS NEW DIRECTION OF PROSPECTIVE RESEARCHES

Abstract: on example of Malinowskoe ore field and Nizhnetaezhny ore district of East Sikhote-Alin volcanic plutogenic-belt prospective forecast of ore-bearing areas are done through integrated research. The analysis includes interpretation of the sources of ore-bearing solutions and the hydrodynamic test of permeable structures. The latter allows performing identification of possible ways of ore transportation and deposition.

Key words: remote sensing, percolation clusters, lattice Boltzmann, hydrodynamic simulation, Minerageny.

Введение

В настоящее время дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) в геологии развивается в качестве дополнительного метода прогноза месторождений полезных ископаемых, наращивания ресурсов минерального сырья и мониторинга существующих объектов эксплуатации. Невысокая результативность ДЗЗ в геологии привела к заметному снижению интереса отечественных и зарубежных специалистов к их практическому использованию.

Для прогноза месторождений полезных ископаемых на дистанционной основе ключевой особенностью является формализация генезиса дешифрируемых объектов. Морфологические структуры, выделяемые как ручной, так и автоматизированной обработкой изображений могут иметь различную геологическую, а, следовательно, и минерогенетическую интерпретацию.

Это связано как с особенностями аппарата анализа космических снимков, так и с уровнем генерализации и выраженности эндогенных факторов формирования ландшафта, отраженного в фототоне космического снимка.

Для труднопроходимых залесенных районов с плохой облаженностью, к которым может быть отне-

сена большая часть территории Сихотэ-Алиня, имитационное моделирование гидротермальных палеосистем может явиться ключевым решением задач наращивания ресурсов минерального сырья, способствуя существенному удешевлению региональных геологоразведочных работ.

Особенности современного состояния дистанционных методов исследования для прогноза рудных месторождений

Нами предпринята попытка критического рассмотрения существующих проблем дистанционных методов исследования и предлагается формирование направления, основанного на синтезе технологий распознавания изображений и численного имитационного моделирования. Исходными для дистанционного анализа рудоперспективности являются представления о том, что наиболее проницаемыми для магм и гидротермальных растворов являются зоны развития трещиноватости в породе, формирующие перколяционные кластеры (т.е. связанные структуры, проницаемые для рудоносных растворов). Традиционно, в результате выполнения исследований материалов космических съемок, вне зависимости от уровня информатизации и автома-

тизации работ, формируется массив дистанционных объектов – линеаментов или кольцевых структур, который затем интерпретируется. Применение и развитие такого привычного подхода, однако, имеет свои особенности и ограничения. Обозначим их:

1) Избыточное упрощение. С точки зрения традиционной «линеаментной» парадигмы, наблюдаемые на космических снимках структуры, стремятся привести к отрезкам-линеаментам, «штрихам рельефа» и подобным объектам, облегчающим выполнение учета и оценки. При этом, затушевывается сложность геологического строения, игнорируется его выраженность, подчиняющаяся масштабу. Решение оператора анализа, направленное на выделение одних и игнорирование других структур – следствие интуиции. Такой подход, находящий свое отражение в линеаментном анализе, может вытеснять понимание сути и сложности геологических процессов. В результате исследователями начинают выделяться и изучаться сами «линеаменты», в природе, однако не обнаруживаемые и существующие лишь в субъективном представлении;

2) Необоснованная универсализация. Для выяснения применимости дистанционных методов исследования необходима проверка возможности реализации того или иного структурно-морфометрического метода анализа территории с учетом ее тектонических и историко-минерагенических особенностей. Недооценка степени структурно-тектонической дифференциации площади, и недостаточное понимание геологической природы выявляемых морфоструктур может привести к получению недостоверных результатов;

3) Слабая верификация. Минерагенические построения на основе дистанционных материалов страдают недостаточным экспериментальным подтверждением и слабым комплексированием, по сравнению с другими методами исследований.

Устранение указанных недостатков методов анализа материалов ДЗЗ возможно усилением роли экспериментальной составляющей. Ввиду трудоемкости полевых работ и необходимости их сосредоточивания на наиболее перспективных участках, очевидные выгоды могло бы принести дополнительное применение методик имитационного моделирования. Результат обработки дистанционного изображения может быть использован в имитационных математических моделях (например, гидродинамических).

Имитационное моделирование флюидных рудоносных палеосистем представляет собой компьютерную реконструкцию инфраструктуры флюидной системы по ее проекции, наблюдаемой в эрозионном срезе. Благороднометалльные районы Сихотэ-Алинского складчатого пояса – области контрастного геологического строения и проявления разновозрастных тектономагматических процессов, а также наличия вулканогенно-осадочного чехла, могут явиться полигоном для испытания методов, связанных с имитационным моделированием на основе данных ДЗЗ.

Характеристика региона и районов исследований

Изучение прогнозных возможностей нового направления производится на примере рудных объектов Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутоногенного пояса (ВСАВП) – Нижнетаежного рудного узла (НТРУ) и Малиновского рудного поля (МРП). Выбор этих объектов обусловлен различной глубиной эрозионного среза: в пределах НТРУ оруденение вмещает интрузивно-вулканогенный комплекс, рудные тела МРП находятся среди интрузивных пород. Это дает возможность наблюдать на дистанционном изображении признаки, характерные для вулканоплутоногенных (включающих также жерловые) и интрузивных комплексов.

Достоверность имитационного моделирования инфраструктуры продуктивной гидротермальной системы (т.е. трещиноватости) заверяется положением известных рудных тел, открытых полевыми исследованиями или работами предшественников. Проведенные исследования позволили также обозначить зоны, рекомендуемые для дальнейшего опосредованного поиска.

Согласно современным представлениям [1, 2], в строении Юго-Восточного Приморья участвуют юрско-меловые тектоно-седиментационные комплексы Сихотэ-Алинского орогенного пояса (САОП), несогласно перекрытые чехлом из мел-палеогеновых эффузивно-пирокластических накоплений Восточно-Сихотэ-Алинского вулканогенного пояса. Терригенное основание последнего формировалось под влиянием процессов субдукции и скольжения в мезозойском взаимодействии Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит.

В объеме САОП (рис. 1) с запада на восток выделяются несколько разнотипных и разновозрастных террейнов [3, 4]: аккреционный Самаркинский (юра), турбидитовый Журавлевский (юра-ранний мел), аккреционный Таухинский (неоком) и островодужный Кемский (баррем-альб). Развернутая характеристика перечисленных террейнов содержится в многочисленных публикациях В. В. Голозубова, И. В. Кемкина, А. И. Малиновского, В. В. Раткина, В. П. Симаненко, других сотрудников ДВГИ ДВО РАН, а также обобщающей монографии [1].

Металлогенические зоны Приморья конформны террейнам и также имеют северо-восточное простирание. С запада на восток последовательно сменяются порфиоровое медно-молибденовое, молибденовое, а также вольфрамовое оруденение Самаркинской зоны, оловоносное оруденение с месторождениями олова Журавлевской (Главной оловоносной) зоны и, наконец, полиметаллическое, боросиликатное и касситерит-сульфидное оруденение Таухинской зоны [1]. Существование латеральной зональности в размещении оруденения предположительно объясняется косым эрозионным срезом Восточно-Сихотэ-Алинского магма-металлогенического пояса (ВСАММП), предопределенным погружением восточной части пояса при раскрытии рифтогенного Япономорского бассейна. Степень эродированности рудно-магматической

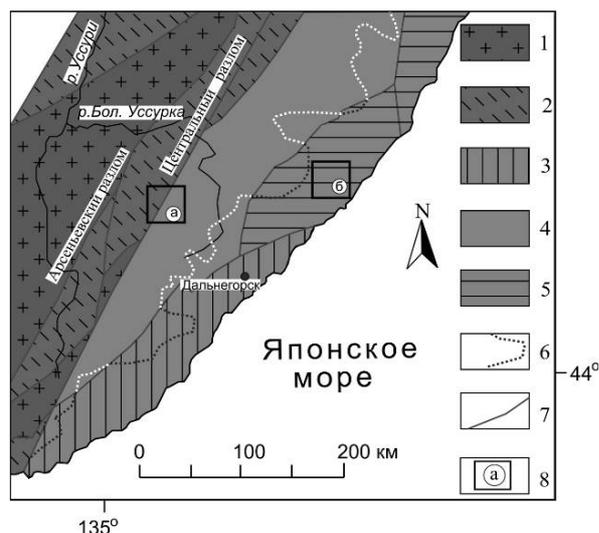


Рис. 1 Схема размещения участков исследования в пределах Сихотэ-Алинского орогенного пояса (САОП). 1-5 – террейны: 1 – докембрийские (Ханкайский и Сергеевский), 2-5 – позднемезозойские: 2 – юрский (Самаркинский) и 3 – раннемеловой (Таухинский) аккреционные, 4 – раннемеловой (Журавлевский) турбидитовый, 5 – раннемеловой (Кемский) островодужный; 6 – западная граница Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса (ВСАВП); 7 – крупные разломы; 8 – участки исследований: Малиновское рудное поле (а), Нижнетаежный рудный узел (б).

мегасистемы (в диапазоне 15–20 км) [5]. Некоторые исследователи отводят решающую роль в металлогенической специализации перечисленных зон условиям генерации магматических образований, с которыми ассоциируют проявления эндогенного оруденения [6, 7, 8].

В стратифицированных образованиях ВСАВП на территории исследования выделяются два структурных этажа. Нижний – терригенный, триас-нижнемеловой, смят в крутые складки северо-восточного простирания, верхний – вулканогенный, включает эффузивно-пирокластические накопления верхнего мела и палеогена.

Первый из объектов исследования, Нижнетаежный рудный узел (НТРУ), площадью до 500 км², расположен в Прибрежной зоне ВСАВП, на территории Кемского террейна (бассейн р. Таежной, примерно в 25 км от побережья Японского моря). Геологическое строение, мегатрещиноватость и рудоносность НТРУ нами описаны ранее [9, 10]. Анализ перколяционных кластеров позволяет объяснить пространственную близость штокверковых рудных тел, обособленных в пределах главных рудных участках миграцией гидротерм, связанных с внедрением Малиновского массива.

Другим эталонным объектом явилось Малиновское рудное поле (МРП), расположенное в Дальнереченском районе Приморского края (верховье реки Малиновка, правый приток р. Усури), на территории Самаркинского аккреционного и Журавлевского турбидитового террейнов, прилегающей к Центральному Сихотэ-Алинскому разлому (рис. 2).

Отмечается приуроченность оруденения к подня-

тию центрального типа диаметром около 5 км [11]. Структура представлена габброидной интрузией сеноман-туронского возраста, прорванной дайками андезитов, андезибазальтов и базальтов маастрихтского вулканического комплекса. Как отмечают те же авторы, Малиновское поднятие образовалось в результате внедрения в нижнемеловые песчано-сланцевые толщи сеноман-туронской Водораздельной интрузии габбродиоритов, а в маастрихтский век – субвулканических андезитов и умеренно-кислых андезидацитов.

Вмещают оруденение здесь пироксеновые и биотит-двупироксеновые монцогаббро-диориты, монциты, диориты и кварцевые монцодиориты, а также песчано-сланцевые породы, экранирующие оруденение с тектоническим контактом. Разрывная тектоника территории характеризуется наличием радиальных и концентрических разломов. Рудные тела МРП представлены линейными штокверками, состоящими из одной-двух жил кварц-сульфидного, карбонат-кварц-сульфидного или сульфидного состава. Жилы сопровождаются зонами прожилково-вкрапленной минерализации. Рудные тела при протяженности 100–225 м, мощности 0,1–20,3 м вскрыты скважинами на глубину до 250 м. Руды МРП золотосульфидно-кварцевые. Среднее содержание сульфидов составляет 10–15 %. Часто встречаются арсенопирит, пирит, халькопирит, также присутствуют пирротин, сфалерит, марказит, магнетит, минералы титана (рутил, сфен). Выделяются: халькопирит-арсенопирит-кварцевый, халькопиритовый, пиритовый типы руд, а также самородное золото. Золотоносные зоны (Меридиональная, Малахитовая, Дальняя, Контактная, Маячная, Серебряная, Медная) располагаются как в приадачной, так и в периферической частях интрузивно-купольного поднятия [11].

Методы исследования

В результате имитационного моделирования флюидных палеосистем выявляются закономерности расположения известных рудных объектов и участки извещения и предполагаемого рудонакопления для НТРУ и МРП. Преодоление недостатков существующих методов дистанционных прогнозных исследований возможно посредством формирования методики, включающей структурный анализ, имитационное гидродинамическое моделирование и экспертный анализ графических результатов моделирования [10].

В рамках реализации структурного анализа применяется автоматизированная обработка изображений Landsat 7 (7 канал, разрешение 30 м), направленная на выделение структурных элементов. Для скелетизации дистанционного изображения использовался алгоритм Canny, реализация которого на языке Matlab, в частности, описана [12, 13]. Распознавание изометрических (кольцевых) структур осуществлялось с помощью метода распознавания Хафа [14, 15, 16]. Выделение изометрических (кольцевых) структур служит для выявления и учета тектономагматических поднятий, центров эксплозивного магматизма (вулкано-

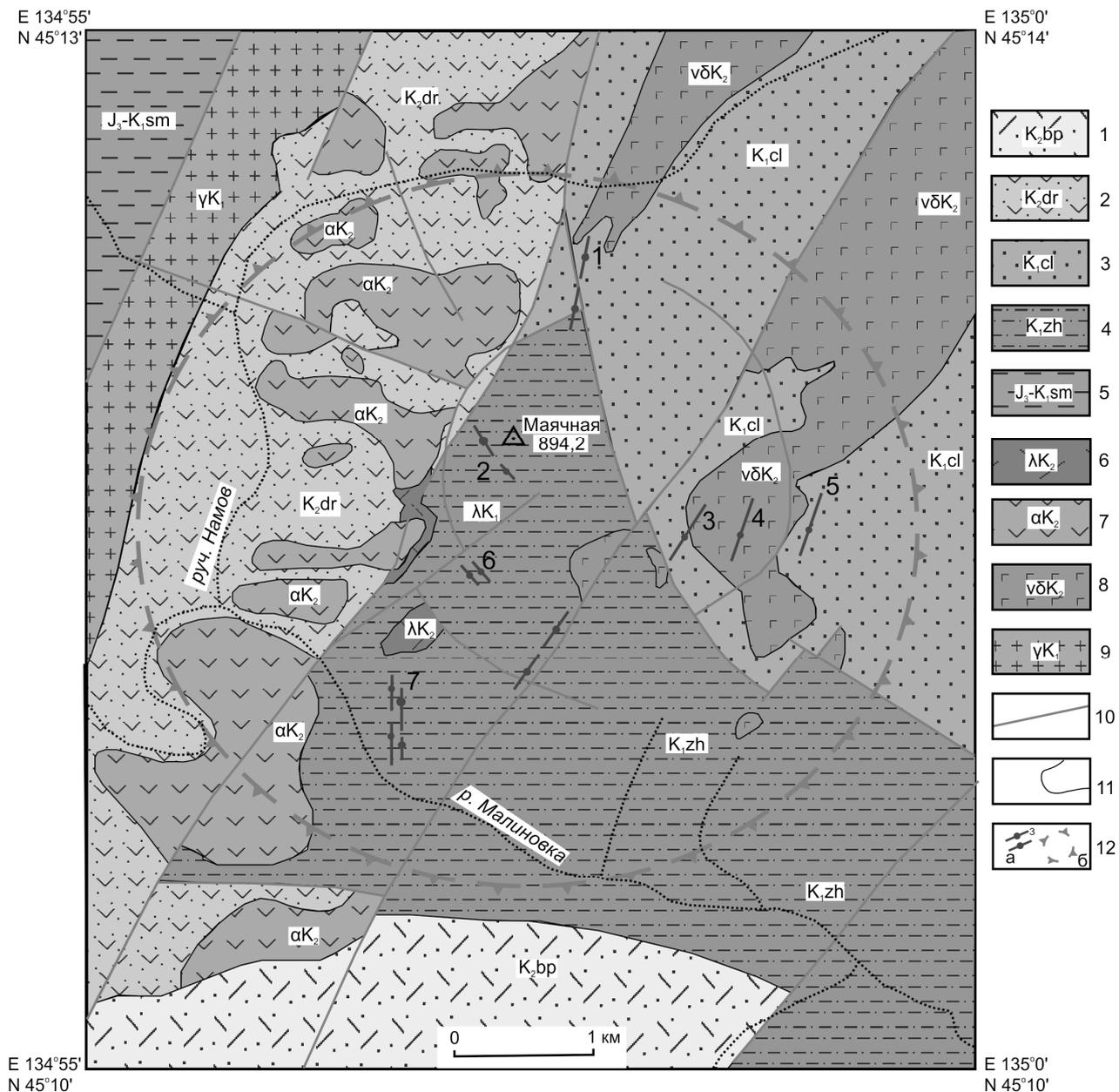


Рис. 2. Схема геологического строения Малиновского рудного поля [по 11]: 1 – туфы риолитов и дацитов, туфоалевролиты, туфопесчаники богопольской свиты; 2 – андезиты и туфы среднего состава дороевской свиты; 3 – песчаники и алевролиты ключевской свиты; 4 – алевролиты и песчаники журавлевской свиты; 5 – алевролиты, аргиллиты, кремнистые сланцы самаркинской свиты; 6 – риолиты и дациты; 7 – андезиты, андезидациты; 8 – габбро, габбро-диориты; 9 – граниты; 10 – разломы; 11 – геологические границы; 12 – известные рудные тела (а) (золоторудные зоны 1 – Контактная, 2 – Серебряная, 3 – Малахитовая, 4 – Меридиональная, 5 – Дальняя, 6 – Маячная, 7 – Медная); предполагаемые границы Малиновского поднятия (б).

плутонических комплексов с разной глубиной эрозионного среза), рассматриваемых в качестве источников гидротермального вещества. Исследование транспортной инфраструктуры гидротермальной системы производится выявлением на дистанционной основе препарированного денудацией рисунка трещиноватости и его дальнейшее гидродинамическое испытание. Специфика этого метода дистанционного анализа связана со следующими ограничениями:

1) Возможно учитывать только горизонтальную миграцию гидротерм;

2) Невозможно учесть неравномерность эрозионного среза в пределах отдельно взятого снимка.

Эти ограничения отчасти преодолеваются следующим образом: производится прогнозирование месторождений, для которых горизонтальная миграция является руководящей; для анализа выбираются относительно небольшие территории, в пределах которых глубина среза принимается неизменной.

Гидродинамическое испытание структуры проводилось с помощью клеточного автомата LBM (Lattice Boltzmann Model (англ.) – модель решетки Больцман-

на), предложенного [17]. Опыт использования этого метода для дешифрованной инфраструктуры нами описан [10]. В результате работы LBM-программы создается карта имитационного моделирования, отражающая относительное распределение скорости потока жидкости в трещинной структуре, полученной дешифрированием дистанционного изображения. При этом выявляются структуры протекания, объединяющие части дешифрованной трещинной структуры, по которым мигрируют флюиды (перколяционные кластеры). Последние, будучи отраженными на карте, могут рассматриваться как рудоперспективные структуры.

Результаты исследований

Дешифрирование дистанционных изображений районов исследования позволило создать скелетизированное изображение препарированного денудационного рисунка макротрещин, использованное для имитационного гидродинамического моделирования. Применением клеточного автомата LBM получены структуры протекания относительно центров кольцевых

структур – выделенной предшественниками Малиновской структуры МРП (рис. 3а) и изометрической слабоконтрастной космофотоаномалии Малиновского массива гранодиоритов НТРУ (рис. 3б).

Экспериментальное создание структур протекания отражает возможные пути латерального перемещения флюидов, мигрирующих от вулканоплутонических структур. Визуальный анализ этих путей демонстрирует нахождение обнаруженных и разведанных рудных тел в пределах проницаемых кластеров.

Для МРП наблюдаются или фактическая приуроченность рудных тел к проницаемым кластерам или оперение ими последних (см. рис. 3а).

Существенно большее количество рудных тел на юго-западе и северо-западе НТРУ может быть объяснено более интенсивным движением флюидов в этом направлении, а равно более развитой перколяционной инфраструктурой (см. рис. 3б).

Полученные минерогенетические модели позволяют рекомендовать к дальнейшему опосредованному поиску наиболее выраженные проницаемые кластеры, а также зоны их сгущения.

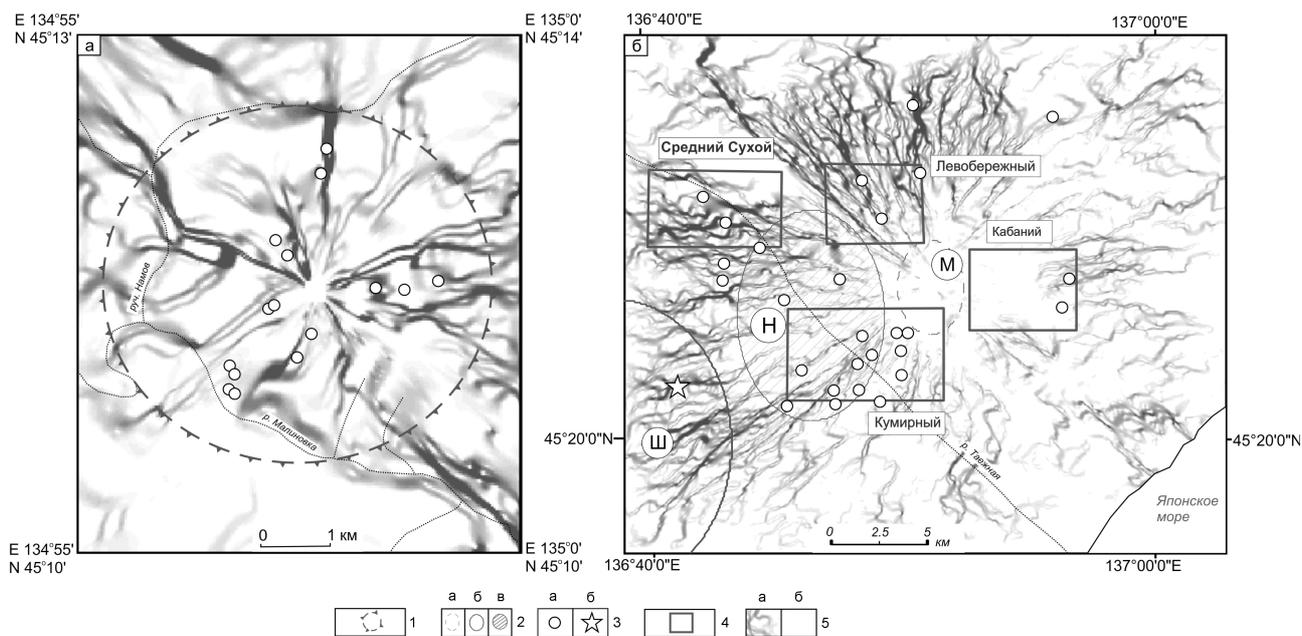


Рис. 3. Структуры протекания районов исследования: а – Малиновского рудного поля; б – Нижнетаежного рудного узла. Обозначения: 1 – Малиновская кольцевая структура, вынесенная по данным [11]; 2 – (а-в – кольцевые структуры, классы выраженности, а (наименее выраженные), – в (наиболее выраженные)); 3 – рудные тела (а – разведанные, б – обнаруженное в ходе полевых работ 2014 года прогнозируемое); 4 – рудные районы НТРУ; 5 – результат применения модели LBM (а – проницаемые кластеры; б – непроницаемые зоны). Буквы в кружках: Ш – Шандуйская и Н – Носыревская кальдеры; М – Малиновский интрузивный массив.

Выводы

Результаты исследования позволяют констатировать достаточную эффективность и формализуемость предлагаемой методики комплексного исследования. Установлены предполагаемые пути миграции вещества, совпадающие в большинстве случаев с действительным местоположением рудных тел. С наращиванием объемов исследованного фактического материала и получением положительного опыта, описанная методика может быть рекомендована для про-

гнозирования гидротермальных месторождений вулканоплутонических поясов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Т. 1/2 / Под ред. А. И. Ханчука. – Владивосток: Дальнаука. – 2006. – 982 с.
2. Ханчук, А. И. Палеогеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока России / Рудные месторождения континентальных окраин. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – Вып. 1. – С. 5–34.

3. Ханчук, А. И. Геология и полезные ископаемые Приморского края / А. И. Ханчук, В. В. Раткин, М. Д. Рязанцева, В. В. Голозубов, Н. Г. Гонохова // – Владивосток: Дальнаука. – 1995. – 66 с.
4. Юшманов, Ю. П. Тектоника, глубинное строение и металлогения Прибрежной зоны Южного Сихотэ-Алиня / Ю. П. Юшманов, А. М. Петрищевский // Владивосток: Дальнаука. – 2004. – 111 с.
5. Уткин, В. П. Структурно-динамические факторы в магмо- и рудогенезе Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса (ВСАВПП) / В. П. Уткин // Доклады Академии Наук, 2007. – Т. 415. – № 2. – С. 225–229.
6. Матюнин, А. П. Магматизм Кавалеровского и Верхне-Арминского оловорудных районов: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук / А. П. Матюнин. – Владивосток. – 1988. – 26 с.
7. Раткин, В. В. Металлогения свинца и цинка тихоокеанской окраины Азии: дисс. док. геол.-минерал. наук / В. В. Раткин. – М. – 1995. – 364 с.
8. Симаненко, Л. Ф. Партизанское скарново-полиметаллическое месторождение: геология, металлогения, генезис. Таухинская металлогеническая зона Сихотэ-Алинь / Л. Ф. Симаненко, В. В. Раткин. – М.: Наука. – 2008. – 158 с.
9. Ивин, В. В. Геологическое строение и типы эндогенной минерализации Нижнетаежного рудного узла (Приморье) / В. В. Ивин, А. Н. Родионов, В. Г. Хомич, Л. Ф. Симаненко, Н. Г. Борискина // Тихоокеанская геология, 2006. – Т. 25. – № 3. – С. 81–87.
10. Шевырѐв, С. Л. Трещиноватость как выраженность инфраструктуры гидротермальных палеосистем на космических снимках (на примере Сихотэ-Алинского орогенного пояса) / С. Л. Шевырѐв // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2016. – № 2. – С. 86–91.
11. Степанов, В. А. Малиновское золоторудное месторождение, Приморский край / В. А. Степанов, Е. Л. Бельченко, К. Н. Доброшевский, В. И. Гвоздев // Руды и металлы, 2013. – № 3. – С. 26–34.
12. Canny, J. F. A Computational Approach to Edge Detection [Электронный ресурс]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. pami-8. – № 6. – NOV. – 1986. URL: http://perso.limsi.fr/vezien/PAPIERS_ACS/canny1986.pdf (Дата обращения: 26.01.2016).
13. 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> (Дата обращения: 23.03.2014)
14. Шевырѐв, С. Л. Автоматизированный морфометрический анализ юго-восточной окраины Сибирского кратона по космическим изображениям в Matlab / С. Л. Шевырѐв // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2014. – № 3. – С. 35–41.
15. Шевырѐв, С. Л. О новых возможностях крупномасштабной прогнозной оценки паттернов дистанционного изображения на примере Нижнетаежного рудного узла, Приморье // Руды и металлы, 2015. – № 2. – С. 56–66.
16. Hough Transform // [Электронный ресурс]. 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).
17. Sukop, M. C. Lattice Boltzmann Modeling. An Introduction for Geoscientists and Engineers / M. C. Sukop, D. T. Thorne // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2006, 2007. – 177 p.

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

Шевырѐв Сергей Леонидович, к.г.-м.н., доцент ДФУ, науч-
ный сотрудник ДВГИ ДВО РАН.
E-mail: shevirev@mail.ru

Шевырѐва Махабат Жагпаровна, магистрант 2-го года
обучения направления «Геология» ШЕН ДФУ
E-mail: xmxmj@mail.ru

Far Eastern Federal University (FEFU)
Far East Geological Institute (FEGI), Vladivostok

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

Shevireva M. Z., master degree student (2-nd year), School of
Natural Sciences, Far Eastern Federal University
E-mail: xmxmj@mail.ru