

ТРЕЩИНОВАТОСТЬ КАК ВЫРАЖЕННОСТЬ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПАЛЕОСИСТЕМ НА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКАХ (НА ПРИМЕРЕ СИХОТЭ-АЛИНСКОГО ОРОГЕННОГО ПОЯСА)

С. Л. Шевырёв

Дальневосточный геологический институт, Дальневосточный федеральный университет

Поступила в редакцию 26 апреля 2016 г.

Аннотация: рассматривается технология прогноза гидротермальных месторождений орогенных поясов, основанная на комплексировании методов автоматизированного анализа дистанционных изображений Земли и гидродинамического моделирования. Симулируется процесс перколяции в гидротермальных палеосистемах, инфраструктура которых препарирована современным эрозионным срезом. Связность проводящих каналов и распределение скорости течения флюида в них могут способствовать выявлению скоплений рудного вещества.

Ключевые слова: исследования Земли из Космоса, перколяционные кластеры, решетка Больцмана, гидродинамическое моделирование, складчатые пояса.

FRACTURING AS EXPRESSION OF THE INFRASTRUCTURE OF THE PALEO HYDROTHERMAL SYSTEMS OF SATELLITE IMAGES (ON EXAMPLE OF THE SIKHOTE-ALIN OROGENIC BELT)

Abstract: we consider the technology of hydrothermal deposits forecast in orogenic belts, based on a combination of automated analysis methods of Earth's remote images and further simulation of fluid flow. It simulates the process of percolation in hydrothermal paleosystem infrastructure which dissected by erosion modern. Connectivity of conducting channels and the distribution of the fluid flow velocity in them can help to identify clusters of ore material.

Keywords: research of the Earth from space, percolation clusters, Boltzmann lattice, hydrodynamic modeling, folded belts.

Введение

Невысокий уровень результативности средств дистанционного зондирования Земли в цикле геолого-разведочных работ является причиной заметного ослабления интереса к этому источнику информации о глубинном строении территорий и размещения месторождений полезных ископаемых. На наш взгляд, одной из причин этого служит значительная доля интуиции в геологической интерпретации данных дистанционного зондирования Земли.

Повышение достоверности прогноза возможно применением имитационных физических моделей, работающих на основе данных дистанционного зондирования Земли. В настоящей статье рассматривается одна из имитационных визуальных моделей – модель решеток Больцмана (Lattice Boltzmann Model (LMB)), применимая к инфраструктуре древней флюидной системы (палеосистемы). В результате приложения этой модели к выделенной по космическим данным трещинной инфраструктуре Нижнетаежного рудного узла (НТРУ) Приморья установлены зоны интенсивной миграции флюидов, связанных с тектономагматическими поднятиями. Качество прогноза

завершается положением известных рудных тел и потенциальных продуктивных зон флангов месторождения.

Характеристика района исследований

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 мегазоне взаимодействия Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит.

В объеме САОП выделяют (с запада на восток) несколько разнотипных и разновозрастных террейнов [3]: 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 обобщающем монографическом труде [1].

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

Объект исследований, Нижнетаежный рудный узел (НТРУ), площадью до 500 км², расположен в Прибрежной зоне ВСАВПП, на территории Кемского террейна (бассейн р. Таежной, примерно в 25 км от побережья Японского моря) (рис. 1).

Этот рудный узел характеризуется контрастным дифференцированным геологическим строением, наличием разрывных нарушений различной выраженности и соподчиненности, а также центров вулканизма. Наличие эродированных вулканических аппаратов делает применимыми для НТРУ методы автоматизированного распознавания изометричных морфоструктур, как выражения центров распространения руденосных растворов.

В строении кальдер (Носыревской, Тальниковой и

Шандийской) и Монкинского вулканокупольного поднятия участвуют богопольская (маастрихт-дат), самаргинская (маастрихт) и приморская (турон-кампан) толщи. На площади НТРУ закартированы крупные интрузивные и субвулканические тела самаргинского и богопольского вулканоплутонических комплексов (ВПК). Интрузивы имеют сложное строение, отражающее стадийность их формирования.

Рудные объекты пространственно ассоциированы с Малиновской интрузией. Ранние фазы этого массива сложены преимущественно самаргинскими диоритоидами, в составе которых преобладают мелкозернистые биотит-роговообманковые разновидности. Описанные в составе этого комплекса биотитовые порфировидные граниты (в краевых частях массива – гранит-порфиры, вероятно, принадлежат богопольскому ВПК [4]. Субвулканические тела последнего представлены крупнопорфировыми риолитами, риолитовыми кластолавами, а также гранит-порфирами.

Среди пород богопольского ВПК подчиненную роль играют неки дацитов и трахидацитов, в ряде случаев переходящих в андезидациты, риодациты и риолиты. Малиновский массив и сопряженные с ним субвулканические образования формируют в дистанционном изображении контрастные кольцевые аномалии.

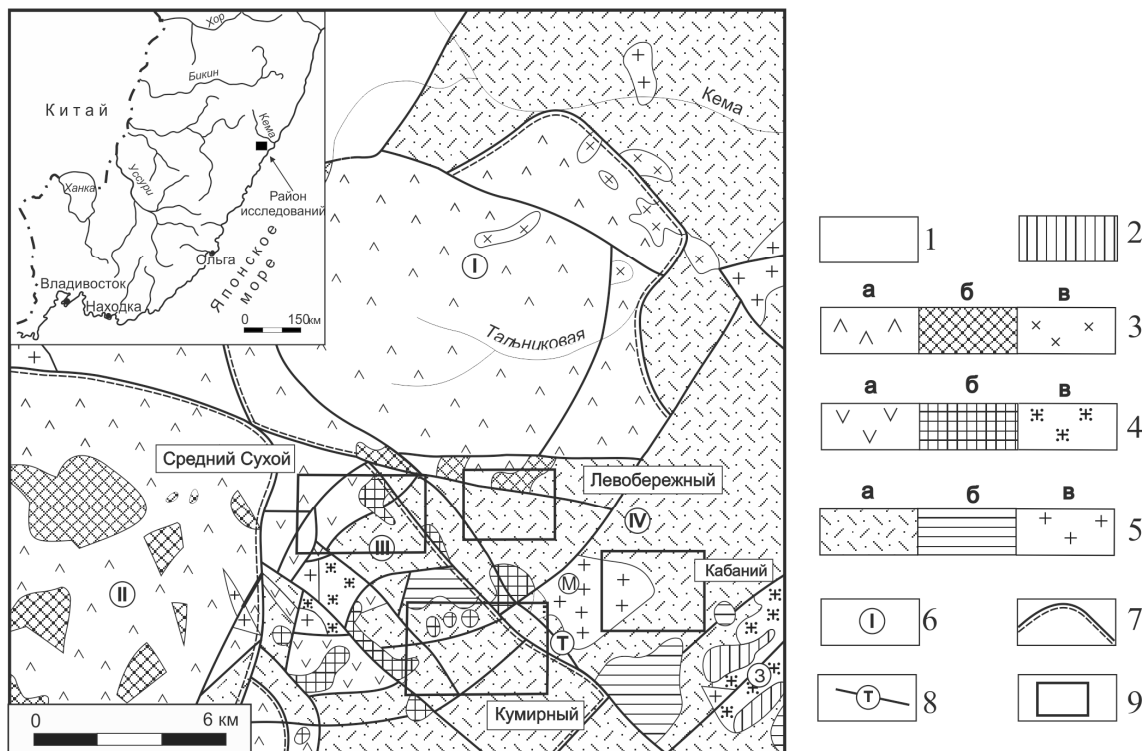


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Нижнетаежного рудного узла, по данным [4]: 1 – нижнемеловые терригенные отложения складчатого основания (фундамента) Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса; 2-5 – вулканические и вулканоплутонические комплексы: 2 – приморский турон-кампанский (а – туфы риолитов с прослоями игнимбритов, туффов, туфоалевролитов, туфопесчаников, б – экструзии и неки риолитов), 3 – самаргинский раннемаастрихтский (а – туфы дацитов и риодацитов, в меньшей мере андезиты, туфы андезитов и риолитов, б – экструзии, неки и дайкообразные тела андезитов и андезидацитов, в – гранитоиды), 4 – богопольский (даний) (а – игнимбриты и туфы риолитов, б – экструзии и неки дацитов, в меньшей степени экструзии андезитов и риолитов, в – гранитоиды), 5 – кизинский (миоценовый) вулканический комплекс (субвулканические тела дацитов, андезидацитов); массивы гранитоидов: М – Малиновский, З – Заводской, Б – Березовский; 6 – крупные вулканотектонические структуры (ВТС): I – Тальниковая, II – Шандуйская, III – Носыревская, IV – Монкинское поднятие; разломы: 7 – ограничивающие кальдеры, 8 – прочие, в том числе: Т – Таежный разлом.

Кизинские, более поздние образования представлены слабо измененными мелко- и неяснопорфировыми разностями роговообманково-плагноклазовых щелочных андезитов, шаровыми базальтами и андезибазальтами.

Геохимическими работами ОАО «Приморгеология» по потокам рассеяния на площади узла выявлены комплексные аномалии серебра, свинца, цинка, олова, меди, позволившие выделить рудоносные участки (поля): Кумирный, Левобережный, Кабаний и Средний Сухой. В их пределах локализованы порядка 30 рудных зон преимущественно северо-западной ориентировки с редкометальной, полиметаллической (с серебром), олово-полиметалльно-серебряной, полиметалльно-серебряной и собственно серебряной минерализацией.

Штокверковые зоны с олово-полиметалльно-серебряным, полиметалльно-серебряным оруденением пространственно и генетически связаны с Малиновским массивом (не путать с описываемым далее в тексте Малиновским рудным полем) и штоком самаргинских диоритов среди ороговикованных вулканитов нижней пачки (K_2rg_1) приморской толщи. Мощность оруденелых зон достигают 10-20 м, протяженность 1,5 км и более. Они состоят из сложноветвящихся крутопадающих сереброносных кварц-сульфидных жил, сопровождаемых прожилково-вкрапленной минерализацией.

Убогосульфидные сереброносные зоны (Кумирная, Водораздельная, Заманчивая, Ближняя, Неясная, Крайняя, Перевальная, Сентябрьская, Сюрприз и др.) пространственно разобщены с олово-полиметалльно-серебряным оруденением. Они имеют значительно меньшую мощность (до 3-4 м) и преимущественно размещены среди вулканитов верхней пачки приморской толщи (K_2rg_3), преобразованных в кварц-серицит-гидрослюдистые метасоматиты [4].

Методы исследования

Гидродинамическое испытание структуры проводилось с помощью клеточного автомата LBM (Lattice

Boltzmann Model (англ.) – модель решетки Больцмана), предложенного [5]. Использовалась модель решетки D2Q9 (2-мерное пространство, 9 возможных направлений векторов скорости в узле решетки). Автомат использует для работы дискретное уравнение Больцмана, приведенное к виду:

$$f_a(x+e_a\Delta t, t+\Delta t) = f_a(x, t) - \frac{[f_a(x, t) - f_a^{eq}(x, t)]}{\tau},$$

где e_a – микроскопическая скорость (скорость по отдельным направлениям), Δt – шаг времени, f_a – масса частиц, перемещаемая из одного узла модели в другой, f_a^{eq} – плотность распределения частиц жидкости, зависящая от макроскопических массы и скорости в данном узле, x – рассматриваемый узел, τ – время релаксации.

Работа модели разделяется на два повторяющихся шага: $f_a(x+e_a\Delta t, t+\Delta t) = f_a(x, t)$ шаг течения (streaming step) $(f_a(x, t) - f_a^{eq}(x, t))/\tau$ шаг столкновения (collision step). Данная модель применима для моделирования течения несжимаемых жидкостей с малыми значениями числа Рейнольдса ($Re \ll 1$). Результат работы модели – течение жидкости в пористой (трещиноватой среде) слева направо с обходом преград показано (рис. 2). Длина стрелок пропорциональна скорости потока. Выделяются обособившиеся области повышенных скоростей.

Совокупность нарушений земной поверхности, выделяемая по космофотоснимкам (КФС) представлена разломами различной природы и возраста, как сопряженными с процессами рудообразования (служащими инфраструктурой магмам или рудоносным гидротермальным растворам), так и не сопряженными (более ранними или поздними наложенными). Этот, казалось бы, очевидный факт следует обосновывать каждый раз при проведении регионального дистанционного геологического исследования, в зависимости от структурного положения исследуемого района, его возраста, происхождения, тектонических процессов и магматизма.

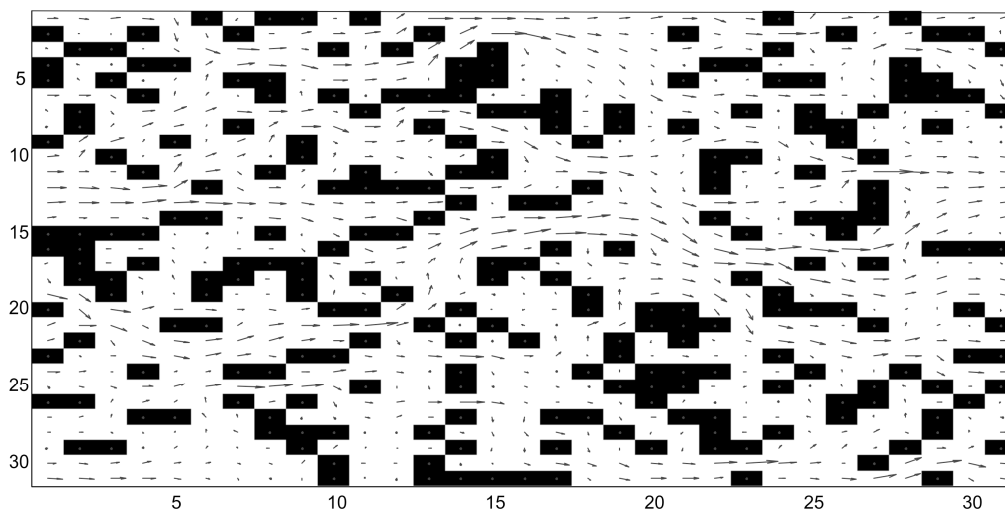


Рис. 2. Визуализации двумерной модели D2Q9 [5]

В результате имитационного моделирования флюидных палеосистем выявляются закономерности расположения известных рудных объектов и участки 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 карт имитационного моделирования (табл. 1).

В рамках реализации первого этапа (см. табл. 1, п.1) применяются способы автоматизированного анализа дистанционного изображения Landsat 7 (7 канал, разрешение 30 м), направленные на выделение структурных элементов. Для скелетизации дистанционного изображения использовался алгоритм Canny, реализация которого на языке Matlab, в частности, описана [6]. Распознавание изометричных (кольцевых) структур осуществлялось с помощью метода распознавания Хафа [7]. Такие методики распознавания уже апробировались [8, 9]. Выделение изометрических (кольцевых) структур служит для определения положения и автоматизированного учета тектономагматических поднятий, центров эксплозивного магматизма, рассматривающихся в качестве каналов миграции гидро-

термального вещества. Исследование транспортной инфраструктуры гидротермальной системы производится выявлением на дистанционной основе препарированного денудацией рисунка трещиноватости и его дальнейшее гидродинамическое испытание (табл. 1, п. 2).

В результате моделирования строилась карта распределения скорости флюида при латеральном движении жидкости в трещинной структуре от центра. Для обеспечения работы модели требовалось выполнить развертывание изображения участка относительно центра. После этого для полученной полосы можно было выполнить гидродинамическое моделирование течения жидкости через структуры изображения LBM (рис. 3).

В результате работы LBM создается карта имитационного моделирования, отражающая относительное распределение скорости потока жидкости в трещинной структуре, полученной дешифрированием дистанционного изображения (см. рис. 3в). При этом выявляются структуры протекания, связанные с латеральной миграцией флюидов. После работы LBM развернутое изображение снова сворачивается и совмещается с картированными данными в ГИС программе.

Таблица 1

Порядок имитационного моделирования флюидных рудоносных палеосистем с применением средств ДЗЗ

№ п.п.	Наименования этапа исследования	Содержание работ	Результат
1	Структурный анализ	Обработка дистанционного изображения Земли, выделение изометричных структур и несплошностей горных пород (крупных зон дробления и мелких дизъюнктивов).	Схемы распределения дизъюнктивов на территории исследования
2	Гидродинамическое моделирование	Симуляция течения жидкости с использованием дешифрированной инфраструктуры гидротермальной палеосистемы в качестве проводящих элементов. В качестве центра латеральной миграции рассматривается центр соответствующей кольцевой структуры.	Карты имитационного моделирования. Отражают направление и скорость протекания жидкости через несплошности земной коры.
3	Экспертный анализ карт имитационного моделирования	Учет пространственного распределения проникаемых кластеров дистанционного изображения, соотнесение их с известными разломами и рудными объектами	Прогнозные выводы о перспективности изучаемой территории, направлении и путях миграции рудоносных флюидов

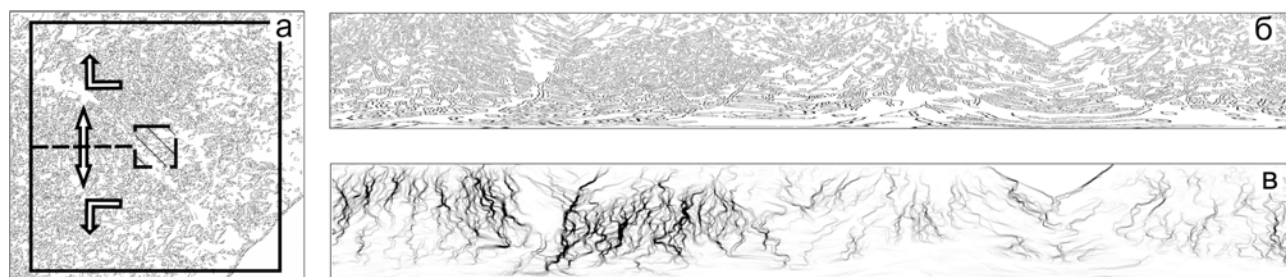


Рис. 3. Подготовка изображения для испытания гидродинамической модели (на примере НТРУ): а – направление разворачивания исходного изображения; б – развернутое изображение; в – карта гидродинамического моделирования, светлым показаны структуры протекания. Заштрихованная часть изображения – выемка. Стрелками показаны направления разворачивания изображения.

Имитационное моделирование флюидных палеосистем территории исследования

Дешифрирование дистанционных изображений территории исследования позволило создать скелетизированное изображение препарированного денудаций рисунка макротрещин, использованное для имитационного гидродинамического моделирования. В результате работы клеточного автомата LBM получены структуры протекания относительно центров кольцевой структуры – изометрической слабоконтрастной космофотоаномалии Малиновского массива гранодиоритов НТРУ (рис. 4).

Экспериментальное создание структур протекания отражает возможные пути латерального перемещения

флюидов, мигрирующих от вулканоплутонических структур. Анализ этих путей демонстрирует нахождение обнаруженных и разведанных рудных тел в пределах проницаемых кластеров. Существенно большее количество рудных тел на юго-западе и северо-востоке НТРУ может быть объяснено более интенсивным движением флюидов в этом направлении, а равно более развитой перколяционной инфраструктурой (см. рис. 4).

Полученные минерагенические модели позволяют рекомендовать к дальнейшему опоскованию наиболее выраженные проницаемые кластеры, а также зоны их сгущения.

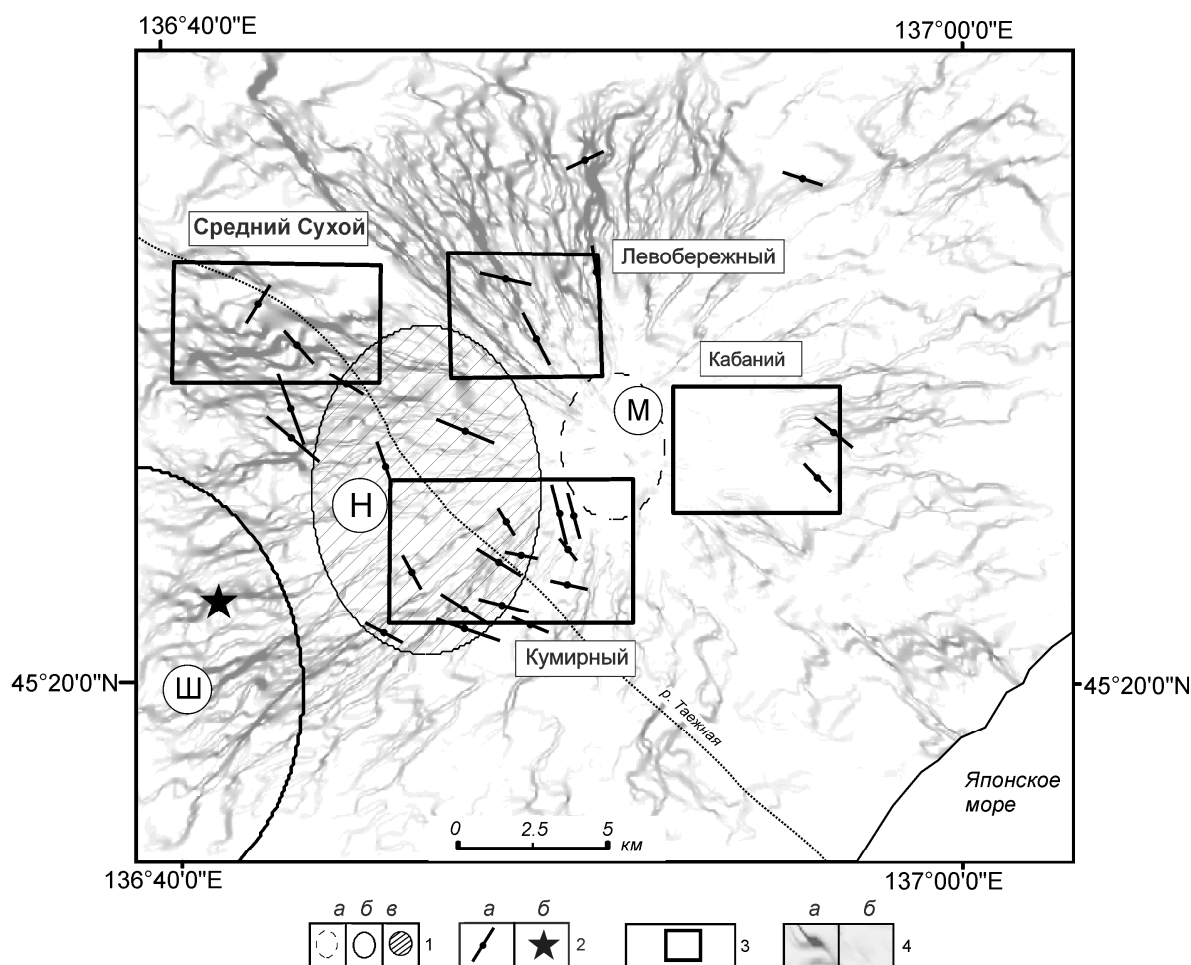


Рис. 4. Структуры протекания Нижнетаежного рудного узла по результатам моделирования: 1 – (а-в – кольцевые структуры, классы выраженности, а (наименее выраженные) – в (наиболее выраженные)); 2 – рудные тела разведанные, (б) обнаруженное в ходе полевых работ 2014 года прогнозируемое; 3 – рудные районы НТРУ; 4 – результат применения модели LBM (а – проницаемые кластеры; б – непроницаемые). Буквы в кружках: Ш – Шандуйская и Н – Носыревская кальдеры; М – Малиновский 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. Направление осевых зон проницаемых кластеров, соответ-

ствует основному направлению тектонических структур ВСАВП – северо-восточному и ортогональному ему северо-западному направлению зон растяжения.

С наращиванием объемов исследованного фактического материала и получением положительного опыта, описанная методика может быть рекомендована для прогнозирования 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. 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. 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.
5. 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.
6. 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).
7. 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).
8. Шевырев, С. Л. О новых возможностях крупномасштабной прогнозной оценки паттернов дистанционного изображения на примере Нижнетаежного рудного узла, Приморье / С. Л. Шевырев // Руды и металлы. – 2015. – № 2. – С. 56–66.
9. Шевырев, С. Л. Автоматизированный морфометрический анализ юго-восточной окраины Сибирского кратона по космическим изображениям в Matlab / С. Л. Шевырев // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2014. – № 3. – С. 35–41.

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

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

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

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