

УДК 553.3.078 + 551.243(571.6)

ДИСТАНЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕЙ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ НАРУШЕННОСТИ РУДОНОСНЫХ ПЛОЩАДЕЙ ДАЛЬНЕГОРСКОГО И КАВАЛЕРОВСКОГО РАЙОНОВ (ПРИМОРЬЕ) ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПРОГНОЗА

© 2012 С.Л. Шевырев, В.Г. Хомич, Н.Г. Борискина

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, 690022;
e-mail: shevirev@mail.ru*

Дешифрированием полей трещиноватости по космическим снимкам установлены количественные структурные характеристики продуктивных гидротермальных систем Дальнегорского и Кавалеровского рудных районов (Приморье). Выявлена связь рудонасыщенности гидротермальных палеосистем и их структурных характеристик. Рассмотрены прогнозные имплементации методики анализа дистанционных данных с применением нейросетей.

Ключевые слова: гидротермальная палеосистема, прогноз рудоносности, дистанционные материалы, нейросети.

ВВЕДЕНИЕ

В последние два десятилетия интерес к использованию материалов спутникового зондирования (съемок земной поверхности различного масштаба и цифровых моделей рельефа), в качестве геоинформационной основы для решения задач металлогенического районирования и прогноза новых рудных объектов остается в России не на должном уровне. Вместе с тем, за этот же период времени существенно возросло качество данных, получаемых с искусственных спутников Земли (ИСЗ) при дистанционном зондировании её поверхности, а также возможности их применения в практической геологии.

Для повышения эффективности практического использования дистанционных материалов необходимо усовершенствование методики их дешифрирования. Так, например, решить проблему эффективности прогноза оруденения можно, по мнению авторов, применяя дифференцированный подход к углубленному изучению особенностей строения, геолого-геофизической позиции типовых рудных районов и использованию таких структурных характеристик флюидной проницаемости рудоносных площадей, как параметры сети тектонической нарушенности.

Целью данного исследования является проверка возможности количественного про-

гнозирования рудоносности с использованием результатов дешифрирования дистанционного космического изображения. Для этого была поставлена задача создания прогнозной модели рудных районов на основе сопоставления парагенезиса структурных параметров и условий локализации рудных объектов на конкретной площади. В качестве эталонных выбраны наиболее изученные в Приморье Дальнегорский и Кавалеровский рудные районы.

СТРУКТУРНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДАЛЬНЕГОРСКОГО И КАВАЛЕРОВСКОГО РУДНЫХ РАЙОНОВ

Дальнегорский и Кавалеровский рудные районы (рис. 1), наряду с Арминским, Кемским и Фурмановским, являются наиболее известными частями Восточно-Сихотэ-Алинского магмо-минерагенического пояса (ВСАММП), формирование которого связывается с процессами субдукции Тихоокеанской плиты под восточную окраину Азиатского континента, происходившими в позднем мелу-палеоцене (Геодинамика..., 2006; Ханчук и др., 1994). Этими же процессами обусловлена и поперечная зональность пояса, выраженная в смене (от побережья Японского моря внутрь континента, то есть с востока на запад) внутренней вулканической

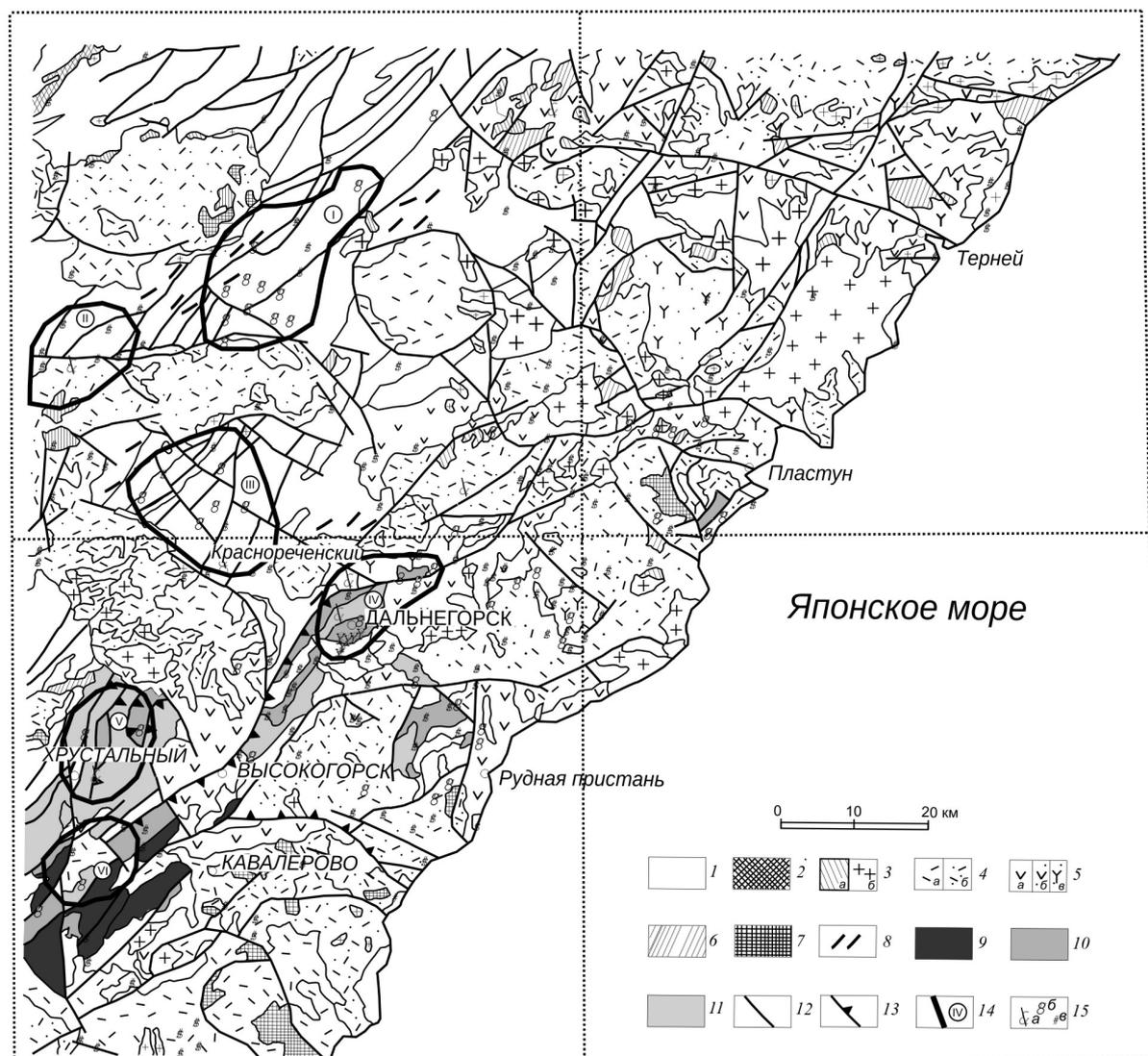


Рис. 1. Схема геологического строения Дальнегорского, Кавалеровского районов и прилегающих территорий (Государственная..., 1994) с некоторыми изменениями: 1 – терригенные породы фундамента ВСАММП; 2-3 – интрузивные породы верхнего мела: 2 – габбро бачелазского комплекса, 3 – приморский комплекс (а – кварцевые диориты, монцититы, диориты; б – граниты); 4 – верхнемеловые риолиты (а) и туфы риолитов (б); 5 – субвулканические и вулканические породы нижнего и верхнего мела (а – андезиты самаргинской и синанчинской свит, б – их туфы, в – вулканы разного состава); б – субвулканические андезиты и андезибазальты верхнего мела; 7 – палеогеновые андезиты, дациты, андезибазальты; 8 – дайки риолитов (палеоген); 9-11 – аккреционные терригенно-карбонатные и кремнистые комплексы: 9 – пермские, 10 – триасовые, 11 – юрские; 12 – разрывные нарушения; 13 – надвиги; 14 – рудные узлы (I – Октябрьский, II – Дальнинский, III – Краснореченский, IV – Дальнегорский, V – Хрустальный, VI – Лиственный); 15 – рудные объекты по классификации ВСЕГЕИ: а – месторождение среднее, б – месторождение малое, в – рудопроявление.

зоны, внешней вулкано-плутонической, а затем и периферической, преимущественно, интрузивной. Все зоны хорошо выделяются в поле силы тяжести. Для пояса характерно синхронное развитие магматизма и оруденения в несколько последовательных этапов (Геодинамика..., 2006; Матюнин, 1988; Уткин, 1986; Юшманов, Петрищевский, 2004).

В геодинамическом отношении ВСАММП рассматривается как постаккреционное сооруже-

ние (Ханчук и др., 1995; Геодинамика..., 2006), в котором вулканы пояса перекрывают покровно-складчатые вулкано-терригенные комплексы, принадлежащие разным фрагментам четырех основных террейнов: юрскому аккреционному (Самаркинскому), юрско-раннемеловому турбидитовому (Журавлевскому), неокомскому аккреционному (Таухинскому) и баррем-альбскому островодужному (Кемскому).

Гравитационное моделирование глубинного строения региона подтверждает моноклиналиное строение верхнего (до глубины 15 км) слоя земной коры, состоящего из трех различающихся по физическим свойствам тектонических пластин, выходы которых на современную поверхность совмещаются с границами вышеназванных террейнов (Юшманов, Петрищевский, 2004). Эта модель хорошо согласуется с представлениями других геологов (Голозубов, 2006; Уткин, 1977, 2005, 2007) о чешуйчато-надвиговом строении региона, в котором участвуют юрско-меловые тектоно-седиментационные комплексы.

Металлогенические зоны Приморья конформны террейнам и также вытянуты в северо-восточном направлении. С запада на восток последовательно сменяется порфиоровое медно-молибденовое ($\pm Au, Ag$), молибденовое ($\pm W, Sn, V$), а также вольфрамовое ($\pm Mo, \pm Be$) оруденение Самаркинской зоны, оловоносным ($\pm W$) оруденением с месторождениями Sn порфиоровой, сульфидной, силикатной и кварцевой формаций Журавлевской (Главной оловоносной) зоны и, наконец, полиметаллическими, боросиликатными, касситерит-сульфидными и золото-серебряными месторождениями Таухинской зоны (Геодинамика..., 2006). Существование латеральной зональности в размещении оруденения логичнее всего объясняется косым эрозионным срезом ВСАММП, предопределенным погружением восточной части пояса при рифтогенном образовании Япономорского бассейна (Уткин, 1986, 2005). Однако, некоторые исследователи отводят решающую роль в металлогенической специализации перечисленных зон условиям генерации магматических образований, с которыми ассоциируют проявления эндогенного оруденения (Раткин, 1995; Симаненко, Раткин, 2008). По мнению авторов настоящей статьи, это не противоречит данным о том, что металлогеническая специализация зон отражает степень эродированности протяженной колонны единой рудно-магматической мегасистемы (в диапазоне 15-20 км).

Дальнегорский рудный район находится в центральной части Таухинской металлогенической зоны (ТМЗ) и характеризуется преимущественным сосредоточением месторождений свинца и цинка разного типа (скарнового, жильного, прожилково-вкрапленного порфиорового), а также присутствием месторождений бора, олова, серебра и золота.

В целом для ТМЗ характерно весьма сложное строение с участием разновозрастных геологических комплексов, принадлежащих двум структурным этажам (рис. 1). Нижний из этажей (фундамент) представлен породами тектоно-стратиграфического комплекса из меловых

(берриас-валанжинских) флишоидных толщ, содержащих глыбово-брекчиевые горизонты (олистостромы и олистоплаки) из триас-юрских кремней, кремнистых сланцев, радиоляритов, базальтов, средне-верхнетриасовых известняков. В этом покровно-складчатом комплексе выделены и детально охарактеризованы автохтонная, олистостромовая, аллохтонная и неавтохтонная породные ассоциации, перемещенные относительно друг друга и по латерали и по вертикали на значительные расстояния (Юшманов, 1986). В блоках закартированы складки с вертикальными, круто-, пологонаклонными и горизонтальными шарнирами и моноклинали.

Верхний (вулканогенный) этаж сложен мелпалеогеновыми эффузивно-пирокластическими и вулканогенно-осадочными толщами, принадлежащими полно-, неполнодифференцированной и контрастной сериям, в каждой из которых разрез начинается моласоидными отложениями, затем сменяется средне-основными вулканитами, которые перекрываются эффузивно-пирокластическими накоплениями кислого состава (Хомич, 1995). Первая из серий объединяет моласоидные накопления (с туфами кислого и среднего состава) петрозевской (альб-сеноман), андезитойды синанчинской (сеноман-турон) и риолитойды приморской (турон-кампан) свит. Ко второй серии относят отложения самаргинской (маастрихт, с моласоидными и слоистыми туфами риодацитов в низах, перекрытых покровами андезитов и андезибазальтов) и богопольской (маастрихт-даний, лавы игнимбритов, игниспумитов и спекшихся туфов риолитов) свит. К третьей серии причисляют моласоиды тадушинской (даний) и туяновской (палеоцен-миоцен) свит (Юшманов, Петрищевский, 2004).

Интрузивные образования, комагматичные вулканическим накоплениям перечисленных серий, группируются в три комплекса: приморский (турон-сантон), дальнегорский (маастрихт-даний) и малых интрузий (палеоцен-эоцен). Приморский комплекс представлен преимущественно гранитоидами (граниты, гранодиориты, диориты); в дальнегорском распространены породы более широкого спектра: от габбро до лейкогранитов, но преобладают кварцевые диориты; к третьему комплексу причислены протяженные пояса даек основного состава.

Специалисты, детально изучавшие рудный район, разделили процессы рудообразования в ТМЗ на несколько этапов, синхронных проявлениях магматизма (Симаненко, Раткин, 2008; Юшманов, Петрищевский, 2004). С наиболее ранним (приморским) этапом сопряжено формирование скарнового боросиликатного месторождения и проявлений касситерит-пирит-галенит-

сфалеритовых прожилково – вкрапленных руд. В последующий (самаргинско-дальнегорский) этап в скарнах, терригенных породах и вулканитах формировались месторождения свинцово-цинковых руд (иногда с Sn), в том числе жильные и гнездово-вкрапленные. Согласно геохронологическим определениям (К-Аг, Аг-Аг методы) временной интервал их формирования составляет более 10 млн. лет (69-57 млн. лет). Более поздний (богопольский) этап генерации оруденения характеризуется золото-серебряной, серебро-сульфосольной, а иногда и оловянной минерализацией, сопряженной с проявлениями внутриплитного магматизма.

Разломная тектоника в районе чрезвычайно сложна и разнообразна (Юшманов, Петрищевский, 2004). В генетическом отношении она представлена конседиментационными тектоническими покровами, сдвигами (и сопутствующими складчатыми и чешуйчатонадвиговыми дислокациями), синвулканическими сбросами, сбросо-сдвигами и раздвигами. По глубине заложения разломы разделяют на гравитационные, коровые и корово-мантийные. Наиболее крупным из них, проникающим на глубину 20-35 км, является Прибрежный (Юшманов, Петрищевский, 2004) Он представлен зонами динамометаморфизма, дробления, рассланцевания, смятия, катаклаза и милонитизации пород мощностью в десятки и сотни метров, образуя вместе со своим сателлитом, отстоящим от него на 15-60 км к юго-востоку, сдвиговый дуплекс, где и сосредоточена основная масса рудных и нерудных месторождений.

В Дальнегорском районе широко распространены и другие сдвиги северо-восточного простирания, с которыми сопряжены нарушения (II порядка) северо-западной ориентировки. Перемещения крыльев сдвигов произошли, в основном, в альбе до формирования вулкано-генного чехла. Позднее, в сеноман-датское время наиболее активными (магмоподводящими) были северо-западные сбросо-раздвиги, к тому же ограничивающие вулкано-тектонические депрессии. Такую же ориентировку имеет и большинство даек.

Согласно гравитационного моделирования, участки сосредоточения полиметаллической минерализации обнаруживают пространственную связь с прогибом подошвы и поднятием кровли корово-мантийного слоя, совпадая с региональным максимумом аномалий Буге (Юшманов, Петрищевский, 2004). На гравитационной модели рельефа подошвы вулканических комплексов Дальнегорского рудного района отчетливо видна структурная приуроченность практически всех значимых месторождений свинца и цинка к выступам, горстовым под-

нятиям фундамента ВСАММП, а проявлений Ag-полиметалльных, Au-Ag месторождений (Березовского, Майского, Пасечного) к вулкано-генному обрамлению горстов на расстоянии до 1-4 км от границ выступов.

Кавалеровский рудный район расположен к запад-юго-западу от Дальнегорского (рис. 2). Его восточной и западной границами принято считать Суворовский и Центральный Сихотэ-Алинский разломы (Неволин, 1995). Площадь района соотносят с горстовым поднятием, осложненным сетью разноориентированных нарушений, среди которых преобладают сдвиги СВ простирания (Неволин, 1995; Уткин, 1986; Финашин, 1986). Здесь распространены позднепермско-раннемеловые стратифицированные накопления. Позднепермские отложения представлены известняками, кремнистыми сланцами, алевролитами и песчаниками с прослоями спилитов. Среди пород более поздних осадочных комплексов преобладают терригенные, кремнисто-терригенные толщи большой мощности (до 10 км) значительного возрастного диапазона: от триаса до раннего мела. В отложениях триаса закартированы рифовые постройки, линзы и глыбы известняков, прослой спилитов и их туфов. В разрезе юрских песчано-сланцевых и кремнисто-терригенных отложений встречаются прослой туфов среднего состава, а для нижнемеловых характерно переслаивание аргиллитов, алевролитов и песчаников. В целом, в осадочных породах вблизи крупных нарушений преобладают узкие линейные складки северо-восточной ориентировки, а на удалении от разломов – более простые симметричные формы с пологими крыльями.

Осадочно-вулкано-генные и вулкано-генные образования позднего мела – палеогена, сосредоточенные в нескольких вулкано-тектонических депрессиях (рис. 2) залегают с резким угловым несогласием на породах основания пояса. Среди вулкаников преобладают образования кислого состава, а средне-основные эффузивы сосредоточены в узких мульдах северо-восточного простирания, сопряженных с магмопроницаемыми разломами сдвиговой природы. Последние, по данным гравитационного моделирования (Юшманов, Петрищевский, 2004), пересекают континентальную литосферу и, достигая верхней мантии, служат каналами продвижения не только магм, но и рудоносных флюидов по малоамплитудным структурам растяжения, сопряженным со сдвигами (Неволин, 1995). Этим объясняется контролирующая роль эшелонированных систем нарушений в локализации месторождений.

С периодом интенсивной магматической деятельности в позднем мелу-палеогене связано

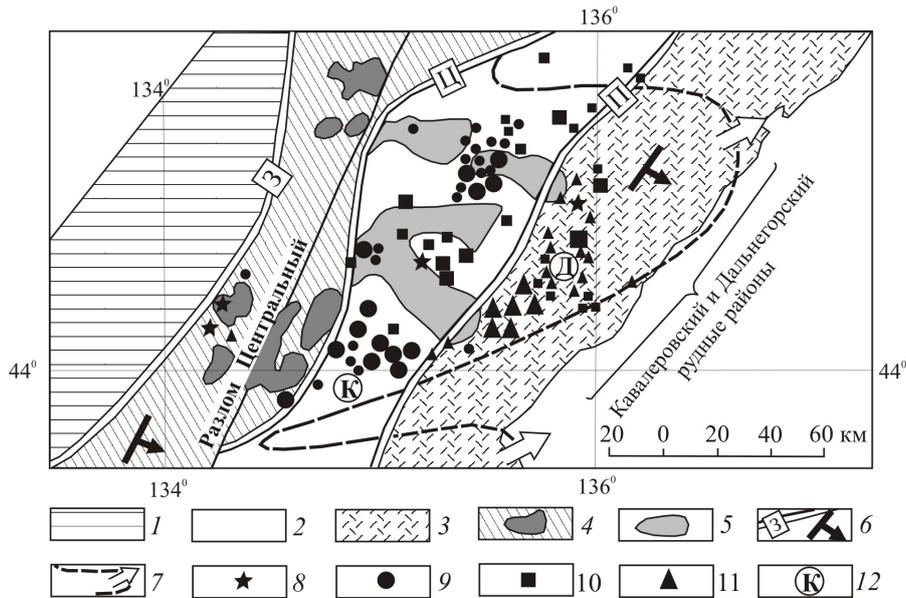


Рис. 2. Латеральная магмо-минерогеническая зональность центральной части ВСАММП по В.П. Уткину (2005) с некоторыми изменениями: 1, 2 – домеловые кремнисто-вулканогенно-терригенные (1) и раннемеловые преимущественно терригенные (2) отложения; 3 – позднемеловые вулканические отложения; 4 – зона альб-раннесеноманских, вскрытых эрозией, гранитоидных плутонов, размещенных на берриас-валанжинских уровнях раннемеловой толщи и непосредственно под ней; 5 – гравитационные минимумы, фиксирующие положение гранитоидных криптоплутонов; 6 – генерализованные западные границы рудно-магматических зон: 3 – Западной (плутоногенной), Ц – Центральной (интрузивно-вулканогенной), П – Прибрежной (вулканогенной), фиксирующих в косом эрозионном срезе вертикальное строение пояса (стрелки направления погружения зон); 7 – генерализованные границы антиклиналий, контролирующих ареалы раннемеловых гранитоидных плутонов и размещение рудных районов (полые стрелки – направление погружения антиклиналий); 8–12 – рудогенные минеральные ассоциации: 8 – касситерит-кварцевые, 9 – касситерит-силикатные, 10 – касситерит-сульфидные, 11 – свинцово-цинковые (крупные значки – месторождения, мелкие – рудопроявления), 12 – рудные районы: Д – Дальнегорский, К – Кавалеровский.

образование не только вулканических покровов, но и субвулканических тел, плутонических массивов, трубок взрыва и многочисленных даек, игравших существенную роль в формировании оловянного оруденения. Выделяется (Матюнин, 1988) до девяти ритмично чередующихся (по составу) интрузивных и вулканических комплексов объединяемых в четыре серии: татибинскую (альб-сеноман), угловскую и приморскую (сеноман-сантон), якутинскую (маастрихт-даний). К палеогену относится суворовский комплекс.

Положение конкретных месторождений в рудном районе контролируется эшелонированными системами разломов разной ориентировки, зонами смятия, повышенной трещиноватости, позитивными и негативными структурными формами, выводными каналами палеовулканов, субинтрузивными телами, роями даек различного состава. Различные сочетания перечисленных элементов характеризуют позицию Высокогорского, Силинского, Темногорского, Дубровского, Арсеньевского, Хрустального, Ивановского и других оловорудных месторождений (Финашин, 1986).

Анализ взаимоотношений касситерит-силикатно-сульфидной минерализации с интрузивными, субвулканическими, экструзивными

телами и дайками разного состава позволил установить, что олово-сульфидные проявления чаще парагенетически связаны с магматическими телами повышенной основности; олово-полиметаллические – с умеренно-кислыми и кислыми, а олово-сульфосольные (олово-серебряные) – с кислыми магматитами умеренной и высокой щелочности.

На слабо эродированных месторождениях имеет место (снизу вверх и от центра к флангам) последовательная смена касситерит-кварцевых ассоциаций (с арсенопиритом, турмалином и хлоритом) сульфосольно-сульфидными и полиметаллическими (Финашин, 1986). С зональностью жильных зон и рудных тел согласуется зональность контактово- и гидротермально-метасоматических изменений вмещающих пород (ороговикование, турмалинизация, пропицитизация, сульфидизация, окварцевание, серицитизация и т.п.). Подмечено, что сульфидность руд на касситерит-силикатно-сульфидных месторождениях усиливается среди эффузивно-пирокластических образований (Неволин, 1995; Финашин, 1986).

Необходимо упомянуть присутствие оловопорфирового оруденения, выявленного

на флангах Дальнегорского (Красногорский рудный узел, Джигитовская оловоносная площадь) и Кавалеровского (Дорожный и Соболиный рудные узлы, Высокогорско-Кисинская оловоносная площадь) районов (Финашин, 1986; Юшманов, Петрищевский, 2004). Рудоконтролирующими структурами оловопорфировых проявлений ВСАММП являются штоки, некки, взрыво-брекчиевые тела кислого и среднего состава, принадлежащие синанчинскому, самаргинскому и богопольскому комплексам.

Исследователями морфоструктур (Гаврилов, 2007; Середин, 1987) рассматриваемая территория причислена к северной окраине Кавалеровско-Дальнегорского сводово-глыбового поднятия в пределах Южно-Сихотэ-Алинского свода (Гаврилов, 2007; Середин, 1987), где сосредоточена значительная часть не только линейных, но и радиально-концентрических рудоконтролирующих элементов. Однако анализ соответствия таких морфоструктур скрытым интрузивно-купольным сооружениям (ИКС), выделенным по результатам геолого-геофизических исследований, показал, что «... между ними наблюдается либо частичное пространственное совпадение (Тернейская, Ольгинская), либо полное отсутствие такового (Артцевская, Бринеровская, Дальнегорская, Высокогорская, Щербаковская ИКС)» (Юшманов, Петрищевский, 2004, с. 85).

Приведенные геолого-геофизические и морфоструктурные материалы раскрывают основные особенности позиции Дальнегорского и Кавалеровского рудных районов и закономерности распределения на их площади проявлений эндогенной минерализации. Эту информацию можно использовать при анализе рудоносности сопредельных территорий Арминского, Кемского и Фурмановского рудных районов (рис. 1), исследуя структурные паттерны полей трещиноватости, получаемые анализом космических снимков.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основе исследования лежит представление о *продуктивной гидротермальной палеосистеме* – участке земной коры, обладающей такими свойствами трещинной перколяционной структуры, которая позволяла рудоносным флюидам мигрировать, а при наличии благоприятных условий – формировать промышленно значимые рудные скопления.

Гидротермальная флюидопроводящая система является геологической *диссипативной структурой* (в теории И.Р. Пригожина (Гленсдорф, Пригожин, 2001)), а, следовательно, обладает структурными параметрами организа-

ции, которые могут быть количественно учтены (Горяинов, Иванюк, 2001). Необходимо напомнить, что при дистанционном анализе изучается не собственно структура, а ее двумерное отображение при неравномерном эрозионном срезе, зафиксированного в рельефе, а затем перенесенного на плоскость дистанционного изображения.

Элементы полей тектонической нарушенности разделяются на две группы – *первого порядка* (линейные разломы, протяженностью десятки-сотни километров, секущие геологические и геоморфологические структуры, т.е. линеаменты), и *второго порядка* (локальные разрывы, нашедшие отражение в элементах орографической сети). Для количественного описания линеаментной сети использовались такие структурные параметры (СП), как: *плотность (Pl)*, *изотропность (Is)*, *фрактальная размерность Минковского (D_m)*, *плотность точек взаимных пересечений линеаментов первого порядка (Int)*, *плотность азимутальных выборок линеаментов (Pl_{az})*. К буквенным обозначениям СП добавляются индексы в зависимости от принадлежности расчета для линеаментов первого (1) или второго (2) порядка.

В соответствии с необходимостью проведения классификации территорий по степени рудоносности авторами вводится понятие *структурного паттерна* (от англ. *pattern* – модель, шаблон, образец, узор) – соотношения значимых СП элементарной единицы оцениваемой площади, характерного для геологических объектов, обладающих определенными признаками (в нашем случае, наличием гидротермального оруденения). Таким образом, использование прогнозной методики основано на установлении связи рудоносности эталонных объектов и *структурных паттернов* исследуемых территорий.

Фактическим материалом для настоящей работы явились изложенные ранее опубликованные данные об особенностях структуры Дальнегорского и Кавалеровского рудных районов (Государственная..., 1994; Неволин, 1995; Финашин, 1986; Уткин, 1977, 1986, 2005; Юшманов, Петрищевский, 2004;), и синтезированные космические снимки Landsat ETM+ с пространственным разрешением до 15 м.

Методика анализа инфраструктуры эталонных и потенциально перспективных рудоносных гидротермальных систем заключалась в выделении объектов дистанционного изображения, являющихся носителями тектонической информации – линейных объектов, с последующим разбиением исследуемой территории сетью элементарных ячеек и их классификацией по рассчитанным структурным параметрам.

Линейные объекты космических фотоснимков (КФС) выявлялись ручным дешифрированием по синтезированным снимкам Landsat 7 ETM+ с пространственным разрешением до 15 м (за счет панхроматического канала). Полученные схемы распределения СП сопоставлялись с известными рудными объектами на единой картографической основе. Классификацией площадей по абсолютным значениям отдельных СП, отличных от среднего на величину, кратную стандартному отклонению, удалось выявить приуроченность большей части рудных объектов к повышенным значениям параметров Pl и D_m рисунка линеаментов, что дало возможность выполнить лишь качественное прогнозирование. Опыт исследований только в пределах эталонных рудных районов показывает, что для крупномасштабных прогнозов (на уровне отдельных рудных узлов, полей и их групп) этот подход малоэффективен.

Дальнейший анализ показал, что для Дальнегорского и Кавалеровского рудных районов, как для эталонных объектов, необходимо создание карты полей значений *относительной рудоносности (RO)*. Этот параметр характеризует распределение оруденения по площади, то есть учитывает наличие известных месторождений и рудопроявлений, выраженное в условных единицах измерения. Карты распределения относительной рудоносности отвечают развитию по площади продуктивной гидротермальной системы и позволяют сопоставлять такую количественно выраженную рудоносность с структурными параметрами рисунка трещинной сети. *Структурный паттерн*, отвечающий рудоносности, таким образом, может быть выражен, как некоторая функциональная зависимость:

$$RO = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1),$$

где x_n – значимый структурный параметр.

В пределах изображенной на рис.1 и рис. 2 площади, в структурно-тектоническом отношении соответствующей фрагментам Журавлевского, Таухинского и, южной оконечности Кемского террейнов, по дистанционным материалам были рассчитаны поля значений СП для покрытия окон осреднения. Всего было оценено 14 различных СП. Для выделения руководящих рудоконтролирующих СП использовался факторный анализ, и строилась множественная регрессионная модель.

Число ведущих факторов (главных компонент) выбиралось в соответствии со стандартными процедурами оценки с помощью критериев Кайзера и «каменистой осыпи». Для всех СП учитывались факторные нагрузки, как вклад в главные компоненты. В множественной регрессионной модели обращалось внимание на β -коэффициенты параметров, и на этой основе выбирались значимые СП.

В качестве руководящих, таким образом, были отобраны параметры $Dm(1)$, $Dm(2)$, Int . Эти СП были использованы для обучения нейросети на элементарных ячейках территории. В результате был получен обученный перцептрон, способный классифицировать *структурные паттерны* элементарных ячеек, присваивая им значения прогнозной RO .

По значениям RO ячейки были выделены два класса: «с неясной перспективностью» и «перспективные».

Для классификации паттернов применялась искусственная нейронная сеть – многослойный перцептрон имеющий число входных нейронов по числу руководящих параметров (рис. 3). Искусственный нейрон представляет собой единицу обработки информации в сети. В нем выделяются синапсы (связи), каждая из которых характеризуется своим весом («значимостью»). Сигнал x_i на входе синапса i , связанного с нейроном k , умножается на вес w_{ki} . Синаптический вес искусственного нейрона может принимать положительные и отрицательные значения. Сумматор осуществляет линейную комбинацию сигналов. Функция активации $\varphi(v)$ ограничивает амплитуду выходного сигнала y_k нейрона. Пороговое значение b_k отражает увеличение или уменьшение входного сигнала. Функционирование нейрона k можно представить парой функций:

$$u_k = \sum_{i=1}^m w_{ki} x_i \quad (2)$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k) \quad (3),$$

где x_1, x_2, \dots, x_m – входные сигналы; $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$ – синаптические веса нейрона k , u_k – линейная комбинация входных воздействий. Применение порога b_k дает эффект аффинного преобразования выхода линейного сумматора u_k . В модели (см. рис. 3а) постсинаптический потенциал вычисляется по формуле:

$$v_k = u_k + b_k \quad (4)$$

Выходной сигнал нейрона y_k определяется посредством активационной функции – сигмоиды:

$$\varphi(v_k) = \frac{1}{1 + \exp(-av)} \quad (5),$$

где a – параметр наклона сигмоиды. Изменяя этот параметр, можно построить график с различной крутизной (рис. 3б). При $a = 0$ сигмоид вырождается в горизонтальную линию на уровне 0.5 (Хайкин, 2006).

Используемый в нашем исследовании перцептрон имеет на входе три нейрона, по числу руководящих параметров ($Dm(1)$, $Dm(2)$, Int), один скрытый промежуточный слой, включающий два ассоциативных нейрона.

Состояние выходного нейрона – аксона, отвечающего рудоносности, определялось

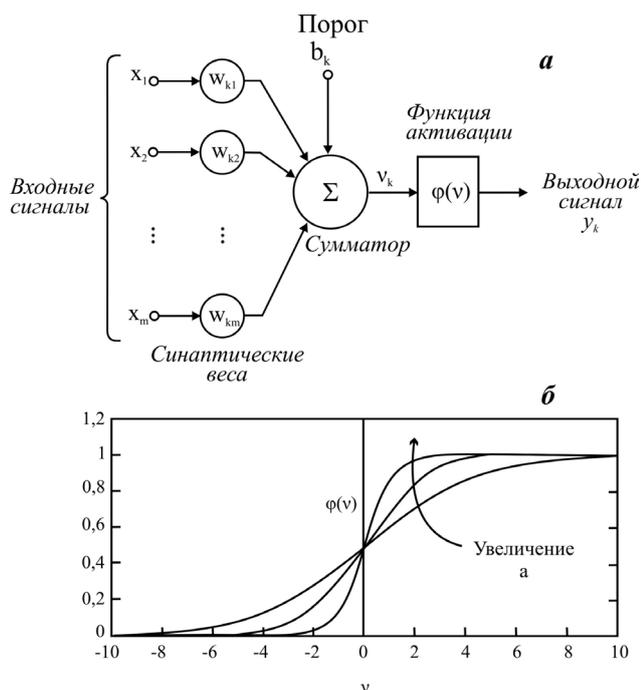


Рис. 3. Схема (а) строения искусственного нейрона и график (б) функции активации (сигмоиды) по С. Хайкину (2006).

сигмоидой (крутизна 1; шаг спуска 0.5; шаг подъема 1.2). При обработке данных нейросетью, входные данные нормализовались к диапазону от -1 до 1, данные выходного параметра (RO) от 0 до 1. В качестве обучающего метода был выбран RProp (Resilient propagation), подразумевающий «оффлайновое» обучение нейрона с коррекцией весов после предъявления всех известных значений (Reidmiller, Braun, 1993). В нашем случае, это известные значения рудоносности, сопоставляемые с выходом аксона y_k . В результате обучения приведенным образом была получена нейронная сеть, способная распознавать структурные паттерны, возможно, отвечающие наличию рудоносности в отраженных на снимке структурах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Напомним основные научно-практические задачи для решения которых проводилось обучение искусственной нейросети, описанное ранее:

1 – выяснение достаточности структурной информации при идентификации рудоносных площадей;

2 – восстановление (получение) информации о продуктивной гидротермальной системе по неполным структурным данным (выраженным в % от общего числа ячеек исследованной территории);

3 – возможность экстраполяции (переноса) обученной нейросети на участки со сходной структурно-тектонической обстановкой в целях прогноза.

Для классификации продуктивных гидротермальных систем по неполным данным в границах эталонных рудных районов проведено обучение персептрона по случайно выбранным смешанным (как «пустым», так и «рудоносным») ячейкам (рис. 4). Варианты восстановления структур гидротермальных систем по неполным данным рассматривались при обучении по случайно выбранным 25% (рис. 4А), 35% (рис. 4Б), 45% (рис. 4В) и, для контроля, 95% ячеек покрытия территории, соответственно (рис. 4Г).

Результаты обучения по 45% ячеек по качеству приближаются к контрольному прогнозу (обучение по 95% ячеек). Уже при 45% ячеек, задействованных в обучении нейросети, в восстановлении целостной картины рудоносных систем эталонных районов удалось достичь существенного совпадения известных структур с перспективными участками при значительной доле отбраковываемых площадей.

Проведенное тестирование на части территории Журавлевской, Таухинской и Кемской металлогенических зон позволило выделить потенциально перспективные относительно изометричные площади, достаточно отчетливо группирующиеся в линейные «пояса» северо-восточной, субмеридиональной и северо-западной ориентировки, отвечающие простирающую рудоконтролирующих систем нарушений. Краткая характеристика последних приведена выше в геологической части публикации. Отметим, что в пределах ВСАММП и его периферии оконтуренные в качестве потенциально перспективных площади покрыты мелко- и крупномасштабными геологическими съемками, сопровождавшимися «стандартными» поисками. Существенным итогом поисково-съемочных исследований прежних лет было обнаружение нескольких сотен рудных точек и десятков рудопроявлений, подавляющее большинство которых остаются слабо или совсем неизученными. Это обусловлено и ограниченностью финансовых ресурсов, ранее выделяемых на детальные геолого-поисковые и разведочные работы, и низкой обнаженностью территории (вследствие высокой залесенности), и повышенными требованиями к качеству (и количеству) минерального сырья. Тем не менее, на участках, часть которых обозначена на рис. 5 как потенциально перспективные, известно несколько месторождений, не получивших полной оценки, таких как Кисинское (Sn, Ag), Черемуховое (Sn, Pb, Zn, Ag), Заявочное (Pb, Zn). Другие объекты: Лысогорское (Sn), Убергоу (W, Sn), Горное (Sn), Среднемикулинское (Sn), рудопроявления Перевальное (Cu), Солнечное, Сухое (Sn, Pb, Zn) размещены севернее, за пределами границ рис. 5 (Государственная..., 1994).

ДИСТАНЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

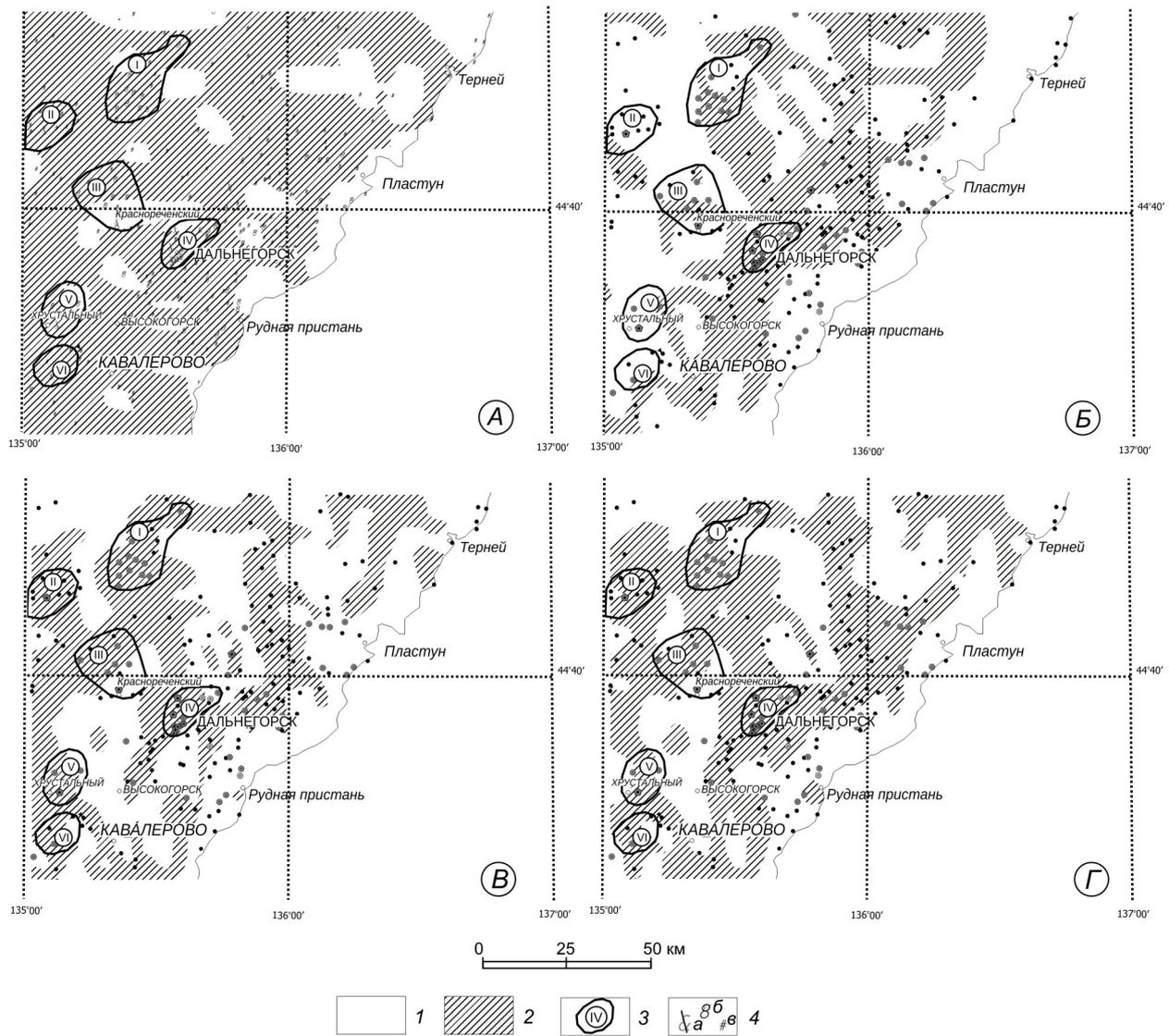


Рис. 4. Применимость нейросети для восстановления трещинной рудоносной структуры по неполным данным: 1-2 – типизация площадей: 1 – с неясными перспективами, 2 – потенциально перспективные; 3 – рудные узлы (нумерация см. рис. 1), 4 – рудные объекты по классификации ВСЕГЕИ: а-б – месторождения: а – среднее, б – малое; в – рудопоявление. Буквенными индексами А-Г обозначены рисунки с расчетами: А – по 25% элементарных ячеек, Б – по 35%, В – по 45%, Г – по 95%.

Авторам представляется вероятным, что не только перечисленные, но и unnamed здесь объекты заслуживают, по крайней мере, доизучения. Для этого потребуются проведение современных специализированных (геохимических, геофизических и т.п.) исследований, сопровождаемых поисково-разведочными работами. Комплексное изучение потенциально перспективных проявлений может быть проведено или сохранившимися государственными предприятиями, или мощными акционерными компаниями горно-геологического профиля, заинтересованными в подготовке месторождений к эксплуатации и последующей добыче полезных ископаемых. Вместе с тем, мы предполагаем, что на оконтуренных потенциально перспективных участках будут выявлены еще

неизвестные проявления оруденения, более полно раскрывающие минерально-сырьевой потенциал региона.

Необходимость проведения на исследованной площади детальных поисково-оценочных работ можно проиллюстрировать несколькими примерами из практики обнаружения и переоценки месторождений на территории Приморья. Так в конце 80-х годов XX века в хорошо изученном Кавалеровском рудном районе было открыто новое месторождение Искра (Кокорин и др., 2000). Оно обнаружено на участке, который по существовавшим на тот период представлениям был неперспективным на выявление промышленного оловянного оруденения. В те же годы в детально изученном Дальнегорском рудном районе было разведано Красногорское

серебро-олово-полиметаллическое месторождение порфиривого (ранее здесь неизвестного) типа и дана оценка Майминовскому серебро-полиметаллическому месторождению (Юшманов, Петрищевский, 2004), расположенному среди терригенных отложений фундамента ВСАММП. Кстати, последнее в настоящее время разрабатывается. Наконец, в Кемском рудном районе (к северу от Кавалеровского и Дальнегорского) на площади, считавшейся малоперспективной по результатам съемочных работ, в конце прошлого века А.Н. Родионовым был открыт Нижне-Таежный многометалльный (Cu, Sn, Pb, Zn, Ag) рудный узел (Ивин и др., 2006.).

Таким образом, сопоставление в пределах ВСАММП площадей «прогнозируемой» рудоносности с действительным положением рудных объектов (узлов, месторождений и рудопроявлений) демонстрирует высокую вероятность обнаружения новых проявлений оруденения, перспективных согласно данным прогноза обученной нейросети (рис. 5), как и возможность переоценки других, что уже выявлены ранее на таких участках.

Изложенные материалы, по нашему мнению, являются подтверждением гипотезы достаточности структурных паттернов для восстановления локальных палеогидротермальных систем по неполным данным, а также возможности классификации потенциально рудоносных площадей по степени их перспективности. Из этой констатации следует, что структурный паттерн элементарной ячейки может быть использован в качестве прогнозно-поискового признака при выделении участков, благоприятных для обнаружения месторождений полезных ископаемых с помощью обучения многослойного персептрона.

ВЫВОДЫ

Обнаружение связей между структурными паттернами и рудоносностью, делает изучение структурной составляющей дистанционного изображения достаточным основанием для предварительной классификации территорий по уровню потенциальной перспективности. Тем самым открывается возможность широкого

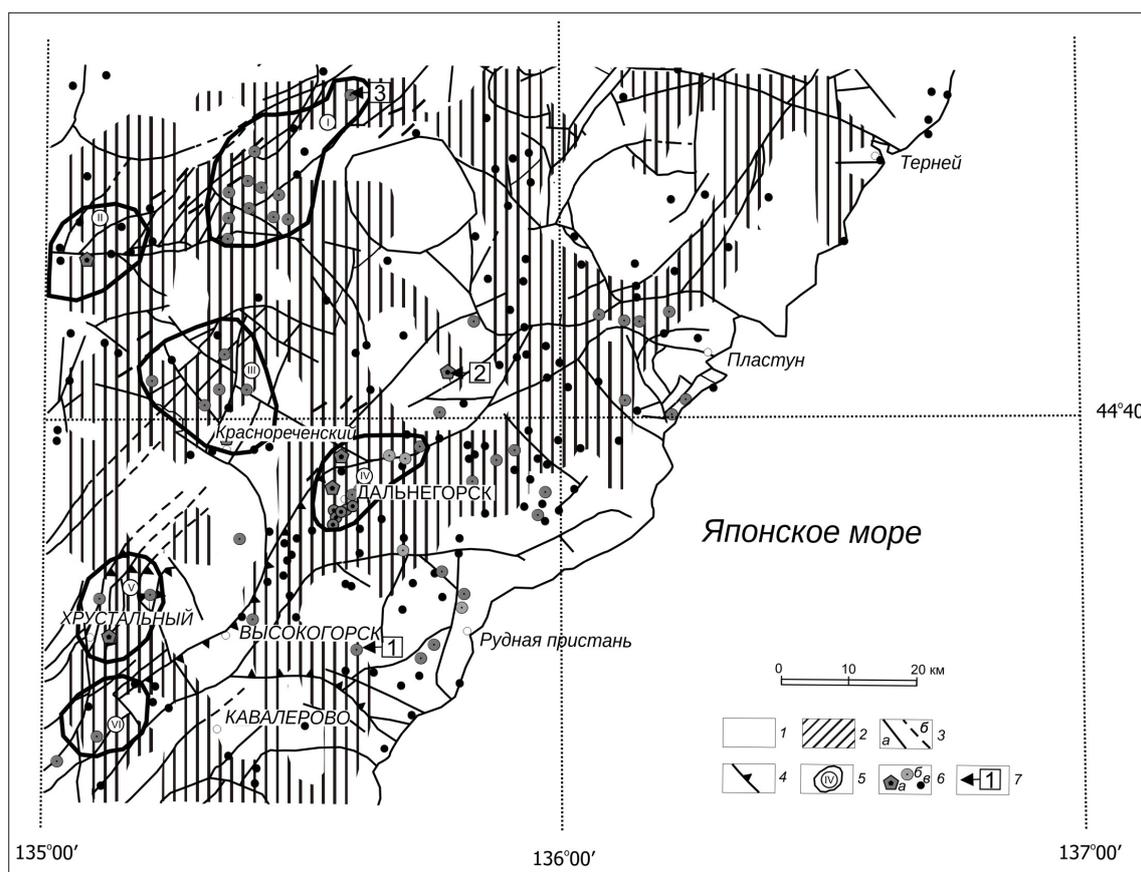


Рис. 5. Сопоставление зон, выделенных обучением нейросети, с известными разрывными нарушениями Дальнегорского, Кавалеровского рудных районов и прилегающих территорий (сеть обучена по 45% элементарных ячеек): 1-2 – типовые площади: 1 – с неясными перспективами, 2 – потенциально перспективные; 3 – дизъюнктивы: а – установленные, б – предполагаемые; 4 – надвиги; 5 – рудные узлы (нумерация см. рис. 1); 6 – рудные объекты по классификации ВСЕГЕИ: а-б – месторождения: а – среднее, б – малое; в – рудопроявление; 7 – месторождения, не получившие полной оценки (нумерация в квадратах: 1 – Кисинское, 2 – Черемуховое, 3 – Заявочное).

использования экономически выгодного формализованного метода для экспресс-оценки потенциально перспективных площадей с целью наращивания ресурсного потенциала рудных полезных ископаемых (благороднометалльных, олово-полиметаллических, иных). Экспресс-оценка, полученная средствами анализа структурных паттернов, способствуя достижению определенной экономии времени и средств при выделении перспективных участков, рекомендуемых для более детального исследования, предполагает необходимость использования и традиционных хорошо зарекомендовавших методов поисков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН и ДВО РАН (проекты № 12-И-П27-02, № 12-3-А08-159).

Список литературы

- Гаврилов А.А.* Новые данные о структурном положении Кавалеровского и Дальнегорского рудных районов (Приморье) // Отечественная геология. 2007. № 6. С. 27-32
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Под ред. член-корр. А.И. Ханчука. Владивосток, Дальнаука, 2006. Т. 1., Т.2. 982 с.
- Гленсдорф П., Пригожин И.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1973. 280 с.
- Голозубов В.В.* Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2006. 239 с.
- Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю.* Самоорганизация минеральных систем. Синергетические принципы геологических исследований. М.: Геокарт, 2001. 312 с.
- Государственная геологическая карта. Масштаб 1:1000 000 (новая серия). Лист L-(53),(54) – Кавалерово. Объяснительная записка. // Ред. Т.В. Брежнева. Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ, 1994
- Ивин В.В., Родионов А.Н., Хомич В.Г. и др.* Геологическое строение и типы эндогенной минерализации Нижне-Таежного рудного узла (Приморье) // Тихоокеанская геология. 2006. Т. 25. № 3. С. 81-87.
- Кокорин А.М., Гвоздев В.И., Гоневчук В.Г. и др.* Месторождение Искра – новый объект Кавалеровского оловорудного района (геология, состав руд, генезис) // Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 226-247
- Матюнин А.П.* Магматизм Кавалеровского и Верхнее-Арминского оловорудных районов. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Владивосток, 1988. 26 с.
- Неволин П.Л.* Геодинамика формирования структур месторождений Кавалеровского рудного района. Владивосток: Дальнаука, 1995. 132 с.
- Раткин В.В.* Металлогения свинца и цинка тихоокеанской окраины Азии. Дисс. док. геол.-минерал. наук. М., 1995. 364 с.
- Ракин В.В., Симаненко Л.Ф., Кузнецов Д.Н., Король Р.В.* Олово-цинковое оруденение Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса // Геология рудных месторождений. 1990. № 2. С. 68-77.
- Середин В.В.* Сводово-глыбовая структура Тихоокеанского орогенного пояса. М.: Недра, 1987. 181 с.
- Симаненко Л.Ф., Раткин В.В.* Партизанское скарново-полиметаллическое месторождение: геология, металлогения, генезис. Таухинская металлогеническая зона Сихотэ-Алинь. М.: Наука, 2008. 158 с.
- Уткин В.П.* Разрывные нарушения и складчатые сооружения Восточного Приморья // Изв. АН СССР. Сер. Геологическая. 1977. № 3. С. 101-112.
- Уткин В.П.* Природа магмо-металлогенической зональности Сихотэ-Алинь // ДАН СССР. 1986. Т. 289. № 4. С. 947-951.
- 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.
- Уткин В.П.* Структурно-динамические факторы в магмо- и рудогенезе Восточно-Сихотэ-Алинского вулcano-плутонического пояса (ВСАВПП) // ДАН. 2007. Т. 415. № 2. С. 225-229.
- Финашин В.К.* Оловорудные месторождения Приморья (Геология и генезис). Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986. 176 с.
- Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1004 с.
- Ханчук А.И., Раткин В.В., Рязанцева М.Д. и др.* Геология и полезные ископаемые Приморского края. Владивосток: Дальнаука, 1995. 66 с.
- Хомич В.Г.* Металлогения вулcano-плутонических поясов северного звена Азиатско-Тихоокеанской мегазоны взаимодействия. Владивосток, Дальнаука, 1995. 343 с.
- Юшманов Ю.П.* Конседиментационные тектонические покровы Прибрежной зоны Восточного Сихотэ-Алинь на примере Дальнегорского рудного района // Тихоокеанская геология. 1986. № 3. С. 99-107.
- Юшманов Ю.П., Петрищевский А.М.* Тектоника, глубинное строение и металлогения Прибрежной зоны Южного Сихотэ-Алинь // Владивосток: Дальнаука, 2004. 111 с.

ШЕВЫРЕВ и др.

Riedmiller M., Braun H. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm / Proceedings of the IEEE International

Conference on Neural Networks, 1993. <http://paginas.fe.up.pt/~ee02162/dissertacao/RPROP%20paper.pdf>

INVESTIGATION OF FIELDS WITH TECTONIC DISPLACEMENTS IN DALNEGORSK AND KAVALEROVO ORE DISTRICTS (PRIMORSKY REGION) FOCUSED ON FORECAST USING REMOTE SENSING TECHNIQUES

S.L. Shevyrev, V.G. Khomich, N.G. Boriskina

Far East Geological Institute FEB RAS; Vladivostok, 690022

Quantitative structural characteristics for hydrothermal systems of Dalnegorsk and Kavalerovo ore districts were revealed using interpretation of fracturing fields in satellite images. Relationships between hydrothermal palaeosystem's ore productivity and their structural characteristics were also revealed. Forecast implementations of space images data analysis with neural networks were considered.

Keywords: hydrothermal palaeosystem, forecast for ore mineralization, remote sensing data, neuronet.