ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, 2024, том 66, № 4, с. 329–362

УДК 551.4.044:528.88:551.2:553.49

ДЕШИФРИРОВАНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СТРУКТУР ЦЕНТРАЛЬНОГО ТИПА НА ТЕРРИТОРИИ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА РУДООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ

© 2024 г. С. А. Устинов[a], *, В. А. Петров[a], **, В. А. Минаев[a], *, И. О. Нафигин[a], ****, Е. В. Яровая[a], *****

[a]*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия*

**E-mail: ustinov@igem.ru*

***E-mail: vlad243@igem.ru*

****E-mail: minaev2403@mail.ru*

*****E-mail: nafigin@igem.ru*

******E-mail: e.v.yarovaya@yandex.ru*

Поступила в редакцию 27.12.2023 г.
После доработки 29.02.2024 г.
Принята к печати 27.03.2024 г.

Вопросам дешифрирования и интерпретации структур центрального типа (СЦТ) при проведении дистанционных структурно-геологических и структурно-геоморфологических исследований уделяется крайне малое внимание. При этом еще в 70–80-х гг. XX в. доказана важная роль СЦТ в локализации месторождений и рудных полей. Положение данных структур обязательно должно учитываться при решении задач поиска и прогноза полезных ископаемых в контексте металлогенического анализа и реконструкции геологической истории развития изучаемых площадей. Практически отсутствие результатов массового дешифрирования и интерпретации СЦТ можно объяснить пока еще слабо разработанной методикой выделения и анализа рассматриваемого типа структур. В исследовании для территории юго-восточного Забайкалья представлен авторский подход к дешифрированию и интерпретации СЦТ, в том числе в связи с локализацией рудных объектов различных геолого-промышленных (геолого-генетических) типов в рамках концепции формирования минеральных систем. Подход основан на использовании современных геоинформационных технологий, данных дистанционного зондирования Земли (радарная топографическая съемка) высокого разрешения, создании цифровой модели рельефа и применении комплексного структурно-пространственного анализа. Проведен статистический анализ выделенных на площади СЦТ, показавший плавное увеличение числа структур с уменьшением их диаметра. Установлено, что пространственные максимумы экстенсивности оруденения в пределах территории сконцентрированы на периферии крупных СЦТ и в непосредственной близости от них. Большинство известных крупных рудных объектов приурочены к внутренним областям структур менее 10 км в поперечнике. Построены модельные разрезы, позволяющие условно реконструировать глубинное положение магматических очагов, с которыми связаны выделенные СЦТ, и тем самым определить вероятные источники металлоносных флюидов. Установлена тесная пространственная связь выявленных магматических очагов с глубинными разломами. Для определения наиболее благоприятных участков отложения рудной минерализации созданы весовые прогнозно-поисковые модели территории. Они основаны на структурно-пространственных критериях, включающих не только структурные элементы СЦТ, но и сегменты известных разрывных структур. Точность комплексной модели составила 89%. Таким образом, в соответствии с концепцией минеральных систем, реконструированы источники, пути миграции и места наиболее вероятного отложения рудной минерализации.

Ключевые слова: структуры центрального типа, рудообразующие системы, геоинформационный анализ, дистанционное зондирование Земли, цифровая модель рельефа, металлогенический анализ, концептуальная прогнозная модель, весовая прогнозно-поисковая модель, металлогения, юго-восточное Забайкалье

DOI: 10.31857/S0016777024040015, **EDN:** cbchrl

ВВЕДЕНИЕ

В рамках многочисленных современных региональных дистанционных исследований геологических структур задаче достоверного дешифрирования, изучения и интерпретации структур центрального типа (СЦТ) часто придается второстепенное значение. В большинстве структурных изысканий данная задача даже не ставится. СЦТ в западной литературе чаще всего обозначаются термином “кольцевые структуры” и в наиболее общем определении представляют собой геологические образования кольцевой, округлой или овальной формы в плане, наблюдаемые на поверхности Земли и других небесных тел (Saul, 1978; Соловьев, 1978). Данный термин впервые ввел А. Харкер в 1904 г. для описания комплексов вулканических пород, окруженных системами кольцевых даек. В настоящее время к СЦТ относят округлые геологические структуры и морфоструктуры различного генезиса, диаметр которых составляет от десятков и сотен метров до десятков и сотен, реже тысяч, километров. Также в российской литературе применительно к поискам и разведке рудных месторождений и структурам рудных полей, разработке геолого-генетических моделей, активно используются близкие к СЦТ по смыслу термины “концентрическая структура” (Лучицкий, Бондаренко, 1974), “система центрального типа” (Ежов, Худяков, 1984), “месторождение кольцевого типа” и “кольцевой рудоносный комплекс” (Невский, Фролов, 1985).

Научно-методические подходы к выявлению, классификации, анализу и интерпретации СЦТ получили свое максимальное развитие в основном в трудах советских исследователей в 70–80-х годах прошлого века. Данный факт объясняется появившейся возможностью работы с космическими снимками. Именно в этот период В.М. Рыжковой и В.В. Соловьёвым издана “Карта морфоструктур центрального типа территории СССР” масштаба 1 : 10000000 (Рыжкова, Соловьёв, 1975). Подробные пояснения по терминологии, методикам и результатам дешифрирования, отраженным на обозначенной карте, а также интерпретация результатов, обобщены в работе “Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-геоморфологического анализа” (Соловьёв, 1978). Учитывая масштабный фактор – слабое пространственное разрешение первых данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и практически отсутствие возможности применения компьютерных технологий для их обработки – авторам на территории СССР в основном удалось выявить только крупные и очень крупные структуры, размер которых варьировал от сотен до тысяч километров.

В основном для выделения СЦТ в обозначенный выше период разработаны и применялись методики геолого-морфологического и морфоструктурного анализов в сочетании с методами обработки первых полученных данных ДЗЗ. При этом показана возможность выделения скрытых геологических структур, не всегда выраженных в рельефе и рисунке речной сети, с помощью анализа геофизических и геохимических полей. В результате дешифрирования СЦТ на основе обобщения большого количества поперечных профилей В.В. Соловьёв выделил три основные топологические группы, свойственные трем морфологическим категориям центральных форм. Им, подобно морфологическому подразделению тектонических структур, предложено использовать термины “кольцевая структура” – для обозначения отрицательных морфоструктур и “купольная структура” – для положительных. Для комплексных структур, сочетающих в себе свойства обеих категорий, предлагалось применять термин “купольно-кольцевая структура” (ККС) (Соловьёв, 1978).

Проведенное картирование, систематизация и сравнительный анализ позволили установить во многих рудоносных провинциях мира широкое распространение разнообразных эндогенных рудных месторождений, приуроченных к СЦТ, считавшихся ранее достаточно редкими структурными образованиями (Томсон и др., 1982; Невский, Фролов, 1985). Таким образом, подтверждена важная практическая роль СЦТ в постановке и решении задач поиска полезных ископаемых и прогнозных металлогенических построений. В это же время возникает множество гипотез формирования различных типов СЦТ в связи с геологическими процессами, такими как региональные тектонические движения, формирование соляных куполов и диапировых складок, проявление гидровулканизма, образование воронко- и трубообразных карстовых полостей, падение метеоритов на поверхность Земли, механическая активность магматических расплавов и вырывающихся из них флюидов, внедряющихся в верхние горизонты земной коры, вулканическая активность.

Подобные посвященные СЦТ исследования обозначенного временного этапа в западной литературе практически отсутствуют. Данный

факт Д.В. Гуревич объясняет направленностью работ зарубежных исследователей в этот период на развитие тектоники плит и совершенствование сверхточных геохимических изысканий (Гуревич, 2009). К сожалению, с распадом СССР вместе с негативными процессами в геологии произошел и резкий спад интереса к проблеме изучения СЦТ.

С начала 2000-х гг. возможности для решения задач в области выделения и интерпретации СЦТ резко возросли благодаря лавинообразному развитию компьютерных технологий, появлению возможности получения различных высокоточных геологических, геофизических и геохимических данных, спутниковых снимков высокого разрешения и разнородных данных ДЗЗ, включая радарную, радиолокационную, мульти- и гиперспектральную съемки, а также при значительном совершенствовании средств сбора, обработки и анализа пространственной геологической информации с помощью геоинформационных систем (ГИС). Это обусловило новую волну интереса геологов к данной проблеме по всему миру. В России наиболее объемные исследования и обобщение материалов о СЦТ отражены в работах Д.В. Гуревича, А.И. Полетаева и О.А. Мещеряковой (Гуревич, 2009; Гуревич, 2010; Полетаев, 2015; Мещерякова, Полетаев, 2018). Д.В. Гуревич, основываясь на своем личном опыте реализации прогнозных и поисковых работ на металлические полезные ископаемые в различных регионах России, стран СНГ и Африки, с использованием конкретных примеров, смог обобщить обширный материал предыдущих исследований и предложил четкую терминологию и классификацию СЦТ, основанную на генетическом подходе. Для сложных СЦТ, имеющих длительную историю развития и поэтому характеризующихся многочисленными вложенными концентрическими структурами, он предложил использовать термин “мультиринговая структура” (Гуревич, 2009).

В зависимости от степени геоморфологической выраженности, особенностей геометрии, вещественно-структурных признаков, размеров и генезиса, на сегодняшний день существует множество классификаций СЦТ (Соловьев, 1978; Космическая информация ..., 1983; Ежов, Худяков, 1984; Брюханов и др., 1987; Гуревич, 2009). К наиболее крупным подразделениям генетической классификации обычно относят магматогенные, метаморфоргенные, тектоногенные, тектоногенно-магматогенные, аркогенные, интрегеогенные, эрозионные и импактные.

Необходимо отметить, что на современном этапе появилось значительно больше зарубежных публикаций, посвященных изучению различных генетических типов СЦТ, с практическим приложением результатов их структурного анализа в области прогноза полезных ископаемых. При этом данные работы в основном посвящены исследованиям единичных, ранее установленных, структур в пределах известных рудных таксонов. Одним из ярких примеров являются исследования кольцевой структуры импактного происхождения Вредерфорт в ЮАР, в пределах которой расположены богатейшие месторождения бассейна Витватерсранд. Структура установлена по системе концентрических разломов и наличию центрального поднятия фундамента (Robb, Meyer, 1995). Очень часто в областях активного палео- и современного вулканизма СЦТ представлены кольцевыми (отрицательными) структурами – кальдерами, изучению механизмов формирования которых также посвящено множество современных работ зарубежных исследователей (Cole et al., 2005; Gudmundsson et al., 2006; Marti et al., 2008).

В данной статье на основе комплексного пространственно-структурного анализа результатов детального дешифрирования СЦТ сделана попытка установить их связь с определенными рудообразующими системами и оценить роль данных структур в формировании крупных рудных объектов в контексте геологической истории развития территории с активным палеовулканизмом. Концепция минеральных систем предложена как мультидисциплинарный подход, ориентированный на анализ всех геологических факторов, контролирующих формирование и сохранность минеральных месторождений, с учетом миграции рудных компонентов из источника, аккумуляции в более концентрированной форме и сохранности в определенных обстановках (Wyborn et al., 1994). Методология минеральных систем успешно использовалась при анализе условий формирования рудных месторождений различных генетических типов (Pirajno, 2009, 2016; Hagemann et al., 2016; Huston et al., 2016). В этом контексте на основе разработанного авторского подхода задача дешифрирования и комплексной пространственной интерпретации СЦТ позволяет восстановить локальные магматические очаги. Дальнейший учет каркаса разрывных нарушений, моделирования кольцевых трещин над поднимающимся магматическим очагом, применение анализа пространственно связанных с ним разрывных структур различных

рангов, тектонофизических и геодинамических реконструкций позволяют проследить пути миграции флюидов и прогнозировать области наиболее вероятного отложения рудной минерализации. Рассмотрение магматических очагов в качестве однозначных источников металлоносных флюидов в данной статье, учитывая парагенетический характер связи различных типов минерализации с интрузивными, субвулканическими и эффузивными телами, носит условный характер. Наиболее вероятные области локализации рудной минерализации могут быть определены при разностороннем структурном анализе (Сафонов и др., 2007).

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемая территория юго-восточного Забайкалья расположена в пределах листа государственной геологической карты (ГГК) M-50 (Борзя) масштаба 1 : 1000000 и характеризуется сложным геологическим строением, а также длительной историей развития, которая, по мнению всех исследователей, во многом определила локализацию мультиметального (Au, U, Mo, Pb-Zn, Sn, W, Ta, Nb, Li, флюорит) эндогенного оруденения в пределах определенных рудообразующих систем.

В региональном плане площадь относится к зоне сочленения Центрально-Азиатского подвижного пояса и Сибирской плиты, границу между которыми проводят по Монголо-Охотскому разлому (Таусон и др., 1984; Красный, 1997; Геологическая ..., 1999), выделяя по окраине Сибирской плиты Селенгино-Яблоновую складчатую область и Монголо-Охотскую складчато-надвиговую систему (фиг. 1). Эти зоны в ряде работ рассматриваются как террейны с сиалическим фундаментом, аккретированные к Сибирскому кратону в позднем рифее и кембрии (Гусев, Хаин, 1995; Парфенов и др., 1999). На северо-западе территории выделяются Пришилкинский и Хилок-Витимский блоки Селенгино-Яблоновой складчатой области. Пришилкинский блок характеризуется широким развитием выходов раннедокембрийского кристаллического основания – метаморфитов и гранитоидов, а также более поздних интрузий раннепалеозойского, позднепермского и позднеюрского (субвулканические образования) возраста. Хилок-Витимский блок представлен незначительным по размерам фрагментом на крайнем северо-западе территории и сложен раннепалеозойскими гранитоидами.

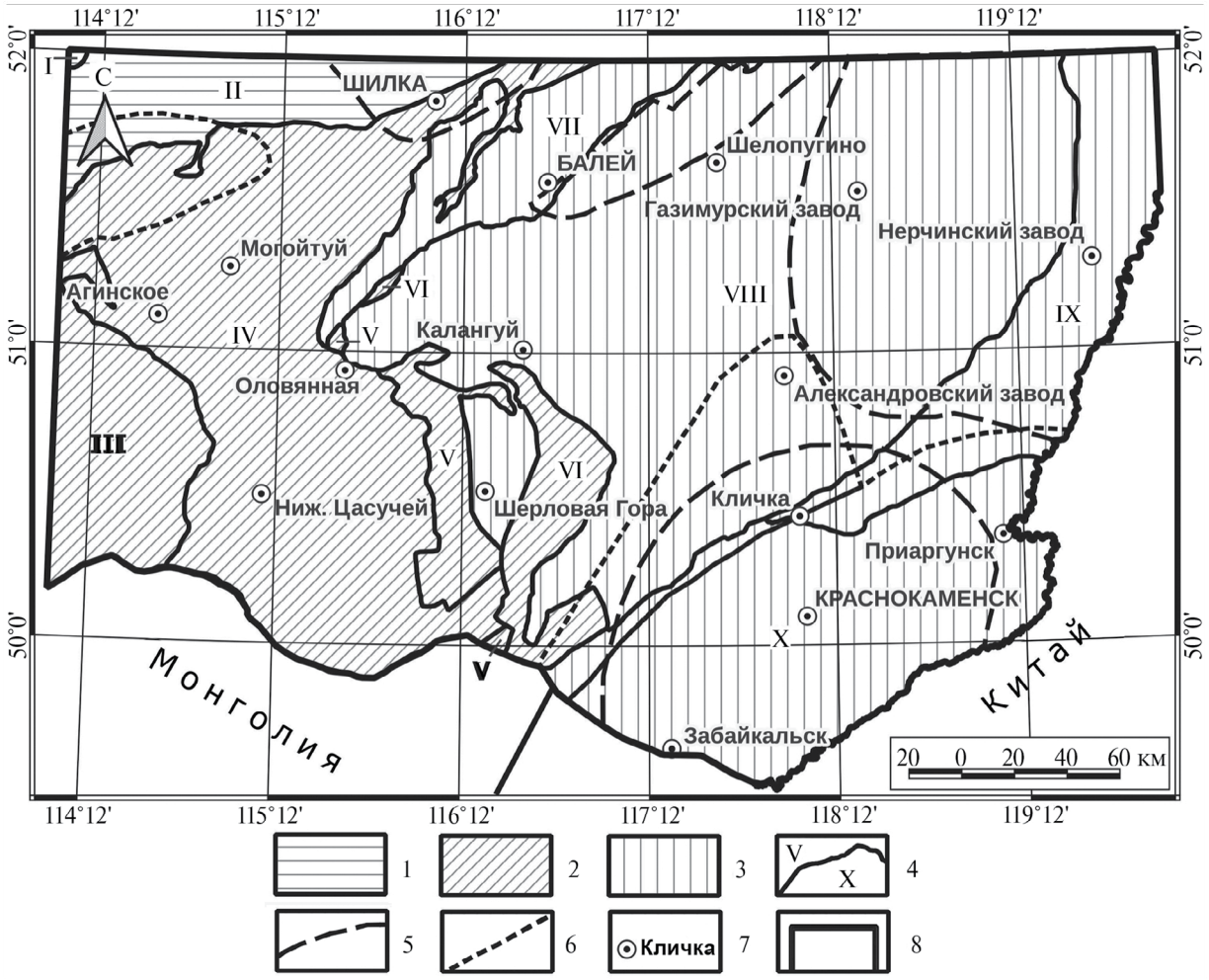
Центрально-Азиатский подвижный пояс к югу от Монголо-Охотского разлома, по мнению одних исследователей, представляет собой чередование разного размера блоков и выступов кристаллического фундамента (микроплит – микроконтинентов), а также фрагментов складчатых и складчато-надвиговых систем (Красный и др., 1999), а по мнению других – коллаж разнородных и разновозрастных террейнов (Гусев, Хаин, 1995; Парфенов и др., 1999). На рассматриваемой территории в составе пояса выделяются Агинская мегазона Монголо-Охотской складчато-надвиговой системы и Керулено-Аргуно-Мамынский композитный микроконтинент или супертеррейн.

Агинская мегазона, ограниченная Онон-Туринским, Монголо-Охотским и Восточно-Агинским глубинными разломами, представлена коллажем различных по размерам террейнов, сложенных осадочными и вулканогенно-осадочными образованиями окраинных морей, формировавшихся на различных этапах и при различных геодинамических режимах по периферии Сибирского континента. По совокупности признаков в Агинской мегазоне выделяются Среднеононский, Ононский, Уртуйский и Борзинский террейны (Парфенов и др., 1999).

Керулено-Аргуно-Мамынский микроконтинент – это одно из крупнейших композитных сооружений в Центрально-Азиатском подвижном поясе, представленное на данной территории одной из своих частей – крупным Аргунским террейном. Он в свою очередь также имеет сложное строение, проявляющееся в неоднородности характеристик и глубины залегания фундамента, в разной степени его гранитизации, а также в распределении разновозрастных геологических образований в верхней части коры.

Фундамент Аргунского террейна можно рассматривать как раннепротерозойское аккреционное сооружение, состоящее из мафических блоков островодужного типа и, предположительно, первичноосадочных пород (Государственная ..., 2010). В раннем протерозое эти образования претерпели ареальную гранитизацию. По совокупности признаков в Аргунском террейне обособляются Заурулюнгуйский (Урулюнгуйский), Газимурский, Калга-Орочинский и Борщовочный блоки (зоны). Для Аргунского террейна в целом характерна северо-восточная ориентировка крупных геологических структур, присущая большей части территории Забайкалья (см. фиг. 1).

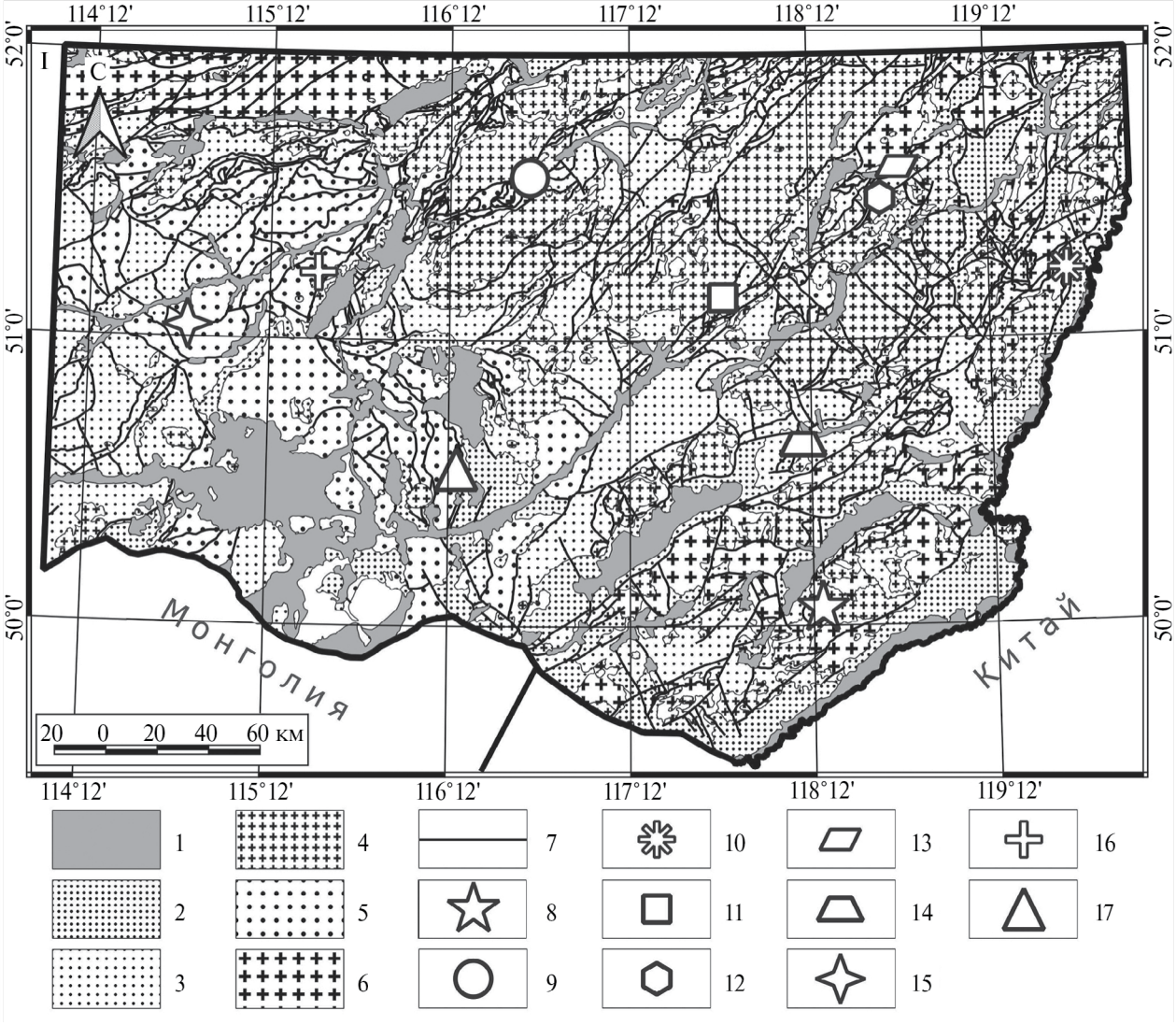
Из приведенного анализа видно, что на территории листа M-50 существуют крупные



Фиг. 1. Схема тектонического районирования юго-восточного Забайкалья (Государственная ..., 2010): 1 – Селенгино-Яблоновая складчатая область; 2 – Агинская мегазона Монголо-Охотской складчато-надвиговой системы; 3 – Аргунский террейн Керулено-Аргуно-Мамынского композитного супертеррейна; 4 – границы тектонических таксонов и их номера: I – Хилок-Витимский блок, II – Пришилкинский блок, III – Среднеононский террейн, IV – Ононский террейн, V – Уртуйский террейн, VI – Борзинский террейн, VII – Борщовочный блок, VIII – Газимурский блок, IX – Калга-Орочинский блок, X – Зауралюнгуйский (Урулюнгуйский) блок; 5 – позднеюрские структурно-фациальные зоны; 6 – средне-позднеюрские фациальные зоны; 7 – населенные пункты и их названия; 8 – контур площади листа карты М-50.

структуры, различающиеся набором вещественных комплексов разного возраста и различной формационной принадлежности. Выделены раннепротерозойский, средне-позднерифейский, позднерифейско-раннепалеозойский, средне- и позднепалеозойский, позднепермско-раннетриасовый, позднетриасовый, ранне-среднеюрский, средне-позднеюрский, меловой и кайнозойский структурные этажи (фиг. 2).

Раннедокембрийская история зафиксирована по фрагментарно сохранившимся выходам в составе древнего фундамента Аргунского террейна и Агинской мегазоны. В переделах первого выделяются разрозненные участки бластомилонитизированных и частично гранитизированных кристаллосланцево-плагиогнейсовых пород. U-Pb датировки кристаллических сланцев из глубокой скважины Стрельцовского рудного поля составляют около 1800 млн лет (Ищукова и др., 1998). В Агинской мегазоне выделяют амфиболитовый комплекс нижнего протерозоя, подвергавшийся неоднократной метаморфизации. Омоложенный Rb-Sr возраст составляет 1500 млн лет (Государственная ..., 2010). Кроме того, получил распространение габбро-ультрамафитовый комплекс, наиболее вероятно, связанный с древним зеленокаменным поясом, развивавшимся вдоль зоны Монголо-Охотского



Фиг. 2. Основные геологические формации и крупнейшие месторождения территории юго-восточного Забайкалья (Государственная ..., 2010): 1 – N–Q осадочные отложения, 2 – меловые вулканогенно-осадочные комплексы, 3 – юрские вулканогенно-осадочные комплексы, 4 – PZ–MZ гранитоидные интрузии, 5 – PZ вулканогенно-осадочные комплексы, 6 – AR–PZ_1 гранито-гнейсы и комплексы магматических пород, 7 – разрывные нарушения, 8–17 – рудные поля и месторождения (вне масштаба) с основными извлекаемыми рудными элементами: 8 – Стрельцовское рудное поле (19 месторождений – U, Mo), 9 – Балейское рудное поле (Балейское и Тасеевское месторождения – Au), 10 – Березовское месторождение (Fe), 11 – Бугдаинское месторождение (Mo, Pb, Au, Ag), 12 – Быстринское месторождение (Au, Ag, Cu, Fe), 13 – Ново-Широкинское месторождение (Au, Ag, Pb, Zn, Cu, Cd, Sb, Bi), 14 – месторождение Нойон-Тологой (Zn, Pb, Au, Ag, Sb, Cd, S), 15 – Орловское месторождение (Ta, Li), 16 – Уронайское месторождение (Bi, Au), 17 – Шерловогорское месторождение (Sn, Zn, Pb, Be, Ag, In, Sc).

глубинного разлома (Геологическая ..., 1999) и имевший важное значение в размещении золоторудных объектов (Щеглов и др., 1994).

Средне- и позднерифейские комплексы связаны с двумя этапами осадконакопления, а также двукратным гранитообразованием, поднятием и размывом территории. В среднерифейский этап накапливались кварцито-песчано-сланцевые и карбонатно-песчано-сланцевые отложения. Позднерифейский этап начался новым поднятием со значительным размывом песчано-сланцевых отложений и гранитов с формированием кор выветривания и конгломерато-песчано-алевролитовой формации. Осадконакопление сопровождалось контрастным вулканизмом с возрастом 792 млн лет (Государственная ..., 2010; Афанасов и др., 2007). Позднерифейский этап завершился формированием гранитов сложного комплекса с возрастом 784–765 млн лет (Афанасов и др., 2007).

Гранитообразование рифейского времени, вероятно, определило металлогеническую специализацию на уран Калга-Орочинского и Заурулюнгуйского (Урулюнгуйского) блоков (Приаргунская зона) Аргунского террейна (см. фиг. 1), где широко распространенные рифейские граниты могли выступать в качестве одного из предполагаемых источников рудного вещества в период позднемезозойской активизации (Ищукова и др., 1998, 2007). По данным Д.Н. Алексеева, в Агинской мегазоне подобная роль, но в отношении золота, принадлежит зеленокаменным породам рифея, в которых обнаружены надкларковые содержания золота (Алексеев, 1975).

Позднерифейско-раннепалеозойский этап начался широким распространением вендских прогибов преимущественно в широкой полосе, обрамляющей с северо-запада Приаргунскую зону. Существует предположение, что прилегающая к прогибу часть зоны представляла собой континентальный склон – шельфовую зону бассейна, где преимущественно формировались толщи углеродистых известняков. Также преобладают флишоидные толщи с отдельными прослоями углеродистых сланцев, туфогенных пород и кварцевых песчаников, свидетельствующих о размыве выступов гранитного фундамента. Этап завершился внедрением небольших гранит-лейкогранитовых массивов и образованием полей скарново-грейзеновых и кварц-светлослюдистых метасоматитов вокруг них. Определения изотопного возраста гранитов и метасоматитов Аргунского хребта в южном Приаргунье показывают датировки 547–430 млн лет (Государственная ..., 2010).

Средне-верхнепалеозойские и верхнепермско-нижнетриасовые отложения широко проявлены на территории юго-восточного Забайкалья и связаны с геосинклинально-инверсионным ($S–D_1–P_1$) и орогенным ($P_2–T_1$) этапами, особенно с формированием гранитоидов в Аргунском массиве. Инверсионно-орогенный магматизм проявлен небольшими габброидными интрузиями и обширными по площади плитообразными, по геофизическим данным (Духовский и др., 2000) интрузиями диорит-гранодиорит-гранитового комплекса с K-Ar возрастом 275–254 млн лет (Государственная ..., 2010; Козлов и др., 2003). К этапу орогенеза относится образование мощной многоритмичной серии, представляющей морскую туфогенную песчано-алевролитовую молассу, приуроченную к локальному шовному прогибу, вытянутому вдоль Восточно-Агинского структурного шва в западном ограничении Аргунского массива. Остальная территория рассматриваемой площади представляла область воздыманий. В пределах юго-восточного Забайкалья главные этапы формирования основной гранитоидной коры завершились в $P_2–T_1$. В дальнейшем преобладали дифференцированные глыбовые движения с возникновением локальных прогибов и обширных сводовых поднятий, характерных для поздних стадий развития подвижных внутриконтинентальных областей.

В развитии мезозоид юго-восточного Забайкалья Л.И. Красный выделяет яншанский этап тектоно-магматической активизации (ТМА), с которым связаны мощные процессы орогенной активизации во всем Монголо-Охотском складчатом поясе. В рамках этапа выделяются стадии предорогенного (J_{1-2}), орогенного (J_{2-3}), тафрогенно-орогенного (J_3) и тафрогенного ($J_3– K_1$) развития (Красный, 1997).

На ранне-среднеюрской стадии в Унда-Шахтаминской и Алгачи-Урюмканской зонах сформирован прогиб с терригенным выполнением, разграниченный внутренним барьерным поднятием на морскую и прибрежноконтинентальную зоны.

В средне-позднеюрскую орогенную стадию развиваются типичные структуры ТМА – глыбовые сводово-купольные плутонические поднятия, обрамленные вулканическими депрессиями – “очаговые структуры” (Томсон и др., 1974), которые в рельефе территории выражены концентрическими морфоструктурами. Этому времени соответствует зарождение Восточно-Забайкальского мегасвода, центр которого обозначился наиболее значительными плутоногенными проявлениями, приуроченными к центральной части раннеюрского прогиба.

В тафрогенно-орогенную стадию молассоидные и вулканогенно-молассоидные отложения выполняли наложенные впадины в пределах депрессий предшествующих периодов со смещением к периферии локальных очаговых структур (сводов), или выполняли вновь образованные грабенообразные структуры, продолжающие свое развитие в раннемеловое время. Наиболее крупные впадины располагались в краевых частях оформившегося к этому времени Восточно-Забайкальского мегасвода. Завершает магматизм тафрогенно-орогенной стадии комплекс субщелочных плюмазитовых лейкогранитов с поздними апогранитами. Их ареал смещен к ближней периферии Восточно-Забайкальского мегасвода, и, в то же время, массивы комплекса

контролируются зонами крупных разломов, часто меридионального простирания.

В целом для геологических и металлогенических структур юго-восточного Забайкалья характерно тесное сочетание региональных северо-восточных зон и разломов с концентрическими структурами и в первую очередь со структурами Восточно-Забайкальского мегасвода (Томсон и др., 1974; Афанасов и др., 2007). Принимая во внимание обозначенный структурный план, сложность геологического строения и высокие перспективы обнаружения новых рудных объектов, задача дешифрирования и интерпретации СЦТ в пределах юго-восточного Забайкалья с целью прогноза локализации рудообразующих систем является крайне актуальной.

Для решения задачи выявления источников металлоносных флюидов и картирования рудообразующих систем, выделения перспективных для поисков областей, построения геолого-генетических разрезов и моделей важное значение также имеют представления о глубинном строении территории. Контрастный тип геологического строения площади и высокая степень геологической, геофизической и геохимической изученности позволили составить карту глубинного строения масштаба 1 : 1000000 (Духовский и др., 2000; Государственная ..., 2010).

В соответствии с данной картой, в верхней части земной коры (до 20 км) выделяются раннедокембрийский кристаллический фундамент и верхний структурный этаж, сложенный образованиями рифея-фанерозоя. При этом в пределах верхнего структурного этажа отмечаются крупные останцы, тектонические пластины и выступы пород фундамента.

Раннедокембрийский кристаллический фундамент имеет сложное мозаичное слоисто-блоковое строение. В нем выделяются три комплекса (“слоя”) пород: нижний – гранулит-базитовый, средний – гнейсо-диоритовый, верхний – гнейсо-гранитовый, отличающиеся друг от друга составом и возрастом (Духовский и др., 1998). В строении кристаллического фундамента выделяется ряд иерархически соподчиненных структур. К структурам первого порядка относятся фрагменты двух мегаблоков: Аргуно-Верхнеамурского и Байкало-Станового. Мегаблоки сочленяются по Монголо-Удскому глубинному шву (фиг. 3). К структурам второго ранга относятся Восточно-Забайкальский ареал-плутон и зона его обрамления. Для плутона характерна резко увеличенная мощность гнейсо-гранитового “слоя” (глубина залегания подошвы до 10–11 км). Зона обрамления шириной 70–140 км имеет мощность гнейсо-гранитового “слоя” до 4–6 км.

Верхний структурный этаж сложен преимущественно магматогенными авто- и аллохтонными телами, формирование которых происходило на протяжении всей геологической истории развития: от раннего палеозоя до раннего неогена. Вертикальные размеры этажа в среднем не превышают 3–4 км, за исключением отдельных массивов, корневые части которых могут находиться на глубине от 5 до 11 км, а также стратифицированных образований в тектонических клиньях. На глубине все локальные геологические тела этажа редко выходят за пределы гнейсо-гранитового “слоя”. Нижняя граница имеет сложную форму, обусловленную морфологией и различной глубиной залегания нижних границ магматических тел, преимущественно гранитоидов. Строение верхнего структурного этажа в каждом из мегаблоков имеет свои особенности, которые коррелируются с особенностями строения фундамента.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

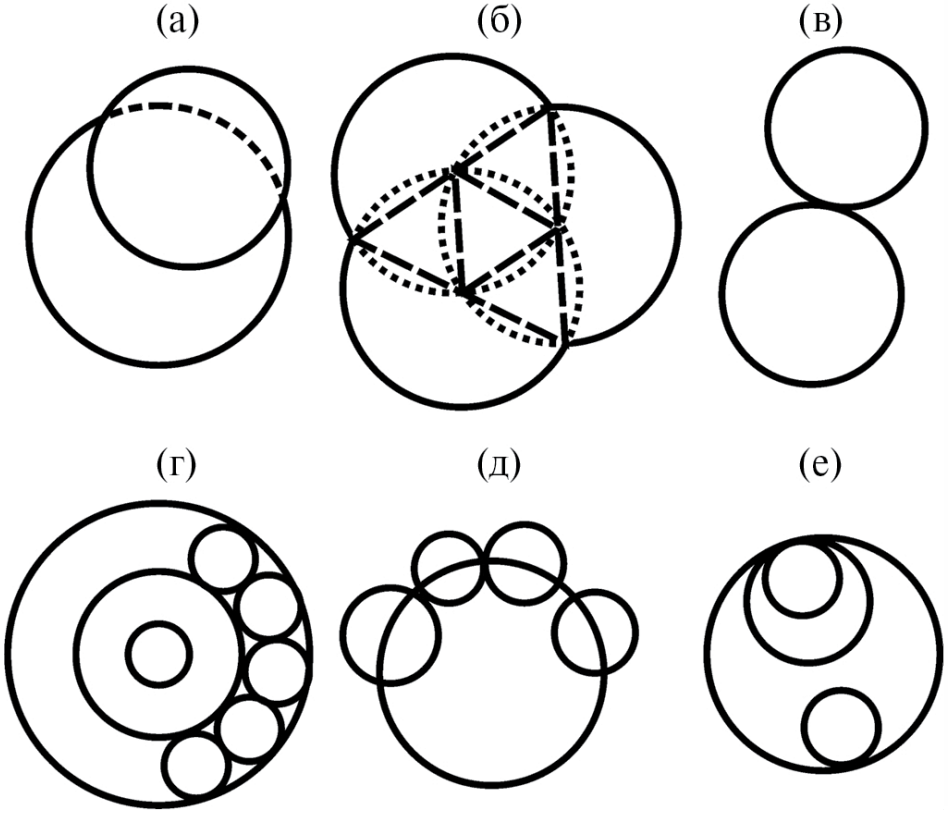
На начальных этапах с использованием имеющегося разномасштабного картографического, схематического и фактического материала по изучаемому объекту проведена обширная работа по разработке организационной структуры территориально централизованной и тематически распределенной базы данных (БД), включающей всю доступную информацию о геологии, полезных ископаемых, прогнозно-минерагенических данных, тектонике, структурном районировании, геоморфологии, геофизических и геохимических полях в пределах изучаемой площади. На основе созданной БД в границах листа карты М-50 формировался ГИС-проект “Юго-восточное Забайкалье”. Кроме того, в распоряжении авторов на территорию имелись данные ДЗЗ SRTM (Liping et al., 2011), комбинация которых, в сочетании с оцифрованными топографическими основами, позволила создать цифровую модель рельефа (ЦМР) высокого разрешения (15 м на пиксель) для решения задачи дешифрирования СЦТ. Дешифрирование предполагаемых СЦТ для большей достоверности проводилось оператором в ручном режиме с использованием различных способов визуализации ЦМР – создание теневого рельефа с вариациями положения источника света (фильтрация изображения), искусственное

Фиг. 3. Схема структурного районирования раннедокембрийского кристаллического фундамента земной коры юго-восточного Забайкалья (на уровне 5 км среза) (Духовский и др., 1998; Государственная ..., 2010): 1–3 – мегаблоки и звенья: 1 – Забайкальское звено Байкало-Станового мегаблока с глубиной залегания подошвы гнейсогранитного комплекса 8–14 км; 2 – Алдано-Становое звено Байкало-Станового мегаблока с глубиной залегания подошвы гнейсогранитного комплекса 6–8 км; 3 – Аргуно-Верхнеамурский мегаблок с ограниченным развитием гнейсогранитного комплекса; 4 – тектонические границы между блоками и звеньями; 5 – проекция плоскости сместителя разлома, разделяющего мегаблоки на уровне пятикилометрового среза (Монголо-Удский глубинный шов); 6 – ареал-плутоны гранитоидного состава (полихронные очаговые структуры): Д – Даурский с однородным внутренним строением глубоких частей, ВЗ – Восточно-Забайкальский со сложным блоковым строением; 7 – границы блоков Восточно-Забайкальского ареал-плутона: 1 – Кукульбейский, 2 – Верхнегазимурский, 3 – Ундино-Золинский, 4 – Новоширокинский; 8 – Верхнехилокская зона смятия; 9 – Верхнеолекминский блок с повышенной мощностью гнейсогранитового комплекса (до 10.5 км); 10 – очаговые и линейные зоны гранитизации: I – Завитинская, II – Орловско-Оловяннинская, III – Шерловогорская, IV – Заурулюнгуйская; 11 – контур площади листа карты М-50; 12 – реки и их названия.

“вытягивание” рельефа, выделение морфологических классов. Кроме того, в автоматическом режиме с использованием специализированных и разработанных авторами на основе нейросетевых технологий программных средств (Гришков и др., 2023) маркировались линеаменты – отрицательные линейные формы рельефа (постоянные и временные водотоки) и осевые линии хребтов (водоразделы) (Кац и др., 1986). При выделении СЦТ в качестве критериев заверки рассматривались радиально-концентрическое положение выявленных линеаментов и их дирекционные аномалии, выражающиеся в изменении линейности (Соловьев, 1978).

Следующим важным этапом работы являлось определение пространственных критериев, благоприятных для размещения различных типов полезных ископаемых относительно выделенных СЦТ и их структурных элементов. Данные критерии учитывались при проведении структурно-пространственного ГИС-анализа и формулировании предположений о возможной связи выявленных структур с определенными рудообразующими системами. По результатам изучения многочисленных СЦТ в расположении структур относительно друг друга можно выделить определенные закономерности (Гуревич, 2009). Часто наблюдается закономерное расположение мелких (“дочерних”) СЦТ относительно “материнской” структуры более высокого ранга – расположение типа “подшипник”, орбитальная локализация и смещение дочерних структур к внешней границе внутри материнской структуры (фиг. 4г–е). Такое взаимное расположение, по мнению Д.В. Гуревича и авторов данной статьи, характерно для комплекса структур, сформировавшихся в результате единого геологического процесса, но в рамках разных стадий его эволюции. Кроме того, определенные пространственные закономерности отмечаются и для одноранговых структур, например примыкание (фиг. 4в). Секущий характер в расположении СЦТ, по сравнению с приведенными выше позициями, встречается гораздо реже (фиг. 4а, б).

Пример модели последовательной эволюции вулкано-плутонической системы опускания с формированием СЦТ, в зависимости от уровня эрозионного среза, приведено в работе С.Е. Джонсона и др. (Johnson et al., 2002). Развитие системы начинается с образования кольцевых трещин над поднимающимся магматическим очагом с ростом купольной структуры. Затем возможны различные варианты эволюции магматического очага с формированием кольцевых даек и разломов разных рангов с образованием кальдеры. Дальнейшее развитие вулкано-плутонической системы может быть связано с подъемом части магматического очага и формированием новой кальдеры, а также внедрением “вложенной” интрузии. В итоге может сформироваться сложный мультиринговый комплекс с центральной интрузией (фиг. 5). Как известно, локализация и условия отложения рудной минерализации во многом зависят от глубинного



Фиг. 4. Схема пространственных взаимоотношений морфоструктур центрального типа (Гуревич, 2009) с дополнениями авторов: секущее наложение (а), сочленение (тройное) (б), примыкание (в), «подшипник» (г), орбитальные структуры (д), смещение дочерних структур к внешней границе материнской структуры (е).

уровня действовавшей вулкано-плутонической системы (рудообразующей системы). Разные уровни характеризуются определенным набором рудных элементов или их отсутствием, возможности их обнаружения определяются уже современным уровнем эрозионного среза.

Детальное дешифрирование СЦТ позволяет выявить проекции ослабленных зон на дневную поверхность. В соответствии с проведенными ранее исследованиями предполагается, что данные зоны (разломы, трещиноватость) образуют кольцевой структурный каркас и своими корнями уходят в соответствующие магмогенерирующие очаги.

Таким образом, откартированные каркасные элементы структурных форм рассматриваются в качестве подводящих каналов, по которым к поверхности поднимаются разного рода эманации и растворы (в том числе и металлоносные). Этим фактом определяется рудоконтролирующая роль СЦТ. Необходимо отметить, что в представленной работе учитывается фактор преимущественно структурного контроля, который должен, при проведении прогнозной оценки, дополняться и вещественным.

В.В. Соловьевым и многими другими исследователями на основе детального изучения взаимоотношений структурных элементов в пределах многочисленных СЦТ выявлены наиболее благоприятные условия и области для локализации рудного вещества (Соловьев, 1978; Невский, Фролов, 1985). Эмпирически установлены следующие позиции распределения повышенных объемов минерализации (в порядке возрастания их значимости): 1) во внешних кольцевых разломах (фиг. 6а); 2) в каркасных узлах (фиг. 6б); 3) в зонах пересечения каркасных элементов региональными разломами и скрытыми разломами фундамента (фиг. 6в); 4) на площадях интерференции разнопорядковых и разновозрастных СЦТ (фиг. 6г); 5) в апикальных частях одиночных купольных форм, особенно при пересечении их глубинными разломами.

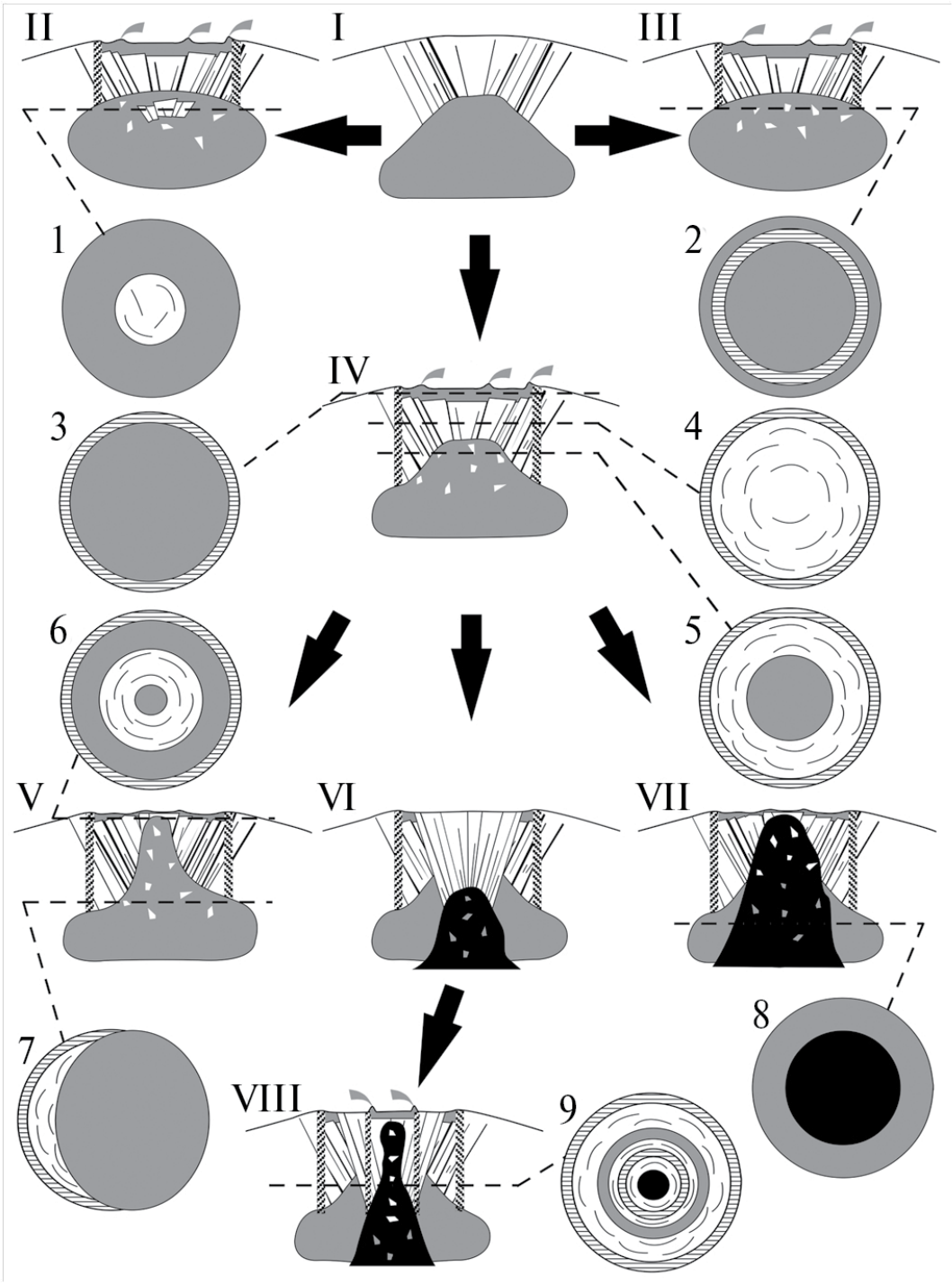
Очевидно, что степень перспективности конкретной области определяется величиной проницаемости тех или иных участков литосферы. Вполне естественно, что сгущение линейных и кольцевых разломов, узлы их пересечения, неоднократная интерференция структурных форм – все это показатели сильной раздробленности, а значит, и проницаемости литосферы для потенциально металлоносных растворов.

Ранее было показано, что многие структурные формы, особенно в ранге астеноконов – структур астеносферного заложения (более 1000 км в поперечнике), перспективны на комплекс как гипогенных, так и гипергенных полезных ископаемых (Соловьев, 1978). Доля месторождений полезных ископаемых всех типов, связанных с СЦТ всех масштабных уровней, по оценкам одних исследователей составляет 70–75% (Брюханов и др., 1987; Корчуганова, Корсаков, 2009), по мнению других – доходит до 100%, при учете, что каждое месторождение располагается в пределах множества СЦТ разного ранга и/или на пересечении элементов одноранговых структур (Гуревич, 2009).

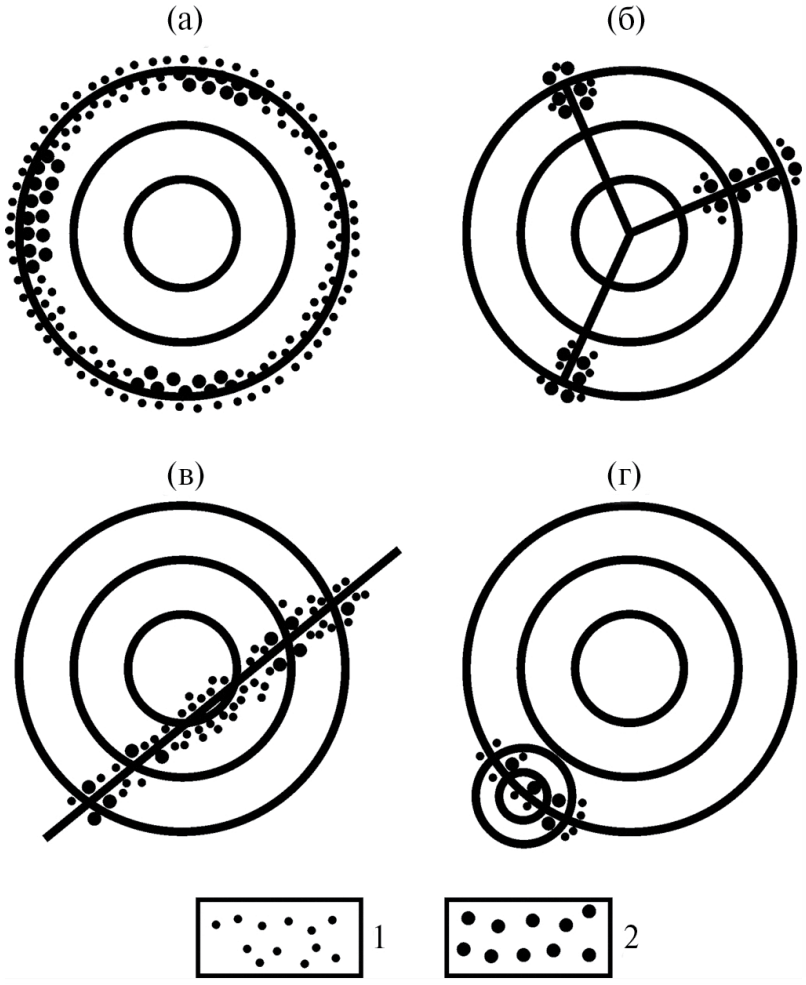
Используя перечисленные критерии и факторы, с применением средств комплексного пространственного ГИС-анализа можно сделать значимые выводы для решения задач регионального прогноза и выявления наиболее перспективных областей локализации рудообразующих систем в пределах рассматриваемой территории.

Задача пространственного геоинформационного прогноза в науках о Земле заключается в выявлении определенных закономерностей (критериев), совокупность которых возможно представить в виде прогнозной карты, составленной на основе правил сочетания выявленных критериев. Для этого исследуемый регион должен представлять собой однородную, в определенном смысле, геологическую зону (Гитис, Ермаков, 2004; Гитис и др., 2013). Среди множества подходов к прогнозному моделированию для визуализации основных критериев размещения рудной минерализации относительно структурных элементов СЦТ и крупных разломных зон нами выбран один из наиболее эффективных и широко используемых в металлогеническом картировании, прогнозе и поиске месторождений полезных ископаемых методов – создание весовой прогнозно-поисковой модели (Franca-Rocha, et al., 2003; Carranza, 2004; Porwal et al., 2010; Shahi, Rouhani, 2014). Данные модели базируются на статистических алгоритмах, которые позволяют определить условную вероятность наличия объекта в конкретном участке земной поверхности на основе геологических данных и их корреляции с уже известными (эталонными) объектами.

Основным принципом создания весовых прогнозно-поисковых моделей является выделение геологических факторов, которые имеют наибольшую значимость для концентрации полезных ископаемых и их дальнейшей интерпретации в контексте проявлений рудных объектов на рассматриваемой территории. После выделения значимых геологических факторов,



Фиг. 5. Модель последовательной эволюции вулкано-плутонической системы опускания с формированием структур центрального типа в зависимости от уровня эрозионного среза (Johnson et al., 2002): I – формирование кольцевых трещин над поднимающимся магматическим очагом, II–IV – варианты эволюции магматического очага с формированием кольцевых даек и разломов разных рангов с образованием кальдеры, V–VII – возможные варианты дальнейшего развития системы с подъемом части магматического очага и формированием нового конуса кальдеры (V), внедрением «вложенной» интрузии (VI, VII), VIII – формирование сложного кольцевого комплекса с центральной интрузией; наблюдаемые структуры центрального типа: 1 – плутон с обрушенными породами кровли, 2 – корни кольцевой дайки, 3 – кальдера, 4 – комплекс кольцевых разломов, 5 – комплекс кольцевых разломов с центральной интрузией, 6 – вулканическая депрессия, 7 – кольцевой комплекс, прорванный ассиметричной интрузией, 8 – вложенные плутоны, 9 – мультиринговый комплекс.



Фиг. 6. Принципиальная схема локализации полезных ископаемых в пределах СЦТ (Соловьёв, 1978) с указанием наиболее вероятных областей локализации рудного вещества: в зоне внешних концентрических блоков (а), в каркасных узлах (б), в зонах секущих разломов (в), в участках структурной интерференции (г); 1 – рудопроявления, 2 – месторождения.

проводится их статистический анализ и оценка влияния каждого из них на вероятность наличия известных рудных объектов. Эти данные затем объединяются в единую модель, которая позволяет определить условную вероятность наличия рудного объекта в конкретном участке земной поверхности. Весовые прогнозно-поисковые модели являются крайне эффективным инструментом прогноза, так как они позволяют объединять различные типы данных и выявлять скрытые связи между ними.

В общем виде создание весовой прогнозно-поисковой модели территории юго-восточного Забайкалья в связи с развитием СЦТ и разрывных структур включало перечисленные ниже шаги.

1. Определение переменных – проводился отбор и определение критериев, прямо или косвенно влияющих на локализацию рудной минерализации.

2. Определение значений переменных – осуществлялся расчет количественных и пространственных параметров выявленных критериев, которые возможно использовать для прогноза локализации рудной минерализации.

3. Оценка значений переменных – проводилась оценка значимости каждого параметра переменной на основе экспертных оценок или статистических данных.

4. Определение функции принадлежности – для каждой переменной проводилось определение функции принадлежности, которая описывает степень принадлежности каждого значения переменной к данной категории. Функция принадлежности определялась в ГИС на основе нечеткой логики (линейная принадлежность)

и характеризовала интервалы значений параметров каждого критерия от 0 до 1.

5. Определение правил – формулировались правила для сочетания значений переменных.

6. Определение весовых коэффициентов – для каждого правила на основе экспертных оценок или статистических данных определялись весовые коэффициенты. Весовые коэффициенты использовались для учета важности каждого правила при оценке вероятности наличия рудного объекта.

7. Расчет вероятности наличия рудного объекта – для расчета вероятности наличия рудного объекта на рассматриваемой территории использованы весовые коэффициенты и оценки переменных. В итоге осуществлен расчет вероятностей обнаружения искомого объекта.

8. Тестирование модели – созданная модель заверялась на тестовых (эталонных) участках для определения ее точности.

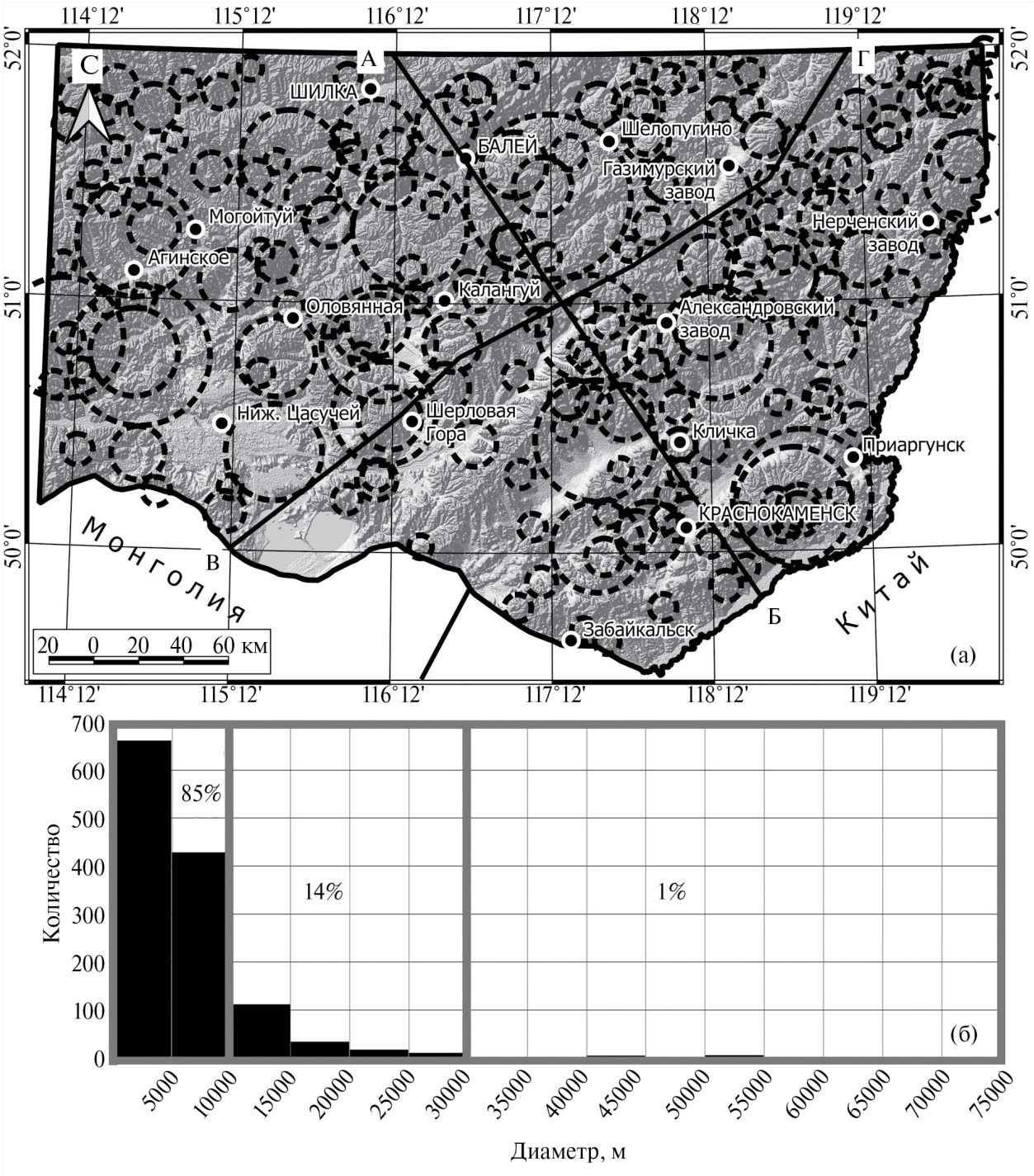
РЕЗУЛЬТАТЫ

На цифровой модели рельефа по структурно-геоморфологическим признакам выделены предполагаемые границы СЦТ (фиг. 7а), которые, возможно, представляют собой систему кольцевых разломов с преобладающими вертикальными смещениями (Соловьёв, 1978). На схеме границы структур условно, для простоты анализа и обработки, показаны пунктиром в форме круга. Необходимо отметить, что геоморфологически, в зависимости от уровня эрозионного среза, наложенных тектонических и геологических процессов, этапов активизации, неправильной формы предполагаемого магматического очага (плутона, интрузии), СЦТ возможно зафиксировать только по отдельным, сохранившимся в процессе длительного геологического развития, элементам (дуги, сегменты кольцевых разломов, радиально-концентрические разломы и трещины). При этом большой опыт авторов по дешифрированию границ СЦТ на основе данных ДЗЗ высокого разрешения показал, что их форма в большинстве случаев стремится к кругу и в редких исключениях приближается к овальной. Результаты более детального дешифрирования позволили установить, что даже овальная форма структур чаще всего объясняется секущим наложением или примыканием нескольких отдельных СЦТ, которые исследователям не всегда удается визуально выявить. Геоморфологически в форме круга обычно отмечаются СЦТ, выделяемые преимущественно по материалам ДЗЗ, но более детальные полевые исследования – применение геофизических методов, геологического картирования, уже позволяют более точно выявить геометрические неоднородности границ в зависимости от типа структуры.

В.В. Соловьев на основе установленной “четкой дискретности латеральных параметров структур” выделяет четыре основные масштабные группы СЦТ – мини- (километры), мезо- (десятки километров), макро- (первые сотни километров), мега- (многие сотни и тысячи километров) (Соловьёв, 1978). В масштабе исследуемой территории, с учетом высокого пространственного разрешения используемых данных ДЗЗ, нам удалось выявить СЦТ, входящие в первые две группы. Всего в пределах площади выявлено 1285 структур, при этом в большем количестве представлены структуры диаметром менее 10 км и площадью менее 80 км^2 (85%). Более крупные СЦТ развиты в меньшей степени и составляют 15% от общего количества структур (фиг. 7б). При статистическом анализе более 4000 СЦТ В.Н. Брюхановым с соавторами не обнаружено выделенных ранее В.В. Соловьевым дискретных групп (Соловьёв, 1978). Установлено только плавное увеличение числа структур с уменьшением их диаметра (Брюханов и др., 1987), что наблюдается и в нашем случае.

Для обобщенного анализа пространственных взаимоотношений выявленных СЦТ и известных рудных объектов построена схема относительной удельной плотности всех металлических полезных ископаемых (месторождения, рудопроявления), известных в пределах территории, с указанием границ выделенных структур (фиг. 8). По своему смыслу, с точки зрения пространственного размещения рудных объектов, их относительная удельная пространственная плотность отражает количество месторождений и рудопроявлений на единицу площади и близка к понятию “экстенсивности” оруденения (Смирнов, 1944).

Установлено, что Балейское рудное поле (БРП – Au) локализовано вблизи области примыкания и сближения двух крупных СЦТ на юго-востоке и юго-западе (относительно рудного поля), а также нескольких меньших по размерам структур на севере и северо-западе. Необходимо отметить, что в рамках крупных СЦТ наблюдаются «вложенные» структуры более низких рангов, которые смещены к внешней границе и области локализации месторождений и рудопроявлений БРП. Это говорит либо о многократной тектоно-магматической активизации, то есть



Фиг. 7. (а) – схема структур центрального типа (СЦТ), выделенных по созданной цифровой модели рельефа для листа государственной геологической карты М-50 (показаны структуры более 10 км в диаметре): А–Б, В–Г – линии разрезов; (б) – гистограмма распределения интервалов диаметров всех выделенных СЦТ относительно их количества (15 классов).

полистадийном процессе формирования морфоструктур в данной области, либо об участии в процессе отложения рудной минерализации нескольких одновозрастных и пространственно связанных, но расположенных на различных глубинах, магматических очагов, что, безусловно, в обоих случаях повлияло на отложение богатой рудной минерализации.

Стрельцовское рудное поле (СРП – U, Mo) локализовано вблизи развития двух крупных "вложенных" друг в друга СЦТ на северо-востоке, в пределах которых также развиты многочисленные более мелкие структуры, большая часть которых смещена к области пространственных максимумов рудных объектов. На северо-западе к рудному полю примыкает группа СЦТ более низких рангов. Такое пространственное размещение структур также позволяет говорить о полистадийности процесса отложения оруденения и участии нескольких связанных (дочерних) или не связанных друг с другом разновозрастных очагов.

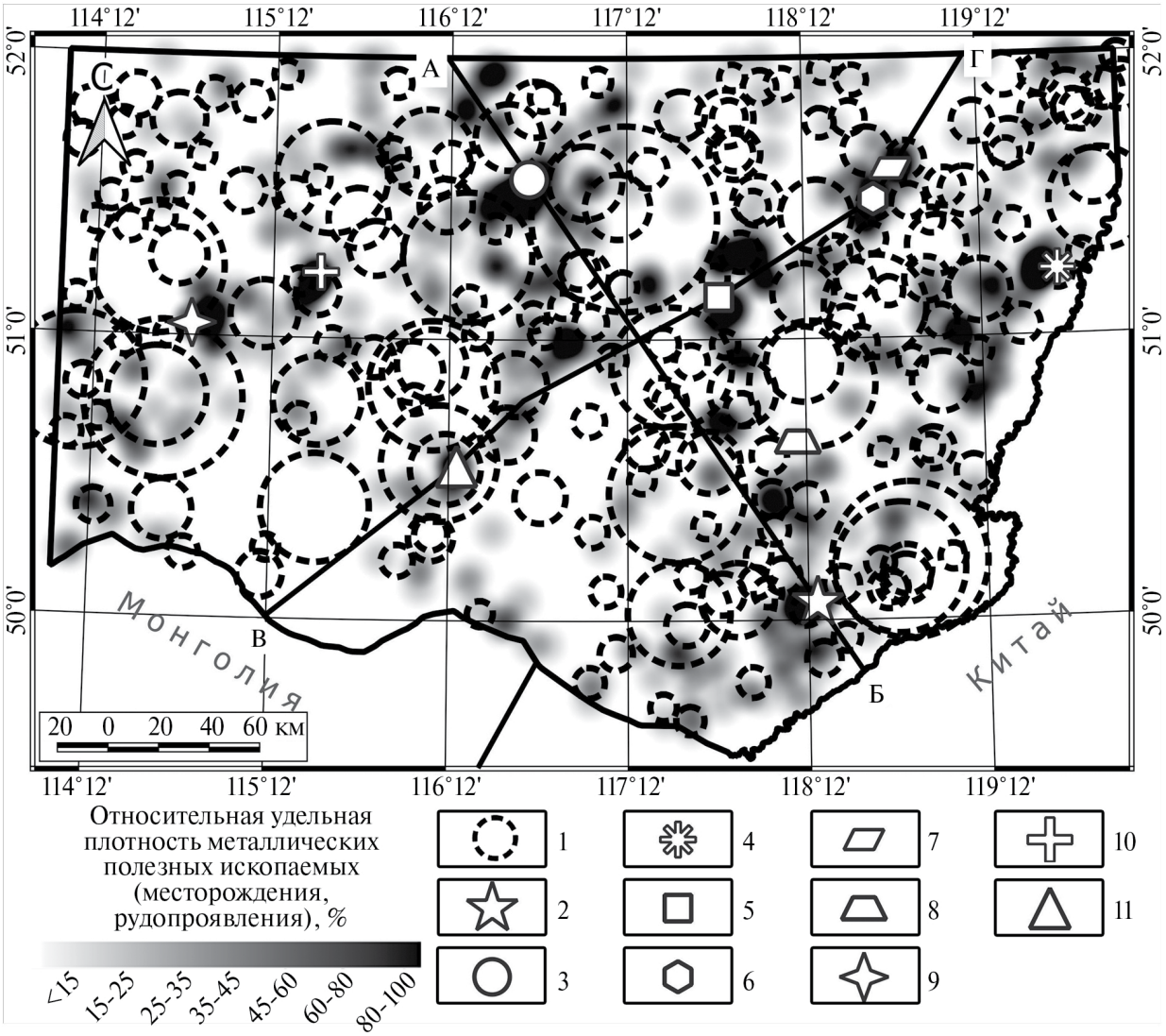
В качестве еще одного наглядного примера можно привести Орловское месторождение (Ta, Li), входящее в Орловско-Спокойнинский рудный узел, который приурочен к Хангилайскому плутону мезозойских гранитов, выраженному в рельефе в виде купольного поднятия (Государственная ..., 2010), выделенного нами в отдельную СЦТ. При этом богатое оруденение, наиболее вероятно, связано с сочетанием глубинных магматических очагов, выраженных в рельефе крупными СЦТ, примыкающими к рудному узлу с севера, востока и юга.

Необходимо отметить, что на фиг. 8, учитывая обширную площадь исследования, для наглядности, показаны только СЦТ более 10 км в поперечнике, при этом, имея в виду высокое пространственное разрешение исходных данных ДЗЗ, более мелкие структуры также выделялись и анализировались. Установлено, что все пространственные максимумы плотности оруденения сконцентрированы на периферии крупных СЦТ, а также вне их границ, но в непосредственной близости, особенно относительно областей интерференции и пространственного сближения, а также примыкания структур. При этом большинство известных рудных объектов приурочено к внутренним и близпериферическим областям более мелких структур (менее 10 км в поперечнике), в зависимости от степени развития каркаса секущих эти структуры, или развитых в границах структур, разрывных нарушений. Ярким подтверждением этого является СРП, где 19 U-Mo месторождений локализованы в пределах одноименной кальдеры на площади ≈140 км^2 в соответствии со специфическим каркасом разрывных нарушений (Ищукова и др., 1998; Ищукова и др., 2007). Кальдера отчетливо выражена в морфологии рельефа и выделена нами в качестве отдельной СЦТ с диаметром 13.2 км.

Почти все крупные рудные объекты региона демонстрируют подобную установленную зависимость. Исключением является БРП, которое, несмотря на локализацию в области сближения крупнейших СЦТ территории, не приурочено к более мелким морфоструктурам. При этом для золотого оруденения БРП прослеживается четкая пространственная связь с региональными разломами северо-восточного простирания, а также линейными структурами более низкого ранга северо-западной ориентировки (Симонов, Любалин, 1979), игравшими роль флюидопроводящих каналов, рудоконтролирующих и рудовмещающих структур, создавая связь между предполагаемыми магматическими центрами, которые маркируются выделенными крупными СЦТ.

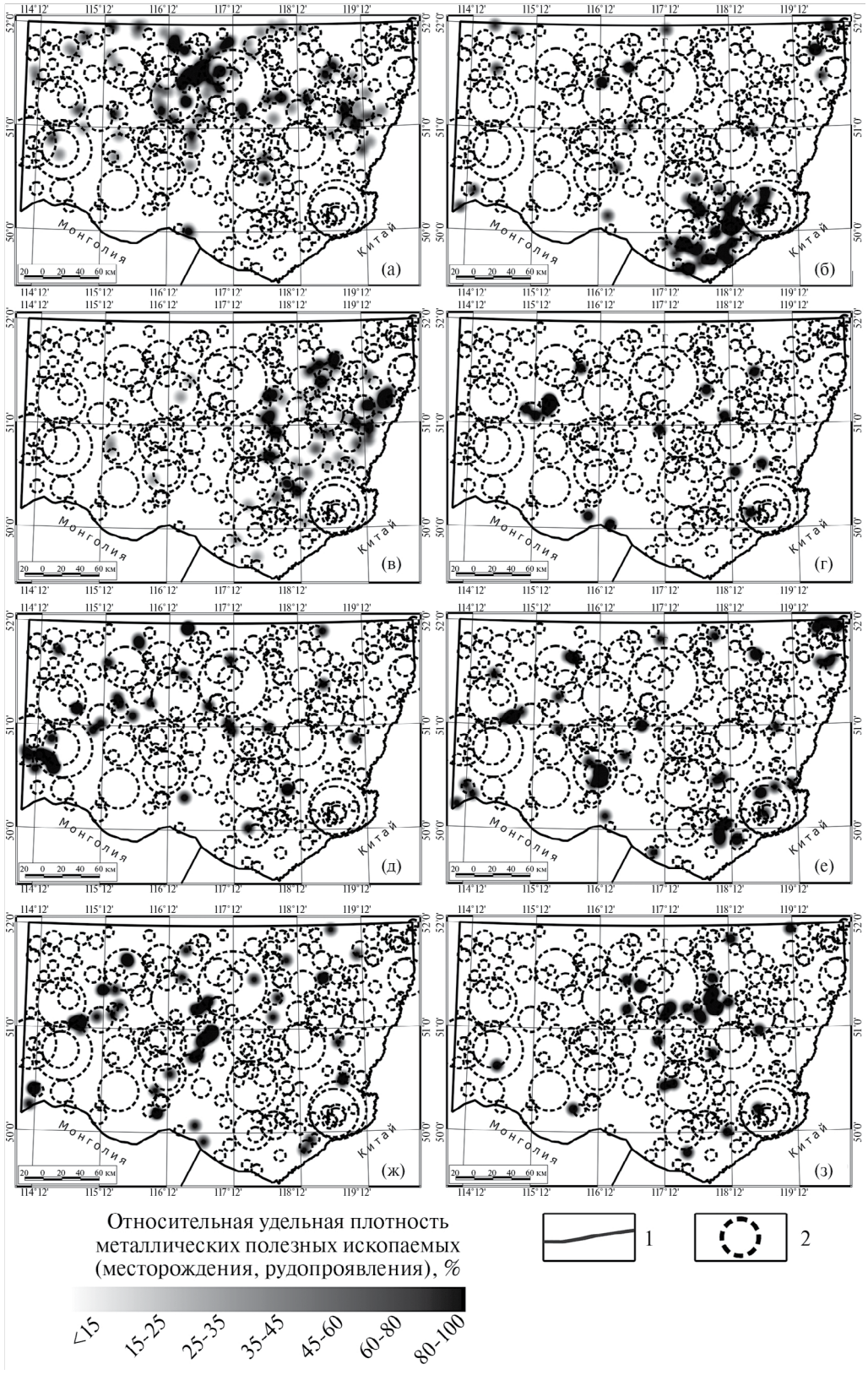
Следующей задачей являлось создание схем относительной удельной плотности известных рудных объектов по типу минерализации с указанием выделенных СЦТ для пространственного анализа с целью выявления связи структур с рудообразующими системами определенных типов. Установлено, что золоторудные объекты локализованы преимущественно в северной (БРП и многочисленные рудопроявления) и северо-восточной частях территории (фиг. 9а); урановорудные большей частью – на юго-востоке (СРП и многочисленные рудопроявления) (фиг. 9б); свинцово-цинковые объекты, крупнейшим из которых является месторождение Нойон-Тологой, а также крупные месторождения комплексных руд (Ново-Широкинское, Бугдаинское) располагаются в восточной части (фиг. 9в); максимумы пространственной плотности меди связаны в основном с небольшими рудопроявлениями, порфировыми и комплексными месторождениями (Ново-Широкинское, Бугдаинское, Быстринское), известными на исследуемой площади (фиг. 9г); сурьма, олово и вольфрам известны повсеместно в пределах территории и локализованы в качестве отдельных рудопроявлений и небольших месторождений (фиг 9д–ж); молибден в основном связан с небольшими рудопроявлениями, является попутным компонентом при извлечении из руд СРП, а также добывался на крупном Шахтаминском месторождении, которое выражено самым большим максимумом пространственной плотности в север-северо-восточной части территории (см. фиг. 9з).

Данные схемы позволили ранжировать выявленные СЦТ по предполагаемому источнику (очагу) в связи с формированием определенного типа полезного ископаемого. Например, самая



Фиг. 8. Схема локализации выявленных морфоструктур центрального типа (более 10 км в диаметре) относительно максимумов удельной плотности металлических полезных ископаемых (месторождения, рудопроявления): А–Б, В–Г – линии разрезов; 1 – морфоструктуры центрального типа; крупнейшие рудные поля и месторождения (вне масштаба): 2 – Стрельцовское рудное поле (19 месторождений – U, Mo), 3 – Балейское рудное поле (Балейское и Тасеевское месторождения - Au), 4 – Березовское месторождение (Fe), 5 – Бугдаинское месторождение (Mo, Pb, Au, Ag), 6 – Быстринское месторождение (Au, Ag, Cu, Fe), 7 – Ново-Широкинское месторождение (Au, Ag, Pb, Zn, Cu, Cd, Sb, Bi), 8 – Месторождение Нойон-Тологой (Zn, Pb, Au, Ag, Sb, Cd, S), 9 – Орловское месторождение (Ta, Li), 10 – Уронайское месторождение (Bi, Au), 11 – Шерловогорское месторождение (Sn, Zn, Pb, Be, Ag, In, Sc).

крупная выделенная нами структура с диаметром 73.4 км, расположенная в северной части рассматриваемой территории, вероятно, маркирует глубинный очаг, связанный с отложением золотой, свинцово-цинковой, медной, сурьмяной, оловянной и молибденовой минерализации. При дальнейшем анализе в зависимости от развития дочерних СЦТ или наложения более поздних структур ниже рангом, являющихся отражением менее глубинных очагов, появляется возможность более точной локализации рудообразующих систем, связанных с определенным типом минерализации. Исходя из этого, как уже отмечалось выше, золотое оруденение относительно рассмотренной структуры локализуется в северо-западной части, вероятно, вследствие сближения и примыкания других СЦТ. Свинцово-цинковая и медная минерализация развиты исключительно в северо-восточной части также в областях сближения и примыкания к данной структуре СЦТ более низких рангов. Сурьма, олово и вольфрам локализуются



Фиг. 9. Схемы локализации выявленных морфоструктур центрального типа (более 10 км в диаметре) относительно максимумов удельной плотности металлических полезных ископаемых (месторождения, рудопроявления – вне масштаба) по главному рудному элементу: 1 – граница листа карты М-50; 2 – морфоструктуры центрального типа; (а) – золото; (б) – уран; (в) – свинец-цинк; (г) – медь; (д) – сурьма; (е) – олово; (ж) – вольфрам; (з) – молибден.

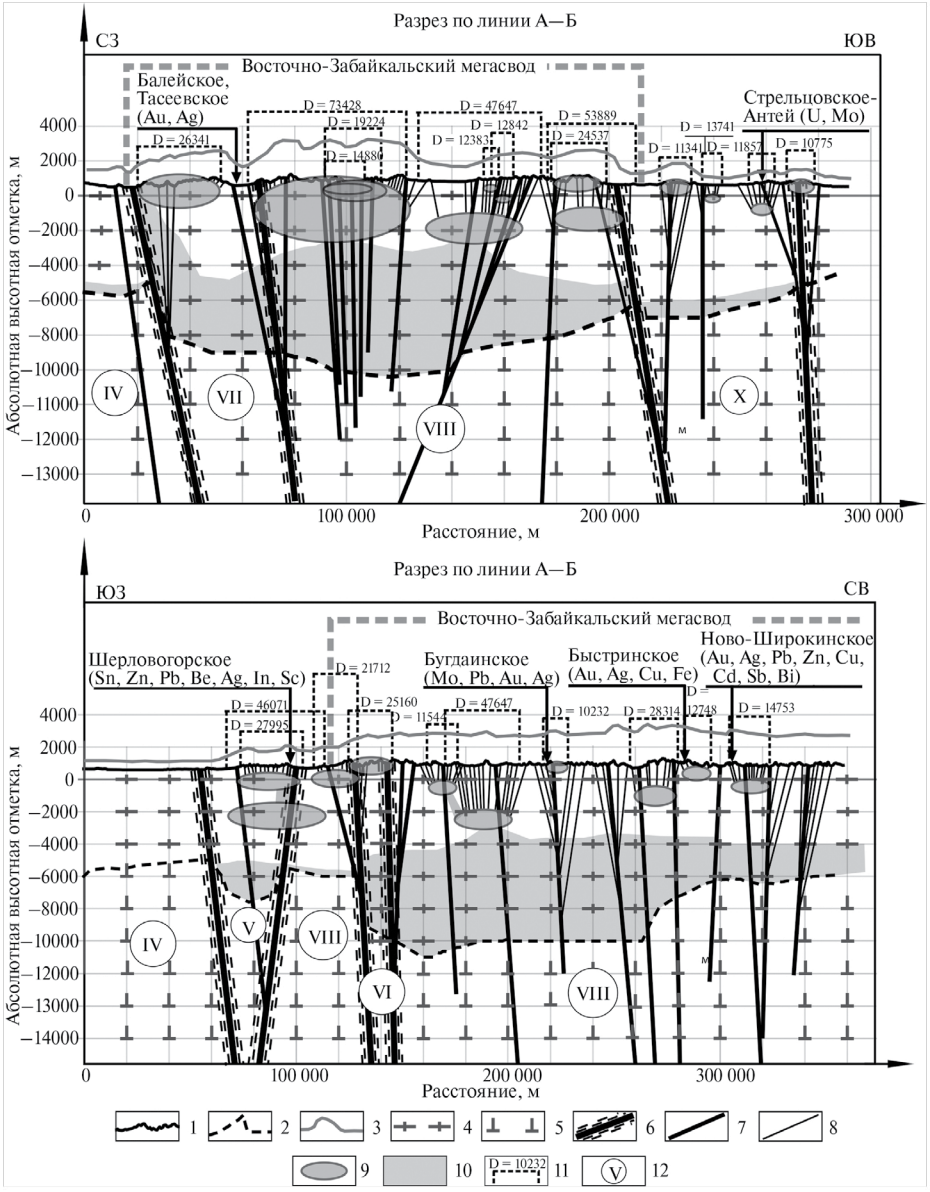
преимущественно в южной части в местах пересечения внешних кольцевых разломов данной структуры с кольцевыми разломами структур низких рангов. При этом рудопроявления сурьмы присутствуют и во внутренней части структуры, но они также приурочены к области интерференции трех "вложенных" в данную СЦТ структур. Молибденовая минерализация проявлена в западной, южной и, особенно интенсивно, в восточных областях относительно структуры, что также может быть объяснено приуроченностью к периферическим частям вложенных или пересекающих данную структуру СЦТ. Восточнее рассматриваемой структуры, в районе Шахтаминского месторождения, распределение молибдена связано с примыканием и небольшим по площади наложением одноранговых СЦТ, формирующих линейную цепочку.

Для реконструкции глубины локализации предполагаемых очагов, их пространственных отношений, а также установления связи с линейными тектоническими структурами и рудными объектами, восстановления уровня эрозионного среза через всю рассматриваемую территорию строились модельные разрезы по линиям, ориентированным с северо-запада на юго-восток – вкрест простирания линейных глубинных структур северо-восточного простирания и крупных хребтов, а также с юго-запада на северо-восток – субпараллельно глубинным разломам и осевым линиям хребтов первого порядка (фиг. 10). Линии разрезов проходят через крупнейшие рудные объекты территории и показаны на фиг. 7 и 8.

При создании модельных разрезов на начальном этапе с использованием ЦМР отстраивалась современная поверхность. На основе изолиний, полученных в результате интерпретации глубинных геофизических данных (Духовский и др., 2000; Методическое пособие ..., 2005), восстанавливалась подошва гнейсо-гранитового "слоя" с фиксацией разломов фундамента и установленных границ Восточно-Забайкальского ареал-плутона (см. фиг. 3), с процессами остывания и неоднократной гранитизации которого исследователи связывают формирование в рельефе площади Восточно-Забайкальского мегасвода (Томсон и др., 1974; Афанасов и др., 2007). Кроме того, с тектонической карты на разрезы выносились разломы различных рангов, в том числе глубинные разломы, разделяющие территорию на блоки (см. фиг. 1, 2). Также отмечались границы выделенных СЦТ с указанием диаметра структуры и позиции крупнейших рудных объектов. На основе примененных предшественниками методов определения глубины эрозионного среза крупнейших рудных полей и месторождений Дальнего Востока (Модников, Скворцова, 1974; Рундквист, Неженский, 1975; Кушнарев, 1982; Казанский, 1986; Ван-Ван-Е, 2001) проведена реконструкция палеоповерхности исследуемой территории на период позднемезозойской ТМА. Полученная обобщенная поверхность также вынесена на модельные разрезы.

Далее с использованием границ морфоструктур, геологической карты (Государственная ..., 2010) и восстановленной палеоповерхности решался вопрос реконструкции глубины локализации магматических очагов, связанных с выявленными СЦТ. По результатам исследований предшественников установлена линейная корреляция между шириной структуры и глубиной ее заложения (Соловьев, 1978; Ежов, Худяков, 1984) – чем больше диаметр, тем глубже локализован предполагаемый очаг. Полевые наблюдения часто свидетельствуют о том, что угол падения кольцевых сбросов, как правило, 90°–75° (Соловьев, 1978). Однако Д.В. Гуревич справедливо отмечает возможность существования "уступов и перегибов", вследствие чего среднее значение угла падения определяет близким к 53° (Гуревич, 2009). При этом проведенные многочисленные лабораторные эксперименты по моделированию процесса формирования кальдеры, с учетом структурной эволюции верхних частей и декомпрессии магматической камеры, позволили поэтапно отследить развитие кольцевых трещин, разломов и показали, что в самых приповерхностных частях в случае полного коллапса действительно формируется система ступенчатых сбросов со средним углом падения 30°–50°, но при переходе к более глубинным уровням, приближающимся к магматическому очагу, кольцевые разломы сливаются в единую структуру с углом падения близким к 90° (Лучицкий, Бондаренко, 1974; Komuro, 1987; Marti et al., 1994; Lipman, 1997; Roche et al., 2000; Acocella et al., 2000, 2001; Roche and Druitt, 2001; Walter and Troll, 2001; Kennedy et al., 2004; Lavalle´e et al., 2004; Geyer et al., 2006; Marti et al., 2008).

Важно отметить, что высокая детальность исходных данных ДЗЗ, высокое пространственное разрешение созданной ЦМР и площадь, ограниченная листом ГГК масштаба 1 : 000000, позволили нам выделить СЦТ исключительно в рангах от мини- (километры) до мезоструктур (десятки километров) (по В.В. Соловьеву). Данные морфоструктуры характеризуются относительно небольшим глубинным положением магматических



Фиг. 10. Обобщенные схематические разрезы по линиям А–Б и В–Г (см. фиг. 8, 9) с реконструкцией положения предполагаемых магматических очагов относительно выделенных границ морфоструктур центрального типа и положения крупных рудных полей и месторождений: 1 – рельеф земной поверхности; 2 – подошва гнейсо-гранитного комплекса (слоя); 3 – реконструированная обобщенная поверхность палеорельефа на период мезозойской тектономагматической активизации; 4 – гнейсо-гранитный комплекс (слой); 5 – гнейсо-диоритовый комплекс (слой); 6 – глубинные разломы, разделяющие крупные тектонические блоки; 7 – глубинные разломы; 8 – разломы в чехле, оперяющие и кольцевые трещины; 9 – предполагаемые магматические очаги; 10 – Восточно-Забайкальский ареал-плутон; 11 – выявленные границы морфоструктур центрального типа и их диаметр в метрах; 12 – номера крупных тектонических блоков (см. фиг. 2): IV – Ононский террейн, V – Уртуйский террейн, VI – Борзинский террейн, VII – Борщовочный блок, VIII – Газимурский блок, X – Заурулюнгуйский (Урулюнгуйский) блок.

очагов, активность которых приводила к формированию локальных морфоструктур. Также при расчетах учитывался уровень эрозионного среза и геологическое строение территории (см. фиг. 2). Например, если границы СЦТ совпадают с положением преимущественно палеозой-мезозойских гранитоидов, то считается, что вулкано-плутоническая система вскрыта эрозионным срезом на уровне интрузии (магматического очага). При фиксации вулканогенно-осадочных отложений и наличии кольцевой (отрицательной) морфоструктуры она интерпретировалась как кальдера.

В этом случае на основе расчета углов падения кольцевых трещин и разломов реконструировалось положение очага. В случае наличия признаков купольно-кольцевых СЦТ или мультиринговых структур реконструировался комплекс очагов, часть из которых вскрыта эрозиннным срезом, а часть находится на глубине. Учитывая вышесказанное, реконструированы глубинное положение и латеральная протяженность предполагаемых магматических очагов.

Из представленных разрезов видно, что известные крупные рудные объекты приурочены преимущественно к периферии малых локальных СЦТ, к их кольцевым разломам и трещинам, сформированным над магматическим очагом, который находится глубже современной дневной поверхности. Балейское рудное поле, как было обозначено выше, является единственным исключением и приурочено к крупным разломам северо-восточного простирания граничной зоны Борщовочного и Газимурского блоков Аргунского террейна, но находится вблизи и в вероятной зоне влияния самой крупной из выявленных на территории СЦТ.

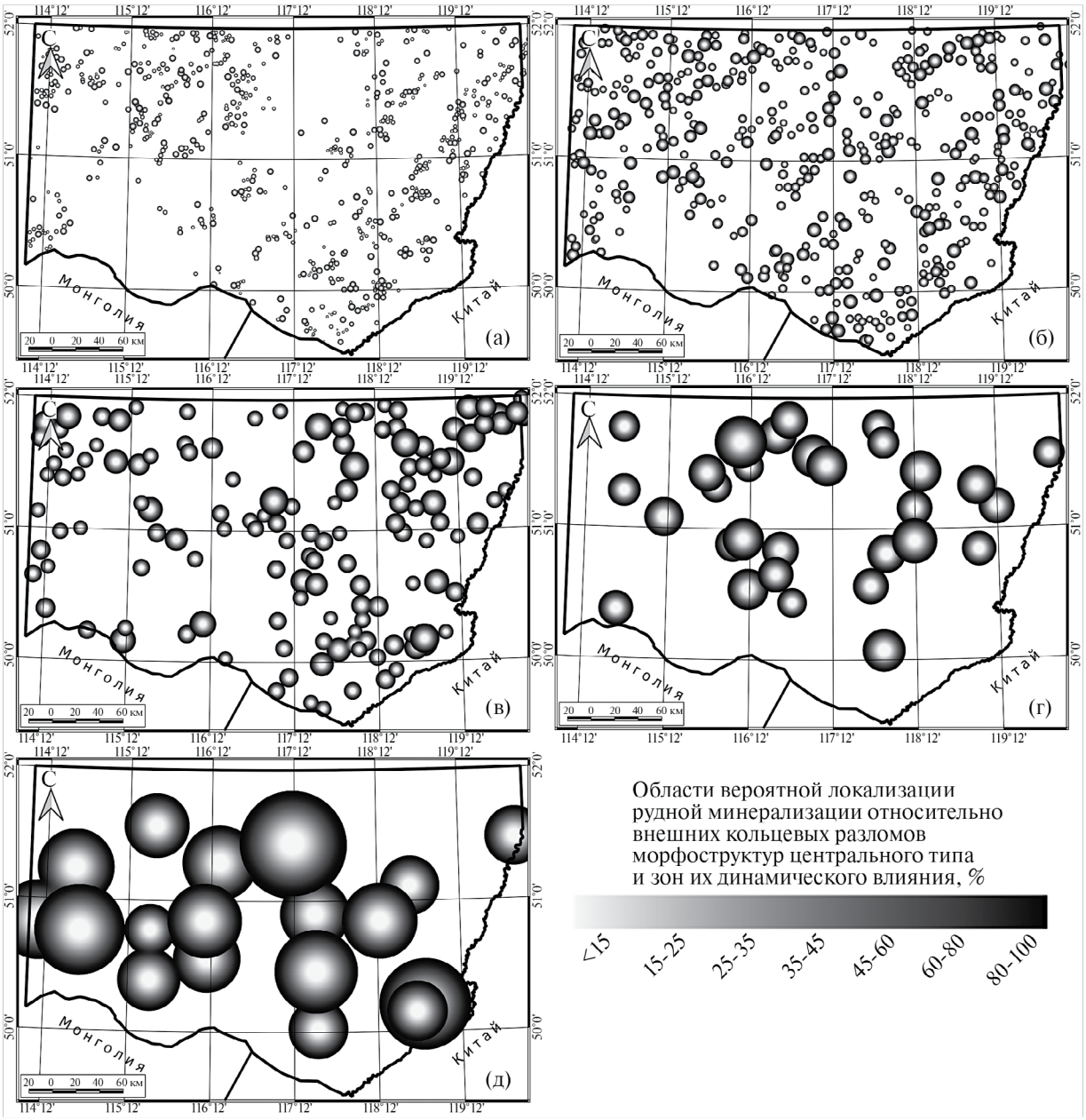
Важно отметить, что СЦТ и связанные с ними реконструированные магматические очаги во всех случаях демонстрируют тесную пространственную связь с заверенными ранее глубинными разломами, которые, вероятно, играли роль магмоподводящих каналов. Кроме того, СЦТ фиксируются нами в основном над областью влияния выделенного Восточно-Забайкальского ареал-плутона, который, подвергаясь процессам неоднократной гранитизации и переплавления (Томсон и др., 1974; Государственная ..., 2010), мог выступать в качестве глубинного “материнского” магматического очага для всех выявленных нами локальных очагов.

Наилучшей демонстрацией полученных результатов пространственного анализа и интерпретации выявленных СЦТ в контексте развития рудообразующих систем является создание весовой прогнозно-поисковой модели территории листа ГГК М-50, демонстрирующей вероятные области локализации рудной минерализации относительно выявленных морфоструктур. Для ее создания в ГИС-среде прежде всего необходимо выделить, обосновать и определенным образом визуализировать пространственные критерии, провести их нормирование, определить вес каждого критерия и установить аппроксимирующую функцию.

С помощью ГИС-технологий и пространственного анализа появляется уникальная возможность учета выявленных В.В. Соловьевым и другими исследователями наиболее благоприятных условий и областей для локализации рудного вещества относительно структурных элементов СЦТ. Одним из главнейших критериев является преимущественная приуроченность рудных объектов к внешним кольцевым разломам морфоструктур (Соловьев, 1978). Также определялась зона динамического влияния внешних кольцевых разломов, которая, наиболее вероятно, находится в линейной зависимости от параметров рассматриваемой структуры – чем больше диаметр, тем шире зона влияния. Для этого проведено ранжирование всех выделенных структур на пять классов, количество которых подбиралось эмпирически. При этом, учитывая факт, что пространственное наложение СЦТ одного класса может быть связано с различными процессами, разнесенными во времени, каждая структура рассматривается нами как отдельный объект. Таким образом, созданы схемы, отражающие вероятность локализации рудной минерализации относительно внешних кольцевых разломов СЦТ (фиг. 11).

Кроме того, очевидно, что сгущение линейных и кольцевых разломов, узлы их пересечения, неоднократная интерференция структурных форм – все это показатели сильной деформированности геологической среды, а значит, и проницаемости литосферы для потенциально металлоносных растворов. Таким образом, в ГИС-среде выделены и визуализированы в виде схем все другие пространственные критерии наиболее перспективных зон локализации рудной минерализации относительно элементов СЦТ. К ним относится относительная удельная пространственная плотность кольцевых разломов, под которой подразумевается количество структур на единицу площади. Эмпирически, учитывая высокое пространственное разрешение исходных данных ДЗЗ, на основе серии тестов установлены оптимальные расчетные параметры для создания схемы плотности кольцевых разломов – радиус поиска 3000 м и размер пикселя 100 м (фиг. 12а).

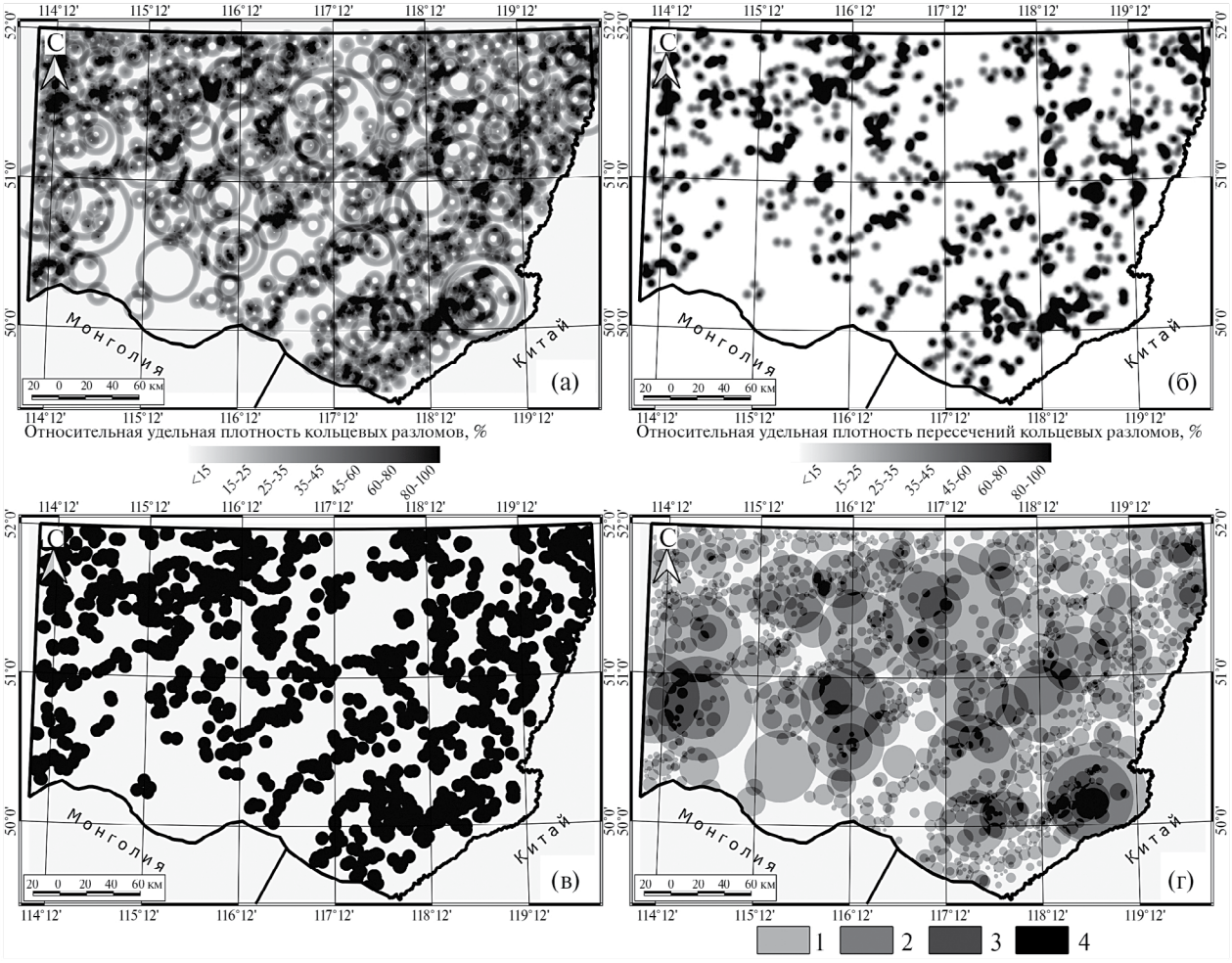
Важно отметить, что схема плотности кольцевых разломов СЦТ отражает преимущественно области, где сближение структур достигает максимума, при этом игнорируются одиночные, удаленные от других, пересечения, которые при пространственном совпадении нескольких иных критериев могут представлять перспективные



Фиг. 11. Визуализация перспективных областей локализации рудной минерализации во внешних кольцевых разломах структур центрального типа разных рангов в зависимости от диаметра, с учетом зоны динамического влияния: (а) – до 5 000 м, (б) – 5 000–10 000 м, (в) – 10 000–20 000 м, (г) – 20 000–35 000 м, (д) – более 35 000 м.

области на итоговой прогнозно-поисковой модели. В связи с этим необходимо учесть все области пересечения кольцевых разломов. Для этого созданы: схема относительных удельных плотностей пересечений кольцевых разломов, отражающая количество пересечений на единицу площади (фиг. 12б), и схема всех областей пересечения кольцевых разломов (фиг. 12в), выраженных в виде буферов с диаметром 10 км (с учетом размеров исследуемой территории и вероятных областей развития минеральных систем).

СЦТ представляют собой площадные объекты, характеризующиеся не только внешними кольцевыми разломами (границами), но площадью развития. Поэтому необходимо учесть возможную пространственную связь различных структур друг с другом или интерференцию (наложение). Для этого каждый выделенный нами

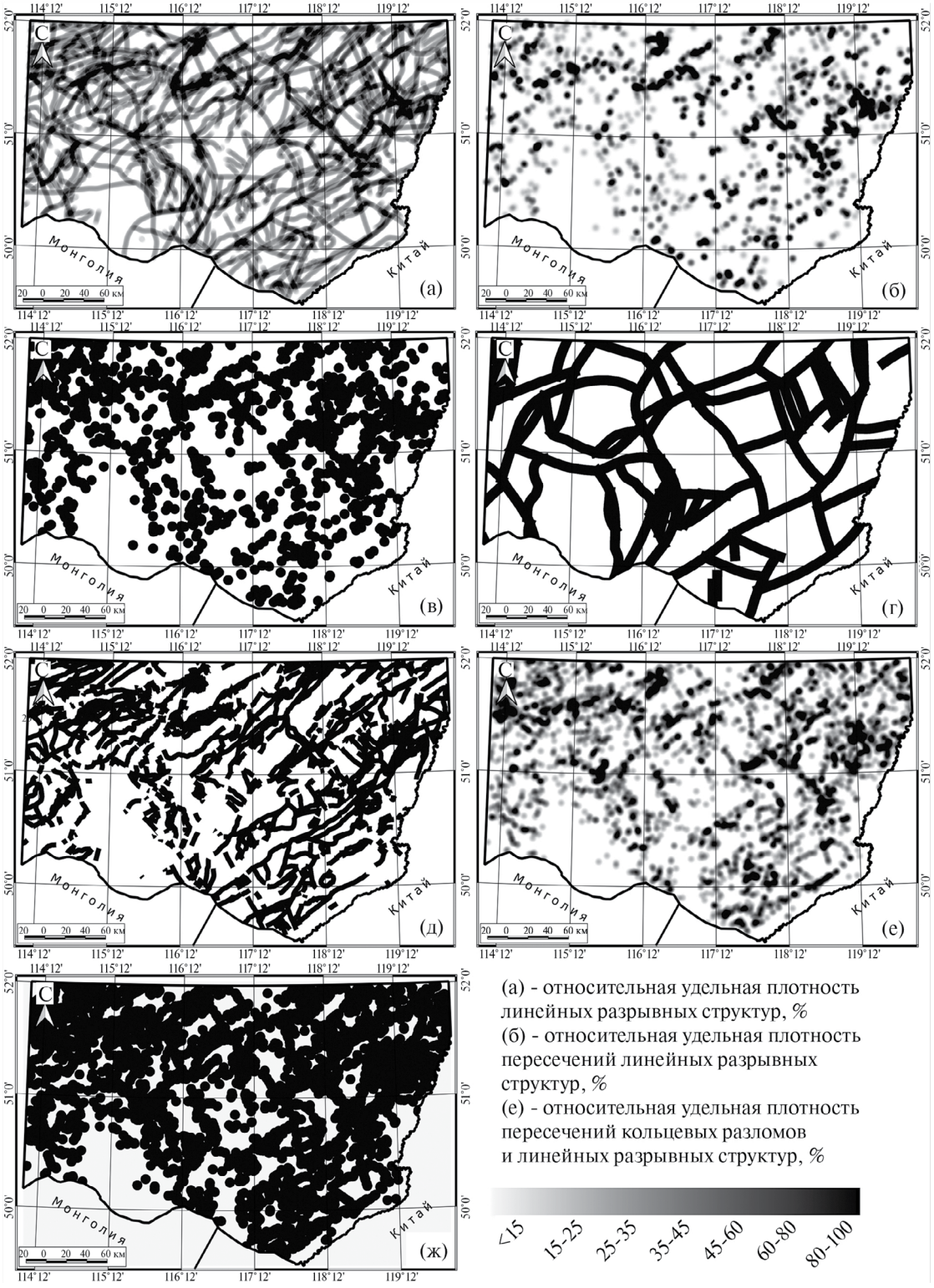


Фиг. 12. Пространственные критерии наиболее перспективных зон локализации оруденения относительно структур центрального типа: (а) – схема относительной удельной плотности кольцевых разломов; (б) – относительная удельная плотность пересечений кольцевых разломов; (в) – области пересечения кольцевых разломов (вероятные рудные узлы); (г) – области интерференции (пространственного наложения) структур центрального типа: 1 – единичные структуры, 2 – наложение двух структур, 3 – наложение трех структур, 4 – наложение четырех и более структур.

объект СЦТ рассматривался отдельно и анализировалось его положение относительно других структур. В итоге создана схема областей интерференции различных СЦТ, которые разбиты на 4 класса – развитие одной структуры, наложение двух структур, наложение трех структур, наложение четырех и более структур (фиг. 12г).

Как показано ранее на основе модельных разрезов (см. фиг. 10), развитие СЦТ происходит в непосредственной пространственной связи с крупными глубинными и оперяющими их разломами, которые, наиболее вероятно, играли роль магмоподводящих каналов, создавая связь материнских и дочерних, менее глубинных, очагов. Соответственно, при создании прогнозно-поисковой модели нами предпринята попытка учета также структурно-пространственных критериев, благоприятных для локализации рудной минерализации и связанных не только с развитием СЦТ, но и с линейными структурами. Аналогично кольцевым разломам создавались: схема относительной удельной плотности всех заверенных на площади разрывных структур (фиг. 13а), отражающая количество структур на единицу площади (радиус поиска 3000 м, размер пиксела 100 м); схема относительной удельной плотности пересечений разрывных структур (количество пересечений на единицу площади) (фиг. 13б); схема всех областей пересечения разрывных структур с радиусом буфера 10 км (фиг. 13в).

Отдельно необходимо отметить, что разрывные структуры, в отличие от СЦТ, формирование



Фиг. 13. Пространственные критерии наиболее перспективных зон локализации оруденения относительно разломов и структур центрального типа: (а) – схема относительной удельной плотности разрывных структур; (б) – относительная удельная плотность пересечений разрывных структур; (в) – области пересечения разрывных структур; (г) – области зон динамического влияния глубинных разломов; (д) – области зон динамического влияния разломов в верхнем структурном этаже;(е) – относительная удельная плотность пересечения разрывных структур и кольцевых разломов структур центрального типа; (ж) – области пересечения разрывных структур и кольцевых разломов структур центрального типа.

которых связывают преимущественно с вертикальными движениями, характеризуются сдвиговыми перемещениями блоков, окруженными зонами интенсивных деформаций, выраженных плотностью оперяющих разрыв трещин, снижающейся по экспоненциальному закону по мере удаления от магистрального разрыва (Рац, Чернышев, 1970; Wilson et al., 2003; Faulkner et al., 2006, 2011, 2018). Подобные зоны выделены и детально описаны в серии статей и в монографиях (Шерман и др., 1983; Шерман, 2014) и названы зонами "динамического влияния разломов". Данные зоны также являются наиболее перспективными на обнаружение рудной минерализации, и нами предпринята попытка их визуализации для дальнейшего учета в создаваемой прогнозно-поисковой модели. Для вычисления средней ширины зоны динамического влияния определенных линейных структур использовались подходы, предложенные Ю.Л. Ребецким с соавторами (Ребецкий и др., 2017). При этом учтен факт, что глубинные разломы характеризуются более мощной зоной динамического влияния по сравнению с разломами, развитыми в верхнем структурном этаже (фиг. 13г, д).

Помимо прочего, в качестве перспективных участков локализации рудной минерализации рассматривались области пересечения кольцевых разломов СЦТ и линейных разрывных нарушений, для которых также создавались схема относительной удельной плотности (фиг. 13е) и схема всех областей пересечения (фиг. 13ж).

Для создания весовой прогнозно-поисковой модели территории юго-восточного Забайкалья все выделенные критерии в связи с развитием СЦТ и разрывных нарушений обоснованы и представлены в виде схем (растров), отражающих градуированной цветовой маркировкой пикселей области проявления критерия от наименее до наиболее значимых. Для каждого критерия проводилось определение функции принадлежности, которая описывает степень принадлежности каждого значения переменной к данной категории. Функция принадлежности определялась в ГИС на основе нечеткой логики (линейная принадлежность) и характеризовала интервалы значений параметров каждого критерия от 0 до 1. Изначально количественные значения критериев находились в различных интервалах, отличающихся друг от друга иногда на порядки. Соответственно, функция принадлежности позволила провести "нормирование" полученных значений и осуществить их корректное сравнение друг с другом. На основе результатов исследований предшественников, экспертной оценки, сравнения с эталонными рудными объектами, литературных и статистических данных для каждого критерия определялись весовые коэффициенты. Весовые коэффициенты использовались для учета важности каждого критерия при оценке вероятности наличия рудных объектов (табл. 1).

В результате нормирования выявленных структурных критериев, с использованием определенных весовых коэффициентов, в зависимости от развития различных типов структур, созданы три весовые прогнозно-поисковые модели – в связи с развитием СЦТ (фиг. 14а), в связи с развитием разрывных нарушений (фиг. 14б) и комплексная (фиг. 14в).

Точность каждой модели определялась на основе эталонных рудных объектов – месторождений и рудопроявлений, известных в пределах площади. Расчетная точность модели локализации рудной минерализации относительно развития СЦТ составила 78%, модели в связи с развитием разрывных нарушений – 64% и комплексной модели – 89%. Необходимо отметить, что для весовых прогнозно-поисковых моделей точность более 70% считается достаточно хорошим результатом (Porwal et al., 2010; Shahi, Rouhani, 2014). Низкую точность модели в связи с развитием разрывных нарушений можно объяснить отсутствием информации об оперяющих крупные разрывы трещинах, которые часто являются рудовмещающими, а также низкой степенью достоверности картирования и отображения структур на мелкомасштабной карте, которая была использована в качестве основы. Исследования разрывных структур для более комплексного анализа нуждаются в тектонофизической и геодинамической интерпретации. Для получения данной информации необходимо провести дополнительный комплекс структурно-геоморфологических исследований, включая формализованный линеаментный анализ, структурно-геоморфологический метод Л.А. Сим, тектонодинамический анализ и анализ напряженно-деформированного состояния пород.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

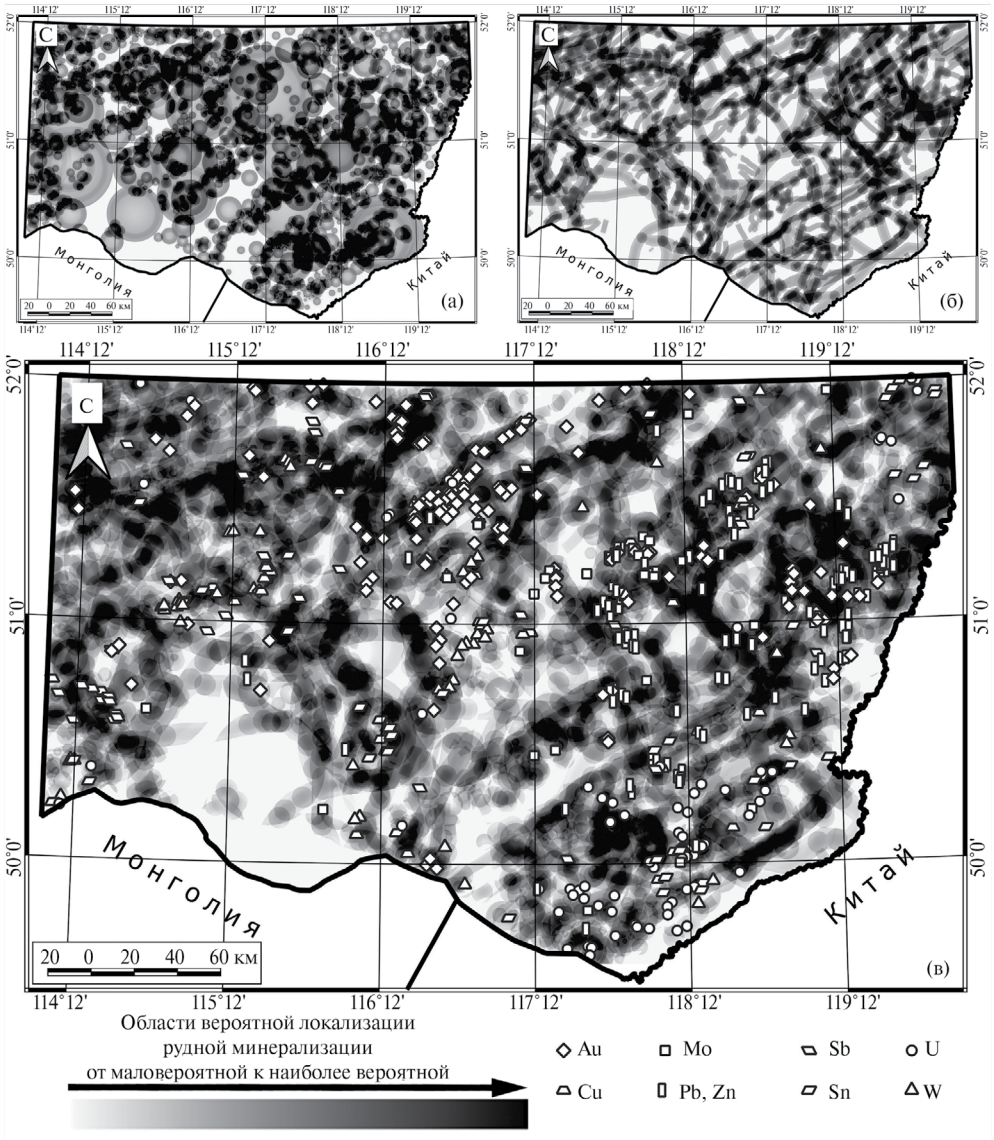
В данном исследовании представлен оригинальный авторский подход к дешифрированию и интерпретации СЦТ на основе применения современных ГИС-технологий и анализа данных ДЗЗ в контексте выявления рудообразующих систем. Проведенная работа является частью проекта по созданию, на основе современных методов

Таблица 1. Весовые прогнозно-поисковые критерии для территории юго-восточного Забайкалья в связи с развитием СЦТ и разрывных структур

№	Обозначение	Критерий	Пояснение	Коэффициент веса
В связи с развитием СЦТ – X				
1	X_1	Максимумы вероятности локализации рудной минерализации относительно внешних кольцевых разломов СЦТ, с учетом зоны их динамического влияния (см. фиг. 11)	Отражают области наиболее вероятной локализации рудной минерализации от центра к периферии СЦТ с учетом зоны динамического влияния внешних кольцевых разломов, которая находится в линейной зависимости от параметров рассматриваемой структуры	1
2	X_2	Максимумы относительной удельной плотности кольцевых разломов СЦТ (см. фиг. 12а)	Отражают области с наибольшим сгущением (сближением) кольцевых разломов и маркируют наиболее деформированные и проницаемые зоны	0.8
3	X_3	Максимумы относительной удельной плотности пересечений кольцевых разломов друг с другом (см. фиг. 12б)	Отражают количество пересечений кольцевых разломов на единицу площади и маркируют наиболее сближенные структурные узлы	0.4
4	X_4	Области пересечения кольцевых разломов друг с другом (см. фиг. 12в)	Отражают все области пересечения кольцевых разломов и маркируют все структурные узлы	0.4
5	X_5	Области интерференции (пространственного наложения) СЦТ различных рангов (см. фиг. 12г)	Отражают количество наложений СЦТ и маркируют участки сильной раздробленности и проницаемости литосферы для потенциально рудоносных растворов. Кроме того, указывают на связь материнских (глубинных) и дочерних, менее глубинных, очагов	0.8
В связи с развитием разрывных нарушений – Y				
6	Y_1	Максимумы относительной удельной плотности разрывных нарушений (см. фиг. 13а)	Отражают области скопления разрывных структур, их сближений, сочленений и маркируют структурно деформированные зоны, представляющие собой участки пересечения (сочленения) нескольких различно ориентированных тектонических нарушений	0.8
7	Y_2	Максимумы относительной удельной плотности пересечений разрывных нарушений друг с другом (см. фиг. 13б)	Отражают наибольшее количество пересечений разломов на единицу площади и маркируют наиболее деформированные зоны и сближенные структурные узлы	0.4
8	Y_3	Области пересечения разрывных нарушений друг с другом (см. фиг. 13в)	Отражают все области пересечения разрывных нарушений и маркируют структурные узлы	0.4
9	Y_4	Зона динамического влияния глубинных разрывных нарушений (см. фиг. 13г)	Отражают зоны интенсивных деформаций вокруг разрывной структуры, выраженные плотностью оперяющих разрыв трещин, снижающейся по экспоненциальному закону по мере удаления от магистрального разрыва. Зона динамического влияния является наиболее перспективной областью для локализации рудной минерализации	0.8
10	Y_5	Зона динамического влияния разрывных нарушений в верхнем структурном этаже (см. фиг. 13д)	Отражают зоны интенсивных деформаций вокруг разрывной структуры, выраженные плотностью оперяющих разрыв трещин, снижающейся по экспоненциальному закону по мере удаления от магистрального разрыва. Зона динамического влияния является наиболее перспективной областью для локализации рудной минерализации. Отличается от Y_4 меньшей шириной	0.6

Таблица 1. Окончание

№	Обозначение	Критерий	Пояснение	Коэффициент веса
В связи с развитием СЦТ и разрывных нарушений – XY				
11	XY_1	Максимумы относительной удельной плотности пересечений кольцевых разломов и разрывных нарушений (см. фиг. 13е)	Отражают количество пересечений кольцевых разломов и разрывных нарушений на единицу площади и маркируют наиболее сближенные структурные узлы	0.5
12	XY_2	Области пересечения кольцевых разломов и разрывных нарушений (см. фиг. 13ж)	Отражают все области пересечений кольцевых разломов и разрывных нарушений, маркирующие структурные узлы	0.5



Фиг. 14. Региональные весовые структурные прогнозно-поисковые модели территории юго-восточного Забайкалья: (а) – модель с учетом структурных критериев в связи с развитием структур центрального типа; (б) – модель с учетом структурных критериев в связи с развитием разрывных структур; (в) – комплексная модель с учетом структурных критериев в связи с развитием структур центрального типа и разрывных структур с указанием положения и металлогенической специализации известных рудных объектов.

дистанционного анализа и нейросетевых технологий, комплексной прогнозно-поисковой модели для территории юго-восточного Забайкалья с целью формирования научно-обоснованных рекомендаций к постановке поисково-оценочных работ, расширению минерально-сырьевой базы Российской Федерации в целом и Забайкальского края в частности. Полученные результаты демонстрируют широкие возможности структурно-пространственного анализа, особенно в связи с дешифрированием СЦТ, с точки зрения решения фундаментальных и практических задач в области выявления источников, путей миграции и областей локализации рудного вещества, а также прогноза полезных ископаемых различных геолого-промышленных (геолого-генетических) типов.

Часто при проведении структурно-геоморфологического анализа, дешифрирования космоснимков и цифровых моделей рельефа не уделяется должного внимания СЦТ – если их выделяют, то практически отсутствует какая-либо пространственная интерпретация в контексте геологического строения и истории развития региона, связи данных структур с полезными ископаемыми. При этом, как показано в данной статье, СЦТ в областях с активным палеовулканизмом играют важную роль в локализации оруденения и должны быть учтены при металлогеническом анализе территории. По мнению Д.В. Гуревича, одним из факторов, “отпугивающих” исследователей от выделения СЦТ, является “боязнь простых форм” (Гуревич, 2009). Действительно, опыт авторов по дешифрированию СЦТ говорит о том, что большинство из них стремятся к форме круга, что, безусловно, требует объяснения, которое может быть дано только в связи с геологическим строением территории. Повторимся, что СЦТ в форме круга или сегментов окружности выделяются исключительно по материалам ДЗЗ и в чем-то упрощаются для проведения предварительных региональных исследований. Более детальные полевые и геофизические изыскания позволяют выявить локальные неоднородности границ и точно определить тип рассматриваемой структуры.

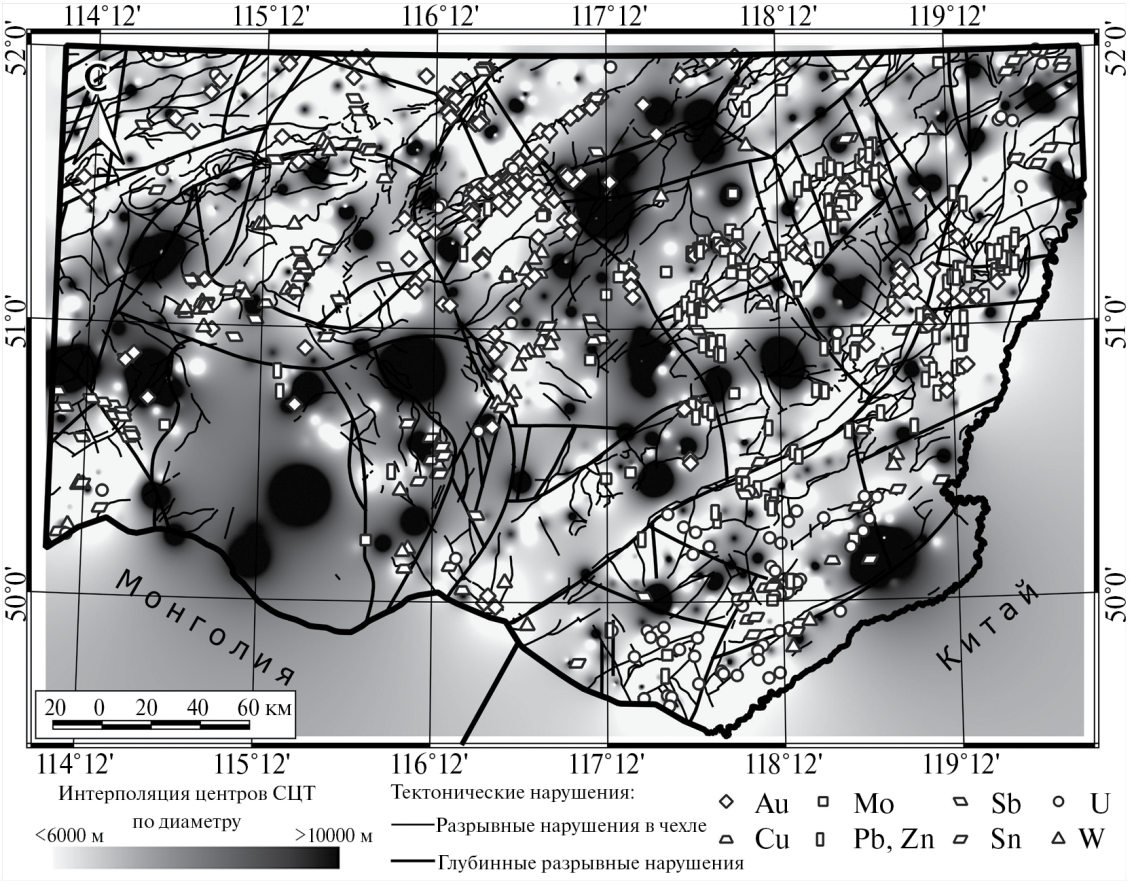
Во многих дистанционных структурных исследованиях до сих пор считается, что СЦТ достаточно редкие структуры. Безусловно, формирование подобных структур напрямую зависит от общей истории геологического развития – наибольшие шансы обнаружения структур в связи с развитием вулкано-плутонических комплексов приходятся на территории с палеовулканизмом и прошедшими процессами тектономагматической активизации. Причем, чем моложе сам процесс, тем больше вероятность обнаружить большее количество перспективных в связи с локализацией полезных ископаемых СЦТ, в меньшей степени затронутых эрозионным срезом. Данный факт обязательно должен быть учтен при постановке цели и задач дистанционного структурного исследования. Кроме того, результат дешифрирования СЦТ во многом зависит от пространственного разрешения используемых материалов. Как было показано в данной статье, большее пространственное разрешение позволяет выделять более локальные, небольшие в поперечнике, структуры. Также часто исследователям достаточно сложно провести интерпретацию данных структур. В этом плане современные средства и инструменты ГИС, а также детальные данные ДЗЗ, позволяют эту задачу решить с использованием многочисленных подходов с привлечением математического аппарата и методов пространственного анализа.

Для территории юго-восточного Забайкалья, учитывая процессы позднемезозойской тектономагматической активизации, с которой связаны почти все металлические полезные ископаемые региона, выделение и интерпретация СЦТ является крайне актуальной задачей. Ранее для данной площади уже проводились попытки выделения СЦТ (Томсон и др., 1974; Афанасов и др., 2007; Головин и др., 2008), но все они сводились к картированию крупной структуры – Восточно-Забайкальского мегасвода, формирование которого связывают с активностью установленного по глубинным геофизическим данным крупного (более 30 000 км^2) Восточно-Забайкальского ареал-плутона (Духовский и др., 1998), а также небольшой серии более локальных СЦТ второго порядка, преимущественно в зоне обрамления мегасвода (Головин и др., 2008). При этом процессы позднемезозойской ТМА охватили всю исследуемую территорию, и отложение рудной минерализации определенных рядов, как показано Б.Л. Рыбаловым, происходило постепенно, в разные временные этапы, с активизацией различных площадей и типов структур, формированием СЦТ, в том числе и вне зоны развития и влияния Восточно-Забайкальского ареал-плутона (Рыбалов, 2000; Рыбалов, 2002; Петров и др., 2017; Андреева и др., 2020). В этом контексте крайне интересными, но дискуссионными, кажутся наши результаты интерполяции центров выделенных СЦТ по диаметру, которые показывают устойчивую пространственную

закономерность, схожую с общим структурным планом всего Забайкальского региона (фиг. 15).

Области развития как малых (до 10 км в диаметре), так и крупных СЦТ (более 10 км в диаметре) формируют чередующиеся пояса (тренды), ориентированные преимущественно на северо-восток. Также среди областей развития СЦТ возможно выделить гораздо менее протяженные линейные зоны северо-западной ориентировки. При этом на всем протяжении зоны развития крупных СЦТ неоднородны, и наблюдается шаг интенсивности формирования структур. Если сравнивать пространственное положение СЦТ относительно развития установленных разрывных нарушений, то видно, что крупные структуры в большинстве случаев откартированы нами вне глубинных нарушений, но в пространственной близости к ним. Малые структуры, напротив, формируются практически на глубинных разломах или разломах верхнего структурного этажа. Это может быть объяснено тем, что крупные СЦТ маркируют глубинные магматические очаги, и связь с конкретной разрывной структурой, выполнявшей роль магмоподводящего канала, устанавливается также на некоторой глубине, в зависимости от элементов залегания разрывного нарушения. Малые структуры маркируют менее глубинные очаги, центры которых находятся вблизи поверхности или вскрыты эрозионным срезом в виде локальных интрузий. Кроме того, установлено, что 97% рудных объектов территории приурочено к областям развития малых СЦТ. Данный вывод может быть использован как дополнительный пространственный критерий при доработке созданной прогнозно-поисковой модели.

Полученные количественные прогнозно-поисковые модели являются важной основой для дальнейших структурно-геоморфологических и структурно-геологических изысканий. Проведенные исследования реализованы на региональном масштабном уровне, но на основе детальных данных ДЗЗ (15 м/пкс). К сожалению, учитывая детальность используемых материалов, не представляется возможным на данном этапе интегрировать в создаваемые модели результаты



Фиг. 15. Схема интерполяции центров структур центрального типа территории юго-восточного Забайкалья по значениям диаметра с указанием положения и металлогенической специализации известных рудных объектов.

геофизических и геохимических исследований, соответствующих масштабу карты (1 : 1000000), охватывающей рассматриваемую территорию. При этом более детальные геофизические и геохимические исследования, соответствующие детальности наших моделей, в пределах площади проводились при изучении отдельных перспективных участков и структурно-формационных зон. Для этих участков возможно создание более детальных моделей за счет интегрирования в нашу модель специализированной информации о геофизических и геохимических полях в зависимости от искомого типа рудной минерализации.

При создании представленных моделей акцент делался преимущественно на пространственно-геологическом анализе СЦТ и крупных разрывных нарушений, а также установлении их связи с размещением полезных ископаемых в контексте решения задачи выделения рудообразующих систем. Задачи выявления, заверки и пространственно-структурного анализа разрывных нарушений, определения их кинематики, выделения наиболее деформированных и проницаемых сегментов, тектонофизической, геодинамической и структурной интерпретации, выявления и анализа оперяющих трещин, оценки роли разрывных структур различных рангов в локализации оруденения, в данной работе не ставились. Они планируются к решению в дальнейшем для интеграции в создаваемую модель и повышения ее точности.

ВЫВОДЫ

Проведенная работа и полученные результаты позволили сделать следующие основные выводы.

1. На основе применения ГИС-технологий и анализа данных ДЗЗ с созданием детальной ЦМР территории юго-восточного Забайкалья разработан авторский подход к дешифрированию и геолого-металлогенической интерпретации СЦТ в контексте выявления и прогноза рудообразующих систем.

2. В пределах территории юго-восточного Забайкалья, учитывая высокое пространственное разрешение ЦМР, удалось выявить 1285 СЦТ от 1.1 до 73.4 км в диаметре. При этом структуры диаметром менее 10 км и площадью менее 80 км^2 составляют 85% от общего количества выявленных структур. Установлено плавное увеличение числа структур с уменьшением их диаметра.

3. Установлено, что пространственные максимумы относительной удельной плотности оруденения (экстенсивность оруденения) в пределах территории сконцентрированы на периферии крупных СЦТ, а также вне их границ, но в непосредственной близости, особенно относительно областей интерференции, пространственного сближения и примыкания структур. Большинство известных крупных рудных объектов приурочено к внутренним и близпериферическим областям структур менее 10 км в поперечнике.

4. Самая крупная выявленная структура на исследуемой площади с диаметром 73.4 км и расположенная в северной части площади маркирует очаг, вероятно, парагенетически связанный с отложением золотой, свинцово-цинковой, медной, сурьмяной, оловянной и молибденовой минерализации. В зависимости от развития дочерних СЦТ или наложения более поздних структур ниже рангом, являющихся отражением менее глубинных очагов, появляется возможность более точной локализации рудообразующих систем, связанных с определенным типом минерализации.

5. На основе создания модельных разрезов, включая построение современной дневной поверхности и реконструкцию палеоповерхности относительно величины уровня эрозионного среза, построение подошвы гнейсо-гранитового слоя, реконструкцию глубинного положения Восточно-Забайкальского ареал-плутона, границ СЦТ, отражение разрывных нарушений разных рангов, вынос положения крупнейших рудных объектов территории, с использованием геологической информации восстановлены глубины локализации предполагаемых магматических очагов в связи с выделенными структурами. Установлено, что СЦТ и связанные с ними реконструированные магматические очаги демонстрируют тесную пространственную связь с глубинными разломами, которые, вероятно, играли роль магмоподводящих каналов.

6. На основе выявленных, обоснованных и визуализированных в виде отдельных схем структурно-пространственных критериев в связи с развитием СЦТ и разрывных нарушений, с помощью нормирования и определения коэффициентов веса для каждого критерия для исследуемой территории юго-восточного Забайкалья созданы количественные прогнозно-поисковые модели, точность которых заверялась по положению эталонных месторождений и рудопроявлений, известных в пределах площади. Точность комплексной прогнозно-поисковой модели составила 89%. Данная модель может быть дополнена за счет применения методов структурно-геоморфологического, пространственно-геометрического и тектонофизического анализов

разрывных нарушений, а также использована при создании локальных прогнозно-поисковых моделей перспективных металлогенических таксонов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность профессору Томского политехнического университета, директору научно-инновационного центра космогеологических исследований “Космогеология” ТПУ д.г.-м.н. А.А. Поцелуеву за обстоятельное рецензирование, детальную вычитку текста, крайне ценные замечания и важные редакторские правки, которые учтены при подготовке статьи к печати. Также авторы благодарны анонимному рецензенту за критические замечания по представлению материала. Кроме того, авторы признательны главному научному сотруднику лаборатории геологии рудных месторождений имени академика А.Г. Бетехтина ИГЕМ РАН д.г.-м.н. И.В. Викентьеву за важные редакторские замечания и предложения по представлению материалов статьи и научному сотруднику лаборатории минералогии имени академика Ф.В. Чухрова ИГЕМ РАН к.г.-м.н. Е.Е. Амплиевой за ценные советы при создании и подготовке графических материалов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев Д.Н. Стратиформное свинцово-цинковое оруденение Забайкалья и Прибайкалья // Литология и полезные ископаемые. 1975. № 5. С. 93–102.

Андреева О.В., Петров В.А., Полуэктов В.В. Мезозойские кислые магматиты Юго-Восточного Забайкалья: петрогеохимия, связь с метасоматизмом и рудообразованием // Геология руд. месторождений. 2020. Т. 62. № 1. С. 76–104.

Афанасов М.Н., Павлова В.В., Терновой В.В. Геолого-металлогеническое развитие юго-восточного Забайкалья // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2007. Сер. 7. Вып. 3. С. 3–19.

Брюханов В.Н., Буш В.А., Глуховский М.З., Зверев А.Т., Кац Я.Г. Кольцевые структуры континентов Земли. М.: Недра, 1987. 184 с.

Ван-Ван-Е А.П. Эродированность эндогенных месторождений в зонах тектономагматической активизации Дальнего Востока // Тихоокеанская геология. 2001. Т. 20. № 3. С. 97–104.

Геологическая карта Приамурья и сопредельных территорий. Масштаб 1 : 2 500 000. Объяснительная записка / Ред. Л.И. Красный, А.С. Вольский, Пэн Юньбяо и др. СПб – Благовещенск – Харбин, 1999. 135 с.

Гитис В.Г., Ермаков Б.В. Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 256 с.

Гитис В.Г., Щукин Ю.К., Старостин В.И. ГИС-технология прогноза рудных месторождений // Информационные процессы. 2013. Т. 13. № 2. С. 48–63.

Головин А.А., Гусев Г.С., Клипко В.А., Криночкин Л.А. Критерии локализации перспективных площадей при мелко-среднемасштабных геохимических работах // Разведка и охрана недр. 2008. № 4–5. С. 50–58.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Лист M50 – Борзя. Объяснительная записка. / Отв. исп. Е.А. Шивохин, А.Ф. Озерский. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. 553 с.

Гришков Г.А., Нафигин И.О., Устинов С.А., Петров В.А., Минаев В.А. Разработка методики автоматического выделения линеаментов на основе нейросетевого подхода // Исследование Земли из Космоса. 2023. № 6. С. 86–97.

Гуревич Д.В. Кольцевые структуры: важнейшие механизмы образования // Региональная геология и металлогения. 2009. № 39. С. 14–23.

Гуревич Д.В. Семейства купольно-кольцевых структур как результат деятельности мантийных и литосферных плюмов // Региональная геология и металлогения. 2010. № 43. С. 65–74.

Гусев Г.С., Хаин В.Е. О соотношениях Байкало-Витимского, Алдано-Станового и Монголо-Охотского террейнов (юг Средней Сибири) // Геотектоника. 1995. № 5. С. 68–82.

Духовский А.А., Амантов В.А., Артамонова Н.А., Панфильцев Д.Н., Ступак В.М. Сейсмические и гравитационные образы ведущих рудных районов и полей Юго-Восточного Приаргунья (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология руд. месторождений. 1998. Т. 40. № 2. С. 99–113.

Духовский А.А., Артамонова Н.А., Булычев А.В., Соколова Т.Б. Изучение объемного строения эндогенных рудных районов при геологосъемочных работах: Методическое пособие по объемному геологическому картированию. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 327 с.

Ежов Б.В., Худяков Б.И. Морфотектоника геодинамических систем центрального типа. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. 129 с.

Ищукова Л.П., Игошин Ю.А, Авдеев Б.В. и др. Геология Урулюнгуевского рудного района и молибден-урановых

месторождений Стрельцовского рудного поля. М.: ЗАО “Геоинформмарк”, 1998. 529 с.

Ищукова Л.П., Модников И.С., Сычев И.В., Наумов Г.Б., Мельников И.В., Кандинов М.Н. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. Иркутск: Типография Глазовская, 2007. 260 с.

Казанский В.И. Глубинные корни рудных месторождений // Природа. 1986. № 11. С. 30–40.

Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф. Основы линеаментной тектоники. М.: Недра, 1986. 144 с.

Козлов В.Д., Ефремов С.В., Дриль С.И., Сандимирова Г.П. Геохимия, изотопная геохронология и генетические черты Верхнеундинского гранитного батолита (Восточное Забайкалье) // Геохимия. 2003. № 24. С. 408–424.

Корчуганова Н.И., Корсаков А.К. Дистанционные методы геологического картирования: учебник. М.: КДУ, 2009. 288 с.

Космическая информация в геологии. Под ред. А.В. Пейве, А.В. Сидоренко, А.Л. Яншина и др. М.: Наука, 1983. 536 с.

Красный Л.И. Тектонотип межблоковой (коллизионно-аккреционной) структуры: системы Монголо-Охотская и Циньлинская // Тихоокеанская геология. 1997. Т. 16. № 5. С. 3–9.

Кушнарев И.П. Глубины образования эндогенных рудных месторождений. М.: Недра, 1982. 210 с.

Лучицкий И.В., Бондаренко П.М. Механизм образования концентрических структур над магматическим очагом // Геология и геофизика. 1974. Т. 15. № 10. С. 3–19.

Методическое пособие по изучению глубинного геологического строения складчатых областей для Государственной геологической карты России масштаба 1 : 1000000 / А.М. Духовский, Н.А. Артамонова, А.И. Атаков и др. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2005. 134 с.

Мещерякова О.А., Полетаев А.И. Геология и геофизика кольцевых структур // Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. Том 2. Материалы L Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2018. С. 11–14.

Модников И.С., Скворцова К.В. О вертикальной зональности молибден-урановых месторождений // Геология руд. месторождений. 1974. № 2. С. 18–27.

Невский В.Д., Фролов Д.Д. Структуры рудных месторождений кольцевого типа. М.: Недра, 1985. 247 с.

Парфенов Л.М., Попеко Л.И., Томуртогоо О. Проблемы тектоники Монголо-Охотского орогенного пояса // Тихоокеанская геология. 1999. Т. 18. № 5. С. 24–43.

Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В., Коваленко Д.В. Тектономагматические циклы и геодинамические обстановки формирования рудоносных систем Южного Приаргунья // Геология руд. месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 445–469.

Полетаев А.И. Космические снимки: к опыту чтения текстов планеты Земля // Электронное научное издание. Альманах Пространство и Время. 2015. Т. 10. Вып. 1.

Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра. 1970. 160 с.

Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. М.: Изд. ГЕОС, 2017. 234 с.

Рундквист Д.В., Неженский И.А. Зональность эндогенных месторождений. М.: Недра, 1975. 205 с.

Рыбалов Б.Л. Пространственное размещение позднемезозойских рудных месторождений в Восточном Забайкалье (Россия) // Геология руд. месторождений. 2002. Т. 44. № 4. С. 354–368.

Рыбалов Б.Л. Эволюционные ряды позднемезозойский рудных месторождений Восточного Забайкалья (Россия) // Геология руд. месторождений. 2000. Т. 42. № 4. С. 377–388.

Рыжкова В.М., Соловьёв В.В. Карта морфоструктур центрального типа территории СССР. М–б 1 : 10000000. Мингео СССР, ВСЕГЕИ, 1975.

Сафонов Ю.Г., Горбунов Г.И., Пэк А.А., Волков А.В., Злобина Т.М., Кравченко Г.Г., Малиновский Е.П. Состояние и перспективы развития учения о структурах рудных полей и месторождений // Геология руд. месторождений. 2007. Т. 49. № 5. С. 386–420.

Симонов Ю.И., Любалин В.Д. Некоторые особенности тектоники Балейского золотоносного района (Восточное Забайкалье) // Геология и геофизика. 1979. Вып. 1. Т. 20. С. 20–27.

Смирнов С.С. Очерк металлогении Восточного Забайкалья. М.: Госгеолиздат, 1944. 89 с.

Соловьев В.В. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-морфологического анализа. Объяснительная записка к Карте морфоструктур центрального типа территории СССР масштаба 1 : 10000000. Ленинград: М-во геологии СССР. Всесоюз. ордена Ленина науч.-исслед. геол. ин-т., 1978. 111 с.

Таусон Л.В., Антипин Н.С., Захаров М.И., Зубков В.С. Геохимия мезозойских латитов Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1984. 189 с.

Томсон И.Н., Полякова О.П., Кочнева Н.Т. Мегасвод Восточного Забайкалья и связь с ним нижнемелового эпитермального оруденения // В кн.: Проблемы эндогенного рудообразования. М.: Наука, 1974. С. 92–101.

Томсон И.Н., Кочнева Н.Т., Кравцов В.С. Системы концентрических структур, их типы и рудоносность // Геология руд. месторождений. 1982. № 4. С. 21–33.

Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука. СО АН СССР, 1983. 110 с.

Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск: Гео, 2014. 359 с.

Щеглов А.Д., Билибина Т. В., Терентьев В.М. Современные проблемы докембрия // Региональная геология и металлогения. 1994. № 23. С. 85–94.

Acocella V., Cifelli F., Funiciello R. Analogue models of collapse calderas and resurgent domes // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2000. V. 104. P. 81–96.

Acocella V., Cifelli F., Funiciello R. Formation of nonintersecting nested calderas: insights from analogue models // Terra Nova. 2001. V. 13. P. 58–63.

Carranza E. Weights of Evidence Modeling of Mineral Potential: A Case Study Using Small Number of Prospects, Abra, Philippines // Natural Resources Research. 2004. № 13. P. 173–187.

Cole J.W., Milner D.M., Spinks K.D. Calderas and caldera structures: a review // Earth-Science Reviews. 2005. V. 69. P. 1–26.

Faulkner D.R., Mitchell T.M., Healy D., Heap M.J. Slip on weak faults by the rotation of regional stress in the fracture damage zone // Nature. 2006. V. 444. № 7121. P. 922–925.

Faulkner D.R., Mitchell T.M., Jensen E., Cembrano J. Scaling of fault damage zones with displacement and the implications for fault growth processes // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2011. V. 116. № 5. P. 1–11.

Faulkner D.R., Sanchez-Roa C., Boulton C., den Hartog, S.A.M. Pore fluid pressure development in compacting fault gouge in theory, experiments, and nature // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2018. V. 123. № 1. P. 226–241.

Franca-Rocha W., Bonham-Carter G., Misi A. GIS modeling for mineral potential mapping of carbonate-hosted Pb-Zn deposits // Brazilian Journal of Geology. 2003. № 33. P. 191–196.

Geyer A., Folch A., Martı´ J. Relationship between caldera collapse and magma chamber withdrawal: an experimental approach // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2006. V. 157. P. 375–386.

Gudmundsson A., Nilsen K. Ring-faults in composite volcanoes: structures, models and stress fields associated with their formation // Geological Society. London. Special Publications. 2006. V. 269. P. 83–108.

Hagemann S.G., Lisitsin V., Huston D.L. Mineral system analysis: quo vadis // Ore Geol. Rev. 2016. V. 76. P. 504–522.

Huston D.L., Mernagh T.R., Hagemann S.G., Doublier M.P., Fiorentini M., Champion D.C., Jaques A.L., Czarnota K., Cayley R., Skirrow R., Bastrakov E. Tectono-metallogenic systems – The place of mineral systems within tectonic evolution, with an emphasis on Australian examples // Ore Geol. Rev. 2016. V. 76. P. 168–210.

Johnson S.E., Schmidt K.L., Tate M.C. Ring complexes in the Peninsular Ranges Batholith, Baja California, MÈxico and southern California, USA: middle- to upper-crustal magma plumbing systems // Lithos. 2002. № 61. P. 187–208.

Kennedy B., Stix J., Vallance J.W., Lavallee´Y., Longpre´ M.-A. Controls on caldera structure: results from analogue sandbox modeling // GSA Bull. 2004. V. 116. P. 515–524.

Komuro H. Experiments on cauldron formation: a polygonal cauldron and ring fractures // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1987. V. 31(1–2). P. 139–149.

Lavalle´e Y., Stix J., Kennedy B., Richer M., Longpre´M.-A. Caldera subsidence in areas of variable topographic relief: results from analogue modeling // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2004. V. 129. P. 219–236.

Liping Y., Xingmin M., Xiaoqiang Z. SRTM DEM and its application advances // International Journal of Remote Sensing. 2011.Vol. 32. №14. P. 3875–3896.

Marti J., Ablay G.J., Redshaw L.T., Sparks R.S.J. Experimental studies of collapse calderas // J. Geol. Soc. Lond. 1994. V. 151. P. 919–929.

Lipman P.W. Subsidence of ash flow calderas: Relation to caldera size and magma-chamber geometry // Bull. Volcanol. 1997. V. 59. P. 198–218.

Marti J., Geyer A., Folch A., Gottsmann J.A. Review on Collapse Caldera Modelling. In: Marti J., Gottsmann J. (eds.). Developments in Volcanology, 2008. V. 10. P. 233–283.

Pirajno F. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. 2009. 1250 p.

Pirajno F. A classification of mineral systems, overviews of plate tectonic margins and examples of ore deposits associated with convergent margins // Gondwana Research. 2016. V. 33. P. 44–62.

Porwal A., González-Álvarez I., Markwitz V., McCuaig T.C., Mamuse A. Weights-of-evidence and logistic regression modeling of magmatic nickel sulfide prospectivity in the Yilgarn Craton, Western Australia // Ore Geol. Rev. 2010. V. 38. Iss. 3. P. 184–196.

Robb L.J., Meyer F.M. The Witwatersrand Basin, South Africa: Geological framework and mineralization processes // Ore Geol. Rev. 1995. V. 10. № 2. P. 67–94.

Roche O., Druitt T.H., Merle O. Experimental study of caldera formation // J. Geophys. Res. B, Solid Earth Planets. 2000. V. 105. №1. P. 395–416.

Roche O., Druitt T.H. Onset of caldera collapse during ignimbrite eruptions // Earth Planet. Sci. Lett. 2001. V. 191. P. 191–202.

Saul. J. Circular structures of large scale and great age on the Earth's surface // Nature. 1978. № 271. P 345–349.

Shahi H., Rouhani A. K. A. GIS-based weights-of-evidence model for mineral potential mapping of hydrothermal gold deposits in Torbat-e-Heydarieh area // J. of Mining and Environment. 2014. № 5. P. 79–89.

Walter T.R., Troll V.R. Formation of caldera periphery faults: an experimental study // Bull. Volcanol. 2001. V. 63. №2. P. 191–203.

Wilson J.E., Chester J.S., Chester F.M. Microfracture analysis of fault growth and wear processes, Punchbowl Fault, San Andreas System, California // J. Struct. Geol. 2003. №. 25. P. 1855–1873.

Wyborn L.A.I., Heinrich C.A., Jaques A.L. Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria // AusIMM Publication Series 4/94. 1994. P. 109–115.

DETECTION AND INTERPRETATION OF CENTRAL TYPE STRUCTURES WITHIN THE TERRITORY OF SOUTHEASTERN TRANSBAIKALIA FOR PREDICTION OF ORE-FORMING SYSTEMS

S. A. Ustinov[1, *], V. A. Petrov[1, **], V. A. Minaev[1, *], I. O. Nafigin[1, ****],**

E. V. Yarovaya[1, ***]**

[1] Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Staromonetny per., 35, Moscow, 119017 Russia

**e-mail: ustinov@igem.ru*

***e-mail: vlad243@igem.ru*

****e-mail: minaev2403@mail.ru*

*****e-mail: nafigin@igem.ru*

******e-mail: e.v.yarovaya@yandex.ru*

Extremely little attention is paid to the issues of detecting and interpreting of central type structures (CTS) when conducting remote structural-geological and structural-geomorphological studies. At the same time, in the 70–80s of the 20th century, the important role of CTSs in the localization of deposits and ore fields was proven. The position of these structures must necessarily be taken into account when solving problems of searching for and predicting mineral resources in the context of metallogenic analysis and reconstruction of the geological history of development of the studied areas. The almost absence of results of mass detecting and interpreting of CTSs can be explained by the still poorly developed methodology for identifying and analyzing this type of structure. In the present study for the territory of southeastern Transbaikalia, based on modern geoinformation technologies, the use of remote sensing data (radar topographic survey) of high resolution, the creation of a digital elevation model and the application of an integrated structural-spatial analysis, an author's approach to detection and interpretation of the CTSs is presented, including in connection with the localization of ore objects of various geological-industrial (geological-genetic) types within the framework of the concept of the formation of mineral systems. A statistical analysis of the CTSs identified in the area was carried out, which made it possible to establish a smooth increase in the number of structures with a decrease in their diameter. It is shown that the spatial maxima of ore mineralization extent within the territory are concentrated on the periphery of large CTSs and in their immediate vicinity. Most of the known large ore objects are confined to the internal areas of structures less than 10 km in diameter. Based on the approach of constructing model sections, it was possible to reconstruct the deep position of magma chambers associated with the identified CTSs, and, thereby, to determine the probable sources of metal-bearing fluids. A close spatial relationship between the identified magma chambers and deep faults has been established. To determine the most favorable sites for the deposition of ore mineralization, based on structural-spatial criteria, which include not only structural elements of the CTSs, but also segments of known fault structures, weight of evidence models of the territory have been created. The accuracy of the complex model is 89%. Thus, in accordance with the concept of mineral systems, the sources, migration pathways and sites of the most probable deposition of ore mineralization have been reconstructed.

Keywords: central type structures, ore-forming systems, geoinformation analysis, remote sensing of the Earth, digital elevation model, metallogenic analysis, conceptual predictive model, weight of evidence model, metallogeny, southeastern Transbaikalia