

**СТРУКТУРЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТИПА В ЮЖНОМ СИХОТЭ-АЛИНЕ В
ВЕРОЯТНОСТНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ: ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ,
РЕОЛОГИЯ, ИЕРАРХИЯ, ФРАКТАЛЬНОСТЬ И МЕТАЛЛОГЕНИЯ**

А.М. Петрищевский

*ФГБУН Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, ул. Шолом Алейхема 4, г. Биробиджан,
697016; e-mail: petris2010@mail.ru*

Поступила в редакцию 18 сентября 2023 г.

В результате анализа 3D распределений плотностной контрастности в земной коре Южного Сихотэ-Алиня установлены связи рудных районов, узлов и полей с иерархически соподчиненными структурами центрального типа трех таксономических уровней. На основании совпадения ареалов рудной минерализации с проекциями глубинных плотностных неоднородностей определена вероятная глубина залегания флюидно-магматических источников рудной минерализации: оловорудных (2–6 км), олово-полиметаллических (4–12 км), полиметаллических (6–20 км) и золото-вольфрамовых (14–24 км). Пространственное размещение структур центрального типа и связанных с ними ареалов рудной минерализации совпадает с зонами вязкого сдвига, внутри которых наблюдаются прогибание верхнего слоя коры (Самаркинский террейн, Кавалеровский район и Соболиный рудный узел) и смещение контуров плотностных неоднородностей в различных глубинных срезах (Дальнегорский район). Определены глубинные границы древней континентальной коры и мезозойских островодужных клиньев, пододвинутых под аккреционно-складчатые комплексы. Сочленение этих структур характеризуется отчетливыми признаками трансформного сдвига.

Ключевые слова: гравитационные модели, реология, рудные районы, структуры центрального типа, вязкие сдвиги, Южный Сихотэ-Алинь.

**СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ
ИССЛЕДОВАНИЯ**

Структуры центрального типа (СЦТ) чрезвычайно широко распространены в геологическом пространстве и особенно широко – в вулканических поясах. На Государственной геологической карте Сихотэ-Алиня М 1:1 000 000 третьего поколения [6] показаны десятки СЦТ, большинство из которых пока слабо изучены и детально не описаны.

Существуют два типа структур центрального типа: интрузивно-купольные (ИКС) и вулкано-тектонические депрессионные (ВТД). Оба типа структур связаны с глубинными магматическими очагами, которые инициируют образование СЦТ. Имея одинаковое происхождение, эти структуры отличаются по механизму формирования приповерхностного (надочагового) слоя. В первом случае (ИКС) над магматическим очагом под давлением последнего формируется купол. В центре таких структур обычно обнажаются фундамент вулканических толщ либо гранитные плутоны, а по периферии – вулканические покровы

и субвулканические экструзивы. СЦТ второго типа обусловлены проседанием (обрушением) кровли магматических очагов, в результате чего в сводах таких структур формируются вулкано-тектонические депрессии, характеризующиеся концентрической магматической и металлогенической зональностью. На периферии этих структур обычно обнажается фундамент вулканических толщ, либо – интрузивные аналоги вулканического покрова.

Рудоконтролирующая роль структур центрального типа признается многими исследователями, однако при региональных обобщениях этому придается второстепенное (локальное) значение, а в качестве главных рудоконтролирующих факторов обосновываются разломы, в том числе сдвиги, и гранитоидный магматизм.

Целью настоящей статьи является анализ структур центрального типа разного ранга на основе 3D распределений плотностной контрастности в земной коре Южного Сихотэ-Алиня, связанной с ее реологическими состояниями. Сопоставляются распределе-

ния рудной минерализации с аномалиями плотностной контрастности и геологическим строением рудных узлов и районов. Распределения аномалий плотностной контрастности увязываются с размещением СЦТ разного ранга, их иерархической соподчиненностью и фрактальными свойствами, а также взаимоотношениями СЦТ с разломами, магматическими проявлениями и сдвиговыми процессами. На основании такого анализа осуществляется попытка локализовать в 3D пространстве глубинные источники зон концентрации приповерхностной рудной минерализации и сопоставить их с профилирующей минерализацией рудных узлов и районов. Это открывает возможность построения вертикальной и горизонтальной металлогенической зональности земной коры в Южном Сихотэ-Алине.

ТЕКТОНИКА, МАГМАТИЗМ И РУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ЮЖНОМ СИХОТЭ-АЛИНЕ

Исследуемый район располагается в зоне сочленения архейско-протерозойского фундамента Амурской плиты (Матвеевско-Нахимовский террейн) с юрско-меловыми аккреционными и складчатыми комплексами (Самаркинский и Журавлевский террейны), перекрываемыми Восточно-Сихотэ-Алинским вулканическим поясом на окраине континента (рис. 1, а, б). Границами террейнов являются региональные разломы. По полученным ранее данным [13, 14], фундамент аккреционно-складчатых комплексов резко отличается по обе стороны от Центрально-Сихотэ-Алинского разлома. К западу от него он сложен континентальным гранитно-метаморфическим слоем, а к востоку – пластинами океанической и островодужной коры, пододвинутыми под аккреционно-складчатые комплексы. Считается, что Кемский террейн имеет островодужное происхождение, а Таухинский – океаническое [4], однако в гравитационных моделях они проявлены одинаково [13, 14], и поэтому автор настоящей статьи не различает историю их формирования.

Кровля островодужной коры (под Кемским террейном) и океанической (под Таухинским) залегает на глубине примерно 5 км, а под Самаркиным – до 15 км [14].

Магматические образования группируются в трех поясах северо-восточного простирания: позднепалеозойском на западе, мезозойском в зоне Центрально-Сихотэ-Алинского разлома и позднемезозойско-кайнозойском – в окраинно-континентальном вулканическом поясе (рис. 1, б). Первый и второй пояса характеризуются отчетливой связью с разломами на границах террейнов.

Большая часть рудных узлов и районов в Южном Сихотэ-Алине концентрируется на территории,

ограничиваемой координатами 44°–45°30' с.ш. и 134°–136° в.д. На этой территории расположены 11 известных рудных узлов и районов, (рис. 1, в) и еще один (Ариадненский), который ранее не классифицировался как рудный узел, хотя признаки золото-вольфрамовой минерализации там были установлены [9]. Этот узел известен более как россыпной. Металлогенические характеристики Ариадненского узла идентичны характеристикам Малиновского (рис. 1, в), и не так давно там было обнаружено самородное золото [26], предполагающее близкое залегание коренного источника. Как будет показано ниже, реологические характеристики земной коры Ариадненского узла тоже близки к таковым Малиновского, и поэтому он вовлечен в наше исследование.

В Южном Сихотэ-Алине 6 из 15 рудных узлов и районов располагаются в зонах региональных глубинных разломов (рис. 1, а), другие (7 из 15) – приурочены к границам крупных массивов гранитов (рис. 1, б). 11 районов из 15 располагаются в пределах кругового контура (рис. 1, в).

Образование рудных месторождений в Южном Сихотэ-Алине связывают с четырьмя рудогенными эпохами [6]. *Раннепалеозойская эпоха* проявлена на юго-восточной окраине Матвеевско-Нахимовского террейна, где редкометалльно-фтористая минерализация приурочена к экзоконтактам вознесенских гранитов с возрастом 300–500 млн лет. Здесь же проявлена позднепалеозойская (200–300 млн лет) промышленная полиметаллическая минерализация [12]. *Позднепалеозойская эпоха* более широко проявилась в Синегорском рудном районе, где обнаружены проявления уран-редкометалльной, полиметаллической и вольфрамовой минерализации. *Юрская эпоха* оруденения характеризуется образованием золоторудной и вольфрам-полиметаллической минерализации преимущественно в зоне Центрального Сихотэ-Алинского разлома (рис. 1). *Меловая–раннепалеогеновая эпоха* является наиболее продуктивной, и с ней связаны многочисленные, в том числе крупные, рудные объекты оловянной, вольфрамовой, полиметаллической и золото-серебряной минерализации преимущественно в восточных районах региона.

В соответствии с эпохами рудообразования рассматриваемая территория Южного Сихотэ-Алиня подразделяется на четыре основные металлогенические зоны: Усуйско-Вознесенскую (F, R, Fe, Mn/PZ) с Вознесенским рудным районом, Восточно-Ханкайскую (Pb, Zn, W, Sn, Au/C–K) с Синегорским и Марьяновским районами), Центральную (W, Au/J–K) с Малиновским, Верхне-Уссурским и Кавалеровским

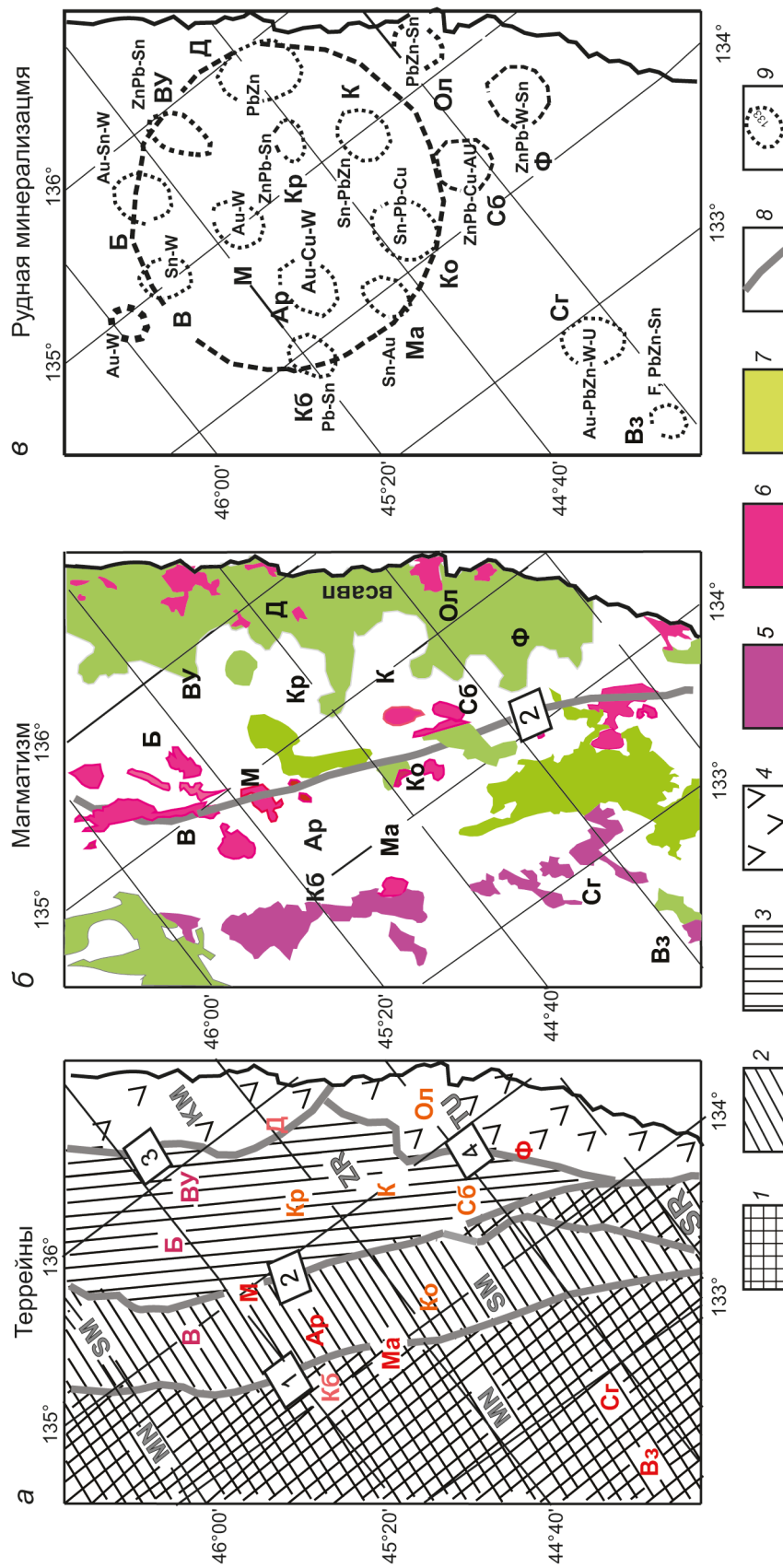


Рис. 1. Террейны (а) [24], магматизм (б) [6], и рудная минерализация (в) [9] Южного Сихотэ-Алиния.

1 – архейский и протерозойский метаморфический фундамент; 2–3–мезозойские аккреционные комплексы: юрские (2) и меловые (3); 4 – островодужные и океанические террейны; 5–6 – гранитоиды палеозойские (5), мезозойские и кайнозойские (6); 7 – мезозойские вулканические покровы; 8 – главные разломы; 9 – ареалы рудной минерализации (узлы и районы). Обозначения террейнов: MN – Матвеево-Нахимовский, SR – Сергеевский, SM – Самаркинский, ZR – Журавлевский, KM – Кемский, TU – Таухинский, ВСАВП – Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс. Обозначения разломов: 1 – Арсеньевский, 2 – Центрально-Сихотэ-Алинский, 3 – Колумбинский; 4 – Прибрежный. Обозначение рудных узлов и районов [9]: В3 – Вознесенский олово-полиметалл-флюоритовый; Сг – Синегорский золото-полиметалл-вольфрам-урановый; Ма – Марьяновский олово-медно-свинцоворудный; Ко – Кокшаровский олово-медно-свинцоворудный; Кб – Кабаргинский свинец-олово-вольфрам-золото-медно-вольфрамовый; М – Малиновский золото-вольфрамовый; В – Восточный вольфрам-оловорудный; Б – Благодатный золото-олово-вольфрамовый; ВУ – Верхне-Уссурийский олово-полиметаллический; Кр – Краснореченский олово-полиметаллический; К – Дальнегорский олово-полиметаллический; Ф – Фурмановский олово-полиметалл-медно-золоторудный; Ол – Ольгинский олово-полиметалл-медно-золоторудный; Ол – Ольгинский олово-полиметалл-медно-золоторудный; Ф – Фурмановский олово-полиметалл-вольфрамовый.

районами, и Таухинскую (Pb, Zn, Sn / K2) с Дальнегорским и Ольгинским районами [6, 9]. Такое районирование в большей степени руководствуется территориальным расположением рудной минерализации и возрастом вмещающих толщ и менее учитывает петрохимические и геохимические характеристики рудных месторождений. Например, промышленные месторождения золота и вольфрама встречаются в двух минерагенических зонах: Восточно-Ханкайской и Центральной, а полиметаллические проявления – в разобренных Восточно-Ханкайской и Таухинской. Не находят объяснения устойчивые парагенезы полиметаллов и вольфрама с оловом независимо от минерагенических зон на всей рассматриваемой территории (рис. 1, в). Все эти неувязки списываются на «активизации» [6], тектонические механизмы которых не раскрываются.

Таким образом, существующие данные свидетельствуют о полиформационном и мультистадийном образовании рудных месторождений в Южном Сихотэ-Алине и не позволяют однозначно судить о доминирующей связи месторождений с региональными геологическими структурами и процессами.

Исследование связи рудных месторождений с глубинными плотностными неоднородностями в 3D геологическом пространстве, предпринятое в предлагаемой статье, расширяют существующие представления о глубинных магматических источниках рудной минерализации разной специализации в структурах центрального типа разного ранга и дополняют их оценками вертикальной и латеральной металлогенической зональности земной коры в разных глубинных диапазонах.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНО-ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

В основе построения 3D-модели плотностной неоднородности земной коры Южного Сихотэ-Алиня лежат следующие следствия теорем единственности и эквивалентности обратных задач гравитационного потенциала:

- центр тяжести симметричного звездного тела определяется однозначно, независимо от его плотности [11, 27, 28];

- для всякого тела с переменной плотностью существует эквивалентное тело с постоянной плотностью, а потенциалы системы (множества) источников и эквивалентного односвязного звездного источника равны, если их массы и расположение центров масс совпадают [7, 8, 29,35]. Численное подтверждение этой закономерности приведено в работе [19];

- потенциалы объемного и сферического источников с общим центром тяжести равны, следствием чего является прием выметания объемных масс на поверхность эквивалентных сфер, впервые предложенный Анри Пуанкаре [36].

Перечисленные математические доказательства позволяют перейти от традиционного плотностного моделирования, в основе которого лежит аппроксимация геологического пространства простыми конечно-метрическими геологическими телами, к вероятностно-детерминированному, который оперирует с эквивалентными областями 3D пространства, число и пространственное расположение элементарных плотностных неоднородностей внутри которых неизвестно (микститовая среда).

Степень приближения источника к форме симметричного (компактного) тела и, соответственно, точность определения центра масс определяются отношениями Z/D и H/D , где Z – глубина поверхности тела, D – его горизонтальные размеры, H – его вертикальная протяженность. Основным условием является соотношение; $Z > 0.5D$, при котором погрешность вычислений не превышает 20 % от реального положения центра масс. Отношения H/D определяют еще более широкие диапазоны использования формул вычисления центров масс для симметричных источников: $5 < H/D < 0.15$ [19]. Внутри этого диапазона вычисляемые центры масс смещаются к верхней кромке вертикального пласта и к нижней кромке горизонтального пласта, оставаясь внутри этих тел, либо близко к ним.

Для построения вероятностной модели распределения плотностных неоднородностей в земной коре Южного Сихотэ-Алиня построены графики аномалий Буге с шагом 1 км по профилям через 10 км, ориентированных вкост преобладающему простиранию изоманомал поля. По этим графикам вычислены глубины залегания центров плотностных неоднородностей и амплитуды соответствующих квази-симметричных гравитационных аномалий (V_{zm}) так, как показано в статьях [20, 21]. В результате вычисления формировался массив $Z_0(x, y, V_{zm})$.

Далее исследуемое геологическое пространство разбивалось на 17 слоев (табл. 1), и источники каждого слоя выметались на поверхности эквивалентных сфер, касательных к поверхностям слоев по формуле:

$$\mu_z = \frac{V_{zm} \cdot Z_0}{4\pi K \cdot (Z_0 - H_c)^2}, \quad (1)$$

где: H_c – поверхность, касательная к поверхностям эквивалентных сфер; K – гравитационная постоянная. Выполнялось условие: $H_c < Z_0$, а пиковые

Таблица 1. Разбиение земной коры на слои.

интервал Z_1-Z_2 , км	1-5	2-6	3-8	4-10	5-12	6-15	9-17	11-20	13-22	15-25	17-28	19-30	21-32	23-35	25-41	28-45	30-50
Нс, км	0	1	2	3	4	5	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28

значения μ_z -параметра сглаживались до значения $\mu_z = 60 \cdot 10^{-2}$ кг/м²/км. В результате вычислений формировалась цифровая 3D-модель $\mu_z(x, y, Hc)$, которая являлась исходным материалом для построения распределений плотностной контрастности в горизонтальных срезах и вертикальных разрезах тектоносферы. По математическому определению μ_z -параметр является поверхностной плотностью эквивалентной сферы, нормированной по глубине центра масс. Более простое геофизическое определение – «плотностная контрастность», поскольку этот параметр отображает степень плотностной дифференциации геологического пространства и, как следствие – реологическое состояние зондируемых сред [16, 19, 20].

Интерпретационная процедура является вероятностно-детерминированной [1]. Вероятность заключается в том, что интерпретируются аномалии не от конкретных геологических тел или структур, а от областей источников с неизвестным распределением плотностных неоднородностей внутри них. Пересечения областей являются случайными. Детерминированность заключается в том, что центры этих областей и распределения плотностной контрастности между центрами и поверхностями эквивалентных сфер вычисляются однозначно при широких начальных условиях ($Z > 0.5D$; $5 < H/D < 0.15$).

Опыт вероятностно-детерминированного моделирования реологических неоднородностей тектоносферы [13, 16] показывает, что результаты такого моделирования слабо зависят от относительного знака локальных гравитационных возмущений. В Южном Сихотэ-Алине априорно не известно, что является преобладающим типом глубинных источников гравитационных аномалий: гранитоиды, обуславливающие минимумы, базиты, обуславливающие максимумы, или рельеф фундамента аккреционно-складчатых и вулканических толщ? Поэтому в интерпретационный процесс вовлечены аномалии обоих знаков (рис. 2, б). Результаты такого моделирования мало отличаются от модели, построенной по локальным минимумам (рис. 2, а).

Реологические гравитационные модели сопоставлены с пространственным распределением особых точек, моделируемых методом отношений производных Трошкова-Грозновой, реализованного в про-

граммном пакете «СИНГУЛЯР» [2]. В этих моделях особые точки плотностных неоднородностей группируются вблизи вертикальных (разломы) и горизонтальных границ геологических сред (рис. 4). Морфология коррелируемых по особым точкам границ в общих чертах согласуется с морфологией изолиний плотностной контрастности.

СТРУКТУРЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТИПА В ЮЖНОМ СИХОТЭ-АЛИНЕ

Региональная Южно-Сихотэ-Алинская СЦТ

Южно-Сихотэ-Алинская СЦТ начинает проявляться в распределениях плотностной контрастности земной коры с глубины 2 км, а на глубине 4 км (рис. 3, а) она характеризуется отчетливой концентрической зональностью, типичной для тектоно-магматических структур центрального типа [15–17]: на ее внешнем контуре располагаются локальные максимумы плотностной контрастности, а в центре – широкий минимум. Таким распределениям соответствуют СЦТ с инверсированной (обрушенной) кровлей магматического очага. На флангах этих структур обычно концентрируется преимущественно низкотемпературная оловянная и золоторудная (золото-сульфидная формация) минерализация, а в центрах – проявления меди, молибдена и высокотемпературного (золото-кварцевая формация) золота. В промежуточной зоне доминируют проявления полиметаллов и вольфрама [17, 21].

В исследуемом регионе локальные максимумы плотностной контрастности в срезе на глубине 4 км (рис. 3, а) на флангах Южно-Сихотэ-Алинской СЦТ совпадают расположением Кокшаровского, Кабаргинского, Верхне-Уссурского, Дальнегорского, Кавлеровского (южный фланг) и Соболиного рудных районов. Во всех этих районах, наряду с месторождениями и проявлениями полиметаллов и вольфрама, присутствует низкотемпературная оловянная касситерит-сульфидная минерализация. Марьяновский и Восточный рудные узлы, в которых проявлена вольфрамовая и золоторудная минерализация, совмещаются с локальными максимумами плотностной контрастности в более глубоких срезах: Восточный на глубине 6 км, а Марьяновский – 6 и 8 км.

В срезе на глубине 10 км контуры Южно-Сихотэ-Алинской СЦТ сужаются (рис. 3, б), а на глубине 20 км центральная зона структуры выражена интенсивным

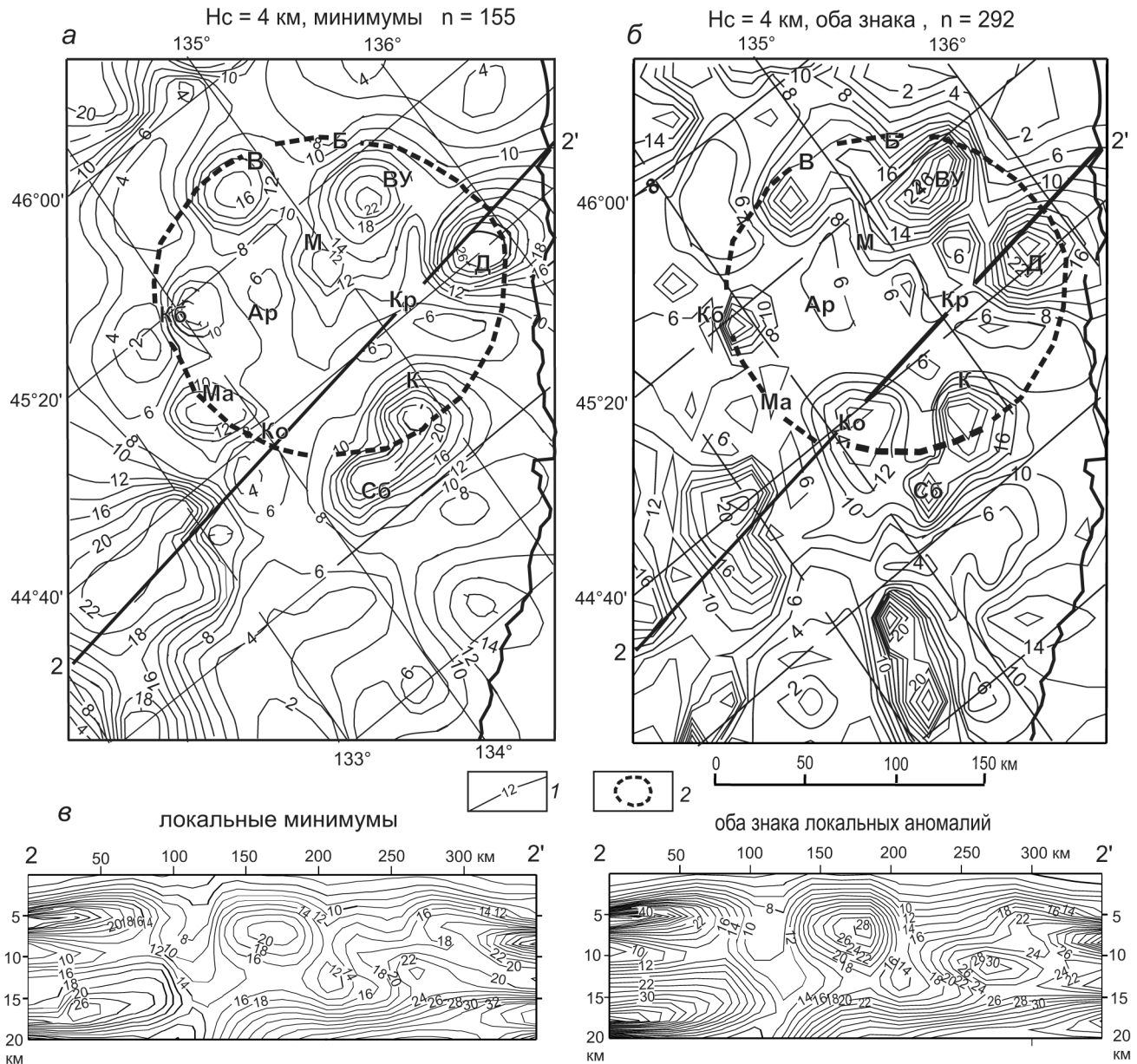


Рис. 2. Распределения плотностной контрастности на глубине 4 км с использованием только локальных гравитационных минимумов (а) и всех аномалий (б) с разрезами μz -модели (в).

l – изолинии плотностной контрастности, 10–2 кг/м³/км; 2 – контур Южно-Сихотэ-Алинской структуры центрального типа. Нс – глубина поверхности конденсации источников на поверхность эквивалентных сфер. 2-2 – обозначения разрезов. Обозначения рудных узлов и районов на рис. 1.

максимумом плотностной контрастности (рис. 3, в), вероятно соответствующим магматическому диапиру. На флангах центральной зоны располагаются Дальнегорский, Верхне-Уссурский, Малиновский, Ариадненский и Кавалеровский рудные узлы и районы. В центре СЦТ расположен Краснореченский район.

Асимметрия контуров СЦТ в разных глубинных срезах обусловлена северо-западным надвиганием верхнекорового слоя, в котором преобладают турби-

диты, на среднекоровый гранитно-метаморфический слой континентальной коры [14]. Надвигание подтверждается наличием задокументированных тектонических покровов [33]. Олистостромы и тектонические покровы в верхнем слое земной коры сочетаются с субдукцией нижней океанической литосферы со стороны Японского моря [22].

В Краснореченском, Верхне-Уссурском и Дальнегорском районах профилирующей минерализацией

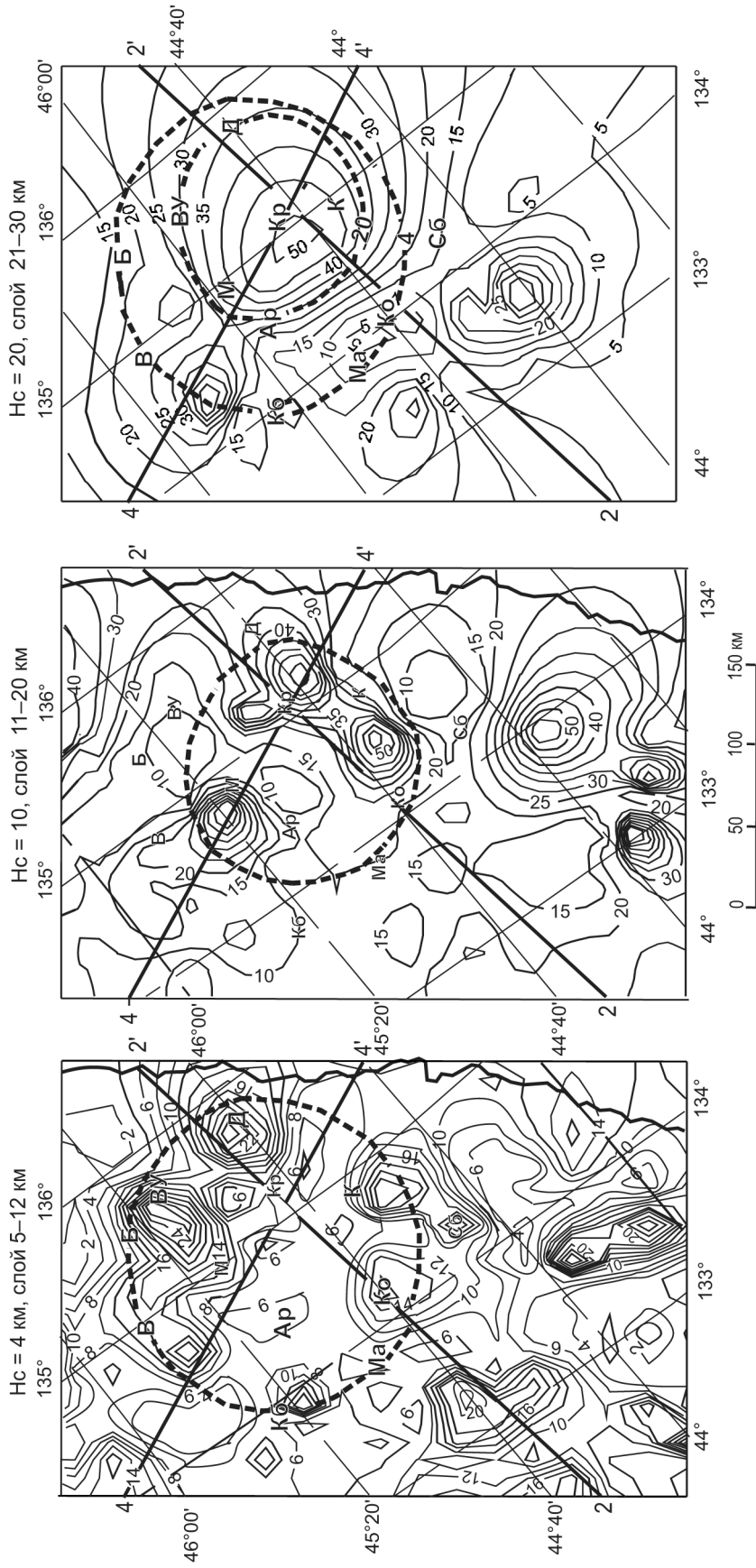


Рис. 3. Распределения плотностной контрастности в интервалах глубин: 5–12 (а), 11–20 (б) и 21–30 км (в). 2-2' и 4-4' – обозначения разрезов на схемах. Другие обозначения на рис. 1.

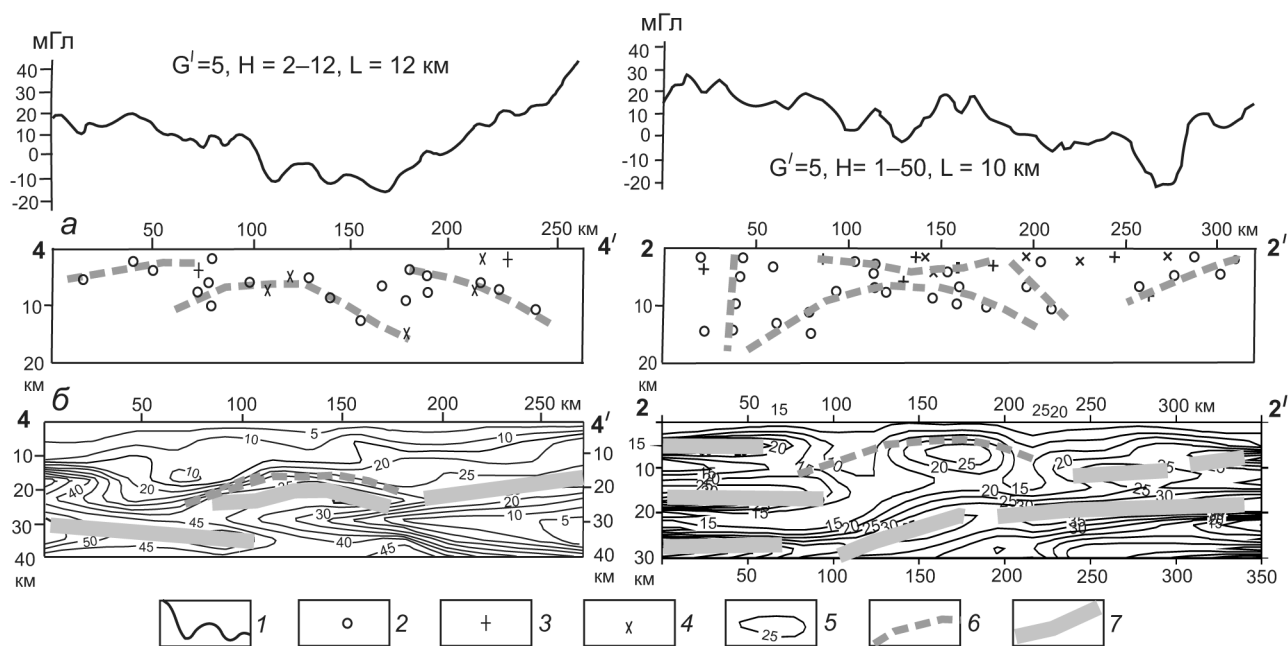


Рис. 4. Распределения особых точек (а) и плотностной контрастности (б) в разрезах Южно-Сихотэ-Алинской СЦТ.

1 – графики аномалии Буге; 2–4 – особые точки по Трошкову, программа Сингуляр [2]: центры масс (2), вершины многоугольников (3) и боковые грани горизонтальных пластин (4); 5 – изолинии плотностной контрастности, 10^{-2} кг/м²/км; 6 – линии пространственной корреляции особых точек; 7 – оси жестких пластин. G' – порядок производной, H – высота пересчета поля, L – ширина скользящего окна. Расположение разрезов на рис. 3.

является полиметаллическая [9], а в Малиновском и Ариадненском – золото-вольфрамовая (рис. 1, в). В Кавалеровском районе на южном фланге тоже присутствует полиметаллическая минерализация.

В разрезах μ_z -модели и распределениях особых точек плотностных неоднородностей (рис. 4) Южно-Сихотэ-Алинская СЦТ выражена куполообразным выгибанием глубинных границ, при этом верхнекоровые границы, восстанавливаемые по распределениям особых точек, смещены на восток относительно среднекоровых, диагностируемых по распределениям плотностной контрастности, что соответствует контурам СЦТ в плане (рис. 3, в). Смещение обусловлено надвиганием верхнекоровых тектонических комплексов на среднекоровые. В распределениях особых точек проявлена инверсия кровли СЦТ: в разрезе 4-4' она выражена смещением кровли купола, а в разрезе 2-2' прогибанием приповерхностного слоя.

В восточных частях разрезов жесткие пластины островодужной коры инъектированы в СЦТ, а еще западнее – надвинуты на прогибающийся нижний слой континентальной коры (рис. 4, б). Такие взаимоотношения установлены во всех разрезах Сихотэ-Алинской аккреционно-складчатой системы [14].

Распределения плотностной контрастности в среднем (интервал глубин 9–17 км) и нижнем (17–28 км) слоях земной коры (рис. 5) отображают характер сочленения трех глубинных структур в Южном Сихотэ-Алине: палеозойской окраины Азиатского континента, мезозойских островодужных пластин и структуры центрального типа между ними. В среднекоровом слое (рис. 5, а) проявлена S-образная структура растяжения-сдвига, в своей средней части совпадающая с Самаркинским террейном. Амплитуда сдвига, судя по расстоянию между «хвостами» S-структуры, составляет 150 км. По полученным данным, Самаркинский террейн представляет собой зону вязкого левостороннего сдвига, горизонтальные перемещения в котором облегчались большим объемом гранитоидных магм, еще не полностью кристаллизовавшихся в позднемеловое время.

Такие сдвиги характерны для всей территории Восточной Азии. Они выявлены в северном Сихотэ-Алине [18], в зоне Охотско-Чукотского вулканического пояса [25] и восточном Китае [37]. К Центрально-Сихотэ-Алинской зоне вязкого сдвига приурочены Кокшаровский, Малиновский, Ариадненский и Верхне-Уссурский рудные узлы (рис. 5). Малиновский и Ариадненский характеризуются проявлениями золота и вольфрама, Кокшаровский – свинца и меди, а Верх-

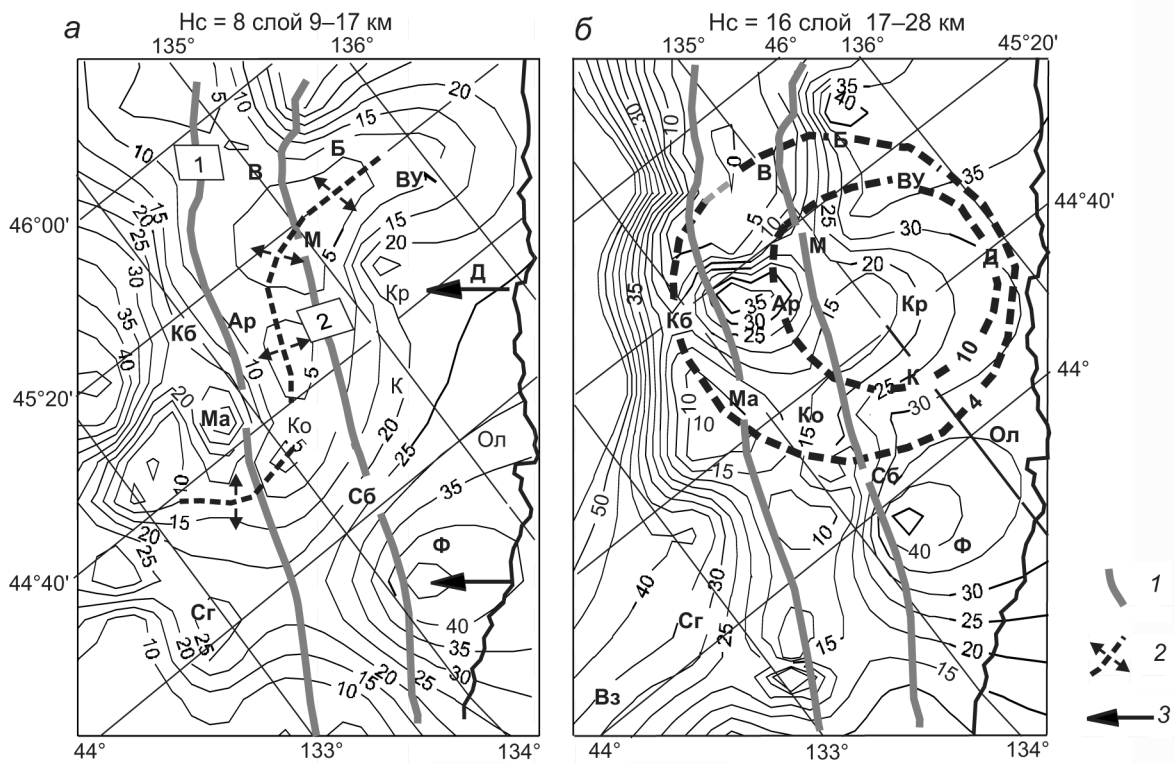


Рис. 5. Распределения плотностной контрастности (1 ед. = 10^2 кг/м³/км) в интервалах глубин: 9–17 (а) и 17–28 км (б). 1 – разломы; 2 – ось Центрально-Сихотэ-Алинской зоны растяжения-сдвига; 3 – векторы пододвигания островодужной коры под аккреционно-складчатые комплексы. Обозначения разломов: 1 – Арсеньевский, 2 – Центрально-Сихотэ-Алинский. Другие обозначения на рисунках 1 и 3.

не-Уссурийский – полиметаллов (рис. 1, в). Низкотемпературная оловянная минерализация в этих районах отсутствует или угнетена.

В нижнекоровом слое (рис. 5, б) распределения плотностной контрастности более рельефно соответствуют областям с разным типом фундамента аккреционно-складчатых толщ. Между ними располагается линейная зона растяжения, совпадающая с Самаркинским аккреционным террейном, которая нарушена структурой центрального типа. Над островодужными (океаническими) клиньями, соответствующими Кемскому и Таухинскому террейнам (рис. 1, а), располагаются Дальнегорский, Краснореченский, Кавалеровский, Ольгинский и Фурмановский рудные районы, в которых доминирует, или широко проявлена, полиметаллическая минерализация [6, 9].

Исходя из характера пространственных взаимоотношений глубинных реологических неоднородностей, можно предположить такую последовательность тектонических событий в рассматриваемой части Южного Сихотэ-Алия: надвигание островодужной коры на континентальную окраину (J-K₁) → сдвиг с растяжением (K₁) → наложение структуры

центрального типа на зону растяжения (K₂-P). Нарушение зоны сдвига структурой центрального типа иллюстрирует рисунок 5, б.

На востоке подошвой смещаемых пластин, по-видимому, являлся подкоровый вязкий слой (рис. 4), а на западе – подошва аккреционной Самаркинской призм и вязкие магмы в зоне Центрального сдвига (рис. 1, б).

В верхнекоровых разрезах 3D μ_z -модели (рис. 6) все рудные узлы и районы, располагающиеся на периферии Южно-Сихотэ-Алинской СЦТ, приурочены к локальным максимумам плотностной контрастности, природа которых является комплексной. В этих рудных районах, с одной стороны, присутствуют поднятия довулканического фундамента (Дальнегорский район), а с другой стороны – вулcano-тектонические (Кавалеровский, Верхне-Уссурийский), либо интрузивно-купольные (Кабаргинский, Марьяновский, Соболиный) структуры, в основании которых залегают интрузивы диорит-гранодиорит-гранитного состава. Состав магматических пород в этих районах существенно варьирует и далеко не всегда там удается идентифицировать геологическую природу локаль-

ных гравитационных возмущений. Гравитационные максимумы могут быть обусловлены как выступами более плотного фундамента, так и субвулканическими экструзиями среднего-основного состава. Минимумы могут быть обусловлены выступами гранитных интрузивов, либо – погружениями довулканического фундамента. Перечисленные аномалии осложняются влиянием метаморфических процессов: региональных и локальных (экзо- и эндоконтактных).

Однако аномалии плотностной контрастности (μ_z -параметра), независимо от природы и относительного знака гравитационных аномалий (рис. 2), способны одинаково локализовать области, районы и участки, характеризующиеся высокой плотностной дифференциацией геологического пространства. Как показывает опыт исследований, эти аномалии одинаково отображают вулканотектонические структуры обоого типа: как интрузивно-купольные, так и депрессионные, поскольку в обоих случаях под этими структурами залегают палеомагматические очаги. Сопоставление глубинных аномалий μ_z -параметра с ареалами приповерхностной рудной минерализации (рис. 1, в) открывает возможность оценки вероятной вертикальной протяженности рудно-магматических колонн. Опыт таких корреляций [17, 18, 21], показывает, что вертикальный диапазон рудно-магматических систем (РМС) различается в зависимости от их металлогенической специализации.

Рудные узлы и районы в центральной зоне Южно-Сихотэ-Алинской СЦТ (Малиновский, Ариадненский и, в меньшей степени, Краснореченский) располагаются в зонах пониженных значений плотностной контрастности (рис. 6). Это обусловлено проседанием свода региональной СЦТ и, соответственно, более глубоким залеганием флюидно-магматических источников рудной минерализации в зоне проседания.

Связь локальных максимумов плотностной контрастности с металлогенической специализацией рудных районов иллюстрирует таблица 2. В районах с преимущественно оловорудной специализацией (Кавалеровский, Восточный) вероятные источники минерализации залегают в верхних горизонтах коры на глубине 2–6 км. Вместе с тем, с большим перерывом под этими районами существуют локальные плотностные неоднородности на глубине 20–22 км, что может быть связано с присутствием в этих районах вольфрамовой (Восточный узел) и полиметаллической (Кавалеровский) минерализации.

Под районами со смешанной олово-полиметаллической специализацией (Краснореченский, Верхне-Уссурский, Кокшаровский) проявлены несколько уровней залегания плотностных неоднородностей. В Краснореченском они залегают на глубинах 2–3,

10–12 и 20–22 км, в Верхне-Уссурском – на глубинах 3–5 и 14–18 км, а Кокшаровском – на глубинах 4–6 и 14–18 км (табл. 2). По мнению автора настоящей статьи верхние уровни ответственны за проявление оловорудных проявлений, а средне-коровые – полиметаллических.

В Ольгинском районе с полиметаллической профилирующей минерализацией вероятные флюидно-магматические источники рудных месторождений и проявлений смещены в среднекоровый слой (8–16 км). Дальнегорская РМС характеризуется широким вертикальным диапазоном: 4–20 км, поскольку в этом районе кроме основной полиметаллической проявлены золоторудная и оловорудная минерализации [31, 33].

Под районами с золото-вольфрамовой минерализацией плотностные неоднородности – вероятные источники РМС – залегают преимущественно в интервале глубин 12–24 км (табл. 2), а редкие максимумы плотностной контрастности на глубине 3–4 км, по-видимому, объясняются присутствием оловорудной минерализации (Благодатный рудный узел), либо существованием близповерхностного магматического очага – источника наложенной на вольфрамоносные скарны низкотемпературной сульфидной минерализации (Малиновский район) [3, 23].

В зоне Южно-Сихотэ-Алинской СЦТ три рудных узла (Соболиный, Кабаргинский, Марьяновский) характеризуются широкопрофильной минерализацией (PbZn-Au-W-Sn), в связи с чем они сопровождаются широким глубинным диапазоном плотностных неоднородностей под этими районами (табл. 2). Судя по распределениям плотностной контрастности, малоизученные Кабаргинский и Соболиный рудные узлы перспективны на обнаружение промышленных благороднометалльных месторождений. Существуют и геологические признаки такой возможности [32].

В результате металлогенического анализа 3D распределений плотностных неоднородностей обнаружена вертикальная металлогеническая зональность земной коры Южно-Сихотэ-Алинской СЦТ. Она характеризуется металлогеническим рядом рудно-магматических систем, связанным с их вертикальным диапазоном: Sn (2–6 км) → Pb-Zn (8–20 км) → Au-W (14–24 км). Установленная закономерность может найти применение при прогнозе и поисках новых рудных месторождений определенной специализации.

Анализ пространственных распределений аномалий плотностной контрастности выявил иерархическую соподчиненность и фрактальность (самоподобие) структур центрального типа разного ранга: региональная Южно-Сихотэ-Алинская СЦТ → вулканотектонические и интрузивно-купольные СЦТ →

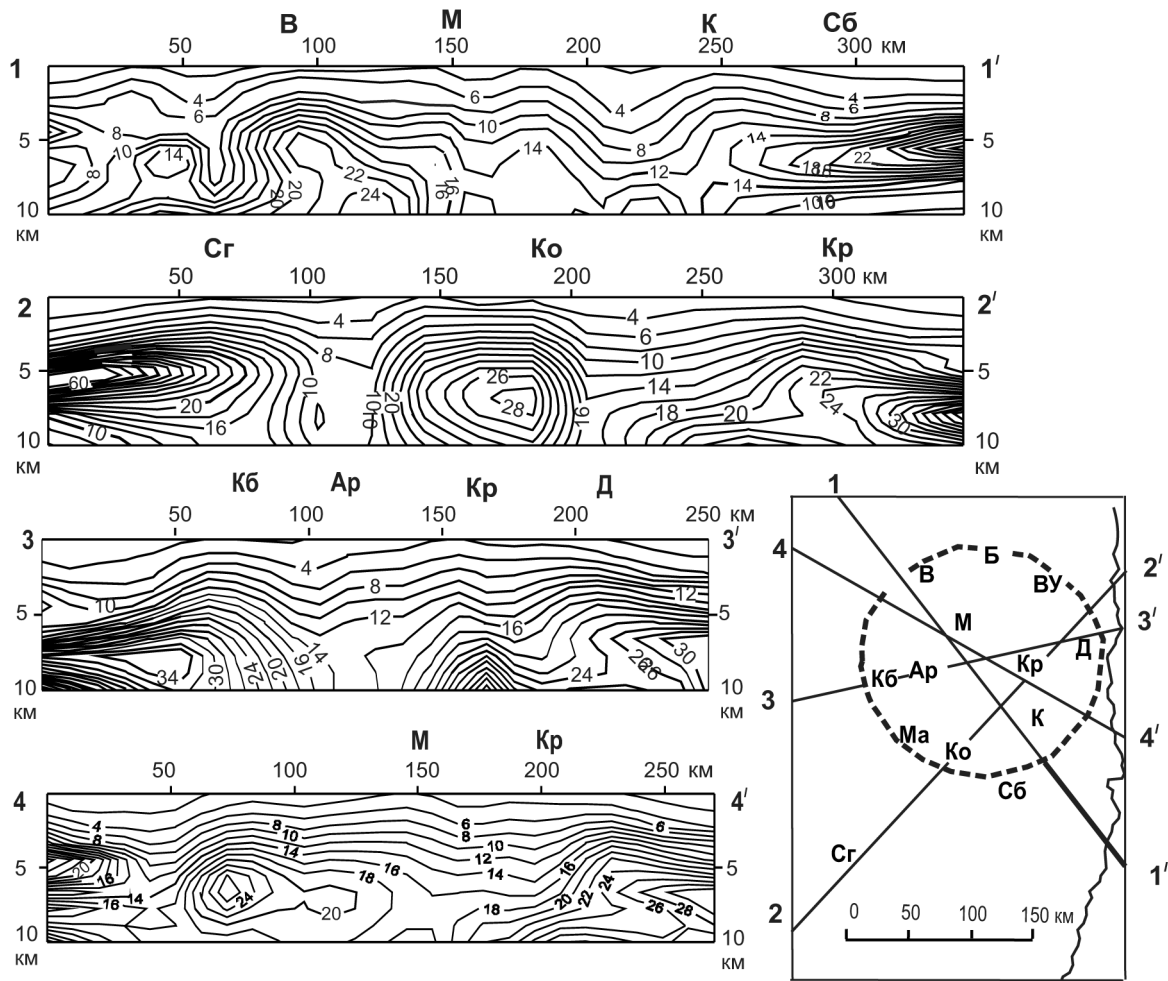


Рис. 6. Верхнекоровые разрезы μ_z -модели
Условные обозначения на рисунке 1.

Таблица 2. Связь рудной минерализации с плотностными неоднородностями в земной коре.

Районы	Рудные узлы и районы													
	Оловорудные		Олово-полиметаллические			Поли-металлические		Золото-вольфрамовые			Широкая специализация			
Нс, км	К	В	Кр	ВУ	Ко	Д	Ол	М	Ар	Б	Сб	Ф	Кб	Ма
2	+		+											
3		+	+	+				+		+				
4				+	+	+					+	+	+	
5		+		+	+									+
6		+			+	+								
8							+	+				+		+
10			+				+	+						
12			+			+				+			+	
14				+	+				+		+			
16							+	+	+	+		+		
18				+	+	+								
20	+		+			+		+						
22	+		+					+	+					
24		+						+	+	+	+		+	
26														+

Примечание. Обозначения рудных узлов и районов в соответствии с рис. 1.

палеовулканы и интрузивные тела. Связи структур высокого порядка с региональной магмо-рудогенерирующей СЦТ анализируются ниже на примере Дальнегорского и Кавалеровского рудных районов и Соболиного рудного узла.

Строение и металлогеническая зональность рудно-магматических систем

Строение *Дальнегорского рудного района* характеризуется сложной соподчиненностью вулканотектонических структур разного ранга (рис. 7) и существованием двух различных по составу, но близких по возрасту магматических ассоциаций: позднемеловых риолитов, их туфов и дальнегорских андезитов [30]. На большей части района распространена Кизинская свита, сложенная туфами риолитов, дацитов и андезитов с прослоями туфопесчаников и туфоалевролитов [33]. Анализ карты плотности пород этой свиты ($2.38\text{--}2.50\text{ г/см}^3$) [33] позволяет говорить о том, что в ее составе преобладают кислые разности вулканитов (липариты и их туфы).

Выходы довулканического фундамента среди обширного поля вулканитов предполагают существование интрузивно-купольной структуры в основании Дальнегорской СЦТ (рис. 7, а), которая в срезе на глубине 6 км выражена максимумом плотностной контрастности (рис. 7, б). По мнению Ю.П. Юшманова [33], Дальнегорская СЦТ приурочена к сдвиговому дуплексу, образованному Колумбинским и Прибрежным сдвигами (рис. 7, а). Эта СЦТ характеризуется выраженной металлогенической зональностью: в ее центре располагаются преимущественно полиметаллические месторождения, а на флангах – золоторудные проявления [33] (рис. 7, а). Такая зональность объясняется провесом кровли Дальнегорской СЦТ, и если бы не было такого прогибания, то в центре этой СЦТ была бы проявлена высокотемпературная золотокварцевая минерализация, в промежуточной зоне – полиметаллическая, а на флангах – низкотемпературная золотосульфидная и серебросульфидная. Такая зональность типична для структур центрального типа [17, 21]. В Дальнегорском районе серебросульфидная

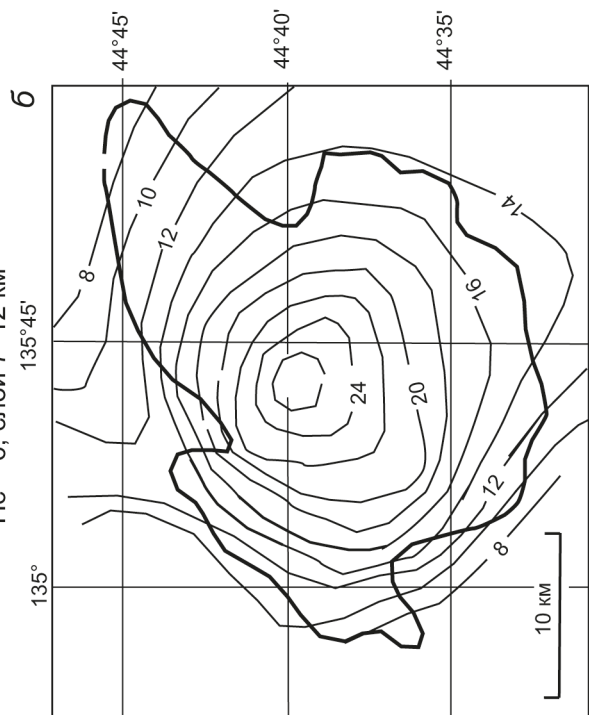
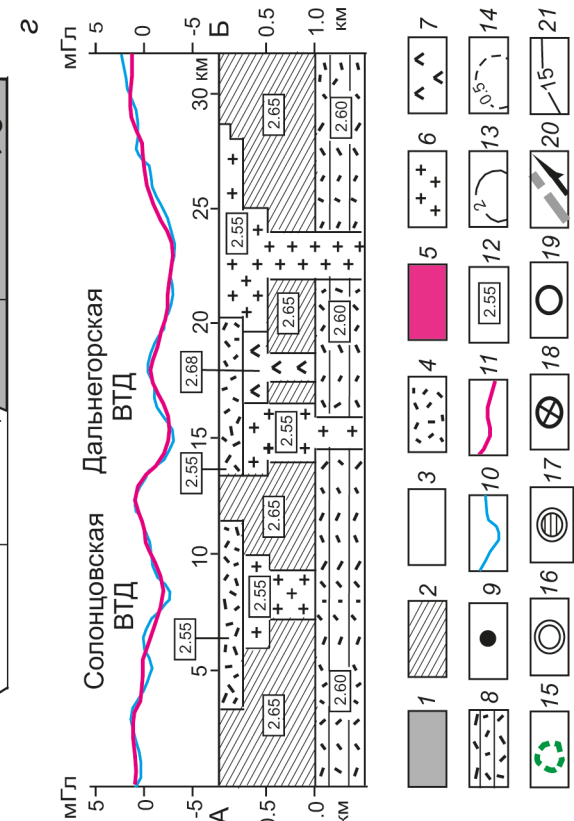
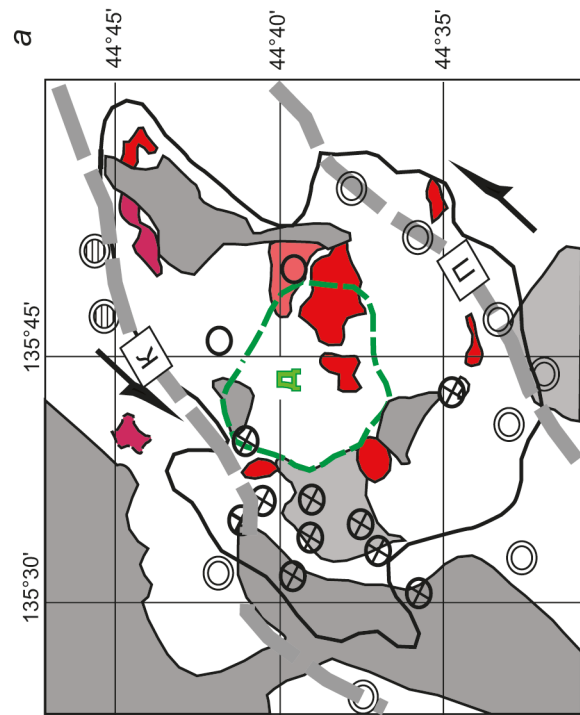
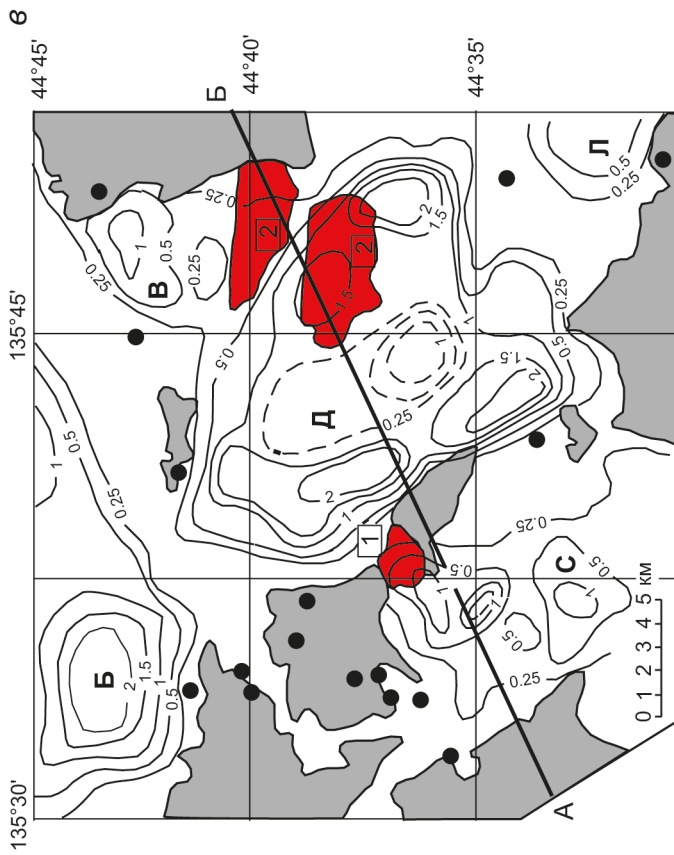
минерализация преобладает на Майминовском месторождении (северный фланг Дальнегорского района) [23]. Другие проявления жильного типа тоже концентрируются на флангах района, а в центре преобладают скарновые полиметаллические месторождения [23].

Более детальная гравитационная модель, основывающаяся на интерпретации гравиметрической карты М 1:50 000 (рис. 7, в), показывает, что свод интрузивно-купольной структуры осложнен вулканотектоническими депрессиями, центральной из которых является Дальнегорская, заполненная преимущественно кислыми вулканитами. Эта депрессия, в свою очередь, осложнена в центре андезитовым диапиром дальнегорского комплекса. Плотностной разрез через центральную часть района (рис. 7, г) иллюстрирует сложность и неоднозначность традиционного гравитационного моделирования его тектонических и магматических структур. В этом разрезе очень сложно разделить гравитационные эффекты риолитовых и андезитовых вулканических пород и субвулканических интрузивов, а ниже глубины 1.5 км от поверхности разделить эффекты фундамента и магматических образований объективно невозможно. Между тем, рудные месторождения Дальнегорского района локализованы преимущественно в довулканическом фундаменте, кровля которого на глубине моделируется крайне схематично даже с применением трехмерных алгоритмов (рис. 7, в).

Сдвиговая составляющая в правом крыле Колумбинского (Прибрежного – по Ю.П. Юшманову [33] или Фурмановского – по В.В. Голозубову [4]) разлома выражена в срыве и смещении приповерхностной части субвулканического интрузива в северо-восточной части Дальнегорской ВТС за ее пределы (рис. 7, в) и закономерном смещении аномалии плотностной контрастности в северо-восточном направлении по мере уменьшения глубины срезов от 10 до 6 км. На глубине 10 км аномалия μ_z -параметра является общей для трех районов: Дальнегорского, Краснореченского и Кавалеровского (рис. 3, б), что объясняет присутствие в них полиметаллов. Плавное смещение локальных аномалий μ_z -параметра указывает на то, что Колум-

Рис. 7. Тектоническая схема Дальнегорской интрузивно-купольной структуры (а) [33], плотностная контрастность (1 ед. = $10^{-2}\text{ кг/м}^2/\text{км}$) земной коры на глубине 6 км (б), схема рельефа подошвы вулканического покрова (в) и плотностной разрез центральной части Дальнегорского рудного района (г).

1–2 – довулканический фундамент в плане (1) и разрезе (2); 3 – вулканический покров; 4 – кислые вулканиты (преимущественно риолиты) в разрезе, 5–6 – гранитоиды в плане (5) и разрезе (6); 7 – андезиты дальнегорского комплекса; 8 – нерасчленяемые магматические образования в фундаменте вулканического покрова; 9 – месторождения на схеме «в»; 10–11 – гравитационные аномалии: наблюдаемая (10) и расчетная (11); 12 – расчетная плотность блоков; 13 – глубина залегания подошвы кислых вулканитов; 14 – глубина залегания дальнегорского андезитового вулканического комплекса; 15 – контур Дальнегорской вулканотектонической депрессии на схеме «а»; 16–19 – рудные месторождения и проявления на схеме «а»: золота (16), золото-серебряные (17), полиметаллические (18), олова (19); 20 – сдвиги: П – Прибрежный, К – Колумбинский; 21 – изолинии плотностной контрастности на схеме «б». Вулканотектонические депрессии: Д – Дальнегорская, Б – Барачная, С – Солонцовская, Л – Лидовская, В – Верхне-Лидовская.



бинский сдвиг, как и Центральный Сихотэ-Алинский, является вязким. По полученным данным, амплитуда Колумбинского сдвига намного меньше, чем Центрального, что может рассматриваться в качестве признака затухания сдвиговых процессов в этом районе континентальной окраины в кайнозойе.

В *Кавалеровском рудном районе* оловорудная минерализация концентрируется вокруг Угловской СЦТ, сложенной в центре синанчинскими андезитами, а на ее периферии картируются субвулканические гранитоиды и кислые эффузивы [5]. СЦТ локализована в зоне разлома (Ключевого, по [5]), который, как предполагают В.Г. Гоневчук с соавторами [5], служит границей Журавлевского и Таухинского террейнов. По другим представлениям [4], Кавалеровский район расположен между двумя левыми сдвигами: Дубровским и Фурмановским, образующими сдвиговый дуплекс с возможной зоной растяжения между сдвигами. Похожая схема предложена Ю.П. Юшмановым [33].

Структурное положение и строение верхнего слоя земной коры Кавалеровского рудного района очень похожи на таковые Дальнегорского района. В обоих районах рудоконтролирующими являются СЦТ с провешенной кровлей (вулcano-тектонические депрессии) в сдвиговом дуплексе. 3D распределения плотностной контрастности (рис. 3) и металлогеническая специализация районов указывают на более высокий эрозионный срез Кавалеровской РМС. Однако, на глубине 10 км (рис. 3, б) оба района приурочены к линейному максимуму μ_z -параметра, что предполагает их общий глубинный источник.

Месторождение Лазурное в Соболином рудном узле является примером связи рудных тел с СЦТ высокого порядка и зональности медно-золото-полиметаллической минерализации (рис. 8). Здесь в провесе кровли субвулканического интрузива локализованы штокверки с золото-медно-молибденовой минерализацией, а на флангах месторождения золото ассоциирует с серебром и полиметаллами. Соболиный рудный узел характеризуется широким диапазоном связи рудной минерализации с глубинными аномалиями плотностной контрастности (табл. 2), что характерно для проявлений меди, золота и молибдена [17]. Согласно предшествующим исследованиям [32–33], структурная позиция Соболиного узла определяется также приуроченностью к сдвиговому дуплексу растяжения, внутри которого существует прогиб, заполненный светловодненной свитой.

Судя по распределениям плотностной контрастности (рис. 3, а), Дальнегорский, Кавалеровский рудные районы и Соболиный рудный узел приурочены к

общей глубинной структуре (структуре пулл-апарт), что согласуется с тектоническими моделями [4, 33].

Фрактальность (самоподобие) структур центрального типа

В рассматриваемом регионе структуры центрального типа разного ранга характеризуются иерархической соподчиненностью и самоподобием. Структурой первого порядка является Южно-Сихотэ-Алинская СЦТ, характеризующаяся концентрически зональным размещением плотностных неоднородностей и соответствующих им рудных узлов и районов в радиусе 90 км (рис. 1–4). СЦТ второго ранга являются интрузивно-купольные структуры и вулcano-тектонические депрессии, определяющие размещение рудных полей внутри районов. Поперечные размеры таких структур составляют 15–20 км. Структурами третьего ранга являются гранитоидные интрузивы и экструзивы с размерами 2–6 км, контролирующие локализацию рудных тел. Несмотря на различие структурных обстановок в районах проявления СЦТ, возраста и пространственных размеров структур, все они имеют общие морфологические черты и обладают подобной внутренней организацией.

СЦТ более низкого ранга являются плюмы, или мантийные струи, характеризующиеся внутренней иерархической соподчиненностью структурных элементов и подобной металлогенической зональностью [17, 18, 21]. Горизонтальные размеры таких структур в астеносферно-астеносферном диапазоне глубин составляют 700–1000 км.

По реологическим, термометрическим и петрохимическим признакам СЦТ плюмового происхождения выявлена в Японском море [22], где установлено северо-западное ответвление астеносферного слоя под южный фланг Сихотэ-Алинской аккреционно-складчатой системы в интервале глубин 60–80 км. Поэтому не исключено, что Южно-Сихотэ-Алинская СЦТ является сателлитом Япономорского плюма.

Надпорядковыми СЦТ являются суперплюмы, в частности: Африканский и Тихоокеанский [10, 34], которые выражены полями горячей мантии с горизонтальными размерами в несколько тысяч километров на глубинах более 3000 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате трехмерного пространственного анализа распределений плотностных реологических неоднородностей в земной коре Южного Сихотэ-Алия установлена связь рудных районов, узлов, полей и месторождений с соподчиненными структурами центрального типа трех иерархических уровней.

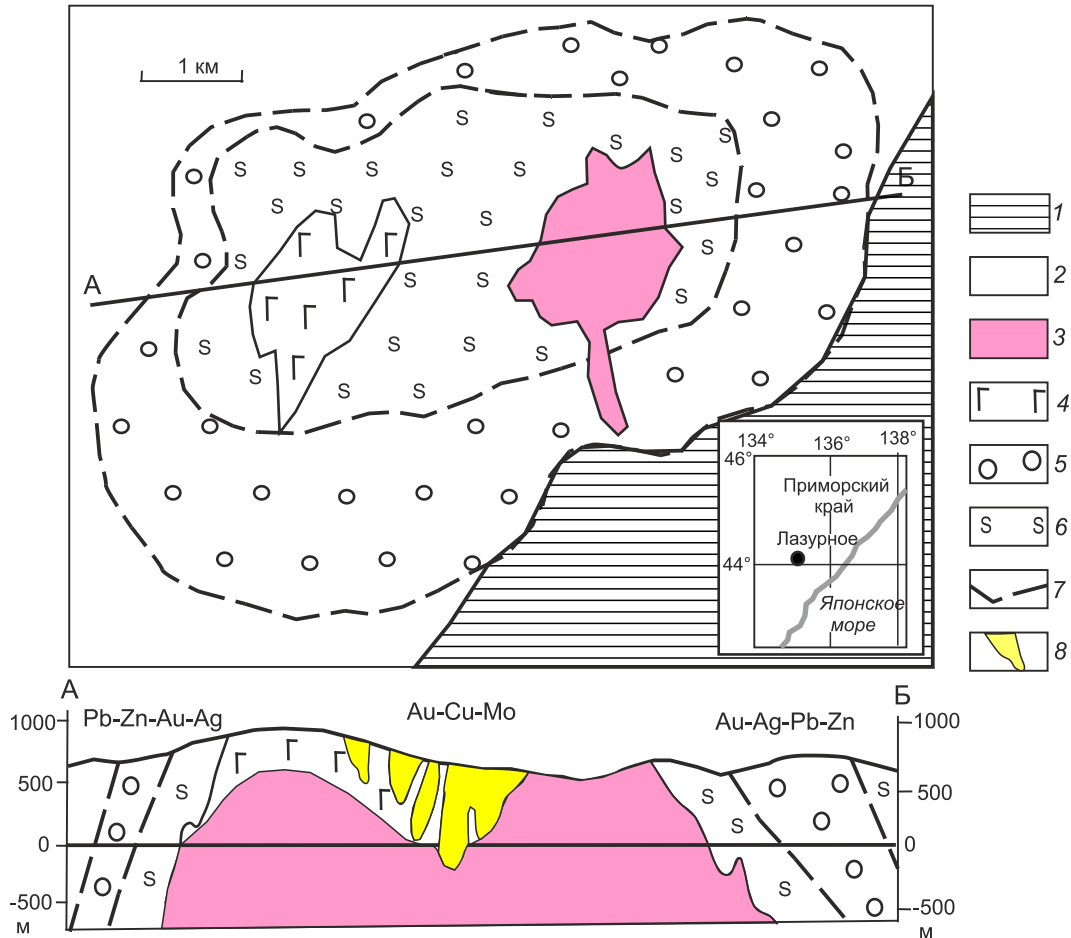


Рис. 8. Метаморфическая и металлогеническая зональность Лазурного месторождения в Соболином рудном узле [32].

1–2 – нижнемеловые терригенные породы: диввинской и светловоденской свит (1), каталевской свиты (2); 3 – гранодиориты; 4 – габбродиориты; 5 – кварц-серицит-хлоритовые метасоматиты; 6 – биотитизация и пиритизация; 7 – границы метасоматических зон; 8 – золоторудные штокверки.

Главной региональной структурой, определяющей размещение рудных узлов и районов, является Южно-Сихотэ-Алинская СЦТ, на периферии которой расположены оловорудные и полиметаллические проявления и месторождения. В центре этой структуры профилирующей является вольфрамово-золоторудная минерализация.

Рудные узлы и районы (второй иерархический уровень) на флангах Южно-Сихотэ-Алинской СЦТ сопровождаются максимумами плотностной контрастности земной коры, обусловленными высокой плотностной дифференциацией геологического пространства. Совпадение ареалов рудной минерализации с проекциями глубинных плотностных неоднородностей является индикатором глубины залегания вероятных флюидно-магматических источников рудогенеза и, соответственно, вертикальной протяженности рудно-магматических систем.

По глубине залегания рудогенных плотностных аномалий различаются оловорудные (интервал глубин 2–6 км), олово-полиметаллические (4–12 км), полиметаллические (6–20 км) и золото-вольфрамовые (14–24 км) рудно-магматические системы, что, вероятно, характеризует вертикальный диапазон этих систем.

Интрузивно-купольные структуры и вулканотектонические депрессии в рудных узлах и районах представляют третий иерархический уровень СЦТ и они непосредственно контролируют размещение рудных проявлений и месторождений. В СЦТ этого уровня (Дальнегорской, Соболиной) выражена концентрическая зональность рудной минерализации.

Пространственное размещение вулканотектонических структур и соответствующих им ареалов рудной минерализации совмещено с зонами растяжения-сдвига, образованными сдвиговыми дуплексами, вну-

три которых наблюдаются относительное прогибание приповерхностного слоя земной коры (Самаркинский террейн, Кавалеровский и Соболиный районы) и смещение контуров плотностных неоднородностей в разных глубинных срезах (Дальнегорский район).

Структуры центрального типа разного ранга вносят определяющий вклад в пространственное размещение рудных месторождений, а разломы, в том числе сдвиги, играют второстепенную (вспомогательную) роль, облегчая продвижение к поверхности магматических масс и глубинных рудогенных флюидов, генерируемых структурами центрального типа.

Исходя из характера пространственных взаимоотношений глубинных реологических неоднородностей, последовательность тектонических событий в рассматриваемом регионе представляется следующим образом: надвигание островодужной, или океанической, коры на континентальную окраину (обдукция) с формированием фронтальной Самаркинской аккреционной призмы ($J-K_1$) → Центральный Сихотэ-Алинский сдвиг с растяжением (K_1) → наложение структуры центрального типа Южного Сихотэ-Алиня на сдвиг ($K_2 - P$). Более поздние сдвиги на окраине континента деформирует СЦТ второго иерархического уровня (Дальнегорский и Кавалеровский районы, Соболиный рудный узел), и они имеют меньшую амплитуду смещения.

Реализованная процедура интерпретации гравитационных аномалий является вероятностно-детерминистской [1], и она не претендует на исчерпывающую характеристику глубинных структур Южного Сихотэ-Алиня, которая лишь в общих чертах отображается в распределениях плотностной контрастности 3D геологического пространства, опосредованно связанных с тектоническими структурами и распределениями рудной минерализации. Тем не менее, она, как справедливо заметил один из рецензентов, представляет собой «материал для размышления и обсуждения». В частности, предстоит подтвердить структурные причины обнаруженной концентрической зональности реологических плотностных неоднородностей с помощью других геофизических методов и найти петрохимические доказательства связи рудной минерализации с глубинными аномалиями плотностной контрастности.

Работа выполнена в соответствии с темой научных исследований, утвержденной государственным заданием Министерства науки и высшего образования: «Дальний Восток России как часть Восточной Азии: закономерности и региональные особенности геологического строения и динамики геосистем» № FWUG-2024-0004 / 1021062311240-7-1.5.6;1.5.5.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балк П.И., Долгаль А.С., Мичурин А.В. Смешанный вероятностно-детерминистский подход к интерпретации данных гравиразведки, магниторазведки и электроразведки // Докл. АН. 2011. Т. 438, № 4. С. 532–537.
2. Блох Ю.И., Каплун Д.В., Коняев О.Н. Возможности интерпретации потенциальных полей методами особых точек в интегрированной системе «СИНГУЛЯР» // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 1993. № 6. С. 123–127.
3. Гвоздев В.И., Федосеев Д.Г. Скарны вольфрамового месторождения Кордонное (Приморский край) // Тихоокеан. геология. 2013. Т. 32, № 1. С. 100–111.
4. Голозубов В.В. Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2006. 239 с.
5. Гоневчук В.Г., Гоневчук Г.А., Кокорин А. М., Лебедев В.А., Орехов А.А. Новые изотопно-геохронологические данные и некоторые вопросы генезиса оловянного оруденения Кавалеровского района (Приморье, Россия) // Тихоокеан. геология. 2005. Т. 24, № 8. С. 77–87.
6. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:1 000 000 (3-е поколение). Серия Дальневосточная. Лист L-(52), 53; (K-52, 53). оз. Ханка: Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2011. 684 с.
7. Зидаров Д. О решении некоторых обратных задач потенциальных полей и его применении к вопросам геофизики. София: Изд-во Болгарской академии наук, 1986. 143 с.
8. Иванов В.К. О разрешимости обратной задачи потенциала в конечном виде // Докл. АН СССР. 1956. Т. 106, № 4. С. 598–600.
9. Карта полезных ископаемых. 1:1 000 000. Серия Дальневосточная. Лист L-(52), 53; (K-52, 53) / Г.С. Белянский, Н.И. Углова, М.Д. Рязанцева. Владивосток: ФГУГП «Приморская ПСЭ», 2006.
10. Коваленко В.И., Ярмолук В.В., Богатиков О.А. Закономерности пространственного распределения «горячих точек» в мантии современной Земли // Докл. АН. 2009. Т. 427, № 5. С. 654–658.
11. Новиков П.С. Об единственности решения обратной задачи потенциал // Докл. АН СССР. 1938. Т. 18, № 3. С. 165–168.
12. Петрищевский А.М. Глубинные структуры Вознесенского флюоритоносного района. Владивосток: Дальнаука, 2002. 106 с.
13. Петрищевский А.М. Реологическая модель земной коры Южного Сихотэ-Алиня (по гравиметрическим данным) // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 3. С. 50–65.
14. Петрищевский А.М. Гравитационная модель сочленения континентальной и океанической коры в Сихотэ-Алине // Вестн. КРАУНЦ. Науки о земле. 2011. № 1. Вып. 17. С. 11–22.
15. Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П. Реология и металлогения Мая-Селемджинского плюма // Докл. АН. 2011. Т. 440, № 2. С. 207–212.
16. Петрищевский А.М. Гравитационный метод оценки реологических свойств земной коры и верхней мантии (в конвергентных и плюмовых структурах Северо-Восточной Азии). М.: Наука, 2013. 192 с.
17. Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П. Геофизические, магматические и металлогенические признаки мантийного

- плюма в верховьях рек Алдан и Амур // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 4. С. 568–593.
18. Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П. Связь рудных месторождений Нижнего Приамурья с глубинными структурами земной коры // Докл. АН. 2014. Т. 257, № 5. С.
 19. Петрищевский А.М. Одно практическое следствие теорем единственности и эквивалентности обратных задач гравитационного потенциала // Геофизика. 2020. № 4. С. 98–111.
 20. Петрищевский А.М. Геологические задачи, решаемые при вероятностно-детерминированном подходе к интерпретации гравитационных аномалий // Геофизика. 2021. № 2. С. 87–97.
 21. Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П. Плотностная контрастность, глубинное строение, реология и металлогения земной коры и верхней мантии Верхояно-Колымского региона // Литосфера. 2021. Т. 21, № 4. С. 491–516.
 22. Петрищевский А.М., Емельянова Т.А., Изосов Л.А. Возрастные взаимоотношения рифтогенеза, субдукции и плюмовых процессов на восточной окраине Азии // Вестн. КРАУНЦ. Науки о земле. 2021. № 4. Вып. 52. С. 22–45.
 23. Федосеев Д.Г. Особенности вещественного состава руд и генезиса шеелит-сульфидного месторождения Кордонное (Приморский край, Россия) : Дис. ... канд. геол.-минер. наук. Владивосток, 2019. 170 с.
 24. Ханчук А.И., Раткин В.В., Рязанцева М.Д., Голозубов В.В., Гонохова Н.Г. Геология и полезные ископаемые Приморского края: очерк. Владивосток: Дальнаука, 1995. 66 с.
 25. Ханчук А.И., Иванов В.В. Мезозойская геодинамическая обстановка и золотое оруденение Дальнего Востока России // Геология и геофизика. 1999. № 11. С. 1635–1645.
 26. Ханчук А.И., Молчанов В.П., Андросов Д.В. Первые находки самородных золота и платины в ильменитовых россыпях Ариадненской интрузии базит-ультрабазитов (Приморье) // Докл. АН. 2020. Т. 492, № 2. С. 39–43.
 27. Цирульский А.В., Никонова Ф.И. О разрешимости обратной задачи логарифмического потенциала в конечном виде // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1975. № 5. С. 37–46.
 28. Цирульский А.В., Никонова Ф.И., Федорова Н.В. Метод интерпретации гравитационных и магнитных аномалий с построением эквивалентных семейств решений. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980. 135 с.
 29. Шашкин Ю.А. К вопросу об обратной задаче теории потенциала // Докл. АН СССР. 1958. Т. 118, № 1. С. 45–56.
 30. Шевырев С.Л., Хомич В.Г. Анализ рудоносности геотермальной системы исследованием структурных паттернов полей трещиноватости (Дальнегорский рудный район, Приморье) // Вестн. ВГУ. Сер. Геология. 2012. № 1. С. 173–181.
 31. Юшманов Ю.П. Структурные особенности локализации золотосеребряного оруденения Дальнегорского рудного узла (Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс) // Тихоокеан. геология. 1997. № 2. С. 32–37.
 32. Юшманов Ю.П. Структура и зональность Au-Cu оруденения месторождения Лазурное в Центральном Сихотэ-Алине // Тихоокеан. геология. 2002. Т. 21, № 2. С. 85–90.
 33. Юшманов Ю.П., Петрищевский А.М. Тектоника, глубинное строение и металлогения Прибрежной зоны Южного Сихотэ-Алия. Владивосток: Дальнаука, 2004. 111 с.
 34. Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle // Earth and Planetary Sci. Letters. 2003. V. 205. P. 295–308.
 35. Faure M., Chen Y., Feng Z., Shu L., Xu Z., Tectonics and Geodynamics of South China: an introductory note // J. Asian Earth Sci. 2017. V. 141. P. 1–6. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseae>.
 36. Evans G.C. Application of Poincare's sweeping-out process // Mathematic. 1933. V. 19. P. 457–461.
 37. Ren J., Tamaki S. Li., Zhan J. Late Mesozoic and Cretaceous rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas // Tectonophysics. 2002. V. 344. P. 175–205.

*Рекомендована к печати Р.Г. Кулиничем
после доработки 20.12.2023 г.
принята к печати 11.01.2024 г.*

A.M. Petrishchevsky

Central type structures in the South Sikhote-Alin in probabilistic gravity models: deep structure, rheology, hierarchy, fractality, and metallogeny

As a result of the analysis of 3D-distributions of density contrast in the crust of the South Sikhote-Alin, connections are established between ore districts, ore clusters, and ore fields, on the one hand, and hierarchically subordinate structures of the central type of three taxonomic levels, on the other. Based on the coincidence of the areas of spatial distribution of ore mineralization with the projections of deep density heterogeneities, the probable depth of occurrence of fluid-magmatic sources of ore mineralization and vertical extent of ore-magmatic systems of different specialization were determined: tin (depth of 2–6 km), tin-polymetallic (4–12 km), polymetallic (6–20 km), and gold-tungsten (14–24 km). The spatial distribution of central-type structures and the associated areas of ore mineralization are coincident with viscous shear zones, within which subsidence of the crustal upper layer is observed (Samarkinsky terrane, Kavalerosky district and Soboliny ore cluster), as well as displacement of the contours of density heterogeneities in different depth sections (Dalnegorsky region). Deep boundaries of the ancient continental crust and Mesozoic island-arc wedges subducted under accretionary-fold complexes were determined. The joint of these structures is characterized by distinct features of a transform fault.

Key words: gravity models, rheology, ore districts, central-type structures, viscous shears, South Sikhote-Alin.