ГЕОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 551.1:550.83:552.3(571.6)

ВЕРОЯТНОСТНО-ДЕТЕРМИНИСТСКИЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ СТРУКТУР ЦЕНТРАЛЬНОГО ТИПА В ДАЛЬНЕВОСТОЧНОМ РЕГИОНЕ РОССИИ

А.М. Петрищевский
Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН,
ул. Шолом-Алейхема 4, г. Биробиджан, 679016,
e-mail: petris2010@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6637-1627

В результате тектонического и металлогенического анализа вероятностно-детерминистских гравитационных моделей, отражающих реологические свойства геологических сред на территории Дальневосточного региона России, охарактеризованы в 3D-пространстве структуры центрального типа (СЦТ) четырех таксономических уровней: 1) – плюмов, 2) – региональной Южно-Сихотэ-Алинской СЦТ, 3) – Дальнегорской, Белогорской и Вознесенской инрузивно-купольных структур, 4) – субвулканического интрузива в Соболином рудном районе. СЦТ разных таксономических уровней характеризуются одинаковой концентрической зональностью аномалий плотностной контрастности и соответствующих им ареалов рудной минерализации. На основании совпадений рудных ареалов с глубинными аномалиями плотностной контрастности разработана модель металлогенической зональности земной коры, в которой вероятные флюидно-магматические источники оловорудных месторождений залегают на глубине 2–6 км, олово-полиметаллических в интервале глубин 4–12 км, полиметаллических – 6–20 км, и золото-вольфрамовых – 14–24 км. В головах плюмов наиболее глубокий уровень генерации золото-молибденовой и медной минерализации располагается в астеносфере на глубинах ниже 70 км. Второй уровень на глубинах 40–50 км соответствует вязкому подкоровому слою верхней мантии, где происходит накопление и перераспределение рудных концентраций Au, Mo, Cu, Pb и Zn. Третий уровень флюдо-магмо-генерации в интервале глубин 10–20 км представляет собой зону повышенной концентрации коровых магматических очагов – источников гранитоидных магм, несущих наиболее широкий спектр рудной минерализации (Au-Mo, Au-Ag, Cu-Mo-Au, Au-Pb-Zn, Au-W, W, W-Sn, Sn, Au-Sb, Sb).

Ключевые слова: *гравитационные модели, реология, структуры центрального типа, металлогеническая зональность, Дальневосточный регион.*

Образец цитирования: Петрищевский А.М. Вероятностно-детерминистские гравитационные модели структур центрального типа в Дальневосточном регионе России // Региональные проблемы. 2024. Т. 27, № 4. С. 16–29. DOI: 10.31433/2618-9593-2024-27-4-16-29.

Введение

Структуры центрального типа (СЦТ) чрезвычайно широко распространены в геологическом пространстве и особенно широко – в вулканических поясах. В Дальневосточном регионе эти структуры характеризуются иерархической соподчиненностью и рудоконтролирующим значением [5–7].

СЦТ первого порядка являются плюмы, гравитационные отображения которых неоднозначны. Большинство мезозойских и кайнозойских плюмов сопровождается воздыманием кровли астеносферы, т.е. сокращением мощности литосферы и соответствующими гравитационными максимумами, однако существование плюмов в настоящем и особенно в прошлом часто предпола-

© Петрищевский А.М., 2024

гается в пределах широких гравитационных минимумов, обусловленных большими объемами гранитоидных магм. В этом случае гравитационное моделирование плотностных неоднородностей плюмовой природы традиционными средствами (конечно-элементными моделями) представляет собой трудноразрешимую задачу.

В тектоно-магматических структурах второго и третьего рангов, соответствующих региональным рудным ареалам и рудным районам, состав магматических пород обычно существенно варьирует и далеко не всегда там удается идентифицировать геологическую природу локальных гравитационных возмущений. Гравитационные максимумы могут быть обусловлены как выступами более плотного фундамента, так и субвулканическими экструзивами 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 эндоконтактовых).

Метод исследования

Метод, результаты реализации которого представлены ниже, обеспечивает одинаковую локализацию областей, районов и локальных объемов 3D геологического пространства независимо от природы и относительного знака гравитационных возмущений [4]. Этот метод диагностирует не относительную избыточную плотность геологических тел и структур, а плотностную дифференциацию геологического пространства – «плотностную контрастность» микститовой среды. Опыт проведенных исследований [4–10] показывает, что плотностная контрастность геологических сред связана с их реологическим состоянием.

Интерпретационная процедура относится к классу вероятностно-детерминированных [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 [4–5]. Математические основы и технология построения вероятностно-детерминистских гравитационных реологических моделей приводятся в работах [4, 5, 10].

Вероятностные реологические гравитационные модели структур центрального типа

Алдано-Зейский плюм

Алдано-Зейский плюм сопровождается концентрической зональностью аномалий плотностной контрастности в коровых срезах μ_z (x,y,Hc)-модели (рис. 1а, 1б): в центре структуры располагается минимум, обрамляемый концентрическими максимумами. В подкоровом срезе (рис. 1в) в центре регистрируется интенсивный максимум, обусловленный утолщением земной коры. Алдано-Зейская СЦТ относится к типу структур с инверсированной (обрушенной) кровлей [8]: прогибание над выступом астеносферы и утолщение земной коры под Становым складчатым поясом. Смещение приповерхностного слоя относительно средне- и нижнекорового обусловлено сдвигом на границе Амурской плиты с Алданским щитом.

В надкупольной зоне Алдано-Зейского плюма выявлена отчетливая дискретность пространственной корреляции рудных узлов и районов с уплотнениями земной коры на глубинах 10, 20 и 35 км, а в низах коры (на глубине 25–30 км), подкоровом слое верхней мантии (40–50 км) и астеносфере (ниже глубины 70 км) обнаружены среды пониженной вязкости, связываемые с очагами полного или частичного плавления – источниками тепла и магматических проявлений на поверхности Земли. Пространственное размещение рудных месторождений характеризуется латеральной металлогенической зональностью, обусловленной «расползанием» и перераспределением магм и рудогенных флюидов, экранированных жесткими пластинами в нижней коре [8]. Выявлен закономерный пространственный ряд рудных парагенезов в направлении от центра к флангам плюма: Au, Mo → Au, Ag, Pb, Zn → Au, Pb, Zn → Au, W → Au, Sb → W, Sn → Sn. Взаимное расположение и строение тектоно-магматических структур более высокого порядка в голове плюма подчиняется иерархической и фрактальной закономерностям [8].

Индигиро-Колымский плюм

Индигиро-Колымский плюм характеризуется концентрическим распределением аномалий плотностной контрастности в земной коре (рис. 2а, 2б) и переходном слое литосфера-астеносфера (рис. 2в). В нижнекоровом срезе контуры СЦТ расширяются, а в астеносфере – сужаются, что предопределяет грибовидную форму СЦТ, типичную для плюмов. В разрезах μ_z (x,y,Hc)-модели (рис. 2) проявлен куполовидный изгиб литосферы, подстилаемый выступом астеносферы.

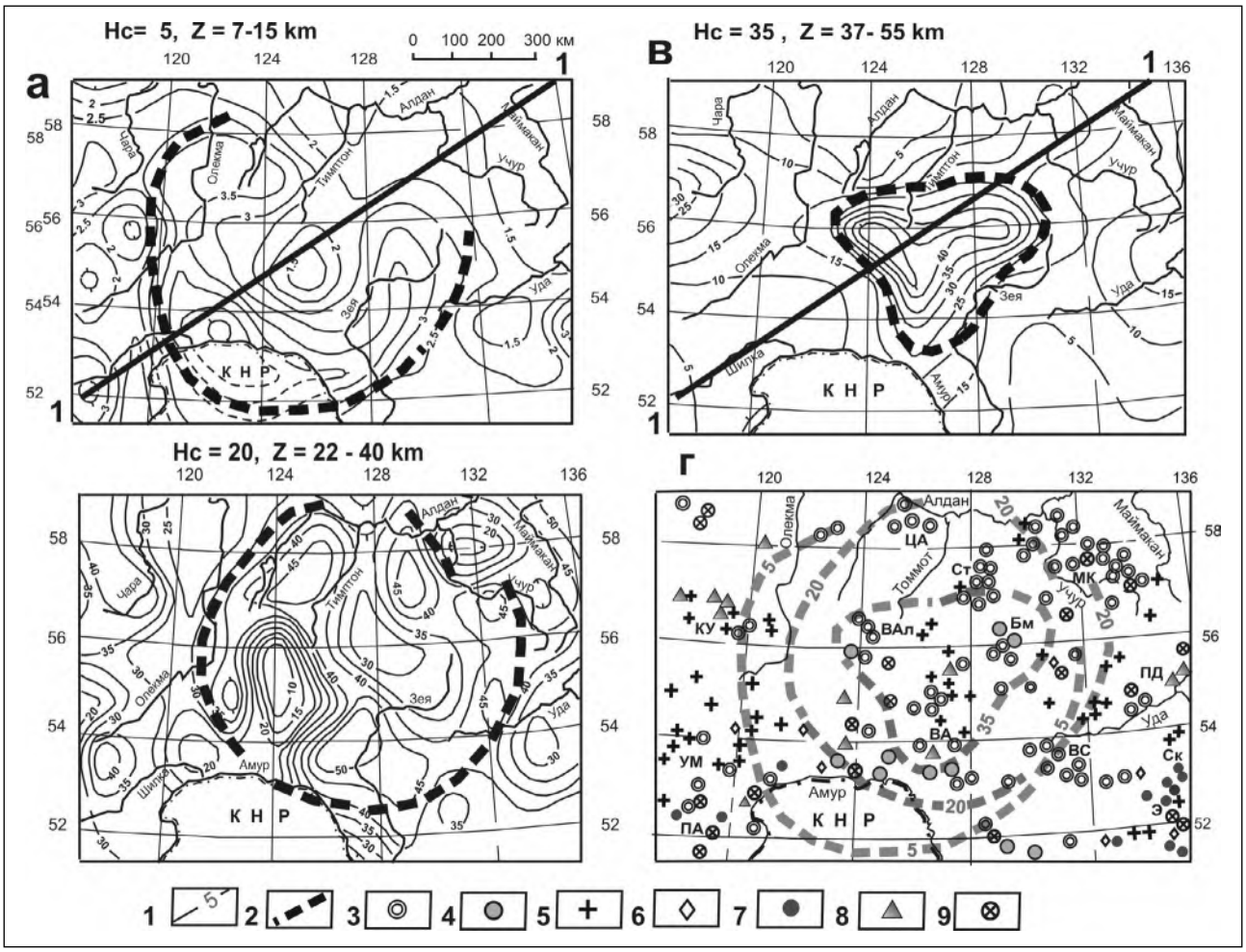

Рис. 1. Карты-срезы (а-в) объемной модели плотностной контрастности (μ_z) в земной коре и подкоровой мантии с размещением рудной минерализации (г) в Верхнем Приамурье

1 – изолинии μ_z-параметра (1 ед. = 10^{-2} кг / м ^{2} / км); 2 – контуры плюма в горизонтальных сечениях; 3–9 – месторождения и рудопроявления (3 – золота, 4 – золотосеребряные, 5 – молибдена, 6 – вольфрама, 7 – олова, 8 – меди, 9 – полиметаллов. Наименования рудных узлов и районов: КУ – Кодаро-Удоканский, ВАл – Верхне-Алданский, ЦА – Центрально-Алданский, Ст – Сутамский, Бм – Бомнакский, МК – Маймакано-Киранский, ПД – Предджугджурский, ВС – Верхне-Селемджинский, Ск – Селитканский, Э – Эзопский, ВА – Верхне-Амурский; Ум – Урюм-Могочинский, ПА – Приаргуньский

Fig. 1. Map-slices (а-в) of 3D volume model of density contrast (μ_z) into the crust and subcrustal mantle with placement of an ore mineralization (г) in the Upper Amur Area

1 – isolines of μ_z-parameter (1 unit = 10^{-2} kg/m ^{2}/km); 2 – contours of the plume in horizontal sections; 3–9 – ore regions (3 – gold, 4 – gold-silver, 5 – molybdenum, 6 – tungsten, 7 – tin, 8 – copper, 9 – led-zinc. Names of ore knots and areas: KU – Kodaro-Udokansky, ВАл – Upper Aldan, ЦА – Central Aldan, Ст – Sutamsky, Бм – Bomnaksky, МК – Maymakano-Kiransky, ПД – Preddzhugdzhursky, ВС – Upper-Selemdzhinsky, Ск – Selitkansky, Э – Ezopsky, ВА – Upper Amur; Ум – Uryum-Mogochinsky, ПА – Priarg

Распределения плотностной контрастности позволяют отнести Индигиро-Колымскую СЦТ к типу тектоно-магматических структур без обрушения кровли.

Пространственное размещение рудных узлов и районов в Верхояно-Колымском регионе контролируется двумя структурными факторами: линейными зонами растяжения и структурами центрального типа (рис. 2). Связи между глубинными плотностными неоднородностями и руд-

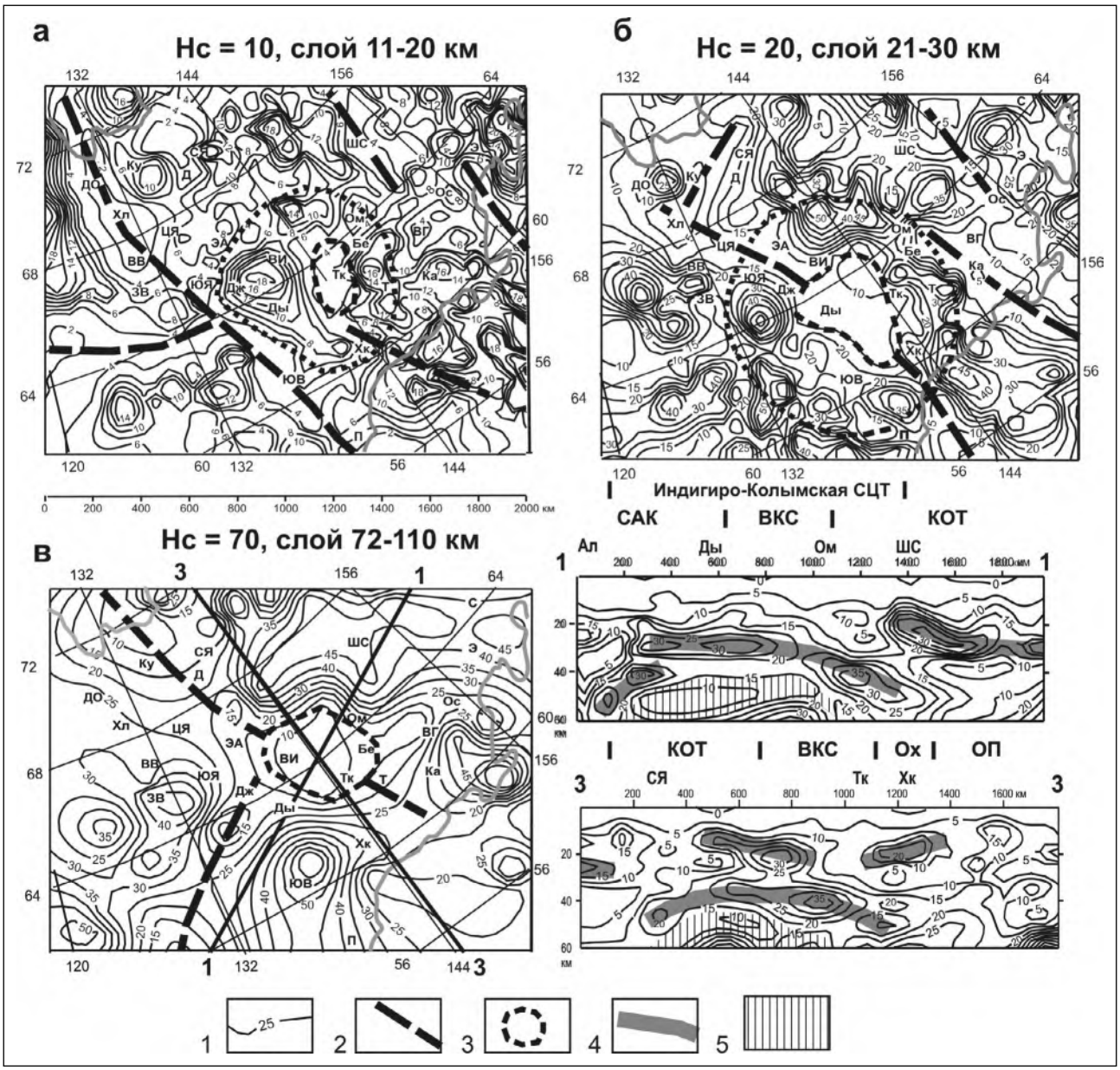

Рис. 2. Распределения плотностной контрастности земной коры Верхояно-Колымского региона на глубинах 10 (а), 20 (б) и 70 (в) км с разрезами

1 – изолинии плотностной контрастности (1 ед. = 10^{-2}кг / м ^{2} / км); 2 – оси зон растяжения; 3, 4 – контуры внутренней (3) и внешней (4) зон Индигиро-Колымской СЦТ; 5 – жесткие (высокая вязкость) слои; 6 – астеносфера. Обозначения структур над разрезами: САК – Северо-Азиатский кратон, ВКС – Верхояно-Колымская складчато-надвиговая система, КОТ – Колымо-Омолонский супертеррейн, ОП – Охотоморская плита, Ох – Охотский массив. Обозначения рудных узлов и районов [МК-2000]: **Бе** – Береляхский, **ВГ –** Верхнеортуканско-Гербенский, **ВИ** – Верхне-Индигирский, **ВВ** – Восточно-Верхоянский, **Д** – Депутатский, **Дж** – Джуптанганский, **Ды** – Дыбинский, **ДО** – Дьянди-Олонойский, **ЗВ** – Западно-Верхоянский, **Ка** – Карамкенский, **Ку** – Куларский, **Ом** – Омчакский, **Ос** – Омсукчанский, **С** – Сергеевский, **СЯ** – Северо-Янский (Полоусный), **Т** – Теньковский, **Тк** – Таскыстабытский, **Хк** – Хаканджинский, **Хл** – Холдинский, **ЦЯ** – Центрально-Янский, **ШС** – Шамано-Столбовской, **Э** – Эвенский, **ЭА** – Эльги-Адычанский, **ЮВ** – Южно-Верхоянский (Аллах-Юньский), **ЮЯ** – Южно-Янский

Fig. 2. Distributions of the density contrast into the crust of Verkhoyano-Kolymsky region at depths of 10 (а), 20 (б) and 70 (в) km with sections of μ_z (x, y, Hc) - model

1 – isolines of density contrast (1 unit = 10^{-2}kg/m ^{2}/km); 2 – axes of the stretch zones; 3, 4 – contours internal (3) and external (4) zones of Indigiro-Kolymsky SCT; 5 – rigid (high viscousity) layers; 6 – asthenosphere. Designations of structures over ections: САК – North Asian craton, ВКС – Verkhoyano-Kolymsky thrust-folded system, КОТ – Kolymo-Omolnsky super-terraine, ОП – Sea of Okhotsk plate. Ох – Okhotsk massif. Designations of ore knots and areas: Ве – Berelyakhsky, ВГ – Verkhneortukansko-Gerbensky, В – Upper-Indigirsky, ВВ – East Verkhoyansk, Д – Deputy, Дж – Dzhuptangansky, Ды – Dybinsky, ДО – Dyandi-Olonoysky, ЗВ – West Verkhoyansk, Ка – Karamkensky, Ку – Kularsky, Ом – Omchaksky, Ос – Omsukchansky, С – Sergeevskiy, ЦЯ – Central Yansky, ШС – Shamano-Stolbovskoy, Е – Evenskiy, ЭА – Elgi-Adychansky, ЮВ – Southern Verkhoyansk (Allah-Yunsky), ЮЯ – Southern Yansky

ными месторождениями дискретны. Наилучшая корреляция рудных узлов и районов с линейными зонами растяжения наблюдается на трех глубинных уровнях: 10–20, 40–50 и 70–80 км. В линейных зонах растяжения большинство (21) рудных районов характеризуется связью рудной минерализации с подкоровым вязким слоем. Второй уровень реологических разуплотнений на глубине 70–80 км имеет меньшее отношение к размещению рудных районов, однако с ним тоже связаны 17 рудных районов.

Теснота связи рудных узлов и районов со структурами центрального типа (СЦТ) увеличена на трех глубинных уровнях: 40–50, 70–80 и 100–150 км. Первый соответствует подкоровому вязкому слою, второй – кровле астеносферы в головах плюма, а третий – утолщениям астеносферы в его центральной (стволовой) зоне. С первым уровнем связаны 9, со вторым – 11, а с третьим – 13 рудных районов. Увеличение количества рудных районов, коррелируемых с астеносферой, обусловлено растеканием астеносферы под подошвой литосферы в голове плюма. По полученным данным, различаются рудные районы с преимущественно коровым вертикальным диапазоном РМС (10–40 км), подкоровым (40-50 км) и астеносферным (70–80 км). К первым относятся ЦЯ, Ом, Дя, До районы, ко вторым – ЯА, ВВ, Ды, Хл, Хк, ЗВ, а к третьим – ВИ, ТК, СЯ, Т (см. обозначения в подписи к рис. 2). Для некоторых районов (Дж, Хл, Ку, ЭХ, ЭА, ЮВ) характерны сквозные связи приповерхностной рудной минерализации с плотностными неоднородностями земной коры и верхней мантии. Наибольшую вертикальную протяженность рудно-магматических систем (РМС) можно предполагать для Дж, ВВ, ЗВ, ЭА, Хк, ЦЯ и ЮЯ рудных районов.

В центральной (стволовой) зоне Индигиро-Колымской СЦТ располагаются районы с преимущественно высокотемпературным золотокварцевым типом минерализации, а на периферии, кроме золоторудных, – олово-вольфрамовые (Дж), оловянные (ЮЯ) и районы с комплексной рудной минерализацией (Ом, СЯ). Большинство золоторудных месторождений с низкотемпературной золотосульфидной минерализацией (Т), примесью олова (ЮЯ, Дж, Т) и полиметаллов (Ом, Тк) тяготеют к флангам Индигиро-Колымской СЦТ.

Южно-Сихотэ-Алинская структура центрального типа

Южно-Сихотэ-Алинская СЦТ представляет собой структуру второго иерархического уровня, но так же, как в головах плюмов, распределения плотностной контрастности в зоне ее влияния характеризуются концентрической зональностью (рис. 3). В верхнекоровом срезе (рис. 3а) на флангах структуры по круговому контуру расположены локальные максимумы μ_z –параметра, а в центре – широкий минимум. В нижнекоровом срезе центр структуры выражен интенсивным максимумом, который может быть обусловлен магматическим диапиром с андезит-базитовым составом магм. С локальными верхнекоровыми максимумами μ_z –параметра совмещаются 7 рудных районов (рис. 3а), а с нижнекоровым – 6 районов (рис. 3б).

Сопоставление глубинных аномалий μ_z – параметра с ареалами приповерхностной рудной минерализации открывает возможность оценки вероятной вертикальной протяженности рудно-магматических колонн. Опыт таких корреляций [4, 7–10] показывает, что вертикальный диапазон рудно-магматических систем (РМС) различается в зависимости от их металлогенической специализации. В районах с преимущественно оловорудной специализацией (Кавалеровский, Восточный) вероятные источники минерализации залегают в верхних горизонтах коры на глубине 2–6 км. В районах со смешанной олово-полиметаллической специализацией (Краснореченский, Верхне-Уссурский, Кокшаровский) выявлены не-

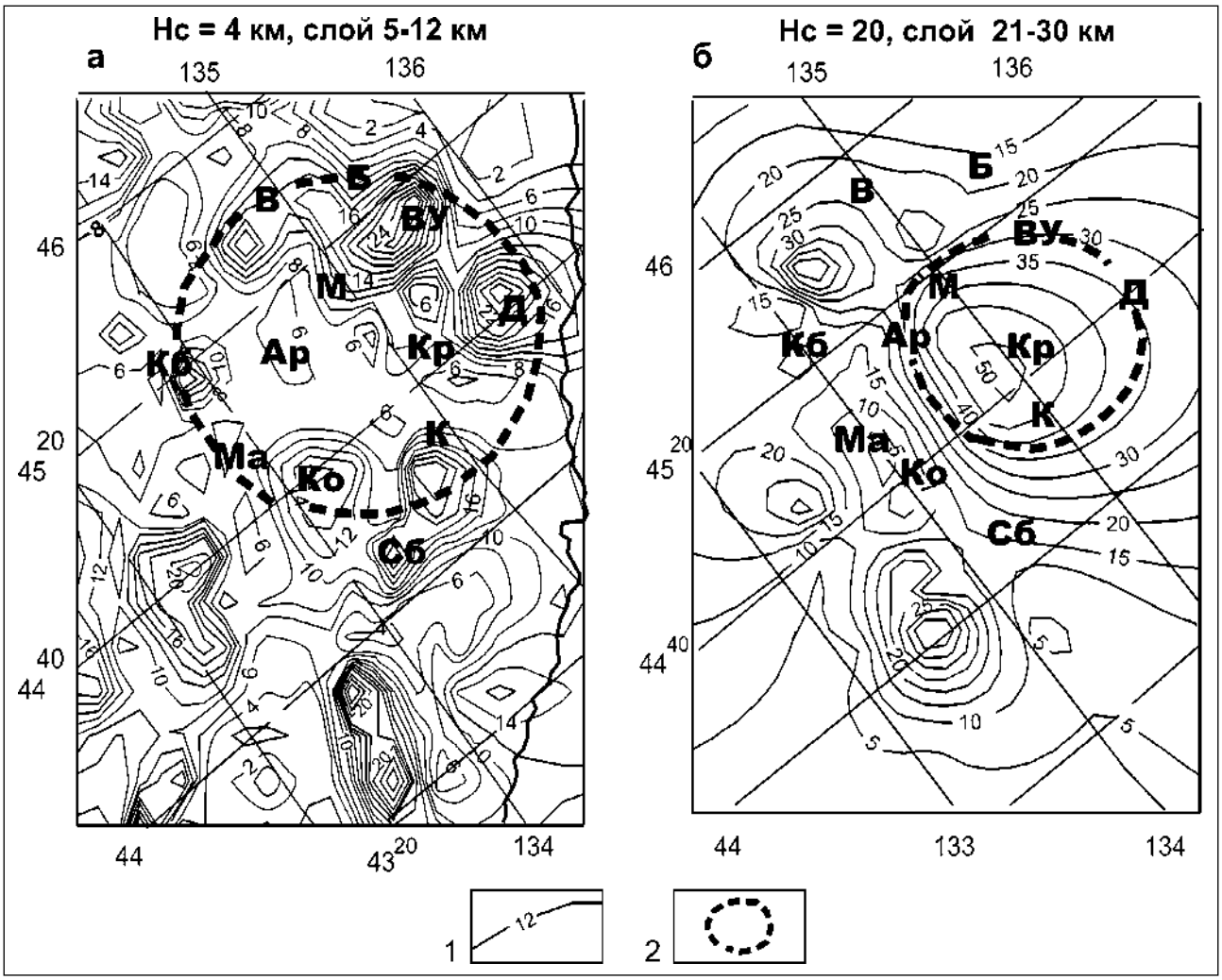

Рис. 3. Плотностная контрастность земной коры Южного Сихотэ-Алиня

1 – изолинии плотностной контрастности (1 ед. = 10^{-2}кг / м ^{2} / км); 2 – контур Южно-Сихотэ-Алинской структуры центрального типа. Обозначения рудных узлов и районов: Вз – Вознесенский олово-полиметалл-флюоритовый; Ма – Марьяновский олово-золоторудный, Ко – Кокшаровский олово-медно-свинцоворудный, Кб – Кабаргинский свинец-оловорудный, Ар – Ариадненский золото-медно-вольфрамовый, М – Малиновский золото-вольфрамовый, В – Восточный вольфрам-оловорудный, Б – Благодатный золото-олово-вольфрамовый, ВУ – Верхне-Уссурский олово-полиметаллический, Д – Дальнегорский полиметаллический, Кр – Краснореченский олово-полиметаллический, К – Кавалеровский оловорудный, Сб – Соболиный полиметалл-медно-золоторудный

Fig. 3. The crust density contrast in the South Sikhote-Alin

1 – isolines of density contrast (1 unit = 10^{-2}kg/m ^{2}/km); 2 – contour of the South-Sikhote-Alin structure of central type. Designations of ore knots and areas: Вз – Voznesensky tin-zinc-fluorite; Ма – Maryanovsky tin-gold, Ко – Koksharovsky tin-copper-led, Кб – Kabarginsky led-tin, Ар – Ariadnensky gold-copper-tungsten, М - Malinovsky gold-tungsten, В – tungsten-tin, Б – Blagodatniy gold-tin-tungsten, ВУ – Upper-Ussursky tin–led-zinc, Д – Dalnegorsk led-zinc, Кр – Krasnorechensky tin-led-zinc, Кв – Kavalerovsky tin, Сб – Soaboliniy led-zinc-copper and gold

сколько слоев с повышенными значениями плотностной контрастности. В Краснореченском эти слои 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.). Предполагается, что верхние слои ответственны за образование оловорудных месторождений, а средне-коровые – полиметаллических. В районах с золото-вольфрамовой минерализацией, тяготеющих к центру СЦТ, плотностные неоднородности – вероятные источники РМС – залегают преимущественно в интервале глубин 12–24 км.

Строение, реология и металлогеническая зональность локальных рудно-магматических систем

Дальнегорская интрузивно-купольная структура (рис. 4) является примером строения и металлогении СЦТ третьего иерархического уровня. Район характеризуется сложной соподчиненностью вулкано-тектонических структур разного ранга и существованием двух полярных по составу магматических комплексов: ольгинского сенонского липаритового и дальнегорского датского андезитового. Выходы довулканического фундамента среди обширного поля вулканитов предполагают существование интрузивно-купольной структуры в основании Дальнегорской СЦТ (рис. 4а), которая в срезе на глубине 6 км выражена максимумом плотностной контрастности (рис. 4б).

Дальнегорская СЦТ характеризуется металлогенической зональностью: в ее центре располагаются преимущественно полиметаллические месторождения, а на флангах – золоторудные проявления [13, 15] (рис. 4а). Скарновые (высокотемпературные) полиметаллические месторождения располагаются в центральной части СЦТ, а жильные (низкотемпературные) с серебром и золотом – на ее периферии [12, 13].

Таблица

Связь рудной минерализации с плотностными неоднородностями в земной коре

Table

The relationship of ore mineralization with density inhomogeneities in the Earth's crust

Рудные узлы и районы														
районы	оловорудные		оловополиметаллические			полиметаллические		золотовольфрамовые			широкая специализация			
Нс, км	К	В	Кр	ВУ	Ко	Д	Ол	М	Аз	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. 7

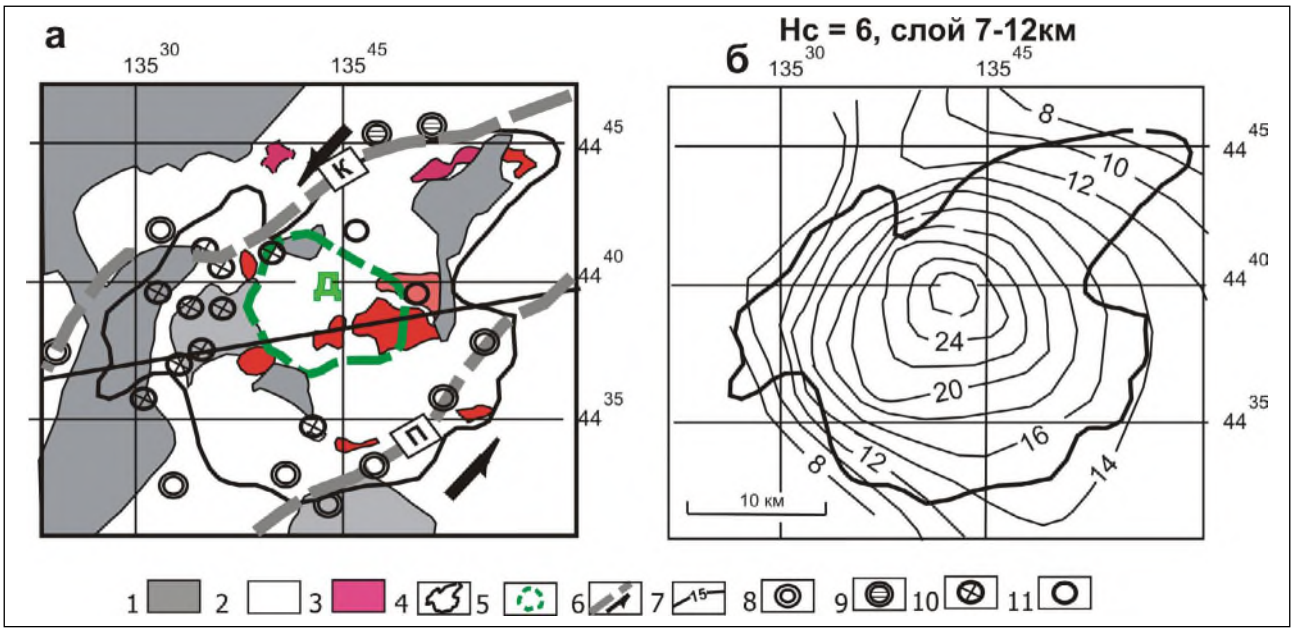

Рис. 4. Тектоническая схема Дальнегорской интрузивно-купольной структуры (а) [15] и плотностная контрастность земной коры на глубине 6 км (б)

1 – довулканический фудамент; 2 – вулканический покров; 3 – синвулканические гранитоиды; 4 – контур Дальнегорской интрузивно-купольной структуры; 5 – контур Дальнегорской вулкано-тектонической депрессии; 6 – сдвиги: П – Прибрежный, К – Колумбинский; 7 – изолинии плотностной контрастности на схеме «б»; 8–11 – месторождения и рудопроявления: золота (8), золото-серебряные (9), полиметаллические (10), олова (11)

Fig. 4. The tectonic scheme of Dalnegorsk intrusive-dome structure (a) [15] and density contrast of the crust at a depth of 6 km

1 – pre-volcanic basement; 2 – volcanic cover; 3 – sinvolcanic granitoids; 4 – contour of Dalnegorsk intrusive-dome structure; 5 – contour of the Dalnegorsk volcano-tectonic depression; 6 – shifts: П – Coastal, К – Kolumbinsky; 7 – isolines of density contrast on the scheme “б”; 8–11 – fields and rudoproyavleniye: gold (8), gold-silver (9), polymetallic (10), tin (11)

Белогорская интрузивно-купольная структура в Нижнем Приамурье (рис. 5) занимает промежуточное положение между СЦТ второго и третьего иерархических уровней. Она хорошо выражена в тектоническом рельефе земной поверхности и на геологических картах, а также в объемных распределениях формализованных параметров Z_0 и μ_z, составленных по результатам обработки мелкомасштабной (рис. 5а) и среднемасштабной гравиметрических карт (рис. 5б).

Первая модель обнаружила в Нижнем Приамурье обширное поднятие подкорового вязкого слоя, диагностируемого максимумом плотностной контрастности (рис. 6а), к флангам которого приурочена большая часть проявлений и месторождений золота, вольфрама и молибдена. В верхнекоровом срезе (рис. 5б) и разрезах (рис. 5в) Белогорская ИКС четко выражена поднятием в центре и окаймляющими его локальными прогибами. В своде структуры обнажается блок складчатого фундамента, пронизанный субвулканическими интрузивами, а в окружающих его вулканических комплексах просматривается зональность вещественного состава: позднепалеогеновые кислые вулканиты (дациты и липариты) в центре обрамляются на периферии структуры неогеновыми базальтоидами.

Подавляющая часть проявлений и все крупные месторождения золота в северной части Нижне-Амурского рудного района располагаются в зонах локальных прогибов складчатого фундамента, отображаемых распределением центров плотностных неоднородностей в интервале глубин 5–10 км (рис. 5*б*). Такое размещение месторожде-

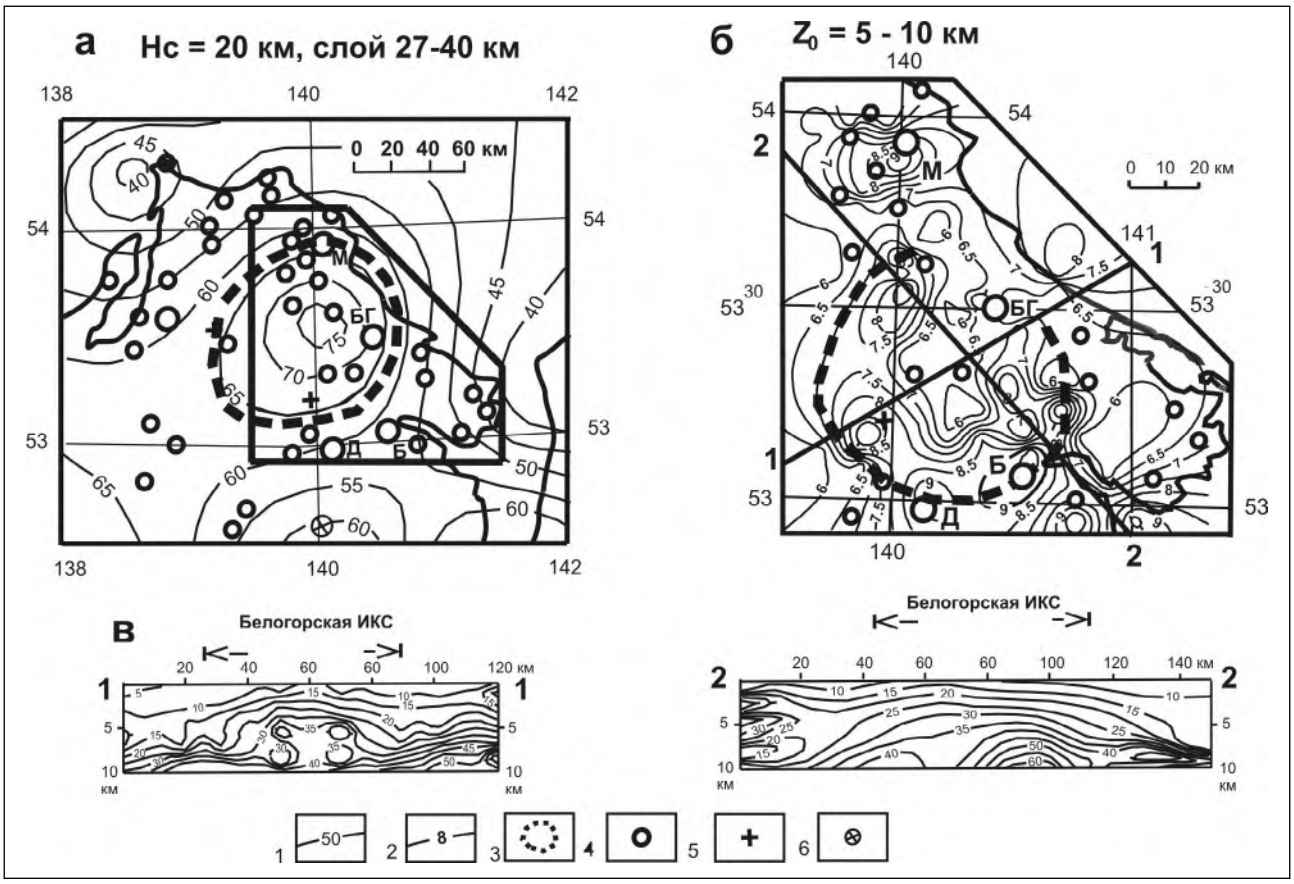

Рис. 5. Плотностная контрастность (а), распределения центров плотностных неоднородностей (б) и разрезы μ_z (x, y, Hc)-модели в Нижнем Приамурье (в)

1 – изолинии μ_z-параметра; 2 – глубина залегания центров аномальных масс; 3 – контур Белогорской ИКС; 4–6 – месторождения и рудопроявления золота (4), молибдена и вольфрама (5), полиметаллов (6). Месторождения: БГ – Белая Гора, М – Многовершинное, Б – Бухтянское, Д – Дыльменское

Fig. 5. Density contrast (a), distributions of the density inhomogeneity centers (b) and sections of μ_z (x, y, Hc) – model in the lower Amur Area (в)

1 – μ_z-parameter isolines; 2 – depth of centers of abnormal masses; 3 – contour of the Belogorskay SCT; 4–6 – ore fields of gold (4), molybdenum and tungsten (5), led-zinc (6). Deposits: БГ – Belogorskoye, М – Mnogovehshinnoye, Б – Bukhtyanskoye, Д – Dylmenskoye

ний может быть обусловлено большим вертикальным диапазоном рудогенных флюидов, несущих золоторудную минерализацию, и соответствующим увеличенным диапазоном связи рудных месторождений с плотностными неоднородностями земной коры. Из приводимых данных следует, что в результате синрудных или пострудных вертикальных подвижек золоторудная минерализация Нижне-Амурского района сохранилась в опущенных блоках. Верхнекоровый контур Белгорской СЦТ (рис. 5а) смещен относительно нижнекорового (рис. 5б), что объясняется вязким сдвигом по Центральному Сихотэ-Алинскому разлому [9].

Вознесенская интрузивно-купольная структура в Юго-Западном Приморье является примером проявления СЦТ в приповерхностном слое земной коры (интервал глубин 0–2 км). μ_z(x, y, Hc)-модель в этом районе получена в результате обработки гравиметрической карты М 1:25 000 (сеть наблюдений 25×100 м). Как и во всех структурах этого типа, Вознесенская СЦТ характеризуется концентрической зональностью аномалий плотностной контрастности: максимумы на флангах и минимум – в промежуточной зоне (рис. 6). В центре структуры наблюдается локальный максимум, в восточной части которого концентрируется

рудная минерализация. На флангах Вознесенской СЦТ большая часть оловорудных проявлений тоже приурочена к локальным максимумам плотностной контрастности. Металлогеническая зональность этой структуры выражена периферическим размещением оловорудных проявлений относительно высокотемпературных флюоритовых месторождений в центре.

Возраст Вознесенкой СЦТ является средне-позднепалеозойским. Ближе к центру структуры располагаются интрузивы габбро-монцонит-диоритов, прорывающие раннепалеозойские вознесенские граниты (рис. 6) на флангах этой структуры. Купольная форма Вознесенской СЦТ хорошо проявлена в разрезе μ_z (x, y, Hc)-модели (рис. 6), в котором свод структуры опущен (сброшен) на 1200 м, благодаря чему флюоритовая минерализация сохранилась вблизи земной поверхности. В советское время месторождения Вознесенского рудного района содержали 90% запасов флюорита в СССР.

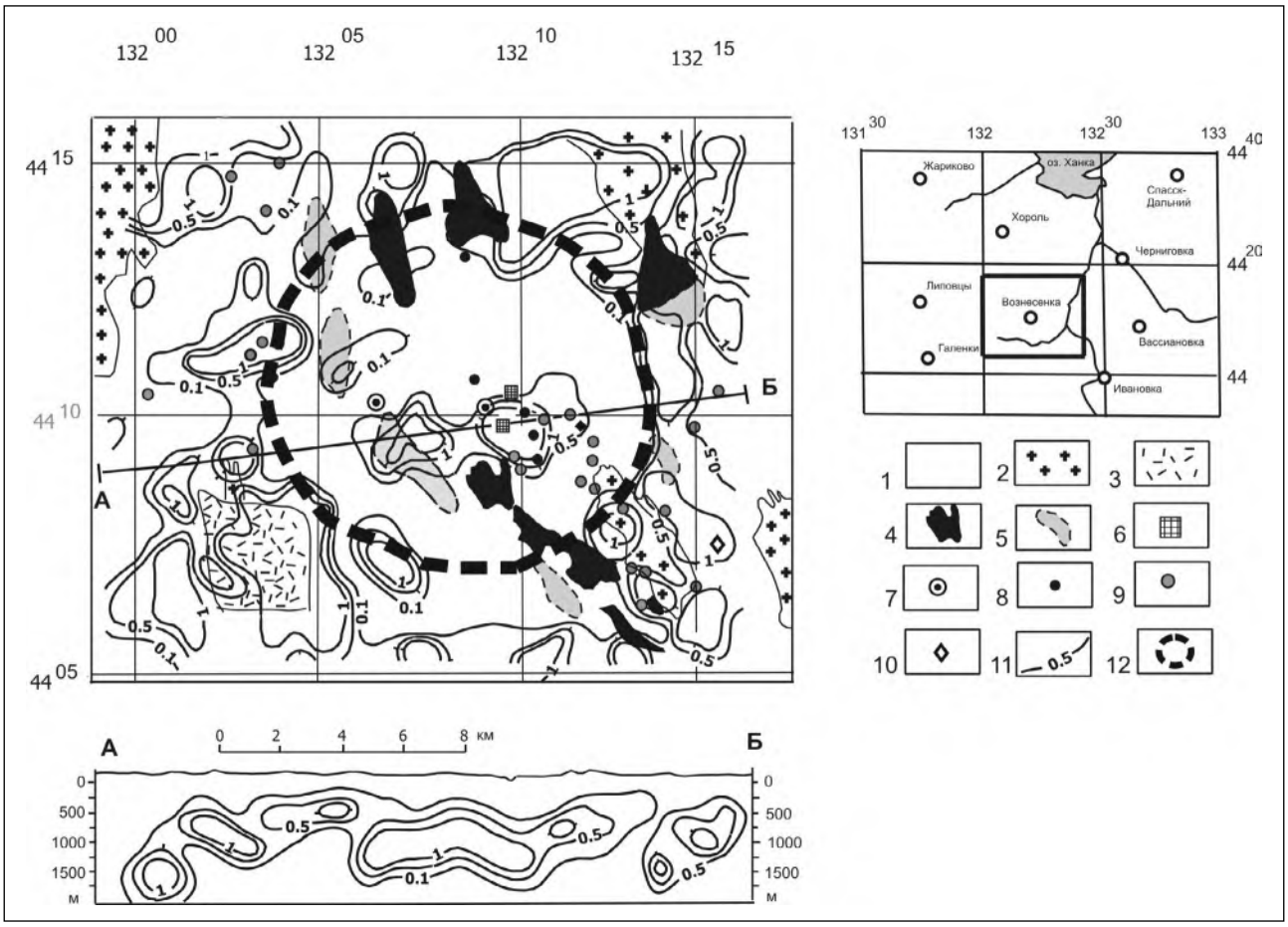

Рис. 6. Плотностная контрастность приповерхностного слоя земной коры (Hc = 1.25 км) в Вознесенском рудном районе

1 – палеозойский чехол Ханкайского массива; 2 – палеозойские граниты; 3 – палеозойские вулканиты; 4–5 – средне-позднепалеозойские габбро-монцонит-диориты на поверхности (4) и на глубине (5); 6–7 – месторождения флюорита (6) и полиметаллов (7); 8–10 – рудопроявления: флюорита (8), олова (9) и вольфрама (10); 11 – изолинии μ_z-параметра; 12 – контур центральной зоны интрузивно-купольной структуры

Fig. 6. Density contrast of the upper crust layer (Hc = 1.25 km) in the Voznesencky ore region

1 – PZ cover of the Khanka massif; 2 – PZ granites; 3 – PZ volcanic; 4–5 – Mid-Later-Paleozoic gabbro-montzodiorites in a surface (4) and deeper (5); 6–7 – deposits: fluorite (6) and polimenals (7); 8–10 – ore bearings: fluorite (8), tin (9), tangsten (10); 11 – μ_z-parameter isolines; 12 – counter of central zone of the intrusion-dome structure

Месторождение Лазурное в Соболином рудном узле является примером связи рудных тел с СЦТ четвертого порядка и зональности медно-золото-полиметаллической минерализации (рис. 7). 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.), что характерно для проявлений меди, золота и молибдена [8].

Фрактальность (самоподобие) структур центрального типа

На востоке Азии структуры центрального типа разного ранга характеризуются иерархической соподчиненностью и самоподобием. К структурами первого порядка относятся плюмы, характеризующиеся концентрически зональным размещением плотностных неоднородностей и соответствующих им рудных узлов и районов в диаметре 700–1000 км (рис. 1–2). СЦТ второго таксономического уровня диаметром 150–160 км представляют собой астеносферные ответвления плюмов или горячие точки, примером которых служит Южно-Сихотэ-Алинская СЦТ (рис. 3). Последняя может быть сателлитом Япономорского плюма, в голове которого установлено северо-западное ответвление астеносферы в интервале глубин 60–80 км под Южный Сихотэ-Алинь [11]. СЦТ третьего ранга представляют собой интрузивно-купольные структуры и вулкано-тектонические депрессии, определяющие размещение рудных полей внутри районов. Поперечные размеры таких структур составляют 15–25 км. Примерами СЦТ третьего уровня являются Дальнегорская и Вознесенская интрузивно-купольные структуры (рис. 4, 6). Структуры четвертого таксономического уровня сложены гранитоидными интрузивами и экструзивами с размерами 2–8 км, контролирующими локализацию рудных тел (рис. 7). 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.

Надпорядковые СЦТ представлены суперплюмами: Африканским и Тихоокеанским [3, 16], которые выражены полями горячей мантии с горизонтальными размерами в несколько тысяч километров на глубинах более 3000 км.

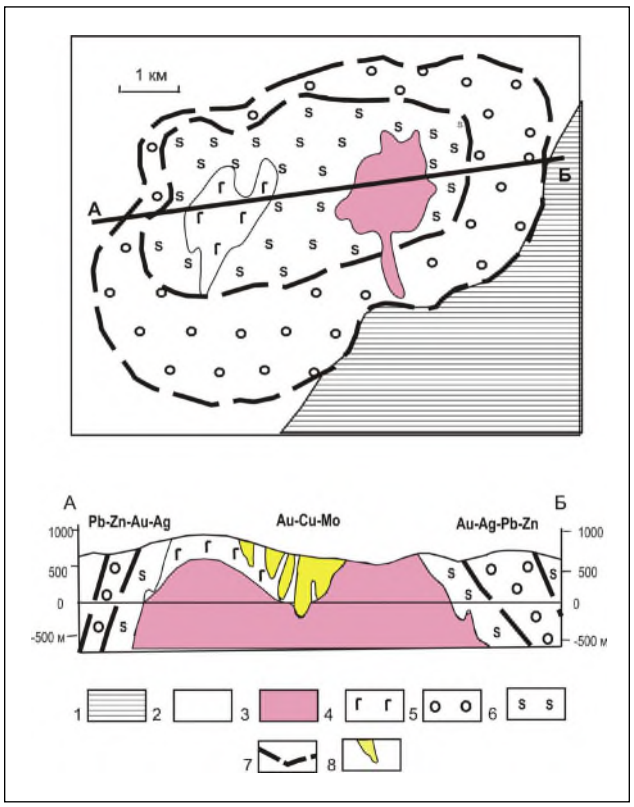

Рис. 7. Метаморфическая и металлогеническая зональность Лазурного месторождения в Соболином рудном узле [14]

1–2 – нижнемеловые терригенные породы: дивнинской и светловодненской 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

Fig. 7. Metamorphic and metallogenic zonality of the Lazurnoye deposit in the Soboliniy ore knot [14]

1–2 – Low Cretaceous terrigenous rocks: by divninsky and svetlovodnensky strata (1), katalevsky strata (2); 3 – granit-diorites; 4 – gabbro-diorites; 5 – quartz-sericite-chlorite metasomatits; 6 – biotitization and piritization; 7 – borders of metasomatic zones; 8 – gold rods

Заключение

В результате тектонического и металлогенического анализа 3D реологических гравитационных моделей в структурах центрального типа различного ранга в трех регионах и четырех рудных

районах дальневосточных окраин России установлены:

– общая морфология (самоподобие) концентрических пространственных распределений плотностной контрастности;

– общие черты металлогенической зональности СЦТ.

Это свидетельствует об универсальности тектонических обстановок, способствующих проникновению мантийных струй в верхние тектонические оболочки Земли и формировании вулкано-тектонических и интрузивно-купольных структур второго и третьего порядка в земной коре.

Имея одинаковое происхождение, структуры центрального типа различаются строением их верхних горизонтов. Интрузивно-купольные СЦТ, включая плюмы, характеризуются антиклинальной формой согласных глубинных границ (Индигиро-Колымская СЦТ), а вулкано-тектонические депрессионные – инверсией (обрушением) кровли магматических очагов над выступами астеносферы (Алдано-Зейский плюм) и подкоровыми магматическими диапирами (Южно-Сихотэ-Алинская и Вознесенская СЦТ).

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.

Металлогеническая зональность СЦТ первого ранга (плюмы) характеризуется четырьмя уровнями связи ареалов рудной минерализации с аномалиями плотностной контрастности. Наиболее глубинный уровень флюидо- и магмогенерации располагается в астеносфере на глубинах ниже 70 км. Он является источником преимущественно золото-молибденовой и медной минерализации. Второй уровень на глубинах 40–50 км соответствует вязкому подкоровому слою верхней мантии. Он является местом аккумуляции и перераспределения рудных концентраций Au, Mo, Cu, Pb и Zn. Третий уровень в интервале глубин 10–20 км представляет собой зону повышенной концентрации коровых магматических очагов – источников гранитоидных магм, несущих наиболее широкий спектр рудной минерализации (Au-Mo, Au-Ag, Cu-Mo-Au, Au-Pb-Zn, Au-W, W, W-Sn, Sn, Au-Sb, Sb). Четвертый уровень на глубинах 5–10 км является источником эпитермальной золото-серебряной, оловянной и золото-полиметаллической минерализации, связанной с вулканогенными и вулкано-плутоногенными магматическими формациями в самых верхних срезах СЦТ.

В Южно-Сихотэ-Алинской СЦТ второго таксономического уровня 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 повторяет закономерность, установленную в головах плюмов.

В СЦТ разного ранга одинаково проявлена метаморфическая зональность в распределении рудной минерализации. В центрах структур преобладает высокотемпературный тип рудогенеза (полиметаллические скарны и золото-кварцевая минерализация), а на флангах – низкотемпературная жильная оловянная и золото-сульфидная минерализация.

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.

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.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Балк П.И., Долгаль А.С., Мичурин А.В. Смешанный вероятностно-детерминистский подход к интерепретации данных гравиразведки, иагниторазведки и электроразведки // Доклады Академии наук. 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» // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1993. № 6. С. 123–127.
3. Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Богатиков О.А. Закономерности пространственного распределения «горячих точек» в мантии современной Земли // Доклады Академии наук. 2009. Т. 427, № 5. С. 654–658.

4. 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.
5. Петрищевский А.М. Одно практическое следствие теорем единственности и эквивалентности обратных задач гравитационного потенциала // Геофизика. 2020. № 4. С. 98–111.
6. Петрищевский А.М. Геологические задачи, решаемые при вероятностно-детерминированном подходе к интерпретации гравитационных аномалий // Геофизика. 2021. № 2. С. 87–97.
7. Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П. Реология и металлогения Мая-Селемджинского плюма // Доклады Академии наук. 2011. Т. 440, № 2. С. 207–212.
8. 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.
9. Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П. Связь рудных месторождений Нижнего Приамурья с глубинными структурами земной коры // Доклады Академии наук. 2014. Т. 457, № 5. С. 597–602.
10. 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.
11. Петришевский А.М., Емельянова Т.А., Изосов Л.А. Возрастные взаимоотношения рифтогенеза, субдукции и плюмовых процессов на восточной окраине Азии // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2021. № 4 (52). С. 22–45.
12. Раткин В.В., Симаненко Л.Ф., Елисеева О.А. Микрофации и минеральные ассоциации серебро-полиметаллических руд Майминовского жильного месторождения (Сихотэ-Алинь, Дальнегорский рудный район) // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37, № 6. С. 76–94.
13. Юшманов Ю.П. Структурные особенности локализации золотосеребряного оруденения Дальнегорского рудного узла (Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс) // Тихоокеанская геология. 1997. № 2. С. 32–37.
14. Юшманов Ю.П. Структура и зональность Au-Cu оруденения месторождения Лазурное в Центральном Сихотэ-Алине // Тихоокеанская геология. 2002. Т. 21, № 2. С. 85–90.
15. Юшманов Ю.П. Тектоника, глубинное строение и металлогения Прибрежной зоны Южного Сихотэ-Алиня / Ю.П. Юшманов, А.М. Петрищевский. Владивосток: Дальнаука, 2004. 111 с.
16. Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle // Earth and Planetary Science Letters. 2003. Vol. 205. P. 295–308.

REFERENCES:

1. Balk P.I., Dolgal A.S., Michurin A.V. A Mixed Probabilistic-Deterministic Approach to Interpretation of Gravity, Magnetic, and Electric Prospecting Data. *Doklady Akademii Nauk*, 2011, vol. 438, no. 4, pp. 532–537. (In Russ.).
2. Blokh Yu.I., Kaplun D.V., Konyaev O.N. The interpretation of potential fields by methods of singular points in the SINGULAR integrated system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka,* 1993, no. 6, pp. 123–127. (In Russ.).
3. Kovalenko V.I., Yarmolyuk V.V., Bogatikov O.A. Regularities of Spatial Distribution of Mantle Hot Spots of the Modern Earth. *Doklady Akademii Nauk*, 2009. T. 427, № 5. C. 654–658. (In Russ.).
4. Petrishchevsky A.M. *Gravitatsionnyi metod otsenki reologicheskikh svoistv zemnoi kory i verkhnei mantii (v konvergentnykh i plyumovykh strukturakh Severo-Vostochnoi Azii)* (Gravity method for evaluation of rheological properties of the crust and uppermost mantle (in the convergent and plume structures of the North-East Asia)). Moscow: Nauka Publ., 2013. 192 p. (In Russ.).
5. Petrishchevsky A.M. One Practical Consequence from Theorems of Uniqueness and Equivalence of Inverse Gravity Problem. *Geofizika*, 2020, no. 4, pp. 98–111. (In Russ.).
6. Petrishchevsky A.M. Geological Problems Deciding at the Probabilistic-Deterministic Approach to Interpreting of Gravity Anomalies. *Geofizika,* 2021, no. 2, pp. 87–97. (In Russ.).
7. Petrishchevsky A.M., Yushmanov Y.P. Rheology and Metallogeny of the Maya-Selemdzha Plume. *Doklady Akademii Nauk,* 2011, vol. 440, no. 2, pp. 207–212. (In Russ.).
8. Petrishchevsky A.M., Yushmanov Y.P. Geophysical, Magmatic, and Metallogenic Manifestations of a Mantle Plume in the Upper Reaches of the Aldan and Amur Rivers. *Geologiya i Geofizika*, 2014, vol. 55, no. 4, pp. 568–593. (In Russ.).
9. Petrishevsky A.M., Yushmanov Y.P. Correlation Between ore Deposits of The Lower Amur River Region with the Deep Structures of the Earth's

Crust. *Doklady Akademii Nauk*, 2014, vol. 457, no. 5, pp. 597–602. (In Russ.).
10. Petrishchevsky A.M., Yushmanov Yu.P. Density Contrast, Deep Structure, Rheology and Metallogeny of the Crust and Upper Mantle of the Verkhoyano-Kolymsky Region. *Litosfera*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 491–516. (In Russ.).
11. Petrishchevsky A.M., Emelyanova T.A., Izosov L.A. Age Relationships Of Rifting, Subduction and Plume Processes on the Eastern Margin of Asia. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o zemle*, 2021, no. 4 (52), pp. 22–45. (In Russ.).
12. Ratkin V.V., Simanenko L.F., Eliseeva O.A. Microfacies and Mineral Assemblages of Silver–Base-Metal Ores of the Maiminovskoe Vein Deposit (Sikhote-Alin, Dal'negorsky Ore District). *Tikhookeanskaya Geologiya*, 2018, vol. 37, no. 6, pp. 76–94. (In Russ.).
13. Yushmanov Yu.P. On the Specific Localization Features of Gold-Silver Mineralization in the Dal'negorsk ore Field (Eastern Sikhote-Alin Volcanic Belt). *Tikhookeanskaya Geologiya*, 1997, no. 2, pp. 32–37. (In Russ.).
14. Yushmanov Yu.P. Structure and Zonality of Au-Cu Mineralization, the Lazurny Deposit, Central Sikhote-Alin. *Tikhookeanskaya Geologiya*, 2002, vol. 21, no. 2, pp. 85–90. (In Russ.).
15. Yushmanov Yu.P. *Tektonika, glubinnoe stroenie i metallogeniya Pribrezhnoi zony Yuzhnogo Sikhote-Alinya* (Tectonics, deep structure and metallogeny of the Coastal zone of Southern Sikhote-Alin), Yu.P. Yushmanov, A.M. Petrishchevsky. Vladivostok: Dal'nauka Publ., 2004. 111 p. (In Russ.).
16. Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, vol. 205, pp. 295–308.

PROBABILISTIC-DETERMINISTIC GRAVITY MODELS OF THE CENTRAL TYPE STRUCTURES IN THE RISSIAN FAR EAST

A.M. Petrishchevsky

As a result of the tectonic and metallogenichesky analysis of the probabilistic-deterministic gravity models reflecting rheological properties of geological mdia in the territory of the Far East region of Russia structures of the central type (SCT) of four hierarchical levels: 1) – plumes, 2) – regional South-Sikhote-Alin, 3) – Dalnegorsk, Belogorsky magmatic dome structures, 4) - subvolcanic intrusion in the Sabolin ore area are characterized in 3D space. SCT of different taxonomical levels are characterized by identical concentric zonality of anomalies of density contrast and the areas of an ore mineralization corresponding to them. On the basis of coincidence of ore areas to deep anomalies of density contrast the model of metallogenic zonality of the crust in which probable fluid and magmatic sources of tin fields lie at a depth of 2–6 km, tin-polymetallic in the range of depths of 4–12 km, polymetallic 6–20 km, and gold-tungsten – 14–24 km is developed. In the plume heads of the deepest level of generation of a gold-molybdate and copper mineralization locates in the asthenosphere at depths below 70 km. The second level at depths of 40–50 km corresponds to a viscous subcrustal layer of the upper mantle where there is an accumulation and redistribution of ore concentration of Au, Mo, Cu, Pb and Zn. The third level of fluid-magma-generation in the range of depths of 10–20 km represents a zone of the increased concentration of crustal magmatic centers – sources of the granitoid magmas bearing the widest range of an ore mineralization (Au-Mo, Au-Ag, Cu-Mo-Au, Au-Pb-Zn, Au-W, W, W-Sn, Sn, Au-Sb, Sb).

Keywords: *gravity models, rheology, structures of the central type, metallogenical zonality, Russian Far East region.*

Reference: Petrishchevsky A.M. Probabilistic-deterministic gravity models of the central type structures in the Rissian Far East. *Regional'nye problemy,* 2024, vol. 27, no. 4, pp. 16–29. (In Russ.). DOI: 10.31433/2618-9593-2024-27-4-16-29.

Поступила в редакцию 12.04.2024
Принята к публикации 17.12.2024