

ГРАВИТАЦИОННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ПРИАМУРЬЯ (ПРОСТРАНСТВЕННО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ)

А.М. Петрищевский

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, г. Биробиджан

Рассматриваются структурные, металлогенические и геодинамические особенности пространственных распределений плотностных неоднородностей “компактного” типа в земной коре и верхней мантии Приамурья. В результате исследований установлена корреляция нижнекоровых гравитационных возмущений с рельефом границы Мохоровичича и приповерхностными тектоническими структурами: наблюдается приближение глубинных плотностных неоднородностей к земной поверхности под кайнозойско-мезозойскими наложенными впадинами, Буреинским мезозойским прогибом и погружение – под палеозойскими аккреционно-складчатыми комплексами. Пространственные взаимоотношения статистических гравитационных границ в нижней части коры и верхней мантии позволяют предполагать существование клиноформной пластины, характеризующейся признаками внедрения под складчатое обрамление восточной части Амурского супертеррейна со стороны Западно-Тихоокеанской литосферной плиты. По совпадению приповерхностных рудных месторождений с аномалиями градиента плотности глубинных слоев земной коры и верхней мантии определены черты региональной вертикальной металлогенической зональности литосферы Приамурья, которая выражается закономерным увеличением вертикальной протяженности рудномагматических систем от преимущественно оловоносных к преимущественно золотоносным: Sn (5–15 км) → W, Mo (30–60 км) → Au (80–100 км). Пространственная связь плотностных неоднородностей нижнекорового слоя (глубина залегания 30 км) с очагами землетрясений может быть использована при долгосрочных прогнозах сейсмичности региона.

Ключевые слова: гравиметрия, земная кора, верхняя мантия, металлогения, сейсмичность, Приамурье.

ВВЕДЕНИЕ

При интерпретации региональных гравитационных аномалий Приамурья доминирует практика детерминированного объяснения и аналитического описания плотностных неоднородностей, результатом которых является уточнение глубинных границ тектонических и магматических структур, пространственная параметризация крупных тектонических нарушений, выделение зон разуплотнения и уплотнения земной коры и верхней мантии, реже – моделирование глубинных границ раздела структурно-вещественных комплексов, увязываемых с результатами сейсмических зондирований (ГСЗ, МОВЗ). С перечисленными элементами глубинного геологического строения сопоставляются структурные [21, 23, 29, 44], магматические [34], геодинамические [10, 12, 23, 35] и металлогенические [2, 4, 5, 8, 24, 26, 34] особенности региона.

Детерминированный подход к истолкованию и количественной интерпретации гравитационных

аномалий методологически является наиболее предпочтительным [41], однако аналитическое (“конечно-элементное” [41], или “конечно-параметрическое” [42]) описание сложных систем плотностных неоднородностей в районах с многоярусным геологическим строением, к каковым относится территория Приамурья, сталкивается с неопределенностью геологической природы “глубинных” гравитационных аномалий и острым дефицитом априорной информации (редкая сеть сейсморазведочных профилей и отсутствие глубоких скважин), что нередко вынуждает исследователей отказываться от параметрического описания аномалиеобразующих объектов и ограничиваться районированием геологического пространства [22, 24, 26], либо изучением корреляционных связей гравитационных аномалий с металлогеническими [2, 24] и геодинамическими [11] характеристиками земной коры.

Промежуточным между аналитическим и эвристическим подходами к интерпретации гравитационных неоднородностей земной коры и верхней мантии

является функционально-статистический подход, при котором неоднозначное геологическое истолкование элементарных гравитационных аномалий сочетается с однозначным определением положения особых точек возмущающих тел простых модельных классов. В рамках второй парадигмы теории интерпретации гравитационных аномалий такой подход удовлетворяет концепции смешанных функционально-статистических моделей [38–40], основывающихся на принципах формализации, оптимизации, автоматизации и системности модельных построений, а в последнее время он характеризуется как аппроксимационный [42].

Формирование массива особых точек плотностных неоднородностей, описывающего изучаемый объем геологического пространства, может быть осуществлено в результате массовой, или “тотальной” [6], интерпретации элементарных гравитационных возмущений, относимых к определенному классу источников. При гравитационном и магнитном моделировании тектонических границ второго класса – дискретных (прерывистых) границ, представляющих собой совокупность особых точек геологического пространства [17], чаще используются два класса модельных тел: вертикальный параллелепипед [6, 7] или тонкий вертикальный пласт [43]. Обе аппроксимации адекватны геологическим средам, в которых преобладают вертикальные нарушения сплошности геологического пространства (блоково-слоистая модель). Однако в районах с широким развитием разновозрастного магматизма и аккреционных комплексов, характеризующихся сложными распределениями плотностных неоднородностей, в т.ч. большим количеством ограниченных по простиранию неровных и наклонных границ, возникает необходимость выбора более широкого класса модельных источников, одним из которых может быть плотностная неоднородность с квазиизометричным поперечным сечением (компактная неоднородность), удовлетворяющая условию: $Z_1 > 0.5 D$ (Z – глубина до поверхности тела, D – его горизонтальные размеры). Глубина центра масс таких неоднородностей определяется однозначно с точностью не грубее 30 %, а при: $Z_1 > 0.7 D$ погрешности составляют менее 15 % [30, стр. 34]. В идеальном случае ($Z_1 \gg D$) центр тяжести такой неоднородности совпадает с центром эквивалентного по массе шара или материальной точкой.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках функционально-статистического аппроксимационного подхода к интерпретации гравитационных аномалий для территории Приамурья вы-

полнено исследование пространственных распределений плотностных неоднородностей земной коры и верхней мантии до глубины 100 км по параметрам: Z_0 и μ^H , где: Z_0 – глубина залегания центра локальной плотностной неоднородности с квазиизометричным поперечным сечением, км; μ^H – вертикальный градиент поверхностной плотности эквивалентного сферического источника при изменении радиуса сферы (размерность параметра: кг / м² / км):

$$\mu^H = \frac{VzmZ_0}{4\pi K(Z_0 - H_k)^2}, \text{ где:} \quad (1)$$

Vzm – амплитуда локального гравитационного возмущения, мГл; H_k – глубина поверхности “конденсации” масс объемных источников на поверхность эквивалентных сфер, км; K – гравитационная постоянная ($6.673 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$).

Теоретическая основа методики изучения неоднородности геологического пространства по параметру μ^H исходит из феномена тождественности плоского и объемного гравитационных потенциалов [20]. Масса (M) объемного источника в точке Vzm ($x=0$) может быть определена из выражения [13, стр. 256]:

$$M = \frac{VzmZ_0^2}{K} \quad (2)$$

Согласно принципу “выметания” (или конденсирования) массы объемного источника на поверхность эквивалентной сферы радиуса (r):

$$\mu = \frac{M}{S} = \frac{VzmZ_0^2}{4\pi K r^2}, \text{ где:} \quad (3)$$

μ – поверхностная плотность сферического источника гравитационной аномалии; Z_0 – глубина залегания центра объемного и эквивалентного ему сферического источника; $S = 4\pi r^2$ – площадь эквивалентной сферы; r – радиус сферы.

При $Z_0 = r$ выражение (3) примет вид: $\mu = Vzm/4\pi K$ и, таким образом, вариации поверхностной плотности сферических источников, касательных к земной поверхности, зависят только от амплитуд гравитационных аномалий. Поверхностная плотность сферического источника в других точках ($H_k = Z_0 - r$) на вертикальной оси, проходящей через центр источника, будет описываться выражением:

$$\mu = \frac{VzmZ_0^2}{4\pi K(Z_0 - H_k)^2} \quad (4)$$

При малых размерах элементарной площадки (δS) плотность сферы в точке (H_k) близка к плотнос-

ти бесконечно тонкого горизонтального слоя. Разделив (4) на Z_0 , что эквивалентно дифференцированию поверхностной плотности (μ) по глубине (Z), получим выражение (1), физический смысл и размерность которого соответствуют вертикальному градиенту поверхностной плотности сферического источника при изменении его радиуса ($r = Z_0 - H_k$).

Измерения амплитуд гравитационных возмущений (V_{zm}) и вычисления соответствующих им глубин залегания центров масс гравитационных неоднородностей (Z_0) производятся по графикам аномалий V_z , снимаемых с гравиметрических карт по параллельным и равноотстоящим друг от друга профилям. В рассматриваемых ниже моделях расстояние между расчетными профилями широтного направления составляет 25 км. Значения (x, y, Z_0, V_{zm}, μ^H) определяются для всех квазиизометричных возмущений поля обоих знаков на линейном фоне (индивидуальном для каждой конкретной элементарной аномалии) в широком частотном диапазоне, при этом фрагменты линейного фона аномалий высших порядков являются элементами аномалий низших порядков. В сложных случаях для сглаживания аномалий используется сплайн-аппроксимация. С принципами и техникой выделения гравитационных возмущений подробнее можно ознакомиться в работах [28, 30].

Вычисляемые параметры (Z_0, V_{zm}, μ^H) каждой единичной аномалии, при таком подходе, не имеют точно обусловленного геологического содержания и являются случайными величинами, характеризующими только первые гармонические моменты ($M, M \cdot Z_0$) возмущающих масс с предположительным квазиизометричным сечением, а получаемые в результате расчетной процедуры пространственные модели $Z_0(x, y)$ и $\mu^H(x, y, H_k)$ являются вероятностными (статистическими). Исследования эквивалентности гравитационных аномалий сложных систем плотностных неоднородностей [15, 27, 33 и др.] доказывают, что для сложной системы источников (многосвязная область) всегда существует эквивалентное звездное* тело (или односвязная область), центр массы которого расположен в центре тяжести системы и, таким образом, анализируемые ниже модели характеризуют собой общие (или доминирующие) закономерности взаимного пространственного расположения источников гравитационных возмущений различной (или смешанной) геологической природы (тектонической, магматической, метаморфической и др.). Такие моде-

ли можно назвать “теневыми”, поскольку они “просвечивают” скрытые особенности разновозрастных и наложенных друг на друга глубинных геологических структур.

При построении рассматриваемой ниже объемной модели $\mu^H(x, y, H_k)$ выполнялось условие, при котором глубина поверхности “конденсации” масс (H_k) всегда располагалась над слоем, для которого вычислялся параметр μ^H : $(Z_0 - H_k) > 1$ км. Поэтому выражение (1) никогда не достигает бесконечности, а объемная модель $\mu^H(x, y, H_k)$ не испытывает разрывов в точках: $Z_0 = H_k$.

Опыт использования параметра μ^H [19, 30] при изучении приповерхностных ($H_k \approx 0$) геологических структур в рудных районах обнаружил устойчивую корреляцию высоких значений этого параметра с областями (узлами, зонами) проявления интенсивных и контрастных по составу магматических процессов, участками интенсивных метасоматических изменений горных пород, рудными полями, а при региональных исследованиях – с рудными узлами, районами и областями современной геодинамической активности литосферы (аномалиями сейсмичности, теплового потока и современных вертикальных движений). Этот параметр является формальным показателем степени плотностной неоднородности геологического пространства, который, наряду со “структурным” носителем геологической информации (Z_0), содержит и “вещественные” (M, μ). Наиболее контрастно параметр μ^H выделяет плотностные неоднородности, залегающие вблизи поверхности конденсации (H_k), поскольку при $Z_0 \rightarrow H_k, \mu^H \rightarrow \infty$. Для территорий Среднего (левобережная часть) и Нижнего Приамурья по вышеописанной методике составлен пакет карт-срезов аномалий μ^H ($H_k = 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80$ и 100 км), формирующих, в совокупности, объемную модель плотностной неоднородности земной коры и верхней мантии: $\mu^H(x, y, H_k)$. Трехмерная модель позволяет строить 2-мерные разрезы $\mu^H(x, H_k)$ по любому выбранному направлению (см. рис. 5 и 6). Реализуемый автором подход к моделированию геологического пространства концептуально близок к построениям Ю.Я. Ващилова [6, 7], которые он называет “гравиметрической томографией” [7].

Структурные особенности распределений элементарных гравитирующих масс вблизи главных тектонофизических границ раздела земной коры и верхней мантии изучены непосредственно по выборкам Z_0 (рис. 1–3), а структурно-вещественные – по параметру μ^H (рис. 5–7).

*В теории гравитационного потенциала звездным считается тело, луч из центра которого пересекает его поверхность только один раз.

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПЛОТНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Ни более контрастными границами раздела земной коры в Приамурье являются подошва сиалических комплексов и граница Мохоровичича. Первая, по данным глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), залегает на глубинах 17–22 км, вторая – на глубинах от 32 км до 40 км [32]. В результате комплексной интерпретации сейсмических и гравиметрических данных Рейнлибом Э.Л. [44] и Малышевым Ю.Ф. [23] составлены схемы рельефа подошвы земной коры Приамурского региона.

Распределение эквивалентных компактных плотностных неоднородностей, залегающих в переходном слое “кора–мантия” (рис. 1), в общих чертах

согласуется с рельефом подошвы земной коры, определяемой по сейсмогравиметрическим данным [23]: приближение к поверхности локальных гравитирующих масс нижнекорового уровня наблюдается в пределах Амуро-Зейской и Средне-Амурской (северо-восточный фланг) мезозойско-кайнозойских впадин, а погружение – соответствует положению Хэган-Чегдомынского блока [9]. “Статистическая гравитационная модель подошвы земной коры” (рис. 1) характеризуется дополнительными (по сравнению с данными предшественников) особенностями: наблюдается локальное поднятие глубинных плотностных неоднородностей в районе Буреинского мезозойского наложенного прогиба, а на северном фланге Буреинского массива (Хумахэ-Гонжинско-Мамынский и Туранский блоки) и в прилегающей части Монголо-Охотс-

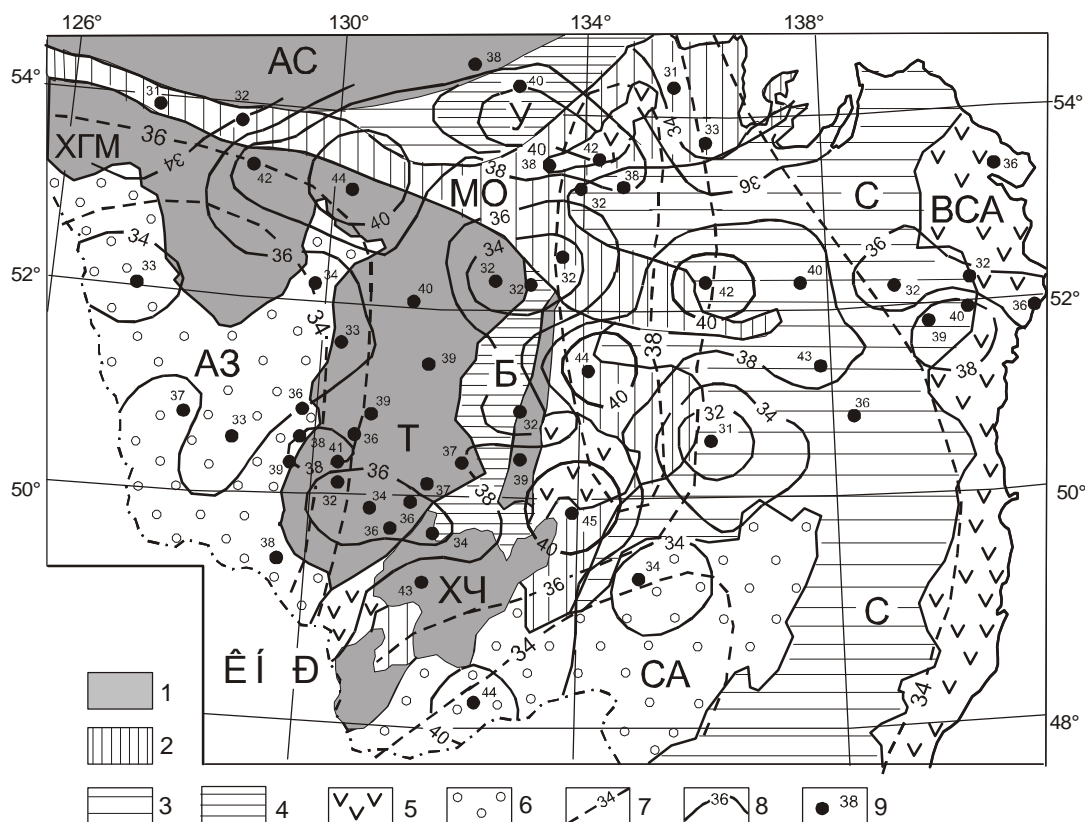


Рис. 1. Схема распределения плотностных неоднородностей в переходном слое “кора–мантия” (30–45 км от поверхности).

1 – блоки домезозойского кристаллического основания композитных массивов (AR – PZ₁); 2–3 – аккреционно-складчатые и складчато-надвиговые системы (2 – палеозойские, 3 – мезозойские); 4 – мезозойские наложенные прогибы; 5 – мезозойские вулканические прогибы и пояса; 6 – мезозойско-кайнозойские наложенные впадины; 7 – изолинии глубины залегания подошвы земной коры, по Малышеву Ю.Ф. [23]; 8 – изолинии глубины залегания центров плотностных неоднородностей, км; 9 – точки расчета глубин залегания центров плотностных неоднородностей, км.

Тектонические структуры по Геологической карте Приамурья и сопредельных территорий [9]: AC – Алдано-Становой щит; блоки композитных массивов Амурского геоблока: Т – Туранский, ХГМ – Хумахэ-Гонжинско-Мамынский, ХЧ – Хэган-Чегдомынский; складчатые системы: МО – Монголо-Охотская, С – Сихотэ-Алинская; мезозойские наложенные прогибы: Б – Буреинский, У – Удский; вулканические пояса: ВСА – Восточно-Сихотэ-Алинский; мезозойско-кайнозойские наложенные впадины: АЗ – Амуро-Зейская, СА – Средне-Амурская.

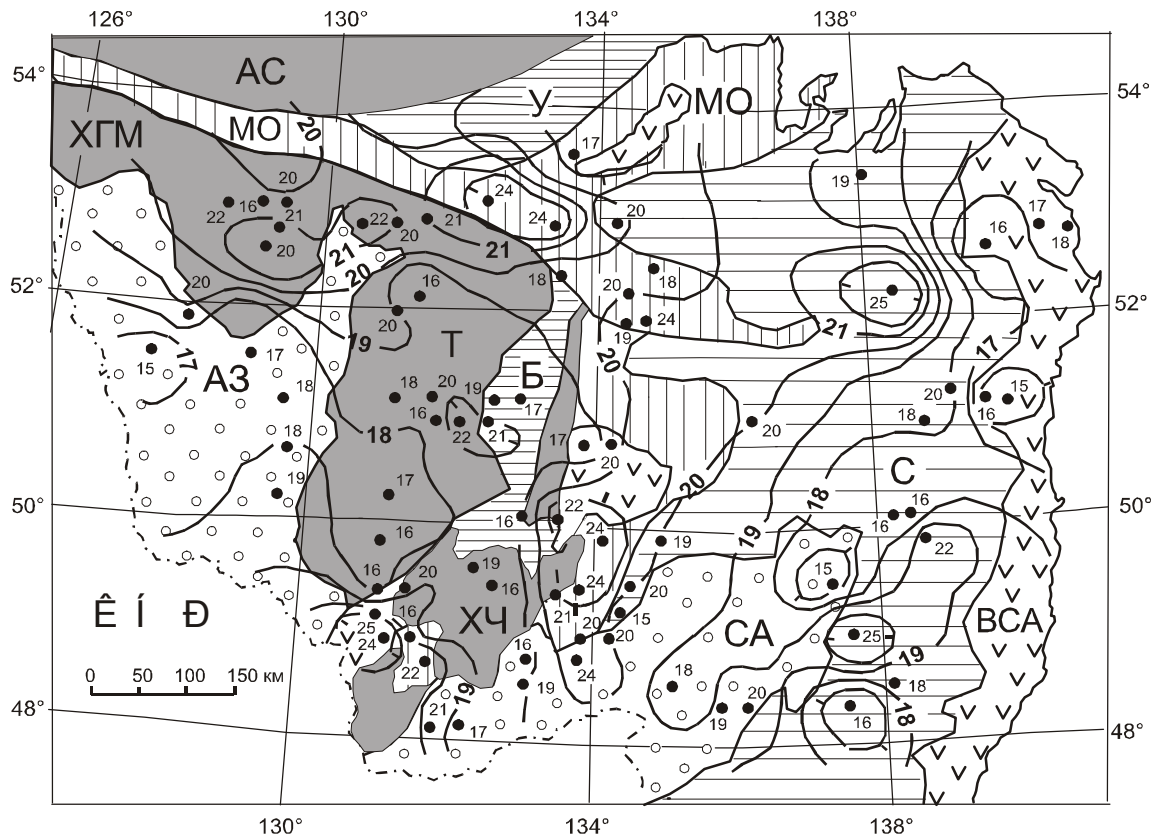


Рис. 2. Схема распределения плотностных неоднородностей в среднекоровом слое (15–25 км от поверхности).

Условные обозначения на рис. 1.

кой складчатой системы, несмотря на неблагоприятное широтное расположение расчетных профилей, обнаруживается цепочка локальных погружений плотностных неоднородностей, которая на востоке смыкается с прогибом под Хэган-Чегдомыньским блоком. Таким образом, Буреинский [21, 24], или Суннэнь-Туранский [9], массив, включаемый в состав Амурского супертеррейна [37], в пределах территории России с двух сторон (с севера и востока) ограничен от сопредельных тектонических структур нижнекоровыми прогибами условной тектонической границы второго класса [17], которая близка к положению подошвы земной коры (рис. 1).

Распределение плотностных неоднородностей в слое 15–25 км от поверхности (рис. 2) и приповерхностные геологические наблюдения [9] свидетельствуют о том, что прогибы в основании земной коры унаследованы средне- и верхнекоровыми структурами, которые окаймляют Амурский супертеррейн с севера и востока. Области относительно прогибания статистических гравитирующих границ на двух глубинных уровнях (рис. 1, 2) совпадают

с местоположением палеозойских складчатых (аккреционно-складчатых [37]) комплексов Монголо-Охотской системы и Хэган-Чегдомыньского блока и укладываются в схему окраинных (периферических) прогибов Суннэнь-Туранского массива [9, рис. 2–4]. Модель распределения гравитирующих масс в среднем слое земной коры (рис. 2) позволяет предположить продолжение глубинных структур Туранского блока к юго-востоку, где они резко дискордантны дислокациям плотностных неоднородностей Хэган-Чегдомыньского блока. Поперечное поднятие среднекоровой статистической гравитирующей границы в этом районе совпадает с местоположением Малохинганского тектонического блока третьего порядка, в пределах которого широко распространены ордовикские граниты [9], а по оценкам Ю.Ф. Малышева [22] здесь предполагается сокращение мощности (редуцирование) сиалического слоя земной коры относительно сопредельных районов Хэган-Чегдомыньского блока.

В пределах крупнейших наложенных впадин Приамурья (Амуро-Зейской и Средне-Амурской) на-

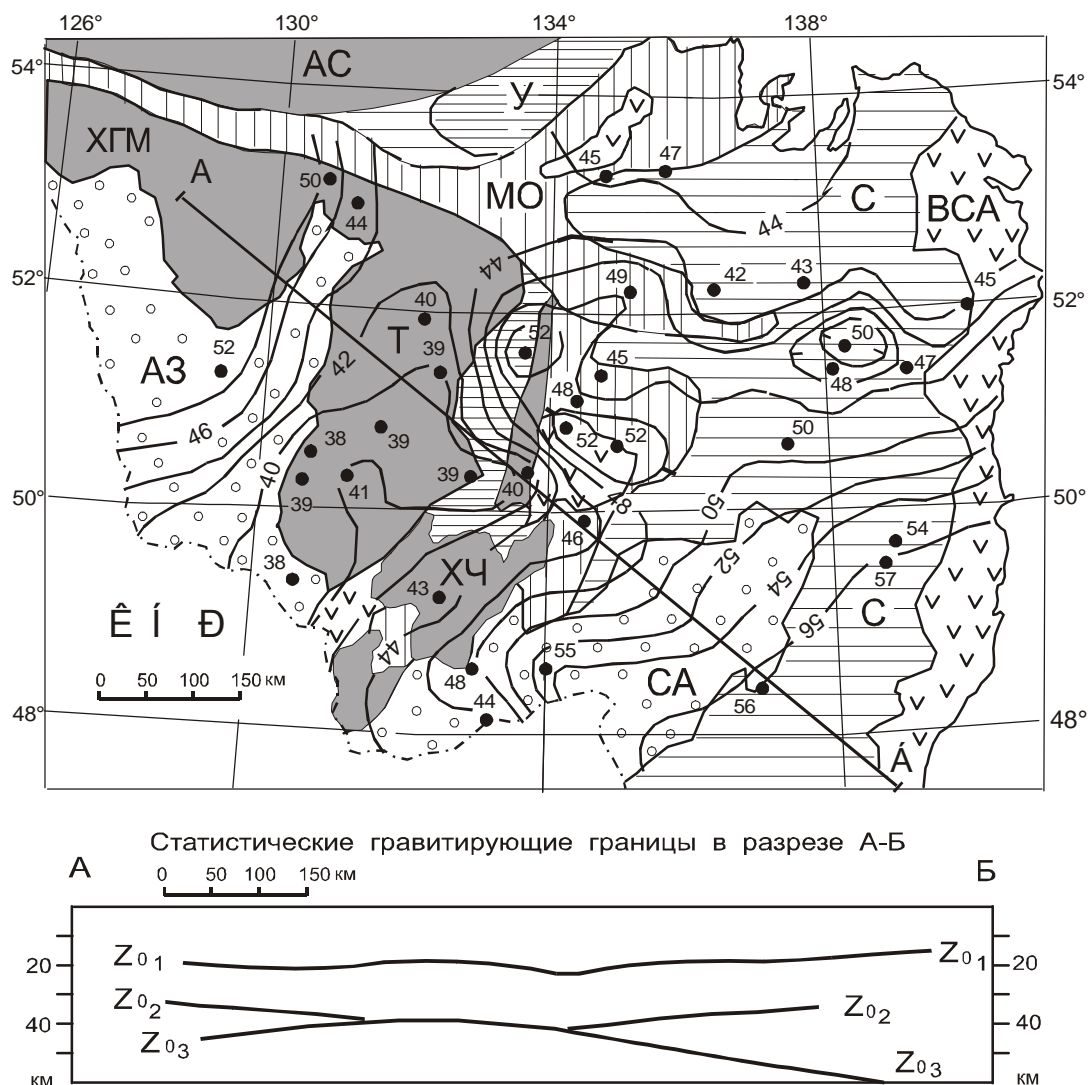


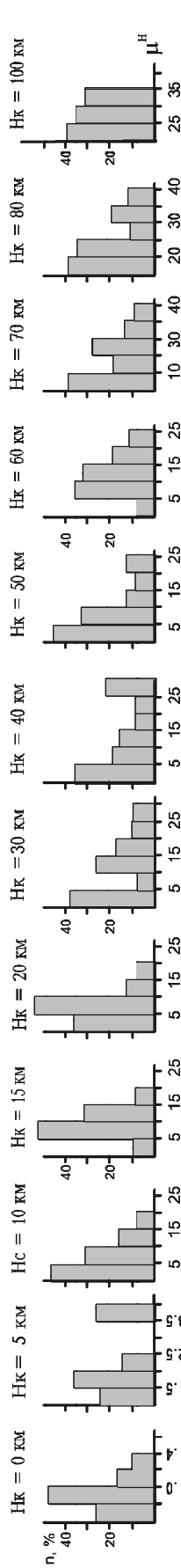
Рис. 3. Схема распределения плотностных неоднородностей в верхней мантии (38–58 км от поверхности). На разрезе: Z_{01} – подошва сиалических комплексов; Z_{02} – подошва земной коры; Z_{03} – подошва слоя аномальной мантии. Условные обозначения к схеме на рис. 1.

блюдается уменьшение глубины залегания как нижнекоровых (рис. 1), так и среднекоровых (рис. 2) плотностных неоднородностей (в среднем на 6–8 км), которое согласуется с сейсмическими данными [32], и по этому признаку [18] можно предполагать внутрикоровую изостатическую компенсированность этих впадин. Наличие линейного (валообразного) поднятия среднекорового слоя под Средне-Амурской впадиной типично для рифтогенных структур. Формирование впадины, по-видимому, не закончено, и дальнейшее развитие процессов рифтогенеза в этой части Приамурского региона можно ожидать в северо-восточном направлении, отвечаю-

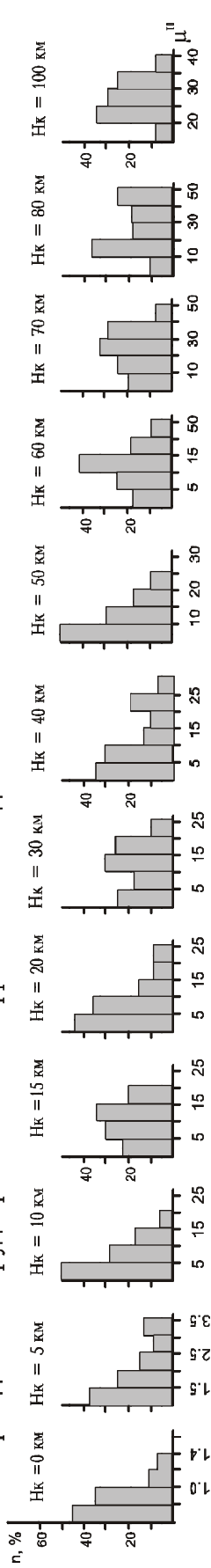
щем простиранию Танлу-Охотской рифтогенной системы [9, рис. 5] и сейсмогенной зоны Танлу [3, 10, 12, 23]. На северном фланге описываемой рифтогенной структуры расположена Удыльская впадина (на рис. 2 не показана из-за малых размеров).

Распределение плотностных неоднородностей в верхней мантии (рис. 3) характеризуется преимущественно северо-восточным линейным простиранием изолиний (Z_0). Центральное положение в рассматриваемом регионе занимает поднятие статистической гравитирующей границы (Z_{02}), пространственно совпадающее с Туранским кристаллическим блоком. К юго-востоку от этого блока наблюдается плавное по-

Месторождения и рудопроявления олова $n = 27$



Месторождения и рудопроявления вольфрама и молибдена $n = 33$



Месторождения и рудопроявления золота $n = 47$

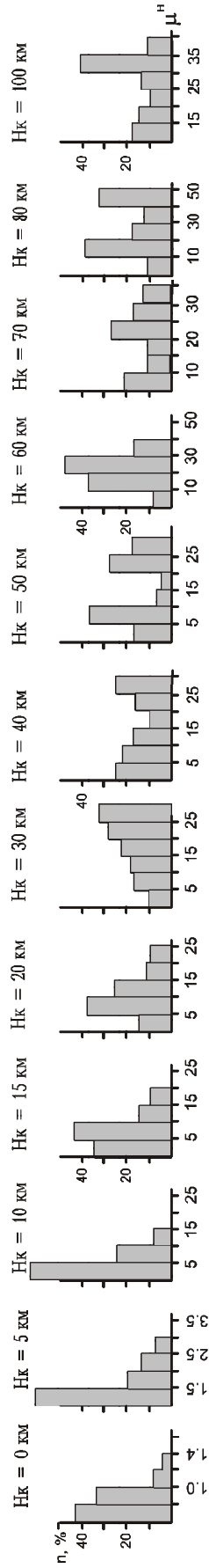


Рис. 4. Гистограммы связи рудных месторождений Приамурья с аномалиями параметра μ^H .

Ординаты гистограмм – число совпадений месторождений (%) с интервалами значений μ^H . Абсциссы гистограмм – значения аномалий вертикального градиента поверхностной плотности эквивалентных сферических источников μ^H ($10^{-1} \text{ kg / m}^2 / \text{km}$). Нк – глубина поверхности “конденсации” гравитирующих масс; n – количество месторождений в выборках.

гружение третьей статистической границы (Z_{0_3}) в сторону Японского моря. Из сравнения рис. 1, 2 и 3 следует, что тенденции пространственных распределений плотностных неоднородностей в нижней части коры и в верхней мантии на северном фланге Сихотэ-Алинской аккреционно-складчатой системы противоположны: среднекоровая (Z_{0_1}) и нижнекоровая (Z_{0_2}) статистические границы воздымаются к востоку от Хэган-Чегдомынского блока, а мантийная граница (Z_{0_3}) – погружается в том же направлении (рис. 3). Такие распределения гравитирующих масс позволяют предположить существование клиноформного слоя (или пластины) в верхней мантии (до глубины 50–55 км). Клиновидная форма в разрезе и пространственная модель рельефа подошвы этого слоя (рис. 3) указывают на его активную роль в процессе коллизии Амурского супертеррейна с Западно-Тихоокеанской литосферной плитой. Близкие к описанному распределения гравитирующих масс в среднем слое коры и в верхней мантии выявлены автором на южном фланге Сихотэ-Алинской аккреционно-складчатой системы [31], где структурная пара границ “подошва сиалического слоя – подошва слоя аномальной мантии” также образуют клиноформную пластину, характеризующуюся признаками активного внедрения (поддвига) со стороны Северо-Западно-Тихоокеанской литосферной плиты. Отличие состоит в том, что в южной части Сихотэ-Алинской системы подошва структурного клина залегает ближе к поверхности (30–40 км). Настолько же различаются глубинные характеристики Туранского и Ханкайского блоков (террейнов по современной классификации): мощность “статистической гравитационной коры” в Туранском блоке составляет 32–40 км, а в Ханкайском – 25–30 км, что соответствует выводам о большей степени перестройки (редуцированности) Ханкайского блока [21]. В свете рассмотренных данных, центральное положение Туранского блока относительно плотностных неоднородностей верхней мантии (рис. 3) является свидетельством его устойчивости к коллизионным процессам на среднепалеозойской восточной окраине Азиатского палеоконтинента.

МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПЛОТНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Наиболее распространенные подходы к металлогенической интерпретации гравитационных аномалий Приамурья основываются на концепциях связи рудных месторождений с разломами, зонами раз-

уплотнения (гранитизации) [4, 26, 34] и рельефом главных границ раздела земной коры [2, 5, 8, 24]. Такие подходы позволяют приблизительно оценить вертикальную протяженность региональных рудно-магматических систем (РМС) – рудных узлов и районов, однако недостаточно эффективны при изучении металлогенической специализации (зональности) земной коры и сравнительных оценках вертикального диапазона однотипных РМС.

Принципиально новые возможности металлогенического анализа гравитационных аномалий открываются при изучении вероятно-множественных распределений плотностных неоднородностей в широком глубинном диапазоне геологического пространства с использованием объемных моделей $\mu^h(x, y, H_k)$. При сопоставлении карт-срезов параметра μ^h ($H_k = 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100$ км) с расположением приповерхностных рудных месторождений на Минерагенической карте России [25] для территории Приамурья установлена корреляция основных типов рудных месторождений (олова, вольфрама, молибдена и золота) с аномалиями параметра μ^h на дискретных глубинных уровнях земной коры и верхней мантии, соответствующих определенным специализациям рудно-магматических систем (таблица, рис. 4).

Большая часть оловорудных районов Приамурья коррелируется с плотностными неоднородностями земной коры на глубинах до 20 км от поверхности, а на глубинах $H_k = 5$ км и $H_k = 15$ км наблюдаются контрастные максимумы связи оловорудных месторождений с аномалиями параметра μ^h (рис. 4). С аномалиями μ^h на глубинах до 20 км пространственно совпадают оловорудные месторождения Хинганского, Дуссе-Алинского, Хуту-Джаурского и Самаргинского районов (рис. 5 ; таблица), что согласуется с преобладающей точкой зрения о связи оловорудных систем с верхнекоровыми очагами гранитоидной магмы. В Баджальском и Комсомольском оловорудных районах наблюдается корреляция месторождений с плотностными неоднородностями более глубоких уровней (таблица). Это объясняется тем, что в этих районах, кроме оловянных, широко распространены вольфрамовые, висмутовые, полиметаллические и медные рудные объекты, многие из которых имеют промышленные запасы [24]. Наблюдаемое увеличение глубины залегания плотностных неоднородностей под РМС Комсомольского рудного района до 30 км (рис. 6, таблица), а Баджальского до 50 км (таблица) совпадает с ранее выполненными оценками параметров зон разуплотнения под этими района-

Таблица. Пространственная корреляция рудных районов Приамурья с аномалиями μ^H .

Рудные районы	Специализация	Глубина конденсации гравитирующих масс Нк, км												
		0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	100	
Хинганский	Sn	+	+											
Хуту-Джаурский	Sn	+	+											
Баджальский	Sn													
Комсомольский	Sn													
Дуссе-Алинский	Sn, W		+	+										
Самаргинский	Sn, Au			+										+
Верхне-Хорский	W, Au													
Ям-Алинский	W, Sn					+		+						
Эзопский	W, Sn					+		+						
Селитканский	Mo, Sn													
Тумнинский	W, Au					+		+						
Притуранский	W, Au					+								
Верхне-Амурский	Au													
Нижне-Амурский	Au					+								
Верхне-Селемджинский	Au													
Пильда-Лимурийский	Au		+	+										

Примечание. Знаком “+” в таблице отмечены районы, площади которых совмещаются с площадями контрастных аномалий μ^H на 50 % и более.

ми [4]. Большой вертикальный диапазон плотностных неоднородностей Комсомольской и Баджальской РМС, по сравнению с Хинганской и Хуту-Джаурской, соответствует геологическим и металлогеническим характеристикам этих систем: для первых из них характерны связь месторождений с интрузиями диорит-монцит-гранодиоритовой формации (производными очагов габбро-андезитовой магмы) и преимущественно халькофильный профиль минерализации [1, 24], для вторых – пространственно-генетическая связь с гранитами и субвулканическими гранитоидами и преимущественно литофильный профиль минерализации [24]. Промежуточное положение в ряду оловоносных РМС занимает Дуссе-Алинская, большинство оловянных месторождений которой приурочены к крупному гранитному плутону, однако здесь же распространены малые диорит-монцит-гранодиоритовые интрузии, а оловянная минерализация пространственно совмещена с вольфрамовой [24]. По полученным данным (таблица, рис. 5, 6), в пределах Дуссе-Алинской РМС наблюдаются две резко разобщенные по вертикали региональные плотностные аномалии, первая из которых заключена в верхней части коры (5–10 км), где, по-видимому, связана с магматическими (гранитоидными) источниками оловянной минерализации, а вторая – в верхней мантии (50–70 км). Так же как и в других вольфрамоносных районах Приамурья (Тумнинском, Эзопском), вторая аномалия плотности может быть

структурно и генетически связана с глубинными источниками вольфрамовой минерализации.

Корреляция месторождений Хинганского оловорудного района с плотностными неоднородностями на глубине 40 км (таблица) остается неясной. Можно предполагать лишь, что вторая, глубинная, плотностная неоднородность, пространственно удаленная от магматических источников олова, связана здесь с иной рудной минерализацией: полиметаллической или золоторудной, единичные признаки которой известны на поверхности [24, 25]. По аналогии с другими районами (таблица), на северных флангах Хинганского района (рис. 6) можно ожидать обнаружение скрытых месторождений вольфрама и молибдена, золота или полиметаллов.

Ниже глубины 40 км от поверхности с оловянными месторождениями слабо коррелируются аномалии μ^H в пределах рудных районов комплексной специализации: Ям-Алинском, Эзопском, Селитканском и Самаргинском (таблица), где широко распространена молибденовая, вольфрамовая и золоторудная минерализация [24, 25]. Эти районы отображаются нечеткими максимумами экстенсивности оловянных месторождений на сводных гистограммах при: Нк = 60 км и Нк = 70 км (рис. 4).

По обобщенным характеристикам (рис. 4), на территории Приамурья наилучшей коррелируемостью с оловорудными месторождениями характеризуются плотностные неоднородности земной коры на

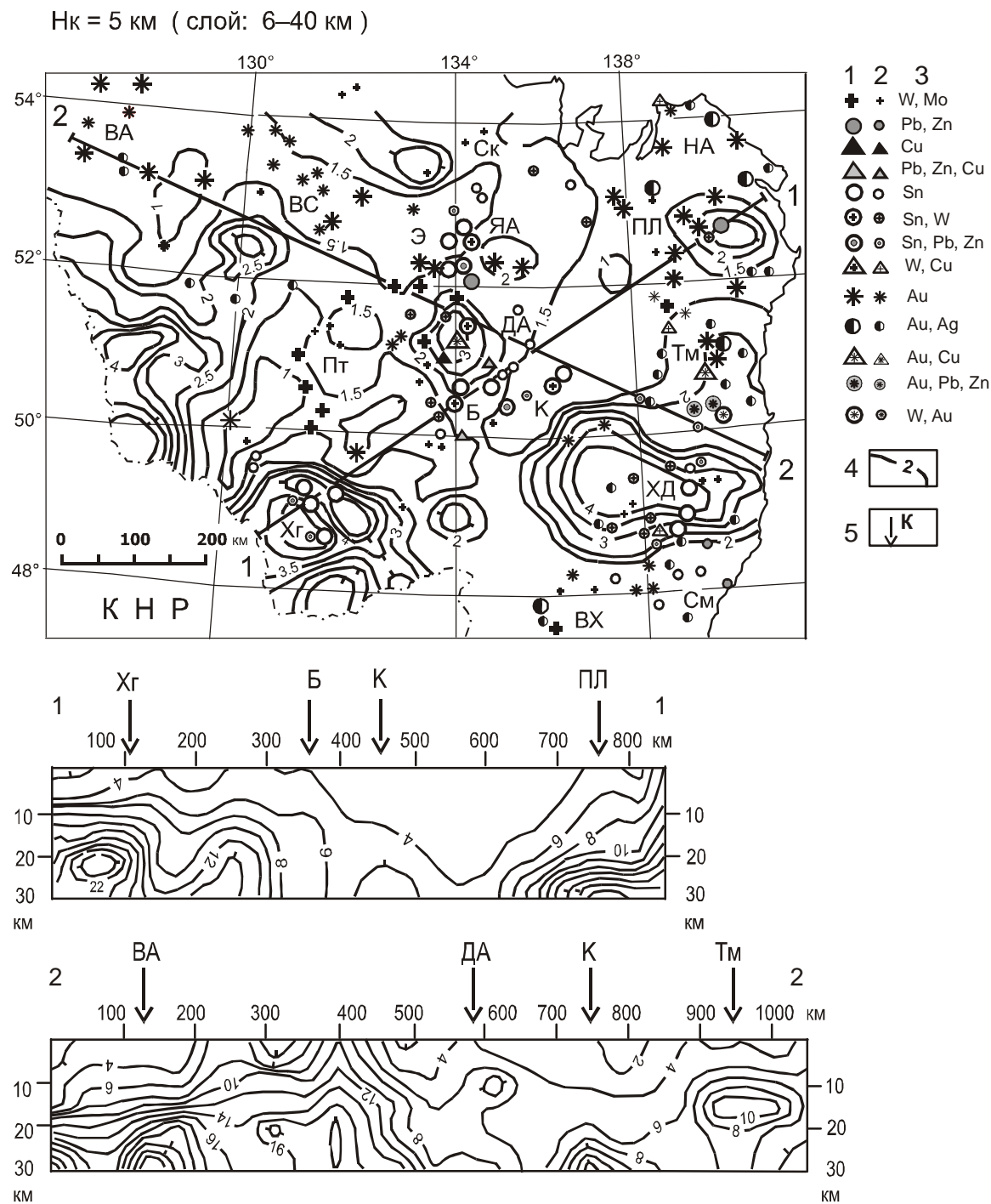


Рис. 5. Аномалии градиента плотности земной коры на глубине 5 км.

1 – месторождения; 2 – рудопроявления; 3 – металлогеническая специализация рудных объектов [25]; 4 – изолинии вертикального градиента поверхностной плотности эквивалентных сферических источников (10^{-1} кг/м²/км); 5 – привязка рудных районов к разрезам.

Обозначения рудных районов : ВА – Верхне-Амурский, НА – Нижне-Амурский, Ск – Селитканский, ВС – Верхне-Селемджинский, Пт – Притуранский, ЯА – Ям-Алинский, ПЛ – Пильда-Лимурийский, Э – Эзопский, ДА – Дуссе-Алинский, Тм – Тумнинский, Б – Баджалский, К – Комсомольский, Хг – Хинганский, ХД – Хуту-Джаурский, ВХ – Верхне-Хорский, См – Самаргинский.

Нк = 30 км (слой: 31–130 км)

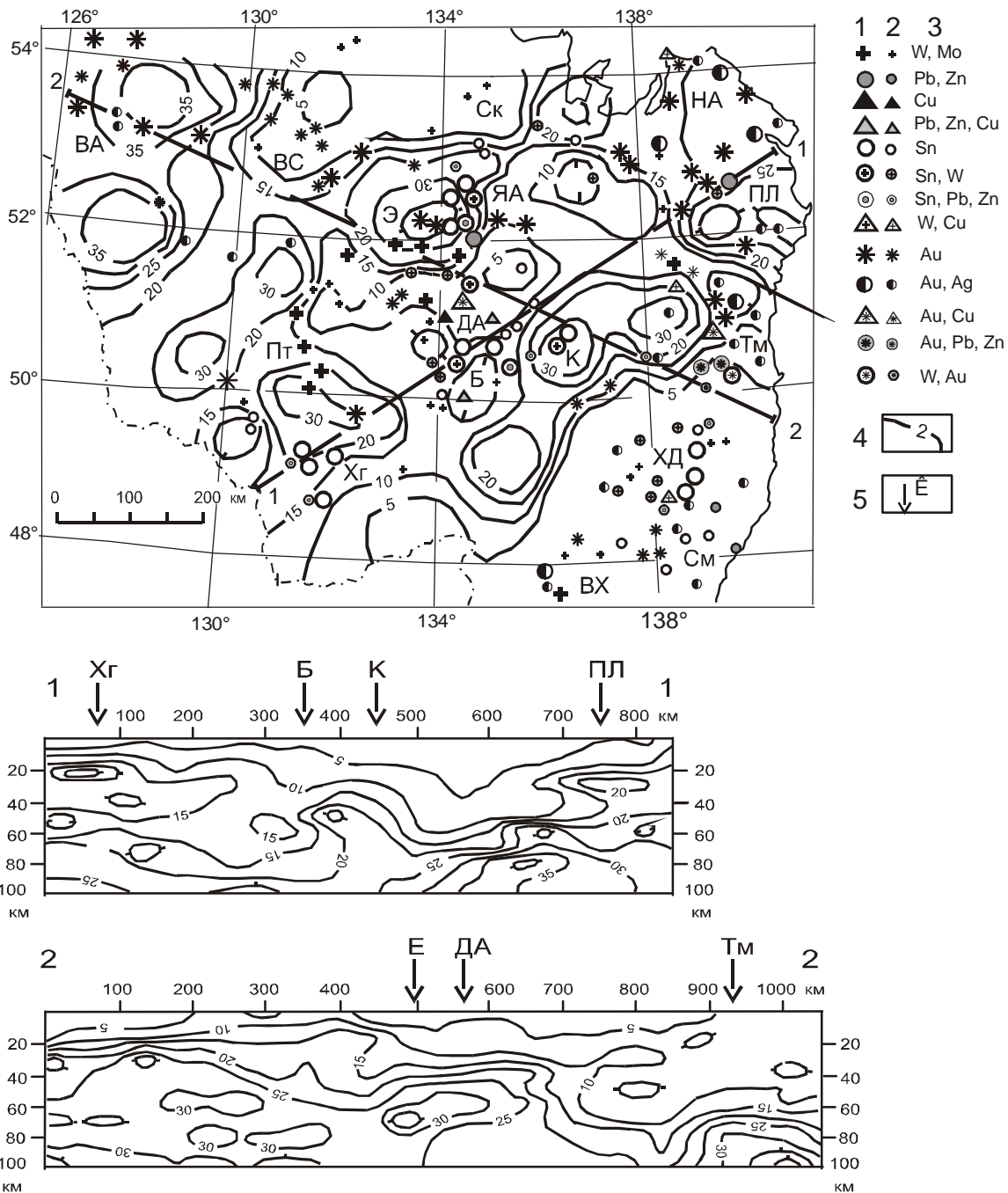


Рис. 6. Аномалии градиента плотности корово-мантийного слоя на глубине 30 км. Условные обозначения на рис. 5.

глубинах 5 и 15 км. Сопоставление глубин залегания плотностных неоднородностей в земной коре, совпадающих с региональными оловорудными РМС (таблица), позволяет наметить пространственный ряд оловоносных рудно-магматических систем: Хинганская (вертикальная протяженность РМС до 5 км)→ Дуссе-Алинская (5–10 км)→Хуту-Джаурская (20 км)

→Комсомольская (30 км). Предположив одинаковую первичную вертикальную протяженность и общий механизм эволюции этих систем, можно провести сравнительную оценку их современного эрозионного среза, согласно которой наименее эродированной является Комсомольская РМС, а наиболее эродированной – Хинганская, что не противоречит их структур-

ному положению (рис. 1). Пространственные и генетические связи оловянной и иной минерализации с конкретными магматическими и вмещающими комплексами в пределах этих систем, при таком предположении, могут быть обусловлены перераспределением рудных элементов на поздних стадиях рудно-магматического процесса.

Пространственное расположение месторождений вольфрама и молибдена наиболее четко коррелируется с аномалиями плотностных неоднородностей на глубинах 60–70 км (рис. 4) в пределах территорий Тумнинского, Дуссе-Алинского, Верхне-Хорского и Селитканского рудных районов (таблица). На меньших глубинах (15 и 30 км) наблюдаются слабо выраженные максимумы корреляционных гистограмм, по-видимому связанные с оловорудной компонентой полиформационных РМС. Таким образом, по полученным данным, глубинные эндогенные источники месторождений вольфрама и молибдена располагаются преимущественно в нижнем слое земной коры и в верхней мантии до глубины 70 км, где, вероятно, связаны с кристаллизовавшимися очагами базитовой магмы, длительное время являвшимися источниками сквозькоровых рудоносных флюидов. По глубине залегания плотностных неоднородностей – индикаторов вертикальной протяженности РМС – региональные вольфрамо-молибденовые РМС Приамурья можно расположить в следующий вертикальный ряд: Ям-Алинская (коррелируемость приповерхностных месторождений с плотностными неоднородностями до глубины $H_k < 30$ км) → Эзопская ($H_k < 50$ км) → Селитканская ($H_k < 60$ км) → Дуссе-Алинская ($H_k < 70$ км). Наибольшей вертикальной протяженностью (и, по-видимому, наименьшим эрозионным срезом флюидно-магматической колонны) среди вольфрамо- и молибденоносных РМС характеризуется Тумнинский рудный район (таблица), где, кроме вольфрамовой и молибденовой, широко распространена золоторудная минерализация [24, 25].

Сопоставление схем аномалий параметра μ^h на разных уровнях среза с минерагенической картой [25] обнаруживает связь золоторудной минерализации Приамурья с глубинными плотностными неоднородностями земной коры и верхней мантии в широком глубинном диапазоне (10–100 км). Наилучшая коррелируемость, выраженная контрастными максимумами экстенсивности золоторудной месторождений на корреляционных гистограммах (рис. 4), наблюдается на глубинах 30, 60 и 100 км. Плотностные неоднородности в нижнем слое земной коры ($H_k = 30$ км) сопровождают все золоторудные провинции Приамурья: Верхне-Амурскую, Нижне-Амурскую,

Селемджино-Кербинскую и Туранскую [26], при этом в аномальной области градиентов плотности ($\mu^h > 15 \cdot 10^{-1}$ кг/м²/км) располагаются 20 месторождений золота из 27. Плотностные неоднородности этого глубинного уровня, вероятно, связаны с нижнекоровыми палеомагматическими очагами, в которых происходило взаимодействие (или смешивание) верхнекоровых гранитоидных и нижнекорово-мантийных габбро-андезитовых магм, что, по мнению ряда исследователей [16, 26], способствует мобилизации золота из глубинных расплавов и фемического (“базальтового”) слоя земной коры.

Второй уровень корреляции золоторудных месторождений с глубинными плотностными неоднородностями ($H_k \approx 60$ км) связан с проницаемыми для глубинных флюидов участками земной коры и верхней мантии в зонах трансрегиональных глубинных разломов: субширотного Тукурингринского, с которым пространственно ассоциируют месторождения Верхне-Амурского, Верхне-Селемджинского, Эзопского, Ям-Алинского и Пильда-Лимурийского районов, и Центрально-Сихотэ-Алинского, в зоне влияния которого расположены Верхне-Хорский, Тумнинский, Пильда-Лимурийский и Нижне-Амурский золотоносные районы. В проницаемых зонах, одновременно с транспортировкой на поверхность значительных объемов андезитовых магм (Умлекано-Огоджинский вулканический пояс), могло происходить сквозькоровое перемещение мантийных флюидов и обогащение их золотом в нижнем слое земной коры при движении к поверхности.

Третий уровень плотностных неоднородностей, пространственно коррелирующийся с золоторудными месторождениями, отчетливо проявлен на гистограмме для $H_k = 100$ км (рис. 4). В области аномальных значений градиента поверхностной плотности ($\mu^h > 25 \cdot 10^{-1}$ кг/м²/км) на этом глубинном уровне располагаются месторождения Нижне-Амурской и Туранской золотоносных провинций [26]. Для всех мантийных аномалий градиента плотности ($H_k > 40$ км), горизонтальные размеры которых увеличиваются с глубиной до 250×300 км, характерна концентрация золоторудных месторождений вне центров аномалий μ^h , что может быть признаком горизонтальной миграции (выноса) золота к флангам глубинных термодинамических систем (плюмов?). Исключением из общего правила является Пильда-Лимурийская полиформационная РМС (Au, W, Be, Pb, Zn), характеризующаяся признаками (таблица) “сквозной” очаговой структуры. Похожее периферическое расположение золоторудных месторождений относительно региональных гравитационных минимумов ранее

связывалось с латеральной зональностью процессов разуплотнения и гранитизации [26, 34], однако, по полученным данным, эта закономерность распространяется на гравитационные аномалии обоих знаков. Исходя из полученных данных, причину зонального расположения золоторудных (и не только золоторудных) месторождений относительно неоднородностей верхней мантии следует искать не в диффузионных, метасоматических или анатектоидных (гранитизация) процессах, а в гидротермально-флюидных характеристиках РМС.

Рассмотренные данные характеризуют главные черты региональной вертикальной металлогенической зональности земной коры и верхней мантии Приамурья, плотностные неоднородности которых закономерно связаны с РМС определенных специализаций: верхнекоровые – с месторождениями олова, среднекоровые – с комплексными оловянно-вольфрамовыми месторождениями, нижнекоровые и мантийные – с месторождениями вольфрама и молибдена. Золоторудные РМС характеризуются наиболее широким вертикальным диапазоном плотностных неоднородностей (от 10 до 100 км) и являются “сквозными” по отношению к структурам земной коры, что соответствует известным данным [5, 16, 26] о чрезвычайно высокой миграционной способности золота, его гетерогенности, многоуровневой и полициклической концентрации (переконцентрации и регенерации) в земной коре. Существование дискретных связей плотностных неоднородностей на глубинах 5, 15, 30, 60 и 100 км с приповерхностными рудными месторождениями (рис. 4, таблица) хорошо объясняется концепцией вертикальной зональности процессов рудогенеза [14, 36], согласно которой экстрагирование и сепарация рудоносных магм и флюидов конкретных рудных специализаций происходит на определенных дискретных термодинамических уровнях литосферы, преимущественно в ее верхних слоях.

В большинстве рудных районов Приамурья обычным является структурная и вещественная совмещенность рудных ассоциаций: оловянной – с вольфрамовой и молибденовой, вольфрамовой – с золоторудной, золоторудной – с серебряной и полиметаллической [24, 25]. Общими, или “проходящими”, для большинства РМС являются рудные концентрации меди, мышьяка, сурьмы, свинца и цинка [24]. В свете полученных данных, структурная совмещенность может быть следствием наложения (телескопирования) разновозрастных гидротермальных систем нескольких разноглубинных магматических очагов, связанных по вертикали флюидо-магматическими каналами в проницаемых зонах

земной коры и верхней мантии, а вещественная – накоплением (или мобилизацией из вмещающих комплексов) одновременно нескольких “рудных” химических элементов в промежуточных коровых и мантийных очагах. Примерами РМС первого (телескопированного) типа являются, по-видимому, Хинганская, Дуссе-Алинская, Самаргинская и Тумнинская РМС, а второго (моноочагового) типа – Верхне-Амурская, Верхне-Селемджинская, Комсомольская и Эзопская (табл., разрезы 1–1 и 2–2 на рис. 5 и 6). Как следует из рис. 4, плотностные неоднородности, предположительно соответствующие палеомагматическим очагам с комплексной специализацией магм, располагаются на глубинах 30 и 60 км. На глубинах менее 20 км располагаются преимущественно оловоносные очаги, а на глубинах более 70 км – преимущественно золотоносные.

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПЛОТНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Территория Приамурья относится к сейсмически активным районам [3, 10, 12, 23, 35]. Здесь преобладают мелкофокусные землетрясения, источники которых располагаются в земной коре и коррелируются со скоростными границами раздела структурно-вещественных комплексов [23]. Значение гравитационных аномалий в комплексе признаков современной геодинамической активности Приамурья невелико: оно сводится к совпадению региональных гравитационных минимумов с аномалиями неотектонических движений в асейсмических окнах, плотностью приповерхностных тектонических нарушений [11, 12] и приуроченностью зон повышенной сейсмичности к границам крупных тектонических блоков, отмечаемых зонами градиентов силы тяжести [11, 23, 35].

Источником дополнительной информации о связи сейсмичности с гравитационно-неустойчивыми блоками земной коры могут быть аномалии параметра μ^H . Изучение особенностей пространственного расположения эпицентров землетрясений [23] относительно аномалий этого параметра в разных глубинных срезах коры открывает возможность оценки наиболее вероятной глубины возможных гравитационных источников землетрясений, которая, по полученным данным (рис. 7), составляет 30–40 км от земной поверхности, а также наметить районы, в которых землетрясения вероятны в ближайшие 50–60 лет (период полного сейсмического цикла в Приамурье, по [3]). Гистограммы связи экстенсивности землетрясений магнитудой более 4.5 с гравитационными не-

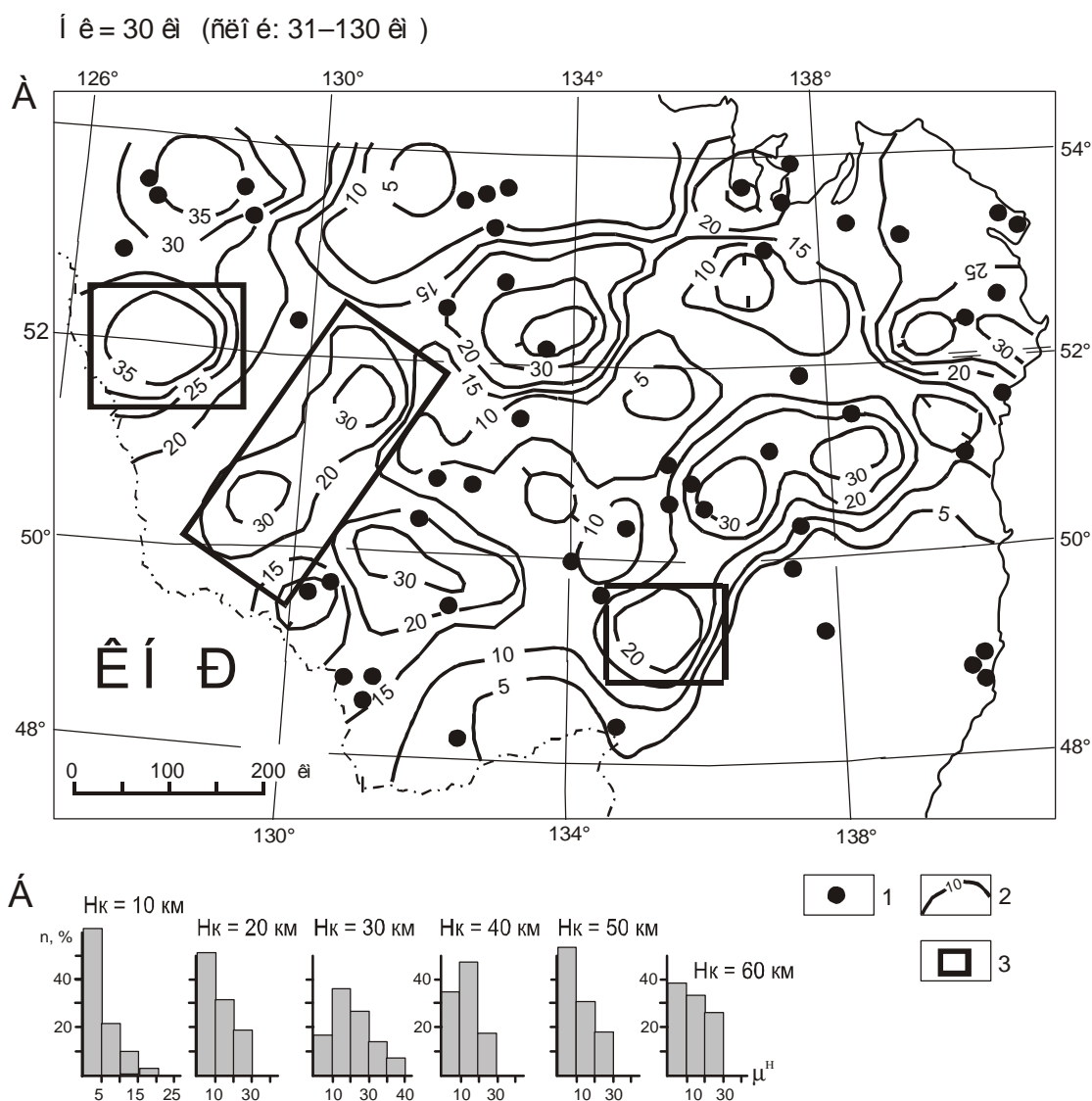


Рис. 7. Связь плотностных неоднородностей земной коры с сейсмичностью.

А – аномалии параметра μ^H на глубине 30 км; Б – гистограммы связи эпицентров землетрясений с аномалиями μ^H (H_k – глубина среза). 1 – эпицентры землетрясений с магнитудой более 4.5 [23]; 2 – изолинии аномалий вертикального градиента поверхностной плотности эквивалентных сферических источников ($10^{-1} \text{ кг/м}^2/\text{км}$); 3 – районы ожидаемых землетрясений. Ординаты гистограмм – число совпадений месторождений (%) с интервалами значений μ^H . Абсциссы гистограмм – значения аномалий вертикального градиента поверхностной плотности эквивалентных сферических источников μ^H ($10^{-1} \text{ кг/м}^2/\text{км}$).

однородностями земной коры в Приамурье (рис. 7 Б) свидетельствуют о том, что плотностные неоднородности выше глубины 30 км и ниже глубины 40 км не связаны с размещением эпицентров землетрясений (наблюдается отрицательная корреляция сравниваемых параметров), а наиболее вероятная глубина залегания возможных гравитационных источников землетрясений составляет 30 км, что близко ко второму максимуму глубинности очагов землетрясений по данным сейсмического мониторинга [10, рис. 6]. На схеме пространственного распределения плотност-

ных неоднородностей этого глубинного уровня (рис. 7 А) из общего числа восьми интенсивных максимумов градиента плотности ($\mu^H > 20 \cdot 10^{-1} \text{ кг/м}^2/\text{км}$) шесть совпадают с участками повышенной концентрации эпицентров землетрясений. Исходя из установленных пространственных (рис. 7 А) и частотных (рис. 7 Б) закономерностей, другие интенсивные аномалии μ^H ($H_k = 30 \text{ км}$), в пределах которых пока не зарегистрированы землетрясения с магнитудой более 4.5, можно отнести к районам, где в ближайшие десятилетия следует их ожидать (рис. 7 А). Все эти

районы принадлежат к Гилюйско-Гурской сейсмогенной зоне [10].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Пространственные связи гравитационных аномалий с глубинными геологическими структурами, металлоносностью и геодинамическим состоянием литосферы общеизвестны, повсеместны и разнообразны. При детерминированной, аналитической или “конечно-элементной” [41], интерпретации гравитационных возмущений обычно удается охарактеризовать (реже параметризовать) лишь отдельные элементы этих связей с точностью, зависящей от априорной базы геолого-геофизических данных и достоверности принятых гипотез. С появлением новых геолого-геофизических данных или изменением геологических концепций модели глубинных и рудогенных структур земной коры также изменяются, нередко – кардинально.

Рассмотренные выше пространственно-статистические (“теневые”) модели распределений в земной коре и верхней мантии эквивалентных плотностных неоднородностей простейшего модельного класса не требуют концептуального геотектонического и априорного петрофизического обоснования и однозначны в рамках расчетных процедур (модели однозначно воспроизводимы при одинаковой ориентировке сети расчетных профилей и точности описания аномального гравитационного поля). Единственным недостатком этих моделей являются искажения, связанные с существованием в земной коре горизонтально-плоских источников, обработка и интерпретация аномалий от которых приводит к завышенным оценкам глубин. Судя по удовлетворительному совпадению пространственных распределений глубинных плотностных неоднородностей Приамурья с элементами геологического строения и скоростными границами раздела земной коры, искажения, обусловленные полого-слоистыми структурами, в рассмотренных моделях невелики, по меньшей мере – они не отвергают основные геологические результаты выполненных построений:

1. В результате анализа пространственных распределений плотностных неоднородностей земной коры и верхней мантии Приамурья в классе элементарных “компактных” и эквивалентных им сферических источников гравитационных аномалий установлена отчетливая связь источников локальных гравитационных возмущений с поведением скоростных границ раздела земной коры и тектоническими структурами: наблюдается уменьшение глубины залегания гравитирующих неоднородностей в переходном слое “кора–мантия” под мезозойско-кайнозойскими

впадинами и мезозойскими прогибами и увеличение – под палеозойскими аккреционно-складчатыми комплексами, окаймляющими Амурский супертеррейн. Мезозойско-кайнозойские впадины сопровождаются сокращением мощности коры и приближением к поверхности подошвы верхнекорового кристаллического сиалического слоя, что является признаком их внутрикоровой гравитационной уравновешенности. В восточном Приамурье обнаружены признаки клиноформной пластины, залегающей в основании Сихотэ-Алинской складчатой системы, мощность которой увеличивается по направлению к акватории Японского моря.

2. В результате сопоставления аномалий градиента плотности литосферы (μ^H) с размещением рудных месторождений и проявлений определены черты дискретной вертикальной металлогенической зональности земной коры и верхней мантии Приамурья, которая характеризуется закономерным увеличением вертикальной протяженности региональных рудно-магматических систем, от преимущественно оловоносных к преимущественно золотоносным: Sn (5–15 км) → W, Mo (30–60 км) → Au (80–100 км). Предлагаемая вниманию исследователей объемная модель $\mu^H(x, y, H_k)$ может найти применение при сравнительных оценках эрозионного среза однотипных РМС и региональных прогнозных построениях.

3. Плотностные неоднородности нижнекорового слоя на глубине 30 км от поверхности корреляционно связаны с мелкофокусными очагами землетрясений и по этому признаку могут быть использованы в долгосрочных (50–60 лет) сейсмических прогнозах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор глубоко благодарен Ю.Ф. Малышеву, В.Я. Подгорному, В.Г. Хомичу и Г.В. Роганову за обсуждение результатов работы и критические замечания, способствовавшие улучшению аргументации, стиля и ясности изложения публикуемых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асманов В.Я., Вокуев А.В., Гоневчук В.Г., Гоневчук С.А., Кокорин А.М., Кокорина Д.К., Коростелев П.Г., Матухин М.О., Огнянов Н.В., Сучков В.И. Металлогения Комсомольского рудного района // Металлогения главных оловорудных районов юга Дальнего Востока. Владивосток, 1988. С. 3–23.
2. Бакулин Ю.И. Золотоносные и оловоносные рудные системы и оценка их перспектив // Металлогения и рудные формации зоны перехода континент–океан. Магадан: СВКНИИ. 1990. С. 88–97.

3. Бормотов В.А., Войтенко Л.А. Закономерности миграций землетрясений Приамурья // Тихоокеан. геология. 1998. Т. 17, № 2. С. 51–60.
4. Брянский Л.И., Бормотов В.А., Ахмадулин В.А., Лойгер П.П., Овчинников В.Е., Бормотова Н.Ф., Развозжаева Е.П. Глубинная структура Комсомольско-Баджалского рудного района по результатам комплексного моделирования // Принципы прогнозирования эндогенного оруденения в Восточно-Сихотэ-Алиньских вулканических поясах СССР. М.: Недра, 1990. С. 294–306.
5. Буряк В.А., Бакулин Ю.И. Металлогения золота. Владивосток: Дальнаука, 1998. 403 с.
6. Ващилов Ю.Я. Блоковослоистая модель земной коры и верхней мантии. М.: Наука, 1984. 240 с.
7. Ващилов Ю.Я. Глубинная структура, геодинамика и геокинематика Северо-Востока России // Структура и геокинематика литосферы Востока России. Магадан, 1993. С. 5–19.
8. Генко Г.А., Львов В.К. Анализ данных о глубинном строении территории БАМ // Геология, геофизика и полезные ископаемые региона Байкало-Амурской магистрали. Л., 1977. С. 28–35.
9. Геологическая карта Приамурья и сопредельных территорий. 1: 2 500 000 / Гл. ред.: Л.И. Красный, Пэн Юнь Бяо. Л.: ВСЕГЕИ, 1999. 3 л. с объясн. зап. 135 с.
10. Горкуша С.В., Малышев Ю.Ф. Глубинное строение и сейсмичность зоны сочленения Тихоокеанского и Центрально-Азиатского поясов // Тихоокеан. геология. 1993. № 2. С.32–51.
11. Горкуша С.В. Изучение сейсмичности и глубинного строения Восточного Приамурья на основе кластерного анализа // Тихоокеан. геология. 1996. Т.15, № 4. С.67–76.
12. Горкуша С.В., Онухов Ф.С., Корчагин Ф.Г. Сейсмичность и неотектоника юга Дальнего Востока // Тихоокеан. геология. 1999. Т. 18, № 5. С. 61–68.
13. Гравиразведка: Справочник геофизика. М.: Недра, 1990. 607 с.
14. Жданов В.В. Метасоматизм и рудообразование в “гранитном” слое земной коры // Магматизм и рудообразование. М., 1975. С. 44–53.
15. Зидаров Д. О решении некоторых обратных задач потенциальных полей и его применении к вопросам геофизики. София: Изд-во Болг. акад. наук, 1968. 143 с.
16. Константинов М.М., Некрасов Е.М., Сидоров А.А., Стружков С.Ф. Золоторудные гиганты России и мира. М.: Науч. мир, 2000. 272 с.
17. Косыгин Ю.А. Тектоника. М.: Недра, 1983. 536 с.
18. Красовский С.С. Гравитационное моделирование глубинных структур земной коры и изостазия. Киев: Наук. думка, 1989. 247 с.
19. Магматогенно-рудные системы. М.: Наука, 1986. 253 с.
20. Маловичко А.К. Основной курс гравиразведки. Пермь: Изд-во Пермского гос. ун-та, 1966. Ч. 1. 326 с.
21. Малышев Ю.Ф., Брянский Л.И., Карсаков Л.П., Петрищевский А.М., Шевченко Б.Ф. Глубинное строение срединных массивов северо-востока Азии и их роль в формировании Тихоокеанской окраины // Тихоокеан. геология. 1983. №2. С. 27–34.
22. Малышев Ю.Ф. Структура фундамента и ее отражение в геофизических полях // Сейсмоструктурология и сейсмическое районирование Приамурья. Новосибирск: Наука, 1989. С. 73–81.
23. Малышев Ю.Ф. Глубинное строение, геодинамика и сейсмичность в области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского подвижного поясов // Тихоокеан. геология. 1998. Т.17, № 2. С. 21–27.
24. Металлогения Дальнего Востока России. Хабаровск, 2000. 217 с.
25. Минерагеническая карта РФ и сопредельных районов. 1:2 500 000 / Авт.: Роднов Ю.Н., Белкина И.Л. и др. М.: ФГУ НПП “Аэрогеология”, 2000.
26. Моисеенко В. Г., Эйриш Л.В. Золоторудные месторождения Востока России. Владивосток: Дальнаука, 1996. 352 с.
27. Никонова Р.И. Разрешимость обратной задачи логарифмического потенциала в конечном виде и ее использование для интерпретации гравитационных и магнитных аномалий: Автореф. дис.... канд. физ.-мат. наук. Свердловск, 1979. 24 с.
28. Петрищевский А.М. Опыт аппроксимации сложных геологических сред массивом материальных точек. Вознесенский рудный район Приморья // Геология и геофизика. 1981. № 5. С. 106–115.
29. Петрищевский А.М. Глубинная структура Охотского срединного массива // Изв. вузов. Сер. Геология и разведка. 1987. № 4. С. 100–106.
30. Петрищевский А.М. Статистические гравитационные модели литосферы Дальнего Востока. Владивосток: Изд-во Дальневост. гос. ун-та, 1988. 168 с.
31. Петрищевский А.М. Структурные клинья в земной коре восточной окраины России (геофизические особенности) // Тихоокеан. геология. 2002. Т. 21, № 4. С. 9–17.
32. Потапов С.В. Авиасейсмические исследования земной коры. М.: Наука, 1977. 170 с.
33. Прилепко А.И. Об единственности определения плотности и формы тела в обратных задачах теории потенциала // Докл. АН СССР. 1970. Т.193, № 2. С. 288–291.
34. Романовский Н.П., Рейнлиб Э.Л., Ващилов Ю.Я. О глубинной природе рудно-магматических систем Тихоокеанского пояса // Тихоокеан. геология. 1992. № 2. С. 66–78.
35. Сейсмоструктурология и сейсмическое районирование Приамурья. Новосибирск: Наука, 1989. 127 с.
36. Смирнов В.И. Глубинные источники рудного вещества эндогенных месторождений // Связь поверхностных структур с глубинными. Киев: Наук. думка, 1971. С. 245–253.
37. Сорокин А.А. Палеозойские аккреционные комплексы восточного сегмента Монголо-Охотского складчатого пояса // Тихоокеан. геология. 2001. Т. 20, № 6. С. 31–96.
38. Страхов В.Н. Основы методологии интерпретации гравитационных аномалий при изучении глубинного строения земной коры и верхней мантии // Гравитационная модель земной коры и верхней мантии. Киев: Наук. думка, 1979. С. 113–121.
39. Страхов В.Н. Две парадигмы в теории интерпретации гравитационных и магнитных аномалий // Изв. АН ССР. Физика Земли. 1987. № 1. С. 46–61.
40. Страхов В.Н. О задачах, решаемых в рамках второй парадигмы в теории гравитационных и магнитных аномалий // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1987. № 3. С. 56–67.

41. Страхов В.Н., Голиздра, Старостенко В.И. Развитие теории и практики интерпретации потенциальных полей в XX веке // Физика Земли. 2000. № 11. С. 41–64.
42. Страхов В.Н. Становление новой парадигмы – это разрушение господствующего стереотипа мышления (на примере гравиметрии и магнитометрии) // Физика Земли. 2002. № 3. С. 3–20.
43. Туезов И.К., Якушко Г.Г. Магнитоактивный слой Сихотэ-Алиня // Геология и геофизика. 1976. № 2. С. 107–119.
44. Туезов И.К., Хе Гоци, Врублевский А.А., Рейнлиб Э.Л., Бай Данхай. Некоторые особенности строения северо-востока КНР и Дальнего Востока России // Структура и геокинематика литосферы Востока России. Магадан, 1993. С. 5–19.

Поступила в редакцию 13 мая 2002 г.

Рекомендована к печати Ю.Ф. Малышевым

A.M. Petrishchevsky

Gravitational heterogeneity of the Earth's crust and upper mantle of Priamurye (spatial and statistical models)

Under study are structural, metallogenic and geodynamic features of spatial distributions of "compact-type" density heterogeneities in the Earth's crust and upper mantle of Priamurye. The investigations resulted in correlation of low-crust gravity disturbances with Moho relief and near-surface tectonic structures: the approach of deep density heterogeneities to the earth's surface under Cenozoic-Mesozoic successor basins, Bureya Mesozoic trough; and a plunge under Paleozoic accretionary-fold complexes are observed. The spatial relationships of statistical gravity discontinuities in the middle part of the Earth's crust and upper mantle allow an assumption of a wedge-formed plate characterized by features of intrusion beneath the fold framing of the eastern part of the Amur superterrane from the West Pacific lithosphere plate. Based on concurrence of near-surface ore deposits with the deep density anomalies of the Earth's crust and upper mantle, features of regional vertical metallogenic zoning of the Priamurye lithosphere have been determined; the zoning is expressed by a regular increase in the vertical extent of ore-magmatic systems from mainly tin-bearing up to mainly gold-bearing systems: Sn (5–15 km) → W, Mo (30–60 km) → Au (80–100 km). The spatial relationship of low-crust density heterogeneities (depth of occurrence 30 km) and seismic foci can be used for long-term seismicity predictions in the region.