

МПР РОССИИ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ
СРЕДЫ МПР РОССИИ ПО ПРИМОРСКОМУ КРАЮ

Многопрофильная инновационная фирма «Экоцентр»

«... прежде, чем может идти речь о настоящей геологической науке, мы должны иметь геохимию, которая ясно должна направить своё внимание на химическую природу масс, составляющих наш земной шар, и на их происхождение.»

Христиан Фридрих ШЁНБЕЙН, 1838 г

«Геохимия научно изучает химические элементы, то есть "атомы" земной коры и, насколько возможно, всей планеты. Она изучает их историю, их распределение и движение в пространстве – времени, их генетические на нашей планете соотношения.»

Владимир Иванович ВЕРНАДСКИЙ

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ГЕОЛОГИИ

В настоящей записке кратко излагаются результаты исследований, выполненных Многопрофильной инновационной фирмой «Экоцентр» (бывшей Центральной геохимической партией Объединения «Приморгеология») в области создания теории геохимической зональности, теории аномального геохимического поля, эмпирико-теоретической формализованной модели аномальных геохимических объектов и основанных на этих разработках методов и технологий поисков и прогнозирования месторождений полезных ископаемых.

Разработанные теория и методы представляют собой единую теоретическую и научно-прикладную систему знаний, которая по своей основе, предназначению и содержанию решаемых задач может быть выделена в самостоятельный раздел геохимии под названием **«ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ».**

Авторы разработок: А.И. Бураго - ООО МИФ «Экоцентр»,
В.А. Бураго – Дальневосточный государственный университет.
Почтовый адрес: 690000, г. Владивосток, Океанский пр., 29/31, ООО МИФ «ЭКОЦЕНТР»
ТЕЛ./ФАКС: 8(4232) 40-71-45, 40-79-57

Владивосток

2003

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ относится к числу наиболее широко распространённых в природе геологических явлений.

ФЕНОМЕН ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ В ПРИНЦИПИАЛЬНОМ ЕДИНООБРАЗИИ УПОРЯДОЧЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ, КОТОРОЕ УСТОЙЧИВО ПРОЯВЛЯЕТСЯ НА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ РАЗЛИЧНЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ: ОТ ЕДИНИЧНЫХ РУДНЫХ ТЕЛ И ИХ ПЕРВИЧНЫХ ОРЕОЛОВ ДО ГЛОБАЛЬНЫХ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИХ СТРУКТУР.

Имеющиеся в распоряжении мировой науки многочисленные данные дают основание рассматривать это явление как установленный факт. В качестве причин, вызывающих геохимическую зональность, исследователи обычно приводят различные геологические, геохимические, физико-химические, термобарические и другие факторы и их различные

сочетания, суммарное количество которых составляет несколько десятков. Предлагаемое авторами теоретическое обоснование геохимической зональности базируется на эффектах взаимодействия ионов с молекулами воды. В основе этой теории лежит механизм гидратационной активации ионов, действующий в водно-флюидных системах в широком диапазоне изменений температуры и давления. Приоритетную роль здесь играют энергетические и структурные характеристики воды и ионно-гидратных комплексов, соотношения между которыми регулируются процессами гидратации и активации ионов, протекающими в среде с переменными давлением и температурой.

Гидратация

Формула энергии гидратации получена как разность работы, которую необходимо затратить в вакууме и воде на зарядку нейтральной сферы путём удаления отрицательных зарядов с поверхности сферы радиусом r_3 в бесконечность. Исходя из этих условий, для энергии гидратации катиона (E_h) получено следующее выражение:

$$E_h = \frac{q^2 z^2}{4\pi \epsilon_0 \epsilon \delta_j r_3} \left(1 - \frac{1}{\epsilon}\right),$$

(1)

где q - абсолютная величина заряда электрона; z - зарядное число; ϵ_0 - диэлектрическая постоянная вакуума; ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость воды; r_3 - эффективный радиус заряженного "шарика" (иона), δ_j - относительный удельный объём воды; e - константа (неперово число). В этой формуле от свойств иона зависят r_3 и z , а от внешних условий, определяющих состояние среды, - ϵ и δ_j .

Модель ион-гидратного комплекса.

1). Ион-гидратный комплекс рассматривается как единая энергетически связанная система, в которую входят следующие условно жёсткие составные части: ион радиусом r_i и массой m_i ; ближняя (внутренняя) гидратная оболочка радиусом R_{ij} , состоящая из N_{ij} молекул воды ($N_{ij} = 4R_{ij}^2 / r_{wj}^2$) суммарной массой $M_{ij} = m_w * N_{ij} = m_w * 4R_{ij}^2 / r_{wj}^2$, где m_w - масса покоя

молекулы воды; r_{wj} - среднестатистический радиус элементарной объёмной ячейки молекулы воды, соответствующий j -условиям давления и температуры (при стандартных условиях $r_{wj} = 1,926 \cdot 10^{-10}$ м, $R_{ij} = r_i + r_{wj}$); внешняя сфера молекул воды, окружающая внутреннюю гидратную оболочку и находящаяся от неё в среднем на расстоянии $2r_{wj}$.

2). Ион-гидратный комплекс, в основном, за счёт сил кулоновского взаимодействия между ионом и молекулами воды образует систему, суммарная энергия которой, т.е. энергия гидратации, определяется по формуле (1).

3). Ион-гидратный комплекс - колебательная система. Внутренняя сфера (с ионом) и молекулы воды внешней сферы совершают колебательные движения, взаимодействуя между собой на половине расстояния и имея длину свободного пробега $\Delta r_{wj} = r_{wj} - r_{H_2O}$. Воздействие внешней сферы на внутреннюю идентифицируется с воздействием внешней периодической силы.

4). Допускается, что среднее значение энергии гидратации, приходящееся на связь одной молекулы воды ближней гидратной оболочкой и иона, является величиной постоянной для каждого иона т.е. $E_{hj} / N_j = E_{h0} / N_0$.

Основные уравнения.

Ион-гидратный комплекс, находясь в некоторых j -условиях, совершает линейные колебательные движения, имея среднюю амплитуду $\Delta r_{wj} = r_{wj} - r_{H_2O}$. Ион, находящийся внутри гидратной оболочки также будет совершать в общем случае хаотические движения как линейные, так и нелинейные (круговые), траектории которых будут находиться на внутренней поверхности некоторой воображаемой сферы радиусом $\Delta R_{ij} = R_{ij} - r_i - r_{H_2O}$, двигающейся в свою очередь линейно. При определённых условиях в рассматриваемой колебательной системе возможно возникновение резонанса и, как следствие - активация иона. Получено два варианта уравнений, определяющих возможность возникновения резонанса в ионно-гидратной колебательной системе.

$$1). \text{ Для линейных колебаний: } R_{ij} = \frac{L_i^2}{S} + \frac{L_i^2}{S^2} - \frac{L_i^2 - L_{wj}^2}{S} . \quad (2)$$

$$2). \text{ Для нелинейных колебаний: } R_{ij} = \frac{L_i}{S_\pi} + \frac{L_i^2}{S_\pi^2} - \frac{L_i^2 - \Delta r_{wj}^2 / n^2 \pi^2}{S_\pi} . \quad (3)$$

В уравнениях (2), (3) обозначено:

$$L = r_i + r_{H_2O}; \quad S = 1 - 4 \frac{m_w}{m_i} \frac{\Delta r_{wj}^2}{r_{wj}^2}; \quad S_\pi = 1 - \frac{16}{n^2 \pi^2} \frac{m_w}{m_i} \frac{\Delta r_{wj}^2}{r_{wj}^2} .$$

Кроме того получены эмпирические уравнения, облегчающие расчёты и моделирование.

1). Зависимость между относительной диэлектрической проницаемостью, удельным объёмом воды и радиусом ион-гидратного комплекса (R_{ij} - функция от δ_j):

$$\epsilon = \frac{1}{1 - \delta_j^3 \frac{R_{ij}^2}{R_{i0}^2} \left(1 - \frac{1}{\epsilon_0}\right)} . \quad (4)$$

2). Зависимость между давлением, относительной диэлектрической проницаемостью и относительным удельным объёмом воды:

$$P = P_0 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon_0 - 1} \right)^{1/3} \quad P \leq 200 \text{ МПа} , \quad (5)$$

$$P = P_0 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon_0 - 1} \right)^{1/3} \quad P \geq 200 \text{ МПа} , \quad (6)$$

Теоретические расчёты

РАСЧЁТЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Решая уравнения (2) - (6) относительно P_i и δ_j , получим положение точки в координатах этих переменных, а также в координатах РТ, которое будет соответствовать условиям, максимально благоприятным для повышения энергетического уровня ион-гидратной колебательной системы, высвобождения иона и вступления его в реакцию с возможным образованием твёрдой фазы. В координатах РТ множества таких точек образуют линии активационных барьеров ионов (геохимические барьеры).

Параметры и характеристики

Для теоретических расчётов геохимической зональности в координатах ТР использовались справочные данные о физических параметрах и характеристиках элементов и соответствующих им ионов. К числу таких параметров относятся (см. таблицу 1): масса иона (m), теплота или энергия гидратации (E_h), ионный радиус, эффективный радиус иона, поправка к ионному радиусу (r_i , r_z , Δr соответственно), средний радиус ион-гидратного комплекса при стандартных условиях ($R_{i0} = r_z + r_w$, где r_w - среднестатистический радиус ячейки молекулы воды для стандартных условий). Указанные выше характеристики имеются или определены для 50 химических элементов (74-х ионов).

Значения энергии (теплоты) гидратации 37-ми низко- и среднезарядных ионов (катионов и анионов) для стандартных условий взяты из работ К.П. Мищенко и Г.М. Полторацкого (1968), А.М. Блоха (1969), К. Дей и Д. Селбина (1971), Л.И. Антропова (1975). К числу таких ионов относятся: Ag^{+1} , Al^{+3} , Ba^{+2} , Be^{+2} , Ca^{+2} , Cd^{+2} , Ce^{+3} , Ce^{+4} , Cl^{-1} , Co^{+2} , Cr^{+2} , Cs^{+1} , Cu^{+1} , Cu^{+2} , F^{-1} , Fe^{+2} , Fe^{+3} , Ga^{+3} , Hg^{+2} , In^{+3} , K^{+1} , La^{+3} , Li^{+1} , Mg^{+2} , Mn^{+2} , Na^{+1} , Ni^{+2} , Pb^{+2} , Ra^{+2} , Rb^{+1} , S^{-2} , Sc^{+3} , Sn^{+2} , Tl^{+1} , Tl^{+3} , Y^{+3} , Zn^{+2} . В таблице 1 порядковые номера этих ионов (из числа включённых в таблицу) выделены полужирным курсивом. По остальным ионам, главным образом высокочарядным, для получения приближённых оценок значений энергии (теплоты) гидратации ионов использовались зависимости этой характеристики от их энергии ионизации, которые для катионов лито- и сидерофильных химических элементов представлены полиномами 3-й или 4-й степени, халькофильных элементов - линейными логарифмическими уравнениями. Рассчитанные величины энергии гидратации даны в таблице 1. Значения ионных радиусов большинства химических элементов брались по Шеннону и Превитту с введением поправки на координационное число (N_{i0}).

Исходные данные при расчёте геохимической зональности

В зависимости от решаемых задач исходными данными могут являться:

- характеристики и параметры ионов из таблицы 1 - для расчёта геохимических барьеров в заданном РТ-поле (линейном, плоском, объёмном), а также при решении всех других задач;
- - данные по определению температуры и давления по флюидным включениям в минералах, сингенетичных главному этапу преобразования пород - при моделировании геохимической зональности в РТ и пространственных координатах;
- - лабораторно-аналитические данные по содержанию химических элементов в коренных породах - при моделировании геохимической зональности в пространственных координатах (Р и Т начально неизвестны и определяются в процессе вычислений);
- - различные комбинации данных, перечисленных выше.

Надёжность моделирования палеополей может быть значительно повышена, если будет повышена точность определения содержания химических элементов.

Таблица 1

Характеристики некоторых катионов, используемые в расчётах

№ П/П	Катион и его валент- ность	Масса иона ($n \cdot 10^{-25}$ кг)	Энергия гидрата- ции (Eh), $n \cdot 10^{-20}$ Дж/ион	Эффек- тивный радиус иона (r_3), $n \cdot 10^{-10}$ м.	Ионный радиус (r_i), $n \cdot 10^{-10}$ м.	Поправка к ионному радиусу (Δr), $n \cdot 10^{-10}$ м.	Средний радиус ион- гидратного комплекса (R0), $n \cdot 10^{-10}$ м
1	Ag1	1.79121879	81.2	1.0326	1.1775	-0.145	2.95849433
2	Au1	3.27075775	87.4	0.9590	1.2190	-0.26	2.88495914
3	Au3	3.27075775	724.6	1.0414	0.9013	0.14	2.96729200
4	B3	0.17950713	1016.2	0.7425	0.1995	0.543	2.66849067
5	Ba2	2.28045460	222.0	1.5105	1.4445	0.066	3.43643471
6	Be2	0.14965315	418.6	0.8012	0.3912	0.41	2.72716952
7	Cd2	1.86664168	305.4	1.0982	1.0062	0.092	3.02413428
8	Ce3	2.32678438	578.0	1.3054	1.1154	0.19	3.23130961
9	Cu1	1.055222953	101.6	0.8251	0.7441	0.081	2.75104010
10	Cu2	1.055222953	354.4	0.9462	0.7312	0.212	2.87213188
11	F-1	0.315480876	80.6	1.0396	1.3316	-0.292	2.96555786
12	Fe2	0.927376015	325.1	1.0314	0.7864	0.245	2.95739416
13	Fe3	0.927376015	796.5	0.9474	0.5894	0.358	2.87329795
14	Hg2	3.330928336	317.3	1.0568	1.0558	0.01	3.01729857
15	La3	2.306625113	553.7	1.3627	1.1527	0.21	3.28867113
16	Li1	0.115259851	88.0	0.9525	0.7565	0.196	2.87848442
17	Mn2	0.912281474	311.7	1.0758	0.8458	0.23	3.00179845
18	Mo6	1.593146541	2693.6	1.1205	0.6505	0.47	3.04643850
19	Ni2	0.974751949	355.4	0.9436	0.6836	0.26	2.86952114
20	Pb2	3.440691716	251.8	1.3318	1.2678	0.064	3.25773123
21	Pb4	3.440691716	1214.2	1.1048	0.8248	0.28	3.03073837
22	Si4	0.466378124	1509.5	0.8887	0.3787	0.51	2.81461942
23	Sn2	1.970925192	265.6	1.2626	1.1426	0.12	3.16659286
24	Sn4	1.970925192	1316.2	1.0191	0.7041	0.315	2.94507778
25	Sr2	1.454987491	242.3	1.3837	1.2538	0.13	3.30970256
26	Tl1	3.393697712	57.2	1.4650	1.6020	-0.137	3.39093630
27	Tl3	3.393697712	704.2	1.0715	0.9015	0.17	2.99748490
28	W6	3.052949672	2446.8	1.2335	0.7235	0.51	3.15947357
29	Y3	1.476340703	611.1	1.2347	0.9707	0.264	3.16067960
30	Zn2	1.085677724	343.4	0.9765	0.7445	0.232	2.90245366

Для расчёта активационных барьеров химических элементов, т.е. геохимической зональности, как функции температуры и давления, в качестве исходных данных использовались числовые характеристики ионов, приведенные в таблице 1, а именно: масса иона, ионный радиус, поправка к ионному радиусу или эффективный радиус иона, относительный удельный объём и относительная диэлектрическая проницаемость воды. Расчёты выполнены для 50 химических элементов путём решения системы уравнений, составленной на основе формул (2)-(6). Результаты вычислений для наиболее характерных ионов показаны на рисунках 1 и 2.

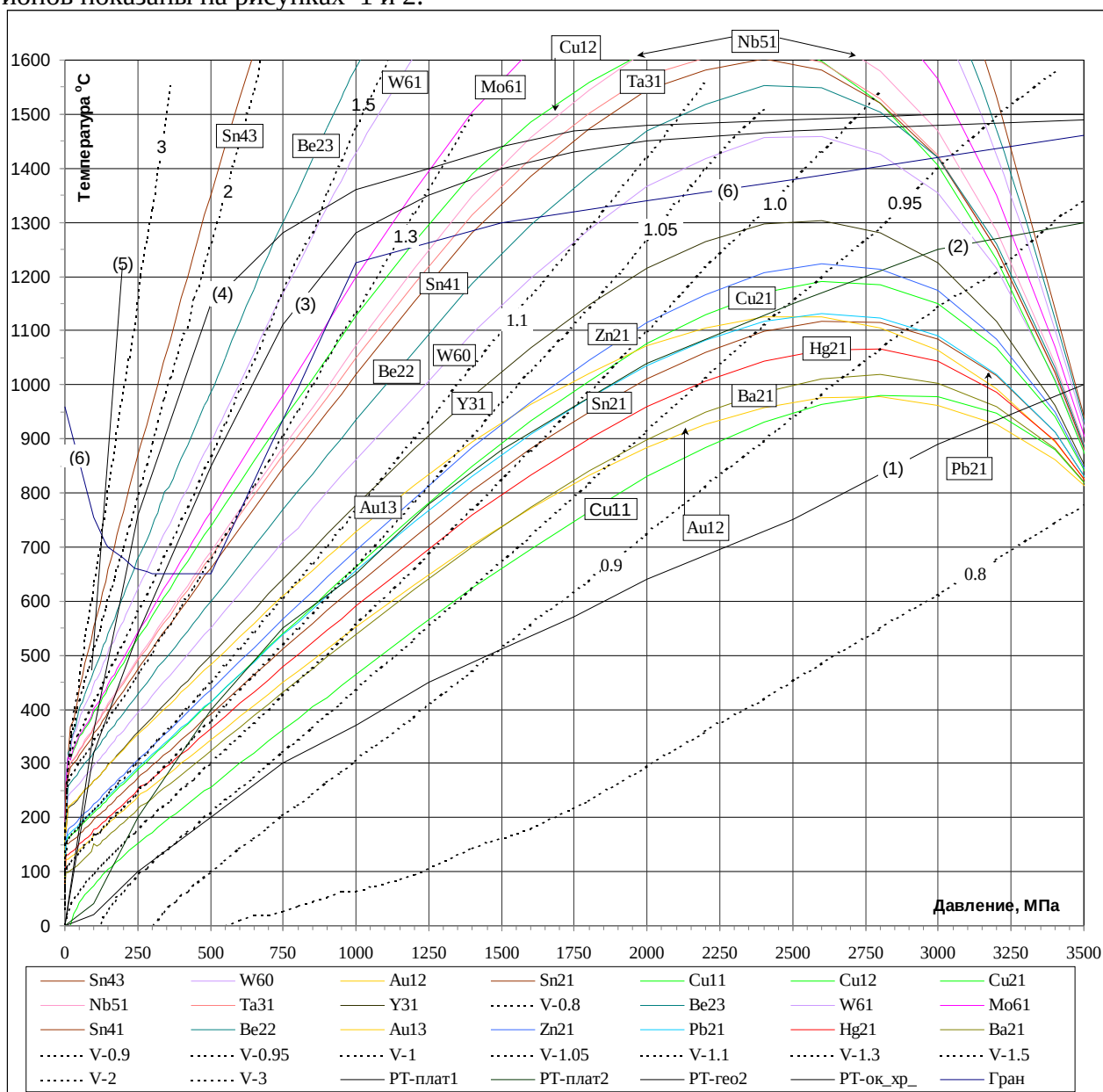


Рисунок 1. Геохимические барьеры (линии активации) ионов основных рудных и сопутствующих им химических элементов, изолинии относительного удельного объёма воды и линии типовых термобарических профилей в земной коре.

Обозначения: **Pb21** - линии геохимических барьеров химических элементов, указанных символами, цифры - валентность иона и его резонансное (ротационное) число; ----1.1---- изолинии относительного удельного объёма воды и их значения; - термобарические профили (геоизотермы): (1) - минимальный платформы, (2) - максимальный платформы, (3) - геосинклинали и океанического срединного хребта; (4) - геосинклинали, (5) - рудно-магматической системы и крупного рудного месторождения, (6) - линия гранитизации

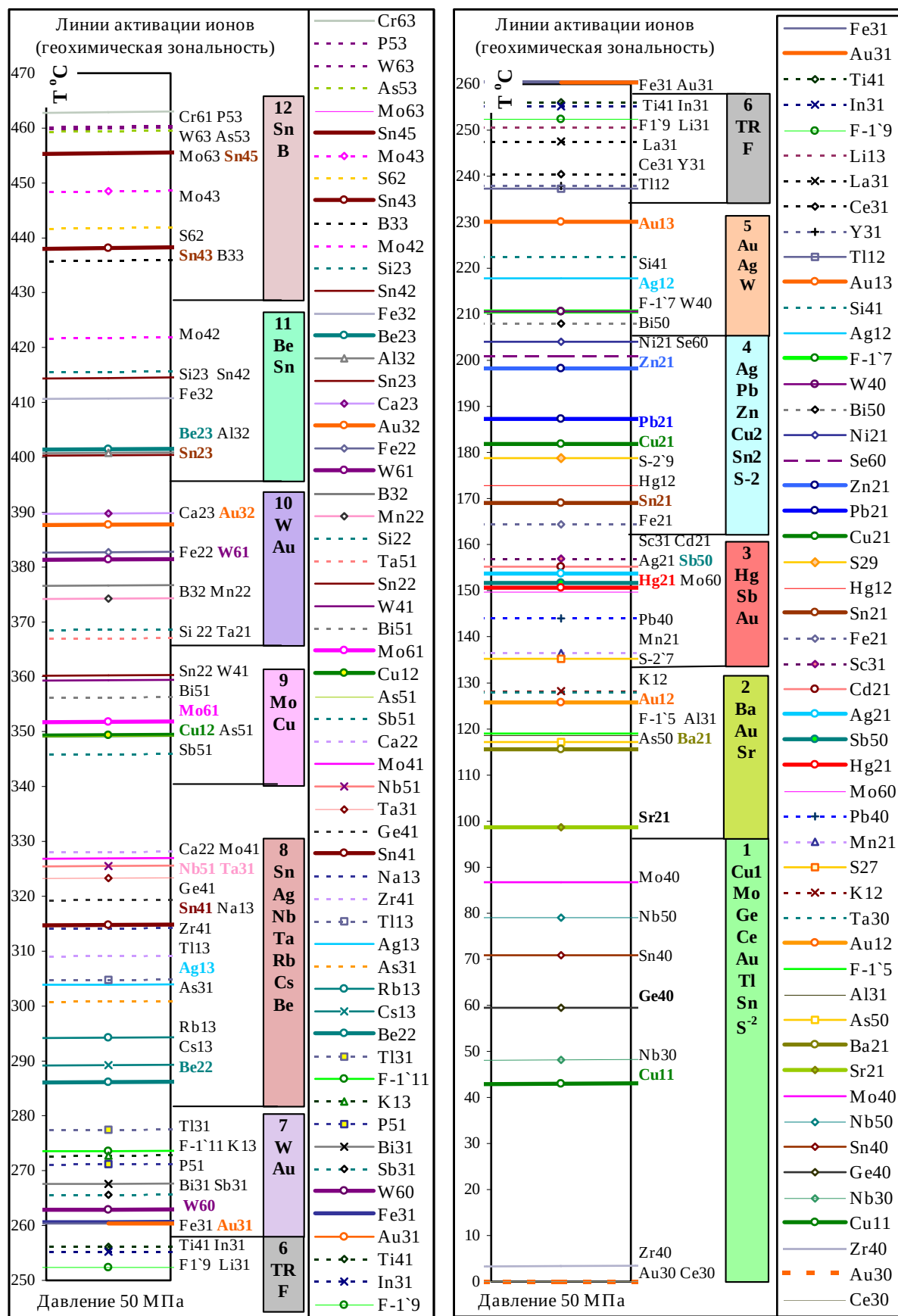
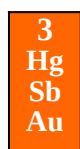


Рисунок 2. Линии геохимических барьеров при фиксированном давлении (50 МПа) и переменной температуре.

Обозначения.



Базовые ассоциации химических элементов:

их номера и символы основных рудообразующих элементов.

1 - низкотемпературная (медная);

2 - баритовая, золото-баритовая;

3 - ртутная, сурьмяно-ртутная;

4 - полиметаллическая (свинцово-цинковая с серебром медью и др.);

5 - золотая (золото-серебряная, золото-кварцевая);

6 - редкоземельная, флюозирит-редкометально-редкоземельная;

7 - вольфрамовая, золото-вольфра-мовая;

8 - олово-редкометальная;

9 - медно-молибденовая;

10 - вольфрамовая;

11 - редкометальная;

12 - оловянная.

В легенде и на рисунке рядом с символом химического элемента цифрами обозначено: первая цифра - зарядное число катиона (валентность), вторая - резонансное число, которое опосредованно определяет энергию и амплитуду колебаний иона.

Линии химических элементов на колонке зональности и символы химических элементов в легенде к рисунку расположены в одинаковой последовательности.

Комментарии к расчётам геохимической зональности в земной коре

В соответствии с теорией геохимической зональности каждый химический элемент имеет "свои" активационно-энергетические барьеры, положение которых в литосфере регулируется механизмом взаимодействия иона с молекулами воды. **Именно эти барьеры и определяют положение химических элементов, а точнее их минералов в земной коре и её фрагментах.** На РТ-диаграммах геохимические барьеры показаны в виде кривых линий, начинающихся в точке наиболее низких значений Р и Т (близ земной поверхности) и сходящихся в точку при Р=3554 МПа и Т=700°C, то есть на глубине приблизительно 100-110 км (рис. 2).

Теоретически количество таких барьеров может быть бесконечно большим. Однако не все они одинаково проявлены в природных условиях. Сравнивая теоретические расчёты с эмпирическими данными, можно констатировать, что в конкретных условиях земной коры и литосферы в целом наиболее отчётливо проявлен один, реже 2-3 низко- и умеренноэнергетических барьера. На рисунке 1 также видно, что в интервале давлений ~450-3300 МПа, соответствующих глубинам от 14-15 км до 90-95 км, линии активации ряда ионов химических элементов располагаются в области высоких температур и поэтому возможность реализации соответствующих процессов с их участием остаётся неясной. К числу таких ионов относятся преимущественно средне- и высокозарядные ионы. Каждый ион характеризуется своим промежутком давления, в пределах которого действует это правило.

Теоретический ряд геохимической зональности "сверху вниз" имеет следующий вид:

Cu₁-Ba-As₁-Au₁-Hg-Sb-Ag₁-Cd-Sn⁺²-Cu₂-Pb-Zn-Ni-Ag₂-Si-Au₂-TR-Li-Fe-Au-W₁-Be₁-Ag₃-Sn⁺⁴₁-Ta-Nb-Cu₃-Mo₁-W₂-Be₂-B-Sn⁺⁴₂-As₂-Mo₂-W₃. В ряду зональности цифрами при символе химического элемента обозначено: внизу - порядковый номер встречаемости элемента в ряду зональности, вверху - зарядное число (валентность). **Приведенный ряд - неполный.** Здесь не показаны некоторые линии **F, S, K, Na, C, Al, P, Co, Cr, Ce, V, Ge, Zr, Hf, Sc, Bi, Mg, Ga, In, Pb, Rb, Cs, S, Se, Te, Cl, Br, I**, т.к. рисунок перегружен. Аналогичная последовательность химических элементов имеет место вдоль типовых термобарических профилей: платформы, геосинклинали, (складчатой области), зон спрединга, рудно-магматических систем, месторождений и т.д.

Аналогичная последовательность химических элементов имеет место вдоль типовых геотерм платформы, геосинклинали (складчатой области), зон спрединга, рудно-магматических систем, месторождений и т.д. Наблюдается хорошее соответствие теоретических расчётов и фактических данных, как геохимических так и термобарических. Объяснить это соответствие случайным совпадением невозможно, так как вероятность его реализации близка нулю. Кроме того, на колонке зональности (рис. 2) нетрудно заметить генетические и минералообразующие ассоциации химических элементов. Например, **генетические ассоциации:** Ba+Al; As+Au; Sb+Hg+Mn; Ag+Cd+Sn⁺²+Cu+Pb+Zn; Ag+Au, Au+Si, Au+W, La+Ce+Y; Fe+Au+W+P; Ag+Sn; Ta+Nb; Cu+Mo; B+Sn и т.д.; **минералообразующие ассоциации:** Sn²1+Cu²1⇒станнин; Sn²1+Pb²1⇒тиллит; W⁶0+Fe³1⇒вольфрамит; W⁶1+Mn²2+Fe²2⇒гюбнерит, вольфрамит; W⁶1+Ca²3⇒шеелит; Be²3+Al³2⇒берилл, эвклаз и т.д. (цифровые индексы при символах элементов означают: первая вверху – валентность, вторая –резонансное число).

С повышением давления и, следовательно, глубины температурный интервал линий активации (ΔT) возрастает от $\Delta T = 400 - 500^\circ\text{C}$ при $P = 50 \text{ МПа}$ до $\Delta T = 800 - 1000^\circ\text{C}$ при $P = 1000 \text{ МПа}$ (в первом случае $\Delta T = T_{\text{max}} - T_{\text{min}} = 600 - 100^\circ\text{C}$; во втором $\Delta T = 1400^\circ\text{C} - 400^\circ\text{C}$). На глубинах порядка 35 км ($P \sim 1000 \text{ МПа}$) энергетические уровни активации катионов многих элементов находятся в области температур выше 1400°C и $\delta > 1,43$, т.е. за пределами термобарического профиля геосинклинали. Отсюда следует, что условия реализации активационных барьеров для высокозарядных катионов при $n > 1$ на глубинах порядка 60-90 км; вероятно, отсутствуют. На глубинах около 110 км ($P_j = 3500 \text{ МПа}$) в мантии спектр активации катионов вдоль координаты δP (или T) сжимается, до точки. Примечательно, что по современным представлениям на указанной глубине происходит выплавление базальтовой магмы.

Если на P-T диаграмме (рисунок 2) показать линию термобарического профиля с температурным градиентом, характерным для складчатой области (геосинклинали), то координаты точек её пересечения с линиями активационно-энергетических барьеров химических элементов будут соответствовать температуре и давлению, наиболее благоприятным для образования соответствующих рудных и нерудных минералов гидротермального генезиса.

Наблюдается хорошее соответствие теоретических расчётов и фактических данных (см. ниже раздел «Сравнение теоретических и эмпирических данных»). Как геохимических так и термобарических. По крайней мере, ничего лучшего авторам пока не встречалось ни в отечественной, ни в зарубежной литературе. Объяснить это соответствие случайным совпадением невозможно, так как вероятность его реализации близка нулю.

Ассоциации химических элементов

По результатам теоретических расчётов выделено 12 базовых ассоциаций элементов, которые достаточно хорошо согласуются с существующими в природе формациями рудных месторождений (таб. 2). В природных условиях количество ассоциаций элементов превышает число выделенных (т.е. более 12), а каждая из них может иметь более широкий элементный состав в сравнении с данными, приведенными в таблице 2. Это объясняется сложностью геологических процессов, приводящих в определённых условиях к наложению одной ассоциации на другую. Учитывая это, ассоциации, приведенные в таблице 2, целесообразно называть "базовыми", а образовавшиеся за счёт их полного или частичного наложения друг на друга - "смешанными". Химические элементы, образующие базовые ассоциации в земной

коре, сближены в пространстве и времени, смешанные - сближены в пространстве, но разорваны во времени. С позиций геологического времени первые - монокронны и во многих случаях могут идентифицироваться с парагенезисами, вторые - полихронны. В условиях низкого температурного градиента базовые ассоциации элементов могут распадаться на отдельные элементы или их сочетания, образующиеся по принципу ближайшего соседства в ряду зональности. В результате, кроме перечисленных в таблице 2, в земной коре могут иметь место такие специализации пород, как борная, редкометальная, медно-висмутовая, золотая, серебряная, серная и др.

Таблица 2

Базовые ассоциации химических элементов в земной коре

Номер	Название ассоциации	Химические элементы	
		Главные	Второстепенные
1	Медная	Cu	S, Bi, Au, Ge, Mo
2	Баритовая	Ba, Sr, F, Mn	Mo, As, Sb, Au
3	Ртутная, сурьмяно-ртутная	Hg, Sb, As, Fe	Cd, Mn, Au
4	Полиметаллическая	Pb, Zn, Ag, Cu, Cd	Au, Ag, Na, Sn
5	Золото-серебряная, золото-кварцевая	Au, Ag Au, Si	Si, W W, As, Fe
6	Редкоземельная	Y, La, Ce	Li, Bi, Fe, Si
7	Вольфрамовая, золото-вольфрамовая	W W, Au	Au, Fe, Bi, Li, Ta, Cs Fe, Bi, Li, Ta, Cs
8	Олово-редкометальная, олово-серебряная	Sn, Be Sn, Ag	Cs, Ta, Bi, Ag, Au? - « -
9	Молибденовая, медно-молибденовая	Mo Mo, Cu	Cu, As, Sb, Li, Cs, K, Mg As, Sb, Li, Cs, K, Mg
10	Вольфрамовая, олово-вольфрамовая	W W, Sn	Sn, Cu, Be, B, Ca, Fe, Mn, Bi, Li, Cu, Be, B, Fe, Mn, Bi, Li, Al
11	Олово-редкометальная	Sn, Be	Si, Al
12	Оловянная	Sn	B, Fe, W, Mo, As, Be, Ge, Bi, Si

Некоторые замечания, касающиеся особенностей эволюции состава и пространственного распределения ассоциаций химических элементов в земной коре.

1). Геохимические ассоциации рудных месторождений представляют собой конечный продукт эволюции распределения микроэлементов в земной коре. Перечень ассоциаций, полученных на основе теоретических расчётов и приведенных в таблице 2, в значительной степени согласуется с известными рудными формациями и типами рудных месторождений, выделенными в рудной геологии на основе многочисленных эмпирических данных.

2). Из теоретических посылок следует, что металлогеническая (рудно-геохимическая) специализация блоков земной коры на этапе регионально-коровых преобразований в значительной степени определяется типом термобарического профиля. Характер последнего зависит от многих геологических факторов. При этом чем меньше температурный градиент, тем в большей степени проявляется разобщённость химических элементов по вертикали. Пространственные флюктуации температурного градиента могут привести к разделению базовых ассоциаций на части (вплоть до моноэлементной специализации пород) или, наоборот, - к их пространственному смыканию или смешению. Флюктуации во времени с тенденцией увеличения термоградиента приведут в конечном счёте к наложению базовых ассоциаций одна на другую.

3). При возникновении в земной коре локальных источников энергии (тепла) характер термобарического профиля резко меняется: выше этого источника градиент резко возрастает, ниже удерживается на прежнем уровне или слабо растёт. В этом варианте возможно бесчисленное множество ситуаций, которые в отдельных случаях могут быть восстановлены посредством компьютерного моделирования.

4). Итоговая картина конечного распределения химических элементов будет характеризоваться следующими особенностями:

а) на участках развития слабо изменённых пород, то есть пород-реликтов, сохранится первичное распределение микроэлементов, которое определяется особенностями их генезиса;

б) в комплексах пород, подвергшихся региональному метаморфизму, сохранится регионально - коровое распределение микроэлементов, которое будет подчиняться основным положениям теории геохимической зональности и может быть восстановлено с помощью компьютерного моделирования;

в) в пределах аномальных геохимических объектов будет преобладать локально-верхне-коровое распределение химических элементов, которое будет отражать геохимическую зональность в пределах рудно-магматических систем и отдельных рудных объектов и также может быть распознано методами компьютерного моделирования.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ РЕГИОНАЛЬНОЙ И РУДНОЙ ГЕОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ

РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ

Потенциальные ресурсы теории геохимической зональности в решении задач теоретической и прикладной геологии, геохимии, металлогении оцениваются достаточно высоко. Однако для этой цели в настоящее время используются далеко не все возможности существующего математического аппарата. Созданные технологии позволяют решать два рода задач.

К задачам первого рода относятся такие, решение которых осуществляется при наличии данных о распределении температуры и давления в пределах объекта оценки. Эти данные могут быть получены путём моделирования температурных полей для различных геологических ситуаций прошлых эпох, в том числе и по составу газово-жидких включений в минералах (палеозадачи), или рассчитываться по характеристикам современных тепловых потоков (современные варианты задач). В результате может быть получена модель распределения химических элементов в земной коре или локальном объекте оценки, интерпретация которой позволяет выделить генетические ассоциации химических элементов, определить рудно-геохимическую специализацию исследуемого объекта, осуществить районирование территории и др. Типичными примерами решения таких задач являются геохимические разрезы земной коры Берингова моря (рис. 3) и Дубровского оловорудного месторождения (рис. 5).

При решении задач второго рода в качестве исходных данных используются содержания химических элементов в точках наблюдения, по которым моделируются варианты распределения в литосфере температуры, давления, химических элементов; выделяются ассоциации химических элементов; определяется геохимическая специализация пород, комплексов пород, блоков земной коры, оцениваются геохимические характеристики, используемые при региональном прогнозировании. Примером решения таких задач может служить геохимический разрез земной коры Сихотэ-Алинской складчатой области (рис. 4). К их числу можно отнести также и геохимический разрез Криничного золоторудного месторождения (рис. 6).

В целом, рассматриваемые методы, могут с успехом применяться практически на всех стадиях и при всех масштабах геологоразведочных работ, а так же при научных исследованиях. С их помощью можно осуществлять не только площадное и локальное количественное прогнозное моделирование, но и решать разнообразные задачи региональной геологии, металлогении, тектоники. В общем случае теория геохимической зональности позволяет создавать объёмные геохимические модели изученных блоков земной коры, частными вариантами которых являются различно ориентированные в пространстве разрезы этих моделей. Последние в подавляющем большинстве своём являются полихронными, хотя имеются возможности получения монокронных. Создание таких моделей и разрезов имеет существенное научное и прикладное значение. Они могут использоваться для целей выяснения особенностей эволюции земной коры, определения источников рудного вещества, выявления рудно-магматических систем, прогнозирования полезных ископаемых, оценки

рудно-геохимической и металлогенической специализации геологических комплексов пород, тектонических блоков, зон и т.д.

Важно отметить, что эффективное решение названных выше задач возможно только с использованием компьютерной техники и соответствующего программного обеспечения.

РАСЧЁТ И ПОСТРОЕНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ РАЗРЕЗОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Геохимический разрез земной коры Берингова моря вдоль линии перемены дат

Процедура моделирования литосферы Берингова моря базируется на математическом аппарате теории геохимической зональности и относится к задачам первого рода. В качестве исходных данных здесь использовались значения температуры и давления. Распределение температуры в разрезе заимствовано из работы И.К. Туезова и В.Д. Епанешникова (1988). Давление определялось как литостатическое. Модель, отражающая современную ситуацию, рассчитана до глубин 70-100 км. На прилагаемом рисунке показана лишь верхняя половина модели до глубины 40 км, охватывающая земную кору на всю её мощность. Необходимо отметить следующие особенности современного распределения химических элементов в разрезе земной коры рассматриваемого региона.

- 1). Под грядой Алеутских островов накапливаются Sn, Be, W, Ag, а на стыке с плитой Берингова моря - Au, Ag, Pb, Zn.
- 2). В краевой части материка, где мощность коры увеличивается до 30 км, на глубине 8-9 км происходит накопление Au, Ag, а в нижней части коры - Au, W, Be, Sn, Ag.
- 3). В пределах плиты Берингова моря на глубине 8-10 км происходит раскисление базальтового слоя коры - накапливаются Si, K, редкие земли, что можно рассматривать в качестве одного из этапов эволюции земной коры - преобразование базальтового слоя в гранитный.

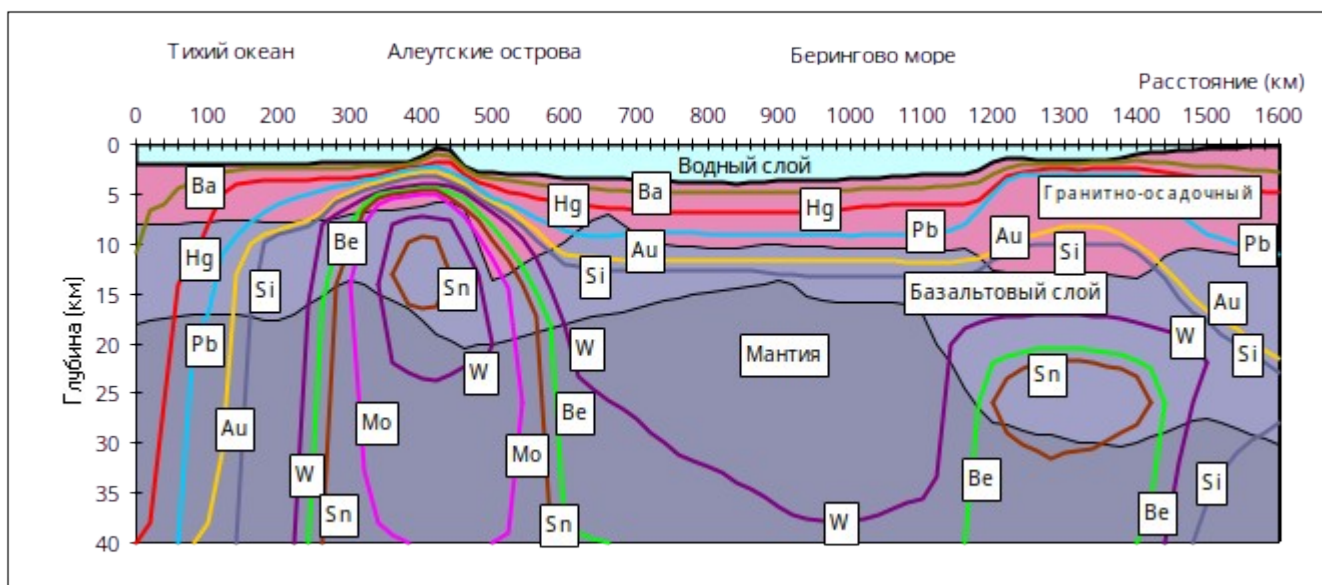


Рисунок 3. Модель современной геохимической зональности в разрезе литосферы Берингова моря вдоль линии перемены дат. Сплошными цветными линиями на рисунке показаны активационные (геохимические) барьеры, определяющие распределение в земной коре химических элементов, показанных символами в разрывах соответствующих линий

Широтный геохимический разрез земной коры Сихотэ-Алинской металлогенической области

Линия моделируемого разреза показана на прогнозно-геохимической карте (рис. 17, линия А-А). Длина разреза 360 км. Исходными данными являлись результаты лабораторно-аналитических исследований проб коренных пород, отобранных при проведении МГХК-1000 на Приморском полигоне. Моделирование осуществлялось по содержаниям химических элементов, осреднённым по площадкам 30х30 км, т.е. по девяти точкам наблюдения. Показанная на разрезе полихронная геохимическая ситуация отражает распределение химических элементов в периоды формирования выявленных в процессе расчётов характерных ассоциаций химических элементов. На разрезе в интервале глубин до 2 - 3 км видна геохимическая специализация пород верхней части земной коры, хорошо согласующаяся с существующими данными и представлениями. В интервале глубин от 5 до 25 км расчётами прогнозируются древние магматические очаги, скорее всего, гранитного состава. Структура модели геохимического поля отражает основные особенности геохимической специализации блоков земной коры, что может быть использовано при МГХК-1000, 200, региональном геологическом картировании, металлогенических построениях, прогнозировании месторождений полезных ископаемых и т.д.

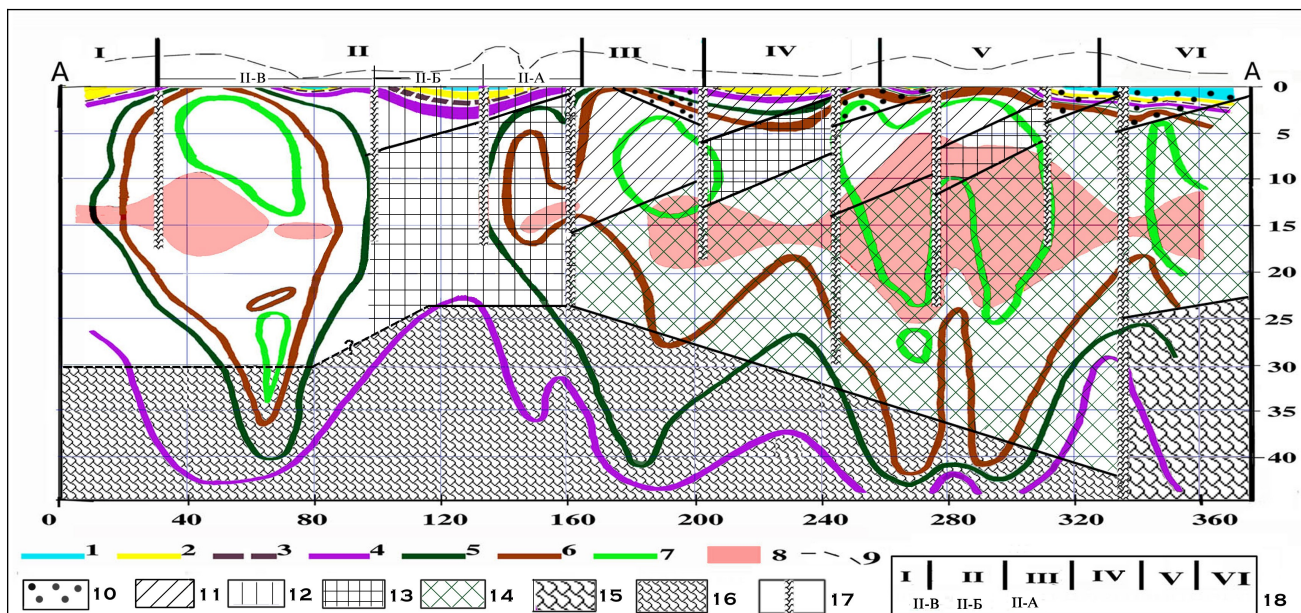


Рисунок 4. Геохимический разрез земной коры Сихотэ-Алинской металлогенической области по линии А-А (см. рисунок).

Обозначения: 1 – 7 - линии активационных (геохимических) барьеров химических элементов, определяющих рудно-геохимическую специализацию геологических комплексов пород и металлогенических структур как: 1 – полиметаллическая (Pb, Zn, Ag, Cu, Au); 2 – золото-кварцевая (Au, Si, Ag); 3 – редкоземельная (La, Ce, Y, Li); 4 – вольфрамовая (W, Au, Bi, Nb); 5 – бериллий-редкометальная (Be, Cs, Rb); 6 – оловянная (Sn, Ag, Mo и др.); 7 – молибденовая, медно-молибденовая (Mo, Cu, W, Bi); 8 – магматические очаги предположительно гранитного состава, существовавшие в период формирования рудно-геохимических ассоциаций химических элементов; 9 - расчётная палеоповерхность. Характеристики плотностной модели земной коры и верхней мантии Приморья (по А.М. Петрищевскому, 1988): 10 – мезо-кайнозойские вулканогенно-осадочные образования (2.60 г/см^3), 11 – позднепалеозойский складчатый комплекс (2.65 г/см^3), 12 - раннепалеозойский складчатый комплекс (2.70 г/см^3), 13 – допалеозойский складчатый фундамент (2.75 г/см^3), 14 – земная кора субокеанического типа (от 2.80 г/см^3 в зоне III до 2.95 г/см^3 в зоне VI), 15 - разуплотнённая мантия (3.1 г/см^3), 16 – нормальная мантия (3.2 г/см^3), 17 – структурные

швы; 18 - пересекаемые разрезом металлогенические зоны: I – Гродековская, II – Ханкайская (II-A – восточный фрагмент Ханкайской зоны, II-B – Синегорско-Черниговская подзона, II-B – западный фрагмент Ханкайской зоны), III – Арсеньевская, IV – Центральная, V – Восточная, VI – Прибрежная. Оси координат – расстояние в километрах.

ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ В РАЗРЕЗАХ НЕКОТОРЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИМОРЬЯ

Моделирование осуществлено по продольному разрезу Дубровского оловорудного касситерит-силикатного месторождения и поперечному разрезу Криничного золоторудного месторождения, относящемуся к золото-кварцевой малосульфидной формации. Результаты моделирования представлены на рисунках 5 и 6.

Геохимическая модель Дубровского месторождения

Месторождение располагается в центральной части Кавалеровского рудного района, сложенной песчано-сланцевыми отложениями нижнего мела и по запасам олова относится к числу крупных. Исходные данные - значения давления и температуры, установленные А.М. Кокориным по включениям в касситерите и кварце. Недостающие для построения изотерм и изобар значения были оценены приблизительно посредством интер- и экстраполяции имеющихся данных. Распределение в разрезе исходных характеристик показано на рисунке 5.

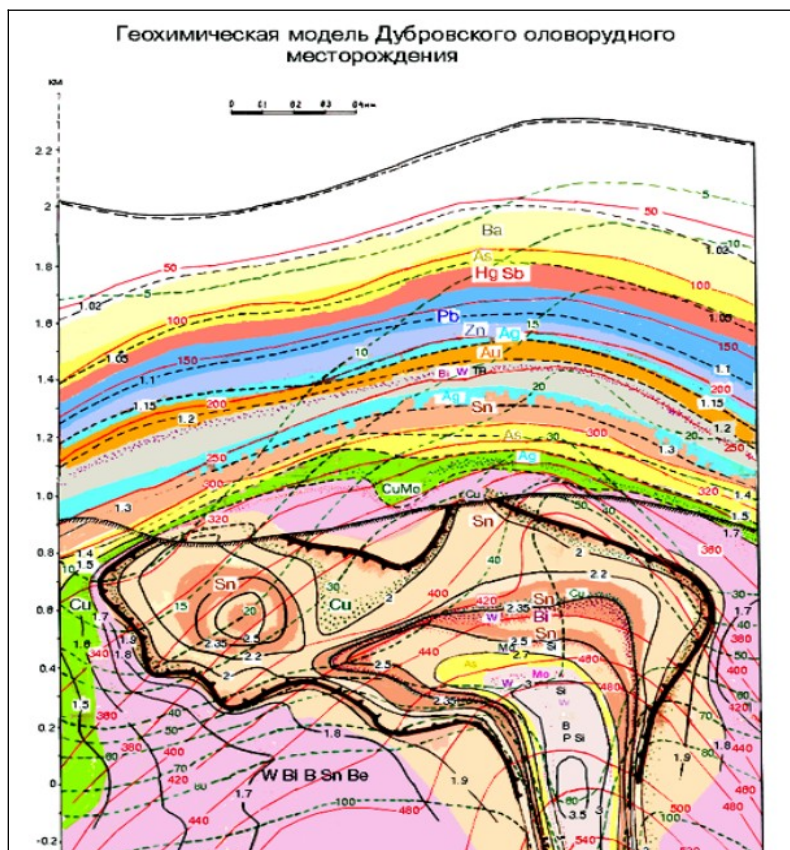


Рисунок 5. Геохимическая модель продольного разреза Дубровского оловорудного месторождения. Обозначения: 1 – изотермы и их значения, в °C; 2 – изобары и их значения, в МПа; 3 – изолинии относительного удельного объема воды и его значения; 4 – контур промышленных руд олова; 5

Кроме того, на рисунок вынесены: контур распространения промышленных руд олова, установленный в процессе отработки месторождения, и линия современной земной поверхности.

Остальные показанные на рисунке линии и поля (относительного удельного объема воды и геохимических барьеров химических элементов) рассчитаны.

Изображенная на рисунке 5 картина представляет собой «моментальный» снимок ситуации рудоотложения, которая изменялась во времени и пространстве с общей генеральной направленностью в сторону понижения температуры и в меньшей степени давления. В силу этого, линии, а в общем случае поверхности, активации ионов химических элементов (геохимические барьеры), изменяли свою конфигурацию, замыкались, исчезали, в итоге проходя через весь объем оконтуренных ими участков. При замыкании

контуров ниже них возникали новые геохимические барьеры, препятствовавшие проникновению в верхние уровни разреза химических элементов в последовательности от высокотемпературных элементов к низкотемпературным.

В итоге этот (или подобный ему) механизм формирует аномальный (рудный) объект и зональное распределение химических элементов в его пределах. Рассчитанные в процессе моделирования данные могут использоваться для количественного прогнозирования оруденения по алгоритмам, основанным на формализованной геохимической модели аномального геохимического поля.

Полученная картина геохимической зональности отражает фиксированную во времени ситуацию, имевшую место в период оптимального рудообразования, когда формировалось аномальное геохимическое поле, то есть рудные тела и первичный ореол месторождения. На рисунке видно, что химические элементы в пределах исследуемого пространства распределены зонально (сверху вниз): Ba, Hg, Sb, As₁, Pb, Zn, Ag₁, Au, W₁, Bi₁, TR, Ag₂, Sn₁, As₂, Cu, Mo₁, W₂, Bi₂, B₁, Be₂, Sn₂, W₃, As₃, Mo₂, B₂, Bi₃, P. Взаимное расположение элементов в направлении сверху вниз близко таковому эмпирическому ряду зональности для касситерит-силикатных месторождений Приморья.

Геохимическая модель разреза Криничного месторождения (Южное Приморье)

Криничный золоторудный узел располагается в Южном Приморье, 45 км западнее г. Находка. Аномальное геохимическое поле узла сложено полого залегающими песчано-сланцевыми толщами триаса и юры, прорванными раннемеловыми магматическими породами умеренно кислого и среднего состава (гранодиориты, андезиты). Для моделирования геохимического поля Криничного месторождения были использованы представления о геологическом строении территории, а также содержания золота и других химических элементов в отдельных пробах коренных пород.

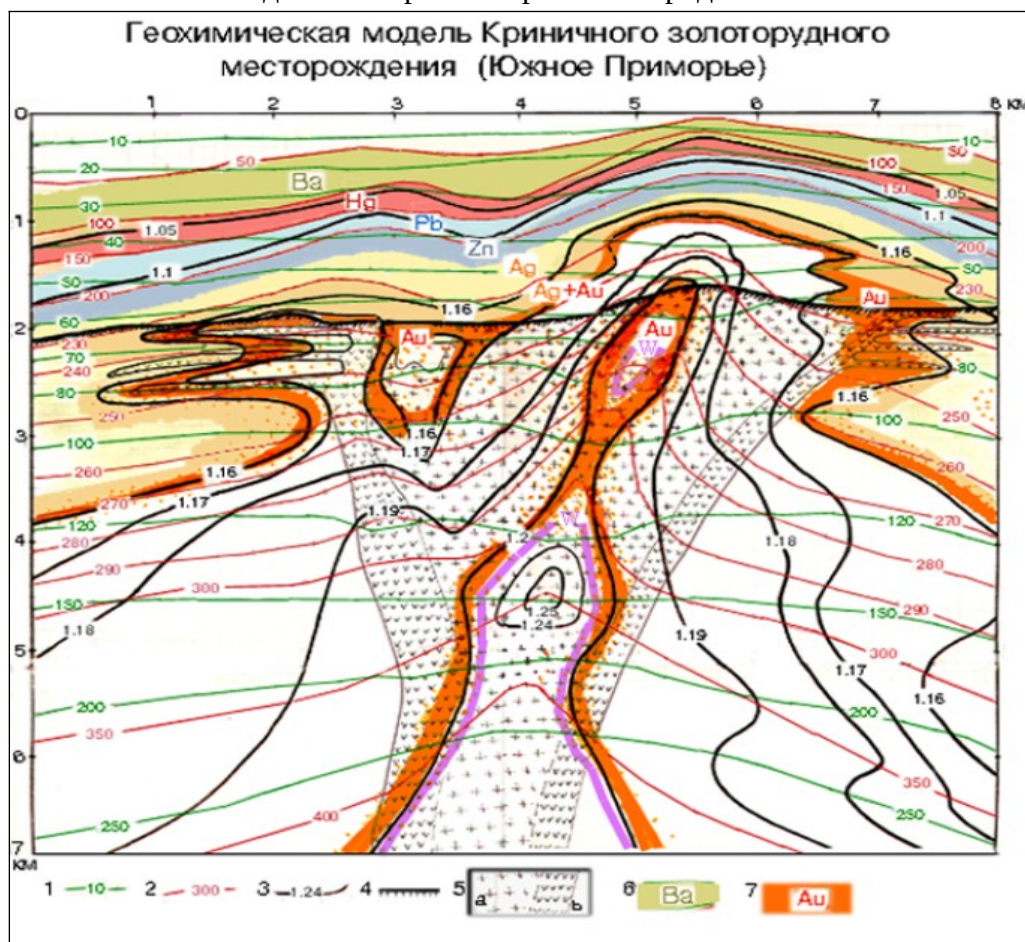


Рисунок 6. Геохимическая модель поперечного разреза Криничного золоторудного месторождения. Обозначения: 1 – изобары и их значения в МПа; изотермы и их значения в °С; 3 – изолинии относительного удельного объёма воды; 4 – линия современной земной поверхности; 5 – гранодиориты (а), андезиты (б); 6, 7 – участки активации (осаждения) рудных элементов.

Полученная модель отражает зональное строение аномального геохимического поля месторождения, степень его эродированности и прогнозируемое распределение золота в поперечном вертикальном разрезе. В центральной части разреза геохимические барьеры золота имеют крутое падение, тогда как на флангах они слабо наклонны, а на отдельных участках почти горизонтальны. Всё это подтверждается фактическими данными. В центральной части месторождения развиты жильно-вкрапленные и прожилковые зоны крутого падения, а на периферии известны послойные рудные тела стратиформного типа с пониженной пробностью золота и содержанием серебра до 200 г/т

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ НА ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

Согласно разработанной теории зональности химические элементы в земной коре накапливаются преимущественно в условиях относительно высокой активации их ионов. Это происходит при определённых для каждого иона значениях температуры и давления. Математический аппарат теории позволяет по содержанию элементов в коренных породах определить возможную геотерму, положение на ней исходной точки наблюдения (пробы) и точек пересечения с геотермой линий геохимических барьеров. Для исходной точки наблюдения расчётами оцениваются: температура, давление, относительный удельный объём воды, парагенетические ассоциации химических элементов. Эти данные используются для определения рудно-геохимической специализации опробованного породного комплекса, степени эродированности территории и её перспективности на полезные ископаемые (в первую очередь – рудные).

ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ СВИНЦА)

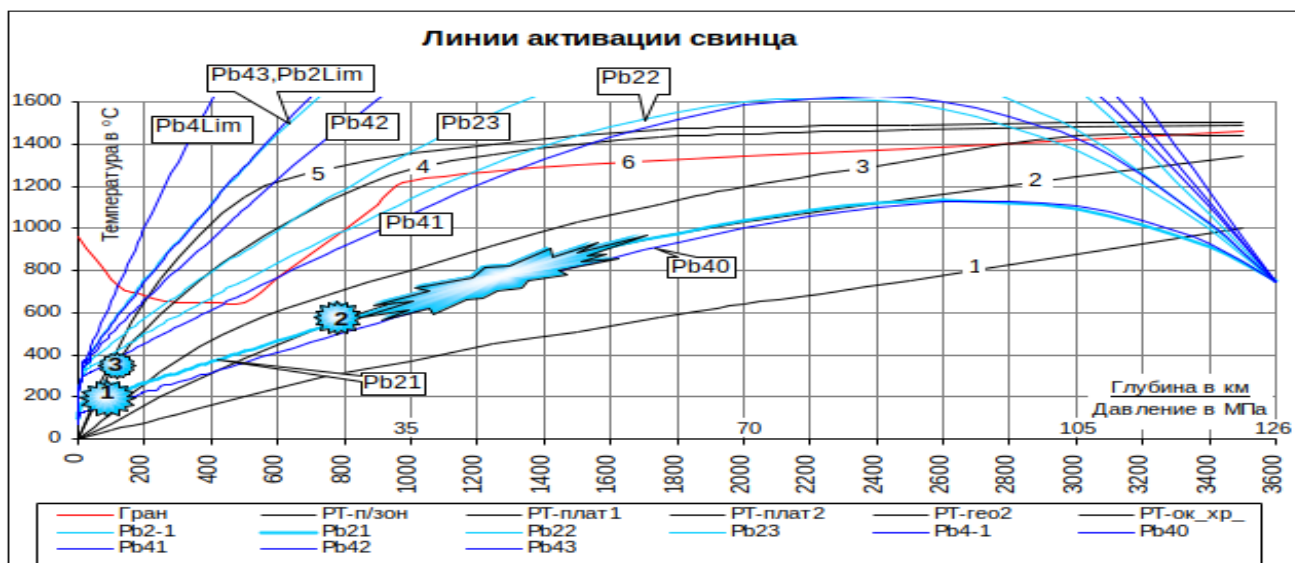
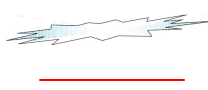


Рисунок 7. РТ диаграмма геохимических барьеров ионов свинца в земной коре.

Обозначения:

	а - типовые термобарические профили: 1 – минимальный платформы, 2 – максимальный платформы, 3 – переходной зоны, 4 – океанического хребта (зоны спрединга), 5 – геосинклинали; 6 – линия гранитизации. б – линия активации четырёхвалентного иона свинца, в – то же двухвалентного (первая цифра при символе элемента – валентность, вторая – резонансное число).
	Области формирования аномальных геохимических объектов свинца (месторождений, рудопоявлений, аномалий): 1 - жильного и скарнового типов (РТ условия характерны для подавляющего большинства полиметаллических месторождений складчатых областей, геосинклинальных и переходных зон, вулканогенов); 2 - прожилково-вкрапленных стратиформного типа (например, Холоденское м-е), 3 – скарнового типа (зон активизации и др.).

	Глубинные области обогащения свинцом вмещающих пород на этапах, предшествовавших формированию рудных объектов. Граница плавления гранитов
---	--

На рисунке 7 видно, что, основной геохимический барьер свинца, на котором происходит образование галенитовых руд, соответствует линии активации двухвалентного катиона Pb^{+2} (на рисунке - Pb^{+1}). Аналогичные диаграммы построены для других химических элементов, формирующих рудные тела и первичные ореолы полиметаллических месторождений.

ОЛОВОРУДНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

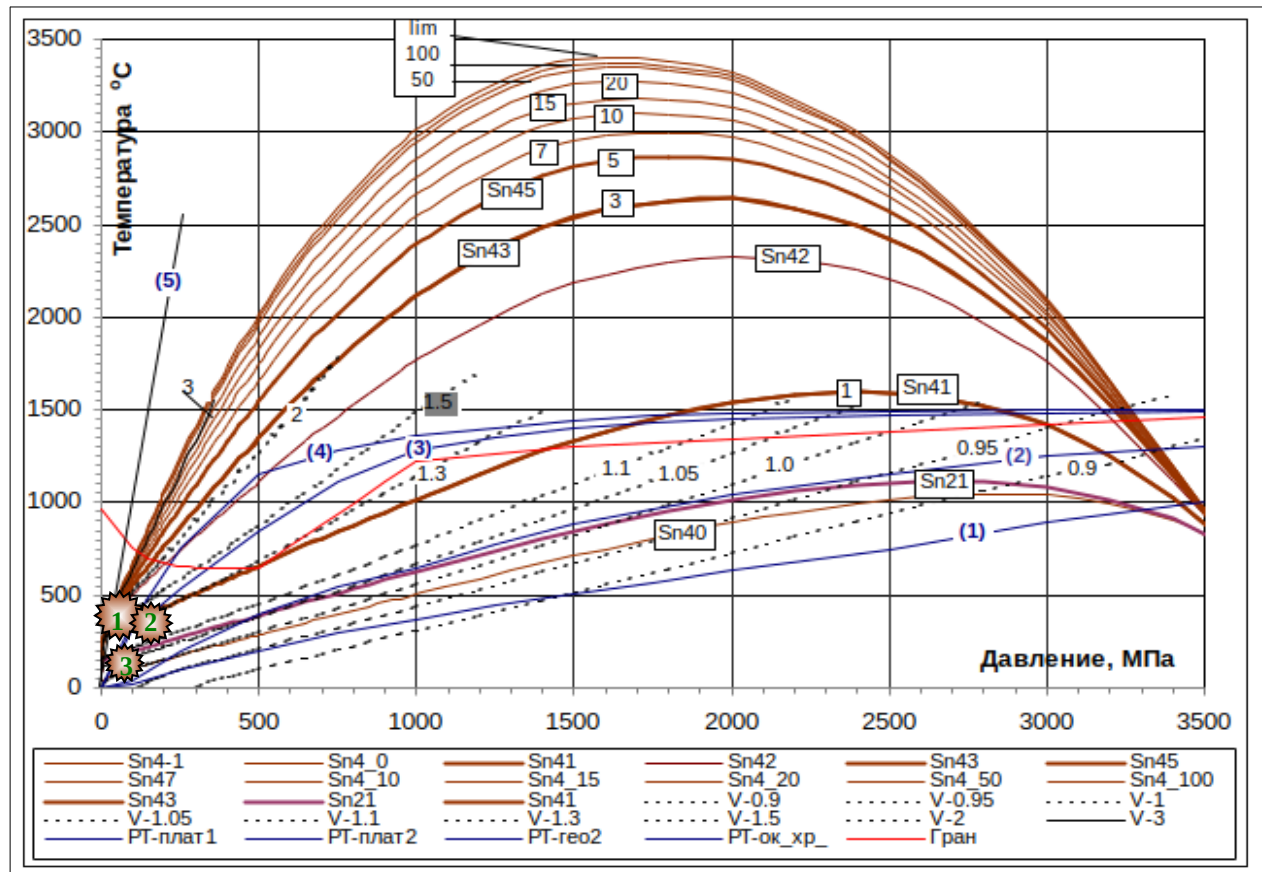


Рисунок 8. Диаграмма линий активации (геохимических барьеров) ионов олова в земной коре.
Обозначения:

1 2 3	Линии активации четырёхвалентных ионов олова: 1 - обычные (в квадрате – значение ротационного числа); 2 – наиболее характерные геохимические барьеры, на которых происходит формирование аномалий и месторождений олова; 3 – то же двухвалентного олова (цифры при символе элемента: первая – валентность, вторая – ротационное число)
4 5 6 7	4 – изолинии относительного удельного объёма воды и их значения; 5 – типовые термобарические профили (геотермы): (1) платформы минимальный, (2) - платформы максимальный, (3) – геосинклинали и зоны спрединга, (4) – геосинклинали, (5) – рудно-магматической системы; индекс "Lim" при символе элемента означает предельное значение ротационного числа, стремящегося к бесконечности; 6 – линия плавления гранитов; 7 – области формирования аномалий и месторождений олова: 1 – сульфидно-касситеритовых, 2 – пегматитовых и грейзеновых, 3 – в составе полиметаллических АГО

На рисунке 8 полужирными линиями отражены основные геохимические барьеры олова, на которых происходит образование главных его минералов – касситерита и станнина. Таковыми являются линии активации четырёхвалентного катиона Sn^{+4} с ротационными (резонансными) числами от 1 и более (см. так же рис. 9) и двухвалентного катиона Sn^{+2} с ротационным числом, равным 1. Все эти характеристики определяют колебания ион-гидратной системы как нелинейные.

Линия "Sn40" соответствует **линейным** колебаниям катиона олова в ион-гидратном комплексе. Эта ситуация теорией трактуется как благоприятная для появления геохимического барьера. Однако термобарические условия, существующие в литосфере, позволяют реализоваться ей в качестве геохимического барьера преимущественно в приповерхностной части земной коры в условиях низких давлений и температур. Примером образования здесь твёрдой минеральной формы олова является так называемый "деревянистый касситерит", формирующий низкотемпературные желвакообразные и натечные агрегаты. Возможность реализации линейных колебаний на глубинах 70-100км представляется маловероятной.

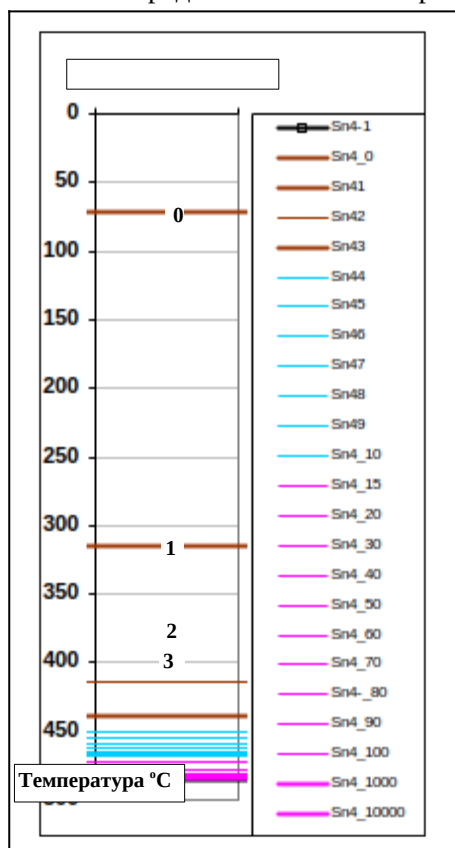


Рисунок 9. Температурный спектр линий активации четырёхвалентного олова при фиксированном давлении 50 МПа. Цифры в разрывах линий - резонансные числа колебаний

Линии **"Sn41"** - **"Snlim"** (в легенде к рисунку 9 символ **SnLim** обозначен как **Sn4-1** – предельное значение резонансного числа) изображают на рисунках 8 и 9 активационные барьеры, связанные с **нелинейными** колебаниями иона олова в ион-гидратной системе, и могут интерпретироваться как геохимические барьеры, на которых образуется касситерит оловянных месторождений различной рудно-формационной принадлежности: **"Sn41"** - пегматитовой и грейзеновой формаций; **"Sn42"** - оловянно-вольфрамовой формации; **"Sn43"** и далее до **SnLim** - касситерит-сульфидной, касситерит-силикатной и касситерит-кварцевой формаций. Можно полагать, что эти барьеры реально могут существовать в земной коре в области умеренных и относительно низких значений давления (~150 МПа и менее) и сравнительно высоких температур (порядка около 400°C и выше), а так же на глубинах ~90-95км, где для этого существуют благоприятные термобарические условия как для олова, так и для большинства ионов химических элементов.

В области больших глубин и высокого давления (в интервале от 300-400 до 3300 МПа), для реализации эффекта активации ионов олова при резонансных числах более 1 необходимы температуры порядка 2400-3400 °C. С позиций традиционных геолого-геофизических оценок температурного состояния земной коры и верхней мантии такие условия здесь отсутствуют, а линии активации, характеризующиеся значениями резонансного (ротационного) числа более 1, можно рассматривать как потенциально возможные геохимические барьеры, которые на первый взгляд в природе никогда не реализуются. Однако в земной коре возможны проявления химических эффектов ультразвука, создающих условия для разогрева множества микролокальных ячеек жидкости (воды) до 5000-5500 °C и повышения в них давления на 500 атмосфер (~50 МПа) сверх литостатического. Если это явление, называемое кавитацией, имеет или имело место в литосфере, то оно, так же как и в экспериментах, будет создавать уникальные условия для протекания высокоэнергетических химических реакций, в том числе и таких, которые приводят к перераспределению вещества и формированию рудных объектов.

Температурный спектр олова, показанный на рисунке 9, представляет собой частный случай термобарического геохимического спектра вдоль геотермы, который также рассчитывается теоретически. Принципиально аналогичные геохимические спектры имеют и все другие химические элементы.

Расчётами по данным опробования коренных пород определяется положение каждой исследуемой точки (пробы) на РТ диаграмме и полученные результаты интерпретируются с рассмотренных выше позиций. Выделяется генетическая ассоциация химических элементов, оцениваются температура и

давление, определяются рудно-геохимическая специализация, возможные глубины, наличие магматических очагов, тип земной коры и т.д.

Возможности использования теории геохимической зональности для оценки перспективности территорий на нефть

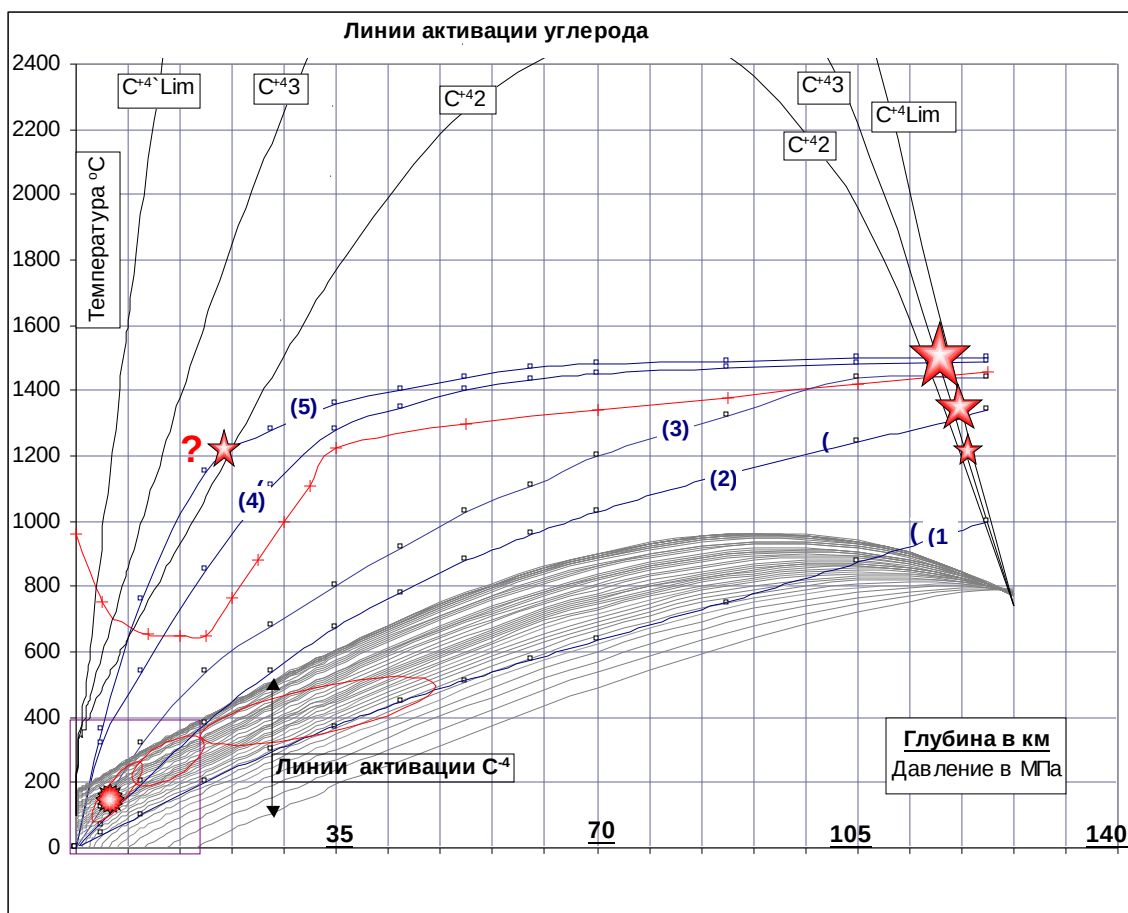


Рисунок 10. РТ-диаграмма геохимических барьеров углерода (ионы C^{4+} , C^{4-}) и поля формирования его минералов (алмаз, углеводороды).

Обозначения: — — — — — - линии активации аниона C^{4-} , — — — — — C^{4+2} — — — — — - то же катиона C^{4+} (вторая цифра - ротационное число); — — — — — (3) — — — — — - геотермы (термобарические профили) и их номера: (1) - платформы минимальный, (2) - то же максимальный, (3) - переходной зоны, (4) - геосинклинали и зоны спрединга, (5) - активной геосинклинали; — — — — — + — — — — — - граница плавления гранитов; ТР-поля, благоприятные для образования

алмазов (★), углеводородов (○★); □ - контур врезки, показанной на следующем рисунке.

На РТ-диаграмме изображена общая теоретически рассчитанная ситуация расположения линий активации (геохимических барьеров) четырехвалентных катионов и анионов углерода. Показаны поля возможного образования алмазов с участием четырехвалентного катиона углерода в условиях высоких температур и давлений и углеводородов в области относительно низких значений этих параметров. В последней ситуации анион C^{4-} обладает наибольшей активностью, что энергетически обеспечивает протекание химических реакций, приводящих к образованию различных низкотемпературных соединений углерода.

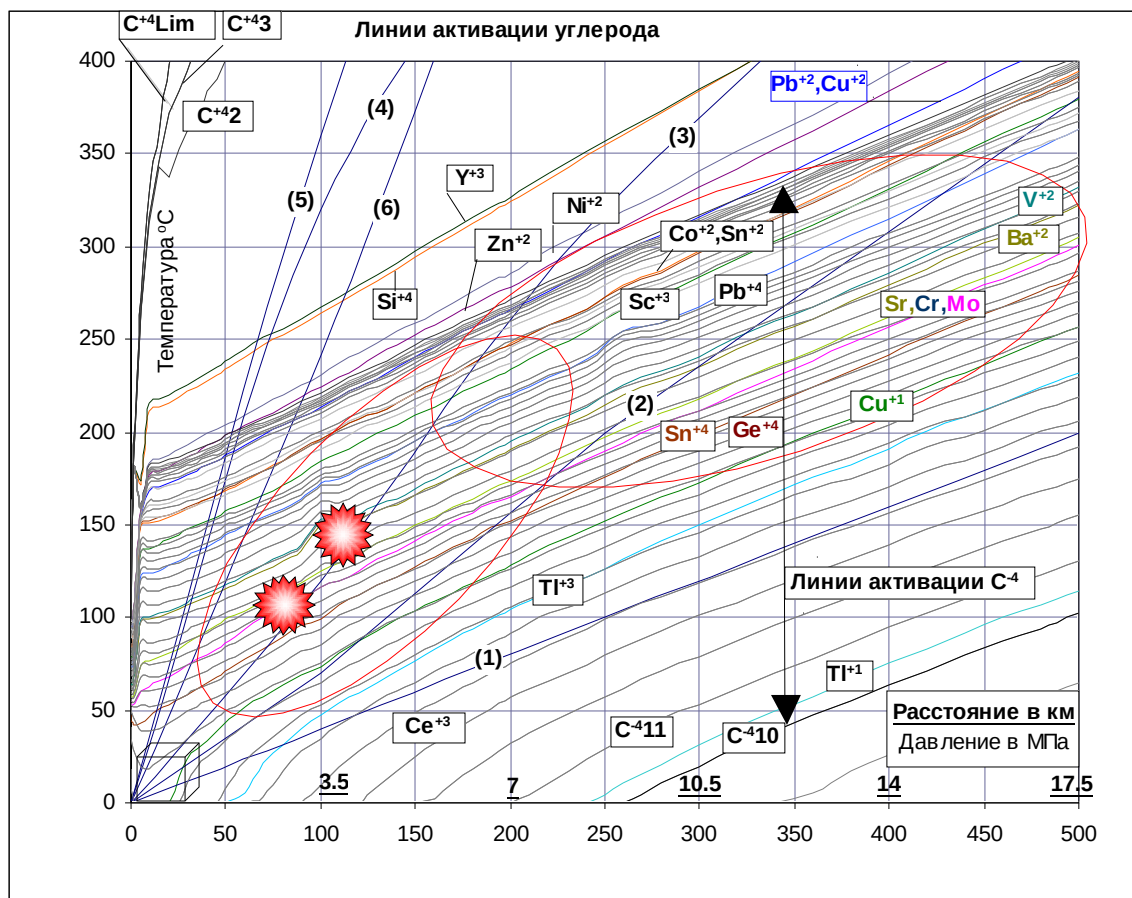


Рисунок 11 (врезка к рисунку 10). РТ-диаграмма низкотемпературных геохимических барьеров углерода (аниона C-4) и поля формирования углеводородов. Обозначения: ——— - линии активации аниона C-4, ——— **Pb⁺²** - то же катионов, указанных цветными линиями и символами; ——— (3) ——— - геотермы (термобарические профили) и их номера: (1) - (5) - см. рис. 10, (6) - типовой геосинклинали; — + — + — - граница плавления гранитов; контуры ТР-полей, благоприятных для продуцирования () и накопления () углеводородов и газогидратов (). Другие обозначения см. на предыдущем рисунке.

Рисунок иллюстрирует возможности использования "обычных" геохимических данных для выявления территорий, потенциально перспективных на поиски месторождений нефти и газа. Это основано на том, что в границах поля активации аниона углерода и в непосредственной близости от него располагаются геохимические барьеры большого числа химических элементов. На рисунке показана меньшая часть из них: Tl, Ce, Cu, Ge, Sn, Sr, Cr, Co, Mo, Ba, V, Pb, Sc, Zn, Ni, Y. Кроме того, в пределах этого же поля располагаются низкотемпературные геохимические барьеры таких химических элементов как Mn, Al, Fe, Hg, Cd, As, Sb, Bi, Os, Au, Ag, Pt, Pd, Zr, Nb, Ta, Cs, Rb, Hf, K, Na, Se, S, Si, P, F, Cl, Br, J. Цветом выделены элементы, обнаруженные в золе и сырой нефти (опубликованные данные). Исходными данными являются содержания химических элементов в коренных породах. Задача решается средствами математического аппарата теории геохимической зональности

по результатам опробования коренных пород. Выявляются породные комплексы, потенциально благоприятные для образования углеводородов.

ЭМПИРИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНОМАЛЬНОГО ГЕОХИМИЧЕСКОГО ПОЛЯ

ЭМПИРИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исходные предпосылки, определяющие свойства модели:

- 1) Распределение концентрации рудного элемента непрерывно в пространстве.
- 2) Геохимическое поле стационарно.
- 3) Композиционно поле состоит из неизвестного числа зон накопления и выноса.
- 4) По своей природе концентрации аддитивны
- 5) Изоповерхности (изолинии) всегда замкнуты.
- 6) На значительном удалении от зоны повышенных значений концентрации рудного элемента стремятся к фоновым значениям.
- 7) Значения моделируемой величины наблюдаются на фоне случайной составляющей

Как правило, области максимальных концентраций различных элементов (зоны накопления) в пространстве пространственно упорядочены в соответствии с принципом геохимической зональности. Излагаемый вариант полигауссовской модели предположение о зональном расапределении элементов не использует.

Уравнения Модели

Надфоновая составляющая модели представлена следующими уравнениями.

Многомерная однокомпонентная модель:

$$C(r) = C_0 \exp\left\{- (r - \mu)^T A (r - \mu)\right\}, \quad r - \text{координата (вектор)},$$

параметры: C_0 – максимальная концентрация, μ – точка максимума, A – матрица коэффициентов. На **Рис. 12** представлен двумерный случай

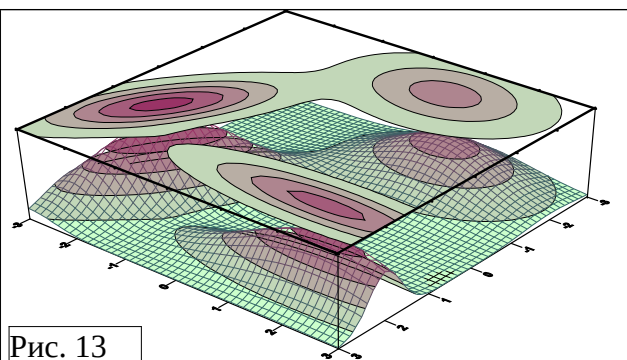
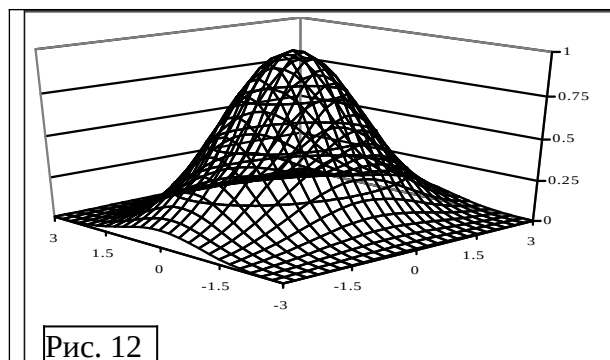
Многомерная многокомпонентная модель (общий случай)

$$C(r) = \sum_{k=1}^L C_{0k} \exp\left\{- (r - \mu_k)^T A_k (r - \mu_k)\right\},$$

r – координата (вектор),

C_{0k} , μ_k , A_k , – параметры k -й компоненты модели, L – число компонент.

На **Рис. 13** представлен пример двумерной трехкомпонентной модели



Осуществлён Кластерный Подход к Полигауссовскому моделированию с использованием метода локальных оценок, когда многокомпонентная задача сводится к более простым однокомпонентным. Соответствующий выбор весовых параметров позволяет оценить параметры каждой компоненты модели.

Алгоритм

- 1°. Выбрать параметры весовой функции C_0, μ_0, A_0 .
- 2°. Сформировать новую выборку $\{\tilde{C}_k \mid k = 1..N\}$.
- 3°. Решить однокомпонентную задачу: $\sum_{k=1}^N \left[\tilde{C}(r_k) - \hat{C} \exp\left\{-(r_k - \hat{\mu})^T \hat{A}(r_k - \hat{\mu})\right\} \right]^2 \rightarrow \min.$

- Повторить этапы 1° - 3° многократно для получения множества локальных оценок.
- 4°. Средствами кластерного анализа исследовать полученное множество локальных оценок. Определить число компонент модели и параметры каждой компоненты.

ТРАНСФОРМАЦИЯ ГАУССОВСКОЙ МОДЕЛИ АНОМАЛЬНОГО ГЕОХИМИЧЕСКОГО ПОЛЯ В АДЕКВАТНУЮ ИЗОТРОПНУЮ МОДЕЛЬ

Преобразование аномального геохимического поля в адекватную изотропную модель заключается в определении среднего радиуса (r_i), площадной продуктивности, (P_i), металлоносности (q_i) в контурах каждой из выделенных изоконцентрат и получении на этой основе осредненного концентрационного профиля рудного объекта. Анализ данных (графиков) по таким профилям (рис. 14 - 16), характеризующим изученные гидротермальные месторождения и рудопроявления Приморья различных рудных формаций показал, что все они по форме и параметрам представляют собой линейные комбинации двух гауссовых функций, одну из которых можно отождествлять с “рудной” составляющей, а другую - с ореольной:

$$C_i = C_{m1} \exp(-\gamma_1 r_i^2) + C_{m2} \exp(-\gamma_2 r_i^2), \quad (7)$$

где индексы “1” и “2” означают принадлежность характеристики к “рудной” и ореольной составляющим соответственно.

Аналогичными по форме функциями описываются изменения площадной продуктивности и удельной металлоносности:

$$P_j = P_{m1} \exp(-\gamma_1 r_i^2) + P_{m2} \exp(-\gamma_2 r_i^2), \quad (8)$$

$$q_j = q_{m1} \exp(-\gamma_1 r_i^2) + q_{m2} \exp(-\gamma_2 r_i^2) \quad (9)$$

Физический смысл такого преобразования заключается в замене сложно построенного концентрационного поля на более простое, но равноценное ему по своим главным параметрам.

Допущения и упрощения, учтенные при трансформации геохимического поля, сводятся к следующему.

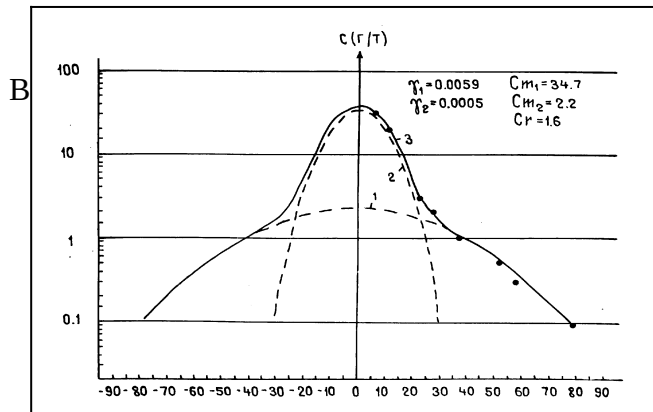
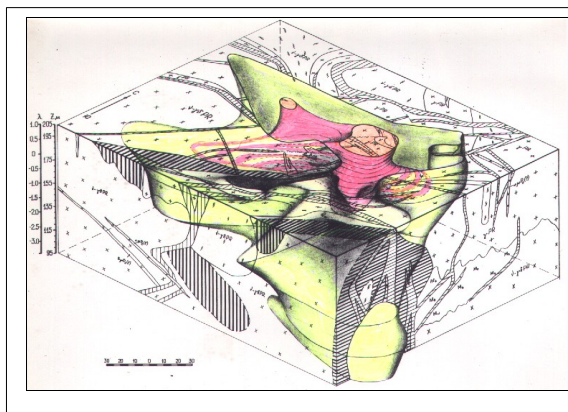
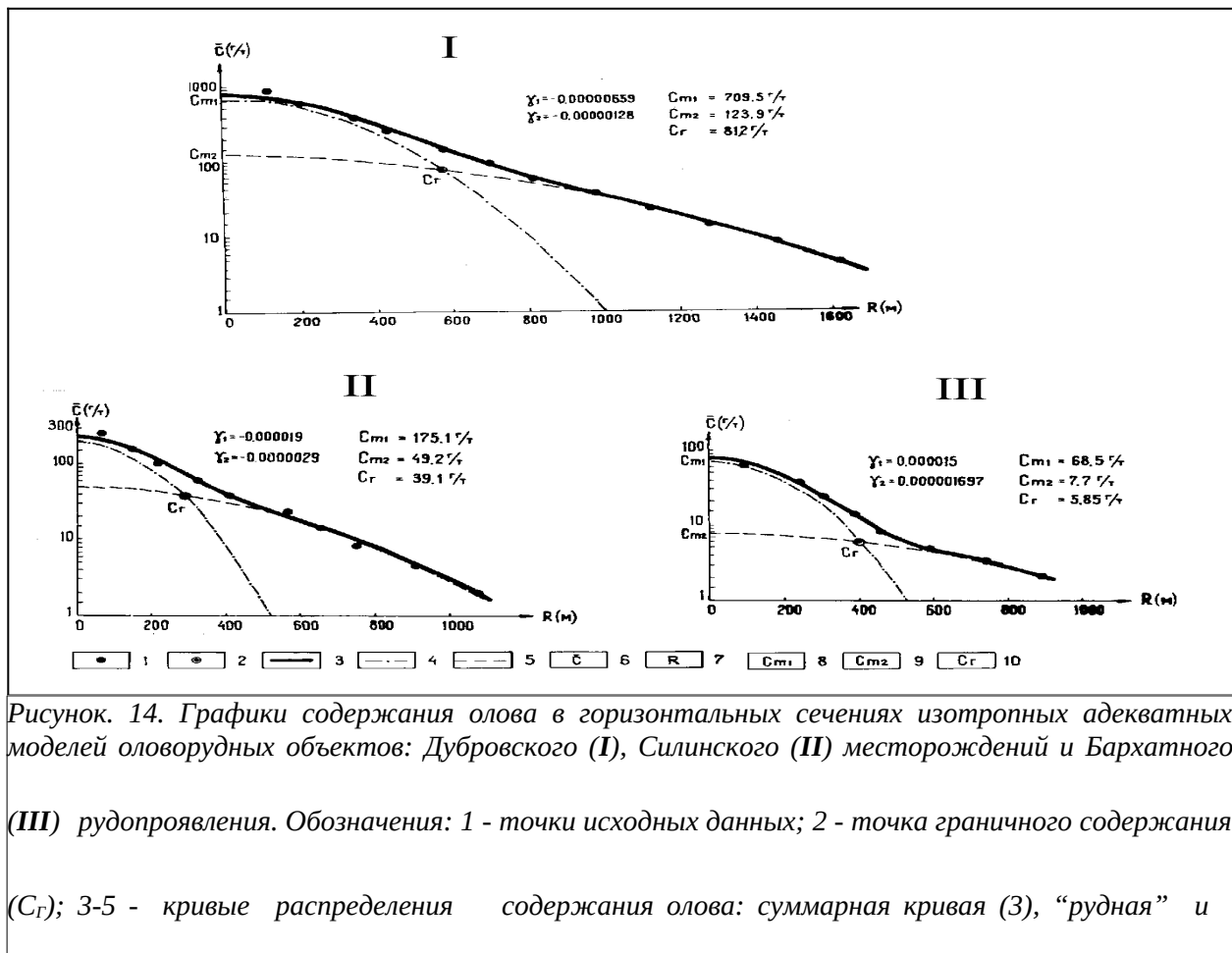
а) Концентрационное поле одного химического элемента, образующего области накопления, допустимо аппроксимировать двумя семействами концентрических шаров или эллипсоидов вращения с совмещенными центрами. Математической моделью поля в этом случае будут являться уравнения (7) - (9).

б) Коэффициент изменчивости концентрации по вертикали (γ) связан с аналогичными коэффициентами, характеризующими поле по двум другим координатам или векторам зональности, соотношением: $\gamma \approx \alpha\beta \approx \gamma \approx^3 \gamma\alpha\beta$. Рассматриваемый коэффициент для “рудной” составляющей (γ_1) по абсолютному значению всегда больше такового для ореольной, т.е. $\gamma_1 > \gamma_2$, т.е. размеры ореола больше таковых рудного тела.

в) Из предыдущих пунктов и выражения (7) следует, что в соответствии с моделью концентрационного поля объекта в некоторой области пространства должна существовать поверхность, на которой концентрации элемента, описываемые функциями “рудной” и ореольной составляющих, будут равны между собой. Графически в трехмерном пространстве эта поверхность представляет собой поверхность сферы (или эллипсоида вращения), отделяющей внутреннюю область модели объекта, где $C_{i1} > C_{i2}$, от внешней, где $C_{i1} < C_{i2}$. Назовем рассматриваемую поверхность и соответствующие ей характеристики “граничными” и будем обозначать их обычными символами с индексом “г”. Граничное содержание

$$\text{рассчитывается по формуле: } C_g = C_{m1j}^{\gamma_2 \cdot \gamma_1} \cdot C_{m2j}^{\gamma_2 \cdot \gamma_1},$$

где C_{m1j} и C_{m2j} - максимальные содержания на j-уровне для “рудной” и ореольной составляющих.



догонку карточка

Рисунок 15. Месторождение Прогресс, зона Беловская. Изоповерхности содержания золота: 3 г/т - розовый цвет, 0.3 г/т - жёлтый цвет. На рисунке показана геологическая обстановка, которая здесь не интерпретируется.

Рисунок 16. Графики распределения содержания золота в сечении адекватной изотропной модели горизонтальной плоскостью. Приморье, месторождение Прогресс, зона Беловская, горизонт 205 м над уровнем моря. Обозначения см. на рисунке 14

Рисунки 15 и 16 даны с целью показать возможности адекватной модели по упрощению структуры аномального геохимического поля без потери и существенного искажения основных характеристик этого поля, получаемых путём свёртывания информации. К их числу относятся: средние содержания, линейная и площадная продуктивности, удельная металлоносность, ресурсы полезного компонента.

Адекватная модель обладает целым рядом особенностей соотношения характеризующих ее параметров. Например, в соответствии с моделью реальные объекты могут иметь, по крайней мере, до

4-х “замечательных” пересечений (уровней), характеризующихся строгим соотношением основных их параметров.

Методы количественного прогнозирования, основанные на полигауссовской модели АГП, эмпирических зависимостях и теории геохимической зональности

Ниже даётся перечень основных методов количественного прогнозирования рудных месторождений, разработанных в Приморье (без их описания).

Методы выделения и общей оценки аномальных геохимических объектов (АГО)

1. Отыскание оптимальных границ полиэлементных литохимических аномалий.
2. Определение рудно-формационной принадлежности АГО и геохимического типа оловянного оруденения
3. Определение уровня среза АГО, в том числе:
 - Метод определения уровня среза по значениям “монотонных” геохимических показателей;
 - Метод определения уровня среза посредством сравнения индивидуальных концентрационных рядов химических элементов с эталонными;
 - Метод определения уровня среза рудных объектов по значению λ -функции;
 - Оценивание степени эродированности территорий на основе использования математического аппарата теории геохимической зональности.

Методы количественного прогнозирования с оцениванием прогнозных ресурсов

4. Оценивание прогнозных ресурсов на основе использования адекватной изотропной модели АГП.
5. Объемное (трехмерное) моделирование аномального концентрационного поля полезного компонента и расчёт прогнозных ресурсов интегрированием.
6. Плоское (двумерное) моделирование линейной продуктивности или удельной металлоносности полезного компонента с расчётом прогнозных ресурсов полезного компонента интегрированием.
7. Одномерный площадной метод количественного прогнозирования по удельной металлоносности и значению показателя уровня среза (λ)
8. Профильный метод количественного прогнозирования оловянного и полиметаллического оруденения с использованием гауссовской модели оруденения и эмпирической зависимости между линейными продуктивностями рудного тела и его первичного ореола
9. Определение некоторых характеристик оруденения по градиентам показателей уровня среза

При мелкомасштабных работах количественное прогнозирование осуществляется на основе использования методов, сформулированных выше в пунктах 1-4. Главное значение здесь приобретает применение математического аппарата, основанного на трансформации формализованной геохимической модели АГП в адекватную изотропную модель.

При детальных работах для целей количественного прогнозирования могут использоваться все поименованные выше методы (п.п. 1-9). Выбор комплекса методов количественного прогнозирования определяется геолого-геохимической обстановкой, характером и представительностью исходных геохимических данных и решаемыми задачами.

Эффективное использование методов прогнозирования по геохимическим данным возможно только с применением компьютерных технологий.

В последующих разделах приводятся некоторые примеры применения перечисленных выше методов.

МЕЛКОМАСШТАБНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ФОРМАЛИЗОВАННОЙ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АГП

ПРОГНОЗНО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ КАРТА ЮЖНОЙ ПОЛОВИНЫ ПРИМОРСКОГО КРАЯ МАСШТАБА 1:1000000 (РИСУНОК 17)

Принято считать, что при геохимическом картировании масштаба 1:1000000 количественное оценивание прогнозных ресурсов металлов не может быть выполнено из-за редкой сети опробования. В данной ситуации прогноз обычно ограничивается выделением аномальных геохимических объектов в ранге рудных районов или крупных рудных узлов с приближённой оценкой их перспективности по геолого-геохимическим данным с применением методов аналогии, экспертных оценок и других интуитивно-вероятностных способов.

Исходными данными при составлении прогнозно-геохимической карты являлись результаты опробования коренных пород, полученные при проведении МГХК-1000 на Приморском полигоне. Плотность опробования составляла преимущественно 1 проба на 100 км², реже – 2 и более проб (в отдельных ячейках Южного Приморья). Ретроспективные данные не использовались.

Обработка полученной геохимической информации показала, что на этой стадии изучения территорий прогнозирование может быть осуществлено на количественной основе, включая определение прогнозных ресурсов рудных полезных ископаемых. Для этой цели были использованы отдельные программы создаваемого авторами автоматизированного программного комплекса "ГЕОТОМ". В основу алгоритмов программ положена обобщённая формализованная модель аномального геохимического поля как линейная комбинация (смесь) гауссовых функций, а также эмпирические закономерности и особенности строения и состава первичных ореолов рудных месторождений. В программах реализован вариант алгоритма оценивания прогнозных ресурсов, основанный на трансформации плоской полигауссовой модели в два семейства концентрических сфер, отождествляемых с "рудной" и ореольной составляющими исследуемого концентрационного поля (адекватная изотропная модель АГП). Расчёт прогнозных ресурсов осуществлялся по "рудной" составляющей интегрированием удельной металлоносности в пределах сохранившегося в недрах рудного интервала.

Ниже даётся перечень методов оценивания АГП, использованных при составлении прогнозно-геохимической карты. К ним относятся следующие: «Определение оптимальных границ полиэлементных литохимических аномалий»; «Определение рудно-формационной принадлежности АГО и геохимического типа оловянного оруденения»; «Определение уровня среза АГО», в том числе по значениям "монотонных" геохимических показателей, путем сравнения индивидуальных концентрационных рядов химических элементов с эталонными, по значению λ -функции; «Линейные (одномерные) методы прогнозирования»; «Метод количественного прогнозирования на основе адекватной изотропной модели АГП».

Прогнозные ресурсы оценивались на широкий комплекс химических элементов: олово, свинец, цинк, серебро, медь, висмут, вольфрам, молибден, бериллий, ниобий, литий, фтор, скандий, иттрий, иттербий, лантан. Из-за отсутствия лабораторно-аналитических данных по

золоту прогнозные ресурсы последнего не определялись. Аномалии золоторудных формаций выявлены специальными методами по ассоциациям химических элементов-спутников.

Выделены практически все ранее известные рудные районы и рудные узлы, группы аномалий и отдельные наиболее крупные аномалии с вполне удовлетворительным соответствием прогнозируемых и реальных ресурсов. Кроме известных АГО в пределах Ханкайской зоны выявлены три геохимических аномалии в ранге рудных узлов, объединённых в новый Спасский рудный район. Выявлена перспективная на медь, серебро, золото аномалия, расположенная на границе трёх государств – России, КНР и КНДР, названная Туманганской; переоценены известные и вновь выявленные аномальные геохимические объекты. Впервые получены данные о перспективности территории Приморья на такие не традиционные для региона химические элементы, как скандий,

иттрий, иттербий. Полученные данные позволили выполнить металлогеническое районирование территории, оценить и уточнить геохимическую специализацию структур и комплексов пород и т.д. Всё это стало возможным благодаря использованию для оценки территорий результатов опробования **коренных пород** и применению методов, основанных на полигауссовой модели АГП и теории геохимической зональности.

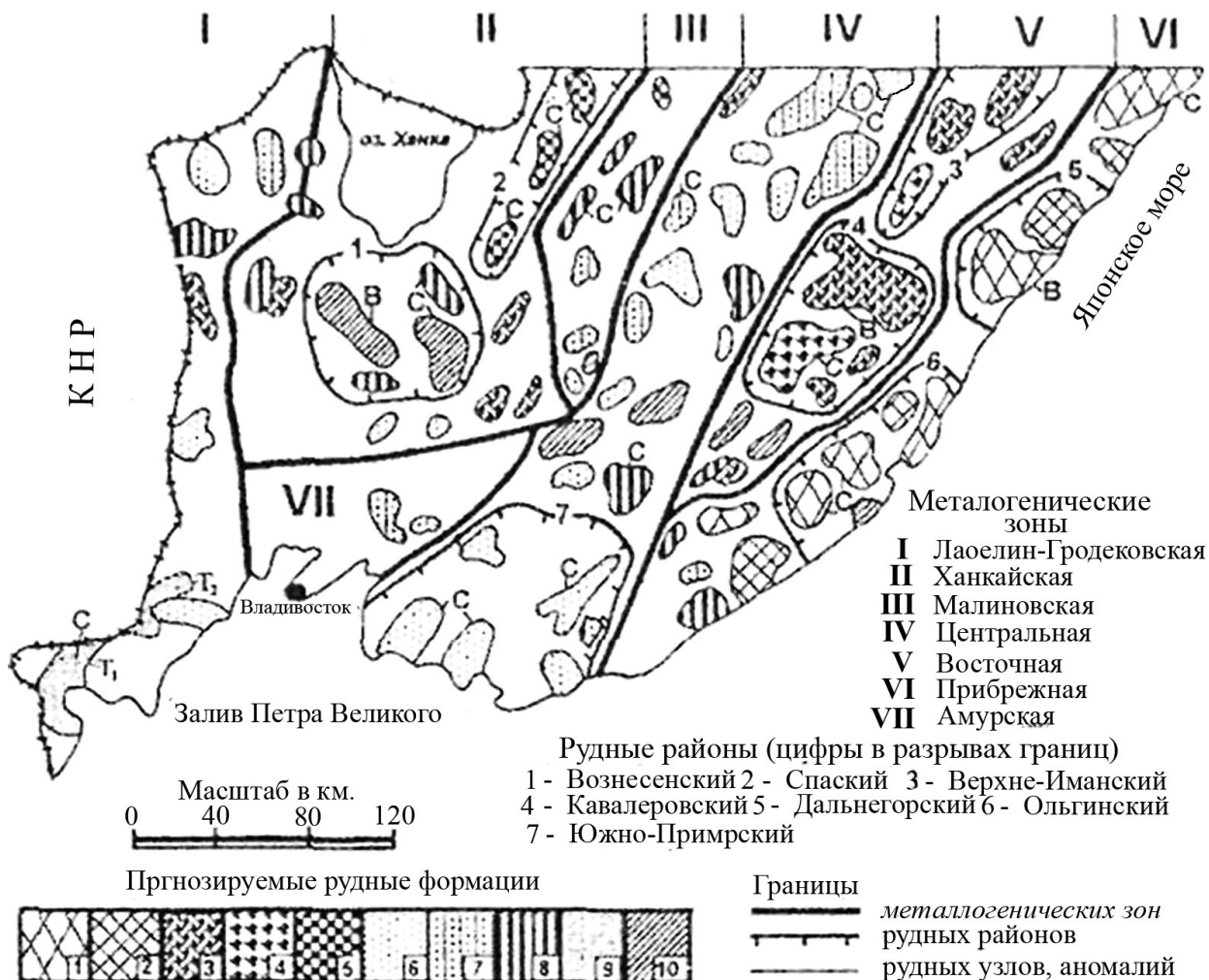


Рис. 17. Прогнозно-металлогеническая схема южной половины Приморского края, составленная по данным МГХК-1000 на основе прогнозно-геохимической карты масштаба 1:1 000 000 (авторы А.И. Бураго, С.А. Шлыков, В.А. Бураго).

Прогнозируемые рудные формации АГП: 1 - полиметаллическая; 2 - полиметаллическая с оловом; 3 - оловянная; 4 оловянно-полиметаллическая; 5 - оловянно-редкометаллическая; 6 - золото-кварцевая; 7 - золото-вольфрамовая (шеелитовая); 8 - вольфрамовая и оловянно-вольфрамовая; 9 - медная с серебром и золотом; 10 - флюорит-редкометаллическая, редкоземельно-редкометаллическая. **Рудно-геохимическая специализация металлогенических зон:** I - Au, Ag, Cu; II - F, TR, Sn, W; III - Sn, W; IV - Au, W; V - Sn; VI - Pb, Zn, Ag. **Аномальные объекты** высокой и средней перспективности отмечены буквами «В» и «С» соответственно, Туманганская аномалия и её продолжение на северо-восток, установленное более поздними работами по результатам опробования коренных пород в масштабе 1:500000, обозначены символами T_1 и T_2 соответственно.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

к прогнозно-геохимической карте южной части Приморского края масштаба 1:1000000

I-1 - Геохимические области (ГО) в ранге металлогенических зон: I - Лаоелин-Гродековская, II - Ханкайская, III - Малиновская, IV - Центральная, V - Восточная, VI - Прибрежная, VII - Амурская; символами химических элементов отражена металлогеническая специализация: Sn - оловянная, Pb, Zn - полиметаллическая, Ag - серебряная, Au - золотая (золото-кварцевая малосульфидная), W - вольфрамовая, FR - флюорит-редкометалльная, R - редкометалльная.

I-2 - Структурно-формационные зоны: 1 - Лаоелин-Гродековская, 2 - Ханкайская, 3 - Синегорско-Черниговская, 4 - Малиновская, 5 - Амурская, 6 - Центральная, 7 - Сергеевская, 8 - Партизанско-Окраинская, 9 - Восточная, 10 - Прибрежная.

I-3 - Месторождения и рудопроявления, символом химического элемента указан основной полезный компонент.

I-4 - Прогнозные ресурсы категории P_3 , рассчитанные по данным МГХК-1000 (коренные породы) для АГО в ранге рудных узлов и рудных районов. Вверху - символ полезного компонента, внизу - ресурсы в тыс. тонн (F - в млн. тонн).

I-5 - Прогнозные ресурсы золота в тоннах, рассчитанные по ретроспективным данным и условно приравненные к категории P_3 .

II-1 – II-16. Рудно-формационная принадлежность аномальных геохимических объектов: 1 - полиметаллическая жильная и скарновая; 2 - серебряная, полиметаллическая; 3 - медная с серебром и золотом; 4 - оловянно-полиметаллическая; 5 - оловянная касситерит-сульфидная; 6 - оловянная касситерит-силикатная; 7 - оловянная касситерит-кварцевая; 8 - оловянно-редкометалльная; 9 - оловянно-вольфрамовая; 10 - вольфрамовая (существенно вольфрамитовая); 11 - вольфрамовая (существенно шеелитовая); 12 - вольфрамовая (шеелитовая) с золотом; 13 - вольфрамовая, золото-кварцевая; 14 - золото-кварцевая малосульфидная; 15 - редкометалльная, редкоземельная; 16 - флюорит-редкометалльная.

II-17 – II-21. Рудно-геохимическая специализация металлогенических зон и рудных районов: 17 - полиметаллическая, 18 - оловянная, 19 - оловянно-вольфрамовая; 20 - золотая, золото-вольфрамовая; 21 - флюорит-редкометалльная.

II-22 – II-26. Перспективность аномальных геохимических объектов: 22 - высокая; 23 - средняя; 24 - низкая; 25 - очень низкая; 26 - не определена.

III-1 – III-6. Границы: 1 - металлогенических зон, совпадающие с границами структурно-формационных зон; 2 - то же несовпадающие; 3 - структурно-формационных зон (несовпадающие с границами металлогенических зон); 4 - то же, перекрытые молодыми (палеоген-четвертичными) образованиями; 5, 6 - рудных районов и рудных узлов соответственно, в разрывах линий показаны: цифрами - номера АГО (здесь не используются), символами химических элементов - рудные формации, прогнозируемые по данным МГХК-1000.

Символьные обозначения рудных формаций месторождений, рудопроявлений, выявленных ранее, и прогнозируемых по данным МГХК-1000 в контурах выделенных АГО: **Sn** - оловянные разных формационных типов (для АГО) и неопределенного типа (для месторождений и рудопроявлений), **Sn1** - касситерит-кварцевые, **Sn2** - касситерит-силикатные, **Sn3** - касситерит-сульфидные ("оловянно-полиметаллические"); **Pb** - полиметаллические свинцово-цинковые с серебром скарновые и жильные; **Ag** - серебряные; **Au1** - золотые (золото-кварцевые малосульфидные), **Au2** - золото-серебряные низкотемпературные; **W** - вольфрамовые разных формационных типов (для АГО) и неопределенного типа - для месторождений и рудопроявлений, **W1** - кварцево-сульфидно-жильные вольфрамитовые, **W2** - скарновые и скарново-грейзеновые шеелитовые, **WSn** - оловянно-вольфрамовые малосульфидные; **FR** - флюорит-редкометалльные; **R** - редкометалльные

Кроме того, тонкими сплошными линиями на карте показаны границы геохимически специализированных структурно-формационных комплексов, поля которых выделены крапом (всё - чёрный цвет). Здесь эти данные не поясняются и не рассматриваются, поскольку прогнозирование осуществлялось без их учёта. Это сделано намеренно, с целью показать возможности формальных методов прогнозирования в «чистом» виде без влияния на них интуиции исполнителей

ОБЪЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИОННОГО ПОЛЯ ОЛОВА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КАВАЛЕРОВСКОГО РУДНОГО РАЙОНА (КРР) В МАСШТАБЕ 1:50000 НА ОСНОВЕ ПОЛИГАУССОВСКОЙ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

При объемном моделировании концентрационного поля олова была решена система, содержащая порядка 15000 уравнений, число неизвестных в которой, как это выяснилось в процессе решения, составило 1160. Полученная модель описывается 116-ю уравнениями (гауссовыми функциями) и в обобщенном варианте может быть записана следующим образом:

$$C_i = \sum_{j=1}^{116} \{ C_{mj} \exp[a_{11j}(X_i - X_{mj}) + a_{22j}(Y_i - Y_{mj})^2 + a_{33j}(Z_i - Z_{mj})^2 + a_{12j}(X_i - X_{mj})(Y_i - Y_{mj}) + a_{13j}(X_i - X_{mj})(Z_i - Z_{mj}) + a_{23j}(Y_i - Y_{mj})(Z_i - Z_{mj})] \},$$

где X_{mj} , Y_{mj} , Z_{mj} - координаты центров областей накопления олова. Рассчитанные значения “произвольных” числовых коэффициентов (a_{11j} - a_{23j}), а также C_{mj} , X_{mj} , Y_{mj} , являются параметрическими константами объемной модели концентрационного поля олова, определяющими структуру поля, его положение и ориентацию в пространстве, размеры и форму в границах любой заданной изоконцентраты. Общее количество таких параметрических констант в модели составляет 1160, т.е. равно числу неизвестных.

По результатам объемного моделирования для изученной территории построено несколько карт концентрации олова в горизонтальных пересечениях модели, одна из которых для $Z=0$ м над уровнем моря в уменьшенном и упрощенном варианте изображена на рисунке 18. Вертикальные разрезы к этой карте даны на рисунке 19. В соответствии с моделью глубина распространения аномальных концентраций олова во всех рудно-геохимических системах превышает 2.5 км, а в Арсеньевской достигает 5 км. Строение концентрационного поля олова в общих чертах согласуется со структурой описанного выше геохимического поля, дополняя ее данными о морфологии, размерах, местоположении и ориентации в пространстве объемов горных пород, охваченных рудным процессом. На основании этих данных можно сделать вывод о том, что в центральной части Кавалеровского рудного района гидротермальным преобразованиям, сопровождавшимся привносом олова, подверглись огромные массы в основном осадочных терригенных пород, объем которых приближенно оценивается следующими цифрами: в Арсеньевской рудно-геохимической системе - 100-150 км³, в Дубровской - 70-100 км³, в Новогорской - 40-50 км³, в Хрустальненской - более 100 км³. Из анализа модели следует, что в Арсеньевской рудно-геохимической системе промышленное оловянное оруденение полого погружается в юго-восточном направлении, а ореол олова, кроме того, охватывает и всю северо-западную часть системы, включая глубокие горизонты с абсолютными отметками (-4 км) - (-5 км). Для Новогорской системы характерно крутое залегание оловянного ореола в целом с умеренным склонением отдельных обогащенных участков на запад. Интересен результат объемного моделирования концентрационного поля олова Дубровской рудно-геохимической системы. Судя по разрезам модели (рис. 19, разрезы В-Г, Д-Е, Ж-З), поле повышенных значений концентрации олова на уровнях с абсолютными отметками около 0 м раздваивается, обнаруживая падения на юго-восток и северо-запад от 40° до 60°. Первое направление четко проявлено в геологических структурах и полностью согласуется с ориентацией в пространстве известных рудных тел и их первичных ореолов. Вторая структура является в какой-то степени “новой” и представляет собой объект дальнейшего изучения. Важно отметить, что основной возмущающий сигнал о наличии здесь ореола олова поступает не с поверхности, а с глубоких горизонтов центральной части Дубровского месторождения.

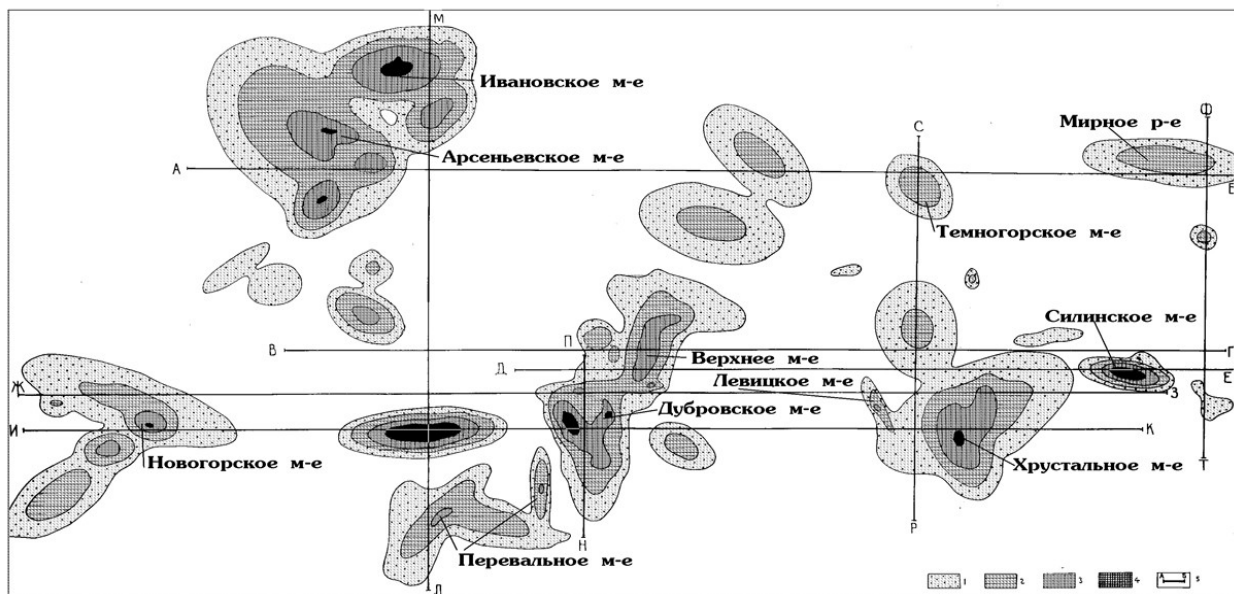


Рисунок 18. Сечение объёмной модели КРР концентрационного поля олова горизонтальной плоскостью на уровне с абсолютной отметкой 0 м. Центральная часть Кавалеровского рудного района. Содержание олова (г/т): 1 - менее 10, 2 - 10-100, 3 - 100-1000, 4 - более 1000; 5 - линии вертикальных разрезов. Подписаны оловорудные месторождения. Масштаб рисунка: в одном сантиметре - 1.6 км; оригинала - 1:50000

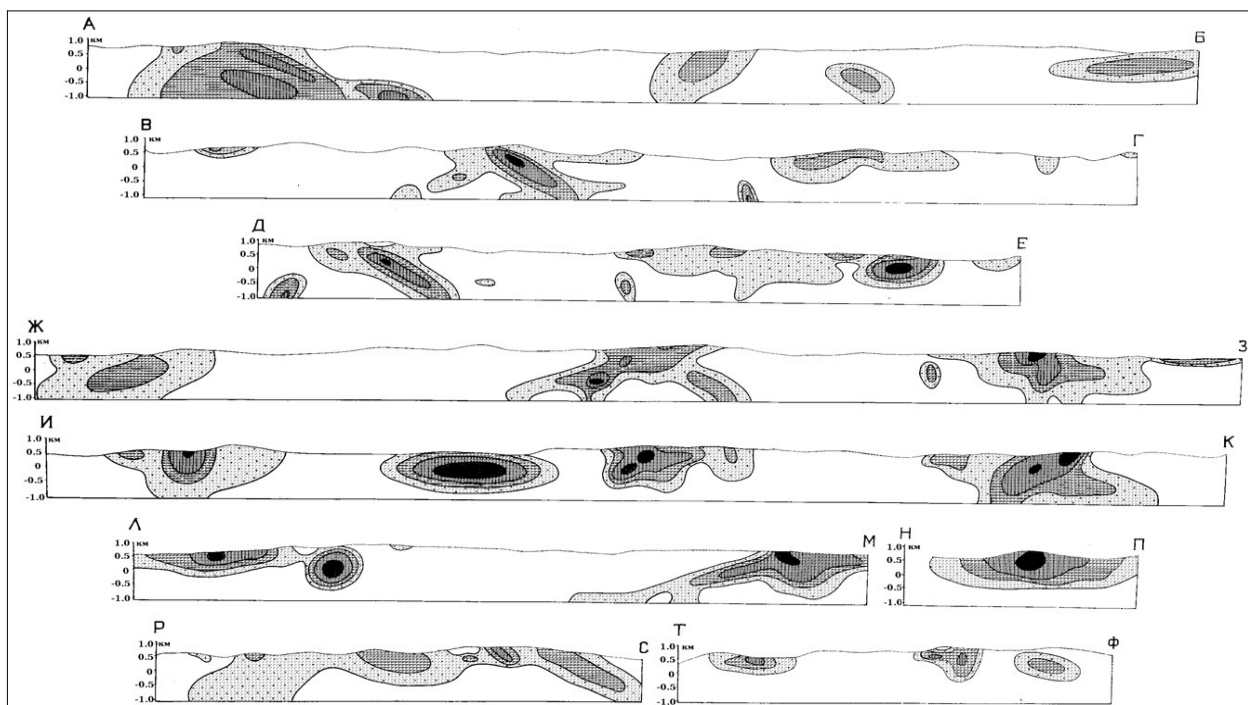


Рисунок 18. Вертикальные разрезы объёмной модели КРР концентрационного поля олова центральной части Кавалеровского рудного района. Крапом показано содержание олова (см. рисунок 17).

ПРИМЕРЫ ОБЪЁМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ РУДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОТДЕЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Тигриное месторождение (моделирование на ЭВМ)

Для Тигриногo месторождения с помощью программы “ELLADA” получена объёмная модель концентрационного поля олова. Моделирование осуществлялось по исходным данным, осредненным трехмерной ячейкой размером $\Delta X \cdot \Delta Y \cdot \Delta Z = 80 \text{ м} \times 80 \text{ м} \times 40 \text{ м}$. На отдельных участках рудного поля месторождения с целью детализации модели и уточнения пространственного положения областей накопления олова исходные данные осреднялись ячейкой $\Delta X \cdot \Delta Y \cdot \Delta Z = 40 \text{ м} \times 40 \text{ м} \times 20 \text{ м}$. Общее количество информативных ячеек по месторождению составило около 600, количество центров - 7, количество параметрических констант модели, равно 70. Результаты моделирования изображены ниже на рисунке. Полученная модель в целом удовлетворительно описывает концентрационное поле олова. Она согласуется с реальными данными по ориентации рудного поля в пространстве и местоположению основных центров накопления. Кроме штоков “Тигренок”, полученный вариант модели содержит еще одну контрастную локальную область накопления олова, центр которой располагается в неизученной части месторождения на гипсометрическом уровне 684 м выше уровня моря. Согласно модели, максимальное содержание олова в центре рассматриваемой области накопления составляет 1.8% (в условном центре штоков “Тигренок” максимальное содержание составляет 2.4%), прогнозные ресурсы соизмеримы с таковыми штоков “Тигренок”. Прогнозируемый штокверк имеет северо-западное простирание и приурочен к зоне северо-восточного эндо- и экзоконтакта тела гранодиоритов, вытянутого в том же направлении. Протяженность штоков с юго-востока на северо-запад в контуре изоконцентраты 0.2% составляет около 300 м, ширина - 70-80 м, высота - 160 м (абсолютные отметки 600-700 м).

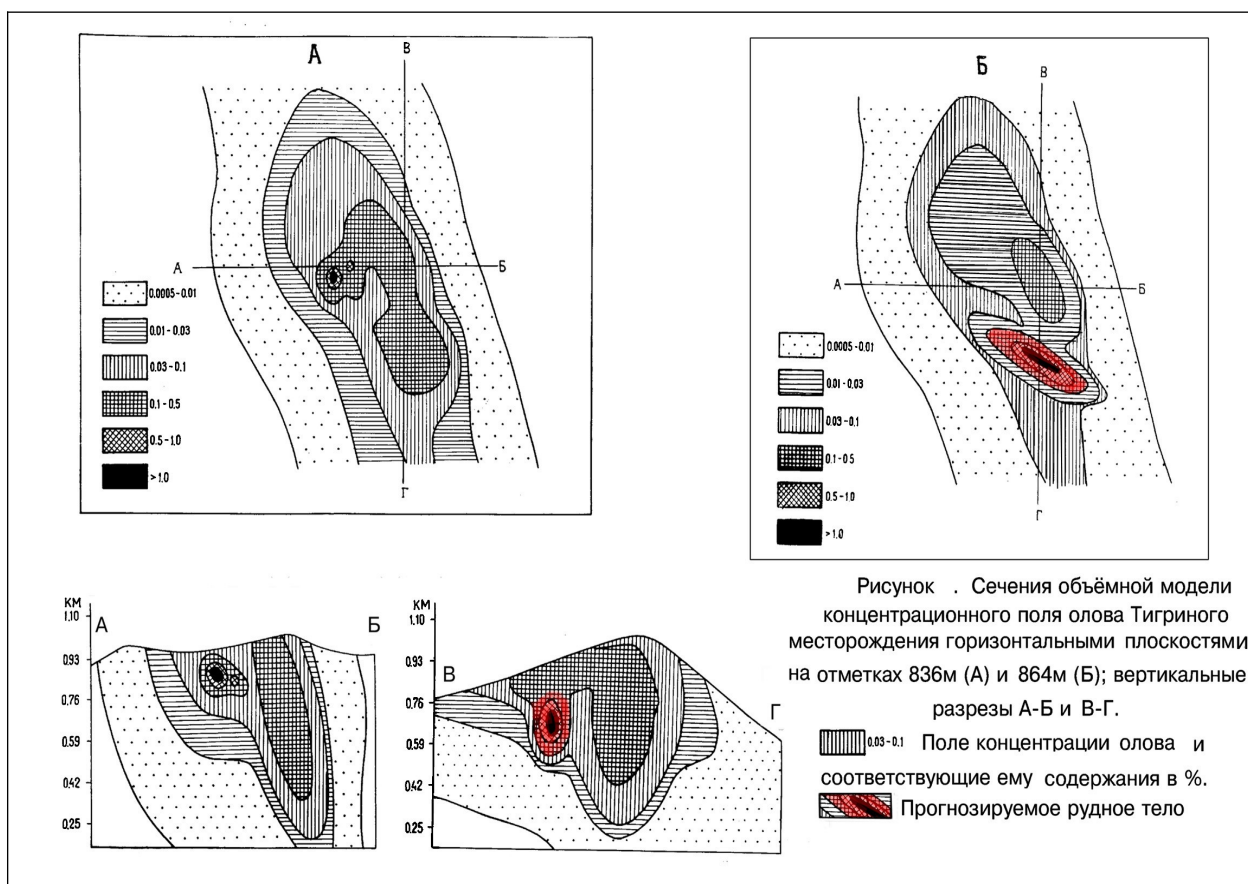


Рисунок 20. Сечения объёмной модели концентрационного поля олова Тигриногo месторождения горизонтальными плоскостями на отметках 836 м (А) и 684 (Б); вертикальные разрезы А-Б и В-Г

Месторождение Рудное (моделирование на ЭВМ)

При объемном моделировании концентрационного поля олова в расчетах использованы исходные данные, осредненные трехмерной ячейкой, имеющей размеры $\Delta X = 20$ м, $\Delta Y = 40$ м, $\Delta Z = 20$ м. Общее количество таких ячеек, заполненных цифровыми данными, составило 780. При моделировании было задано условие аппроксимации концентрационного поля тремя семействами эллипсоидов. В результате получен трехцентровый вариант объемной модели поля, который в целом удовлетворительно соответствует реальным данным. Сечения (разрезы) модели показаны ниже на рисунке. Дополнительных, т.е. не выявленных при детальной разведке, центров (областей) накопления олова, в пределах которых могли бы находиться промышленно интересные рудные тела, по результатам моделирования не предполагается.

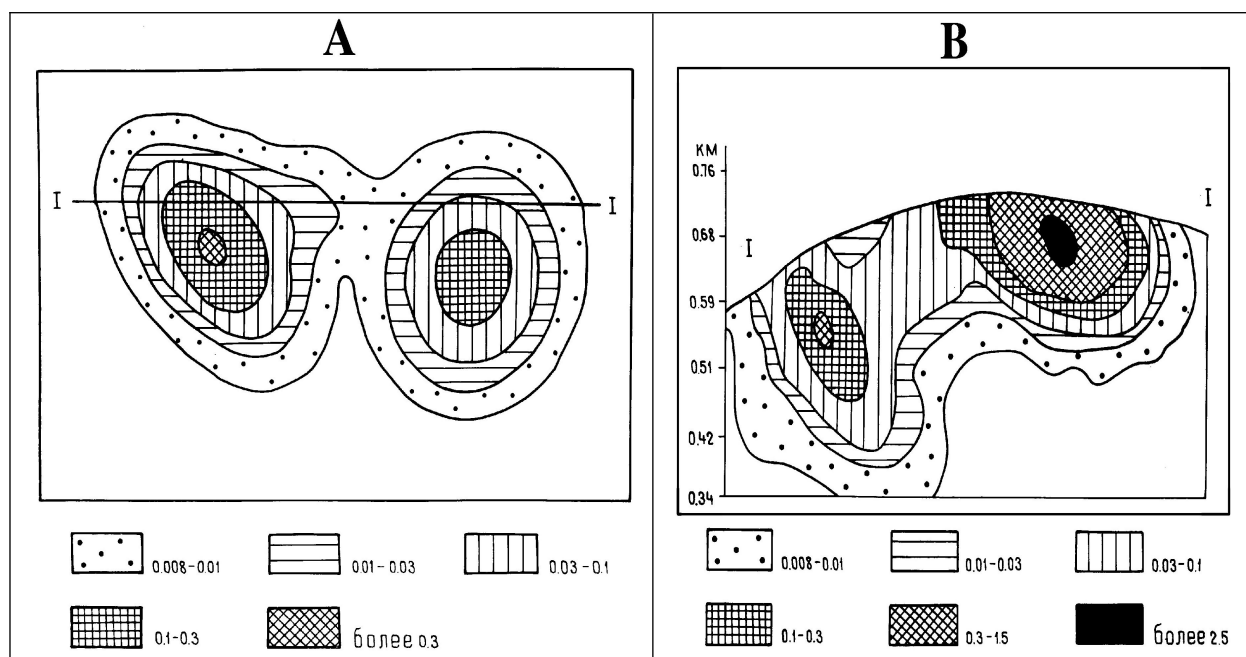


Рисунок 21. Сечения объёмной модели поля концентрации олова месторождения Рудного. А - горизонтальный разрез (плоскость XY) при фиксированном Z=564 м; В - вертикальный разрез (плоскость XZ) при фиксированном Y=185 м. Обозначения: крапом показаны рассчитанные содержания олова в %.

Месторождение Прогресс (моделирование “вручную”)

По месторождению Прогресс выполнено объемное графическое и одномерное математическое моделирование концентрационного поля основного рудного элемента - золота. Результаты графического моделирования показаны на рисунке 15, математического в виде графиков и уравнений концентрационного профиля адекватной изотропной модели золота даны на рисунке 16. Здесь не приводится рисунок адекватной модели. В разрезе он представляет собой систему концентрических окружностей, моделирующих распределение изоконцентрат золота в адекватной изотропной модели, равнозначной по своим главнейшим параметрам реальному объекту. Получение таких моделей по наблюдаемым исходным данным, лежащим в одной плоскости, позволяет вполне корректно и достаточно точно оценивать прогнозные ресурсы объекта. При расчете прогнозных ресурсов золота на месторождении Прогресс таким способом ошибки не превышали 20-30%.

ДЕТАЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОЛОВЯННОГО ОРУДЕНЕНИЯ В ПРИМОРЬЕ НА ОСНОВЕ ОДНОМЕРНЫХ И ДВУМЕРНЫХ ГАУССОВЫХ МОДЕЛЕЙ

В 70-80-е годы геохимическими методами с использованием данных по первичным ореолам в Приморье было оценено порядка 500 рудопоявлений и литохимических аномалий. Заверочные буровые и горные работы были проведены на 30 объектах. В 27 случаях прогнозные оценки подтвердились, в трёх нет (прогнозируемые перспективы были завышены). Подтверждаемость составила 90%. Ниже приводятся некоторые примеры заверки геохимических прогнозов.

Пример первый, Фурмановское оловорудное месторождение (рис. 22). По результатам изучения первичных ореолов с поверхности был сделан вывод о том, что рудные тела месторождения эродированы до среднерудного и нижнерудного уровней. Применение профильного метода количественной оценки оруденения на основе одномерной модели показало, что промышленные руды олова могли сохраниться только в наименее эродированной части рудого тела, а максимальная глубина их распространения не превышает 80-90 м от земной поверхности. Прогнозные ресурсы олова в пределах расчётного контура оценивались в 400-500 тонн. На этом основании по геохимическим данным месторождение было отнесено к числу непромышленных. Однако в связи с тем, что по геологическим, геофизическим, минералогическим и метасоматическим критериям перспективы его глубоких горизонтов на выявление промышленного оловянного оруденения оценивались положительно, на месторождении были пробурены 9 поисково-оценочных скважин глубиной от 100 до 400 метров. По результатам бурения и проходки поверхностных горных выработок было установлено, что промышленное оловянное оруденение выклинивается на глубине порядка 90 м, реальные запасы олова по категории C_2 составляют 380 тонн, и месторождение, следовательно, промышленного интереса не представляет.

Пример второй, Голубое оловорудное месторождение (рис. 23). На первом этапе по геологическим данным перспективы месторождения на олово были оценены отрицательно. Позднее по результатам геохимических исследований с применением профильного метода количественного прогнозирования по первичным литохимическим ореолам месторождению была дана положительная оценка, которая по одному из рудных тел, зоне Золушка, базировалась на следующих прогнозных данных: уровень эрозионного среза – средне-верхнерудный, глубина залегания максимума оловянного оруденения – 150-200 м, максимальная линейная продуктивность рудного тела по олову – 2,5 м%, размах ожидаемого промышленного оруденения – 300 м, прогнозные ресурсы олова – 6,2 тыс. тонн. Проведенные позднее геологоразведочные работы, включавшие бурение скважин и проходку подземных горных выработок, вполне удовлетворительно подтвердили сделанный прогноз. Запасы олова в рассматриваемом рудном теле по категориям C_1 и C_2 составили 5,8 тыс. тонн. Данные по геометрии прогноза и результатов заверки показаны на рисунке.

Пример третий, оловорудное месторождение Трапезия (рис. 24). Для прогнозной оценки пяти рудных тел месторождения были применены количественные методы, основанные на двумерной модели оруденения. В начале по одному из рудных тел (ж. Альфа) было выполнено пробное (тестовое) двумерное моделирование. В качестве исходных данных использовались результаты опробования поверхностных горных выработок. Достоверность прогнозирования оценивалась по степени соответствия прогноза фактическим данным, полученным ранее по имевшейся здесь штольне. Результаты моделирования оказались вполне удовлетворительными. После этого было осуществлено двумерное моделирование других рудных тел по значениям линейных продуктивностей олова в их пересечениях канавами, то есть на земной поверхности. В результате были получены прогнозные данные о том, что два рудные тела являются глубоко эродированными и наблюдаемое на поверхности промышленное содержание олова с глубиной быстро убывает до ниже «бортовых»; два других характеризуются промышленными содержаниями до глубин 100-140 м; а одно, являясь скрытым, имеет небольшой размах оруденения (до 100-150 м). Полученные в результате расчётов размеры рудных «столбов» составляют в среднем 100-150 м, а прогнозные ресурсы олова не достигают промышленных значений. Для заверки количественных прогнозов по двум рудным телам были пройдены штольни. В связи с хорошим совпадением прогнозных и фактических данных и невысокими общими прогнозными перспективами по основным рудным телам месторождения дальнейшие работы по проходке подземных горных выработок были прекращены.

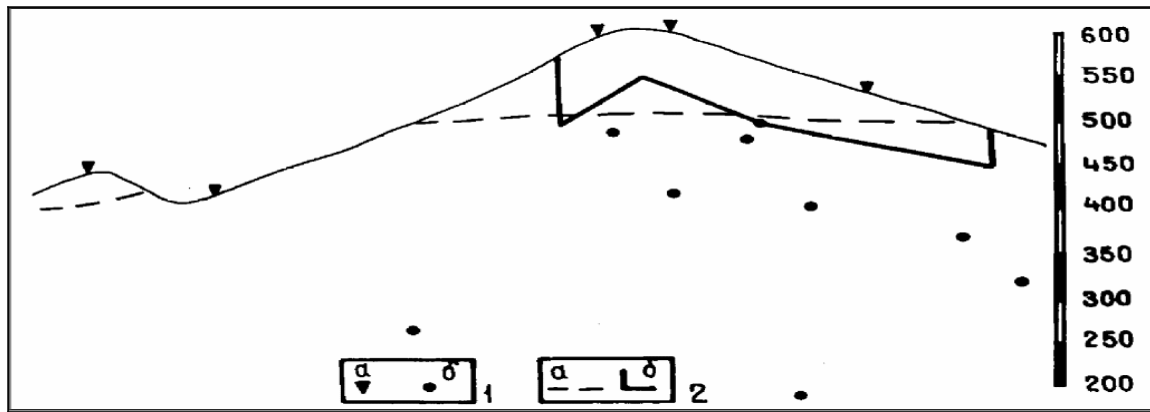


Рисунок 22. Проекция зоны 1 Фурмановского месторождения на вертикальную плоскость с результатами заверки количественного прогноза буровыми работами. Обозначения: 1 – пересечение рудной зоны профилями опробования коренных пород (а) и заверочными буровыми скважинами (б); 2 – прогнозный контур промышленных руд (а), контур промышленных руд, установленный заверочными буровыми работами (б).

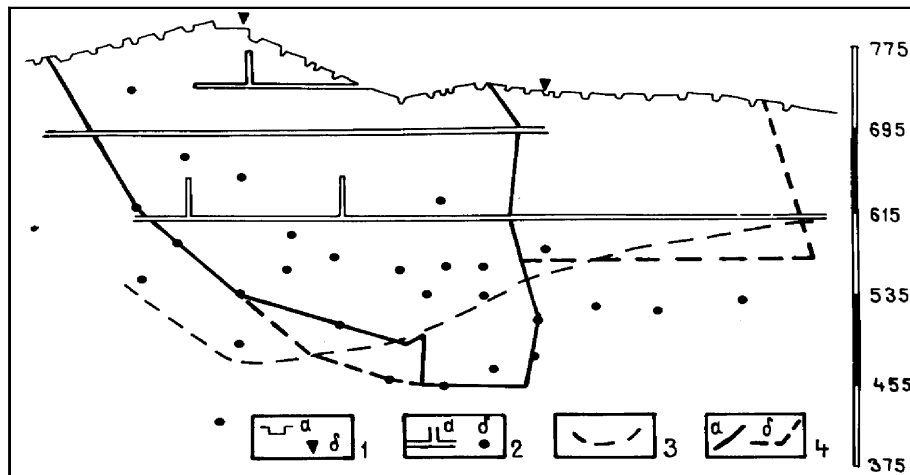


Рисунок 23. Проекция зоны Золушка Голубого месторождения на вертикальную плоскость с результатами заверки количественного прогноза бурением и подземными горными выработками. Обозначения: 1 – пересечения рудного тела канавами (а) и профилями опробования коренных пород (б); 2 – заверочные горные выработки (а) и буровые скважины (б); 3 – прогнозный контур промышленных руд (6.2 тыс. тонн Sn); 4 – контуры промышленных (а) и забалансовых (б) руд по результатам разведки (5.8 тыс. тонн).

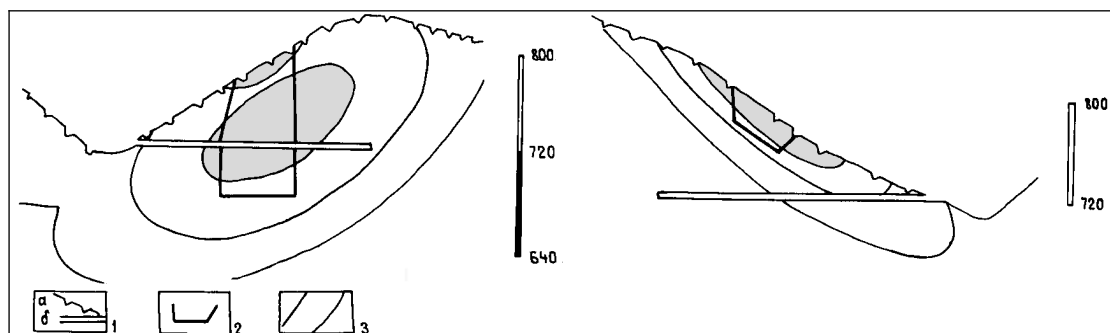


Рисунок 24. Проекция рудных тел месторождения Трапеция на вертикальную плоскость с результатами заверки количественного прогноза штольнями. Обозначения: 1 – места вскрытия рудных тел канавами (а) и штольнями (б); 2 – контуры промышленных руд, установленные по результатам заверки; 3 – прогнозируемые изоконцентраты олова (серые поля – прогнозируемые промышленные руды).

Составил А.И. Бураго
Сентябрь 2000 г.