
**Приоритетное направление 7.5. ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ; НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ
МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ.**

**Программа VII.58.2. МАНТИЙНО-КОРОВЫЕ РУДНО-МАГМАТИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ КРУПНЫХ ИЗВЕРЖЕННЫХ ПРОВИНЦИЙ И ФАКТОРЫ ИХ
РУДОПРОДУКТИВНОСТИ**

**Проект VII.58.2.5. ИСТОЧНИКИ И ФАКТОРЫ МОБИЛИЗАЦИИ РУДНОГО
ВЕЩЕСТВА Au, Au-Ag, Pt И Cu-Ni МЕСТОРОЖДЕНИЙ В СТРУКТУРАХ
СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ, ЕЁ ЮЖНОГО ОБРАМЛЕНИЯ И СЕВЕРО-
ВОСТОКА РОССИИ**

(научные руководители проекта д.г.-м.н. А.М. Спиридонов, д.х.н. В.Л. Таусон)

Блок 1. Изучить минералого-геохимические особенности и условия образования золото-порфирового оруденения месторождений Дарасунского рудного узла и «Амурские дайки» Карийского рудного узла, выявить геолого-структурные, минералогические и геохимические критерии поисков месторождений подобного типа.

Продолжить изучение поведения благородных, редких элементов и лантаноидов в породах и рудах Au-Ag месторождений Приохотья, изучить их формы нахождения, провести изотопно-геохронологические исследования (отв. исполнитель д.г.-м.н. А.М.Спиридонов).

- С целью изучения форм нахождения золота и элементов-примесей золотого оруденения месторождения «Амурские дайки» (Восточное Забайкалье) выполнены микронзондовые исследования сульфидов с помощью электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализатора JXA8200 (JEOL Ltd). Это исследование вызвано тем, что согласно количественному спектральному анализу монопроб сульфидов в образцах установлены аномально высокие концентрации Au, Ag, Bi, Cu, W, Mo, Sn, As и др. (Табл. 1). В результате проведённых исследований установлено, что все примесные элементы, имеющие аномально высокие содержания, входят в состав сульфидов в основном в виде минеральных включений. (Рис. 10, 11) Элементы, которые не обнаружены в виде включений, вероятнее всего тоже находятся во включениях, которые просто не попали в область изучения (включение на исследуемой поверхности отсутствует, а лежит в глубине образца) (д.г.-м.н. Спиридонов А.М.).

Таблица 1

Содержание золота и элементов-примесей в монопробах пиритов и халькопиритов месторождения
«Амурские дайки» Карийского рудного узла (Восточное Забайкалье)

№№ п/п	Номер образца	Характеристика рудной минерализации	Содержание элементов, (г/т)*										
			Au	Ag	Bi	Cu	W	Mo	Sn	Pb	Zn	As	Sb
1	Уа-6а	Зона каолинизации. Кварц-сульфидная жила (сульфидов до 85%: пирит, халькопирит, арсенопирит и др.)	1,58	4,9	25	48	14	0,28	3,6	480	150	>1%	12
2	Уа-7	Зона каолинизации. Кварц-сульфидный прожилок с гидротермально изменёнными гранодиоритами	1,67	19,0	>30	62	0,6	0,25	2,0	250	19	250	23
3	Уа-7/1	Гранодиориты калишпатизированные и сульфидизированные	1550	9,7		8,7	1,9	0,42	3,9	120	42		
4	Уа-7б	Гранодиориты калишпатизированные и сульфидизированные	142,5	2,1		15	<0,3	0,62	3,7	68	36		
5	Уа-10	Кварц-сульфидные прожилки	0,36	3,1	2,1	6,2	0,5	0,7	5,0	92	47	22	3,9
6	Уа-11	Кварц-сульфидная жила	0,77	6,8	>30	4600	<0,3	1,2	6,0	270	67	150	54
7	Уа-20	Гидротермально изменённые сульфидизированные породы	3,0	6,0	0,93	14	<0,3	0,76	4,6	470	55	21	6,5
8	Уа-28	Гранодиориты калишпатизированные и сульфидизированные	634	1,9	16	9,6	<0,3	0,8	4,9	9,6	34	190	5,8
9	Уа-29	Гранодиориты калишпатизированные и сульфидизированные	68,0	7,9	23	8,6	0,3	0,7	5,9	20	55	130	10
10	Уа-33/1	Зона каолинизации. Кварц-сульфидная жила (сульфидов до 85%: халькопирит)	0,65	8,4		15000	< 0,3	0,78	4,4	790	800		
11	Уа-38	Гранодиориты калишпатизированные, окварцованные и сульфидизированные	50,0	24,0	>30	1100	<0,3	3,6	4,2	160	46	96	640
12	Уа-50	Изменённые хлоритизированные и эпидотизированные с гнёздами сульфидов (главным образом халькопирит)	14,86	48,0	1,5	29000	2,8	0,42	4,5	440	2600	15	98
13	Уа-50/2	Гранодиориты с кварц-сульфидными (пирит, халькопирит) прожилками	6,0	39,0	6	28000	35,0	<0,3	3,5	380	5600	11	24

*Содержание элементов по данным количественного спектрального анализа.

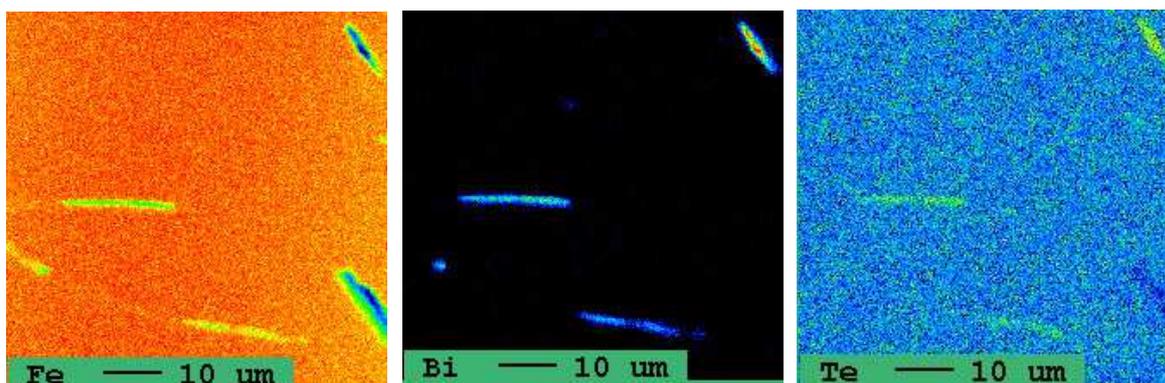


Рис. 10. Включение в сульфиде железа, содержащее висмут и теллур.
Изображение участка поверхности образца Ya-28 в рентгеновских лучах соответствующих элементов. Увеличение x1400.

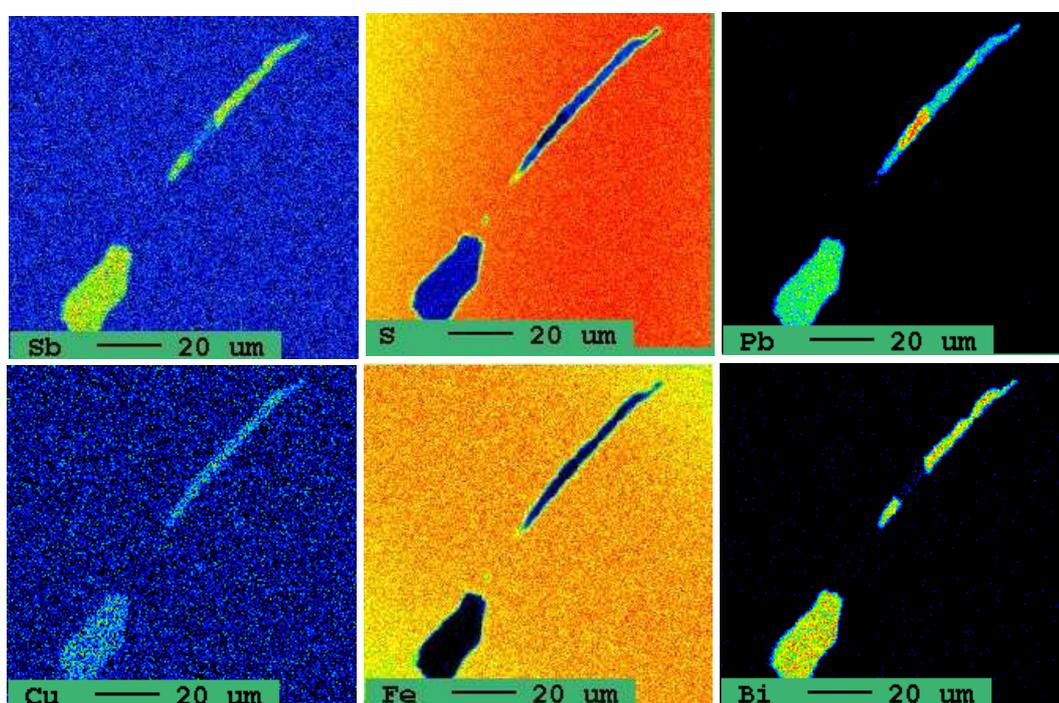


Рис. 11. Включение в сульфиде железа, содержащее висмут, медь, сурьму и свинец.
Изображение участка поверхности образца Ya-10 в рентгеновских лучах соответствующих элементов. Увеличение x4000.

- С использованием тонких минералогических, электронномикроскопических, электронно-зондового, мессбауэровской спектроскопии, ИК-спектроскопии, ICP-MS, термобарогеохимических и изотопных методов получены новые данные об особенностях процесса турмалинизации и рудообразования на Дарасунском, Талатуйском и Теремкинском золоторудных месторождениях Дарасунского рудного узла в Восточном Забайкалье, относящихся к месторождениям золото-порфировой формации (совместные исследования сотрудников ИГЕМ РАН

В.Ю.Прокофьева, МГУ И.А.Бакшеева и Н.Н.Кривицкой, ИГХ СО РАН Л.Д.Зориной, Института геологии и геохронологии докембрия Б.В.Беляцкого, ГЕОХИ РАН В.Устинова).

Широко проявленный процесс турмалинизации на всех трех месторождениях охватывает промежуток времени до образования продуктивных стадий минерализации. Установлены турмалины трех генераций. Наиболее ранний турмалин представлен дравитом и железистым шерлом и по составу сходен с турмалином пропиловых зон медно-порфировых месторождений [Lynch, Ortega, 1997¹ и др.]. Турмалин второй генерации слагает прожилки, пересекающие ранние турмалиновые агрегаты, и представлен более железистым дравитом и шерлом. Турмалин третьей генерации соответствует дравиту и богатому магнием шерлу. Истощение железом турмалина обусловлено отложением ранних сульфидов (пирита, арсенопирита, халькопирита).

На Дарасунском месторождении изучены турмалины из серии «шерл-дравит-повондраит». Эволюцию химического состава турмалинов Дарасунского месторождения из этой серии можно обобщить в следующей модели. Турмалин первой генерации с низким содержанием Al и высоким содержанием Fe соответствует «окси-дравиту-повондраиту», второй генерации с высоким содержанием Al и низким Fe соответствует «окси-дравиту», третьей генерации состоит из дравита, имеющего самое высокое содержанием Al и низкое Fe. Установленная эволюция химического состава турмалинов относительно содержаний главных компонентов – Al и Fe аналогична турмалинам Sn- и Cu-порфировых месторождений и может быть принята в качестве руководства при разведке месторождений порфирового типа. Этот вывод для повондраита является третьим в мире и первым для гидротермальных месторождений золота.

По соотношениям изотопов кислорода растворы–источники турмалиновой минерализации – имели магматическое происхождение, однако, при преобразовании турмалинов Теремкинского месторождения зафиксировано

¹ Lynch G., Ortega S. Hydrothermal alteration and tourmaline-albite equilibrium at the Coxheath porphyry Cu-Mo-Au deposit, Nova Scotia // Canadian Mineralogist, 1997, V. 35, P. 79-94.

участие метеорных вод.

Широкий диапазон значений Fe^{3+}/Fe_{tot} , $f(O_2)$ и pH турмалинов Дарасунского месторождения свидетельствует о наиболее сложном и непрерывном процессе, что привело к большим масштабам этого месторождения по сравнению с Талатуйским и Теремкинским месторождениями и самого крупного в районе.

Полученные данные свидетельствуют о том, что гидротермальный процесс на изученных месторождениях протекал в субвулканических условиях при температурах от 618 °С до 118 °С, давлении от 2040 до 65 бар. Самые высокие температуры (618-611 °С) зафиксированы при образовании взрывчатых брекчий Дарасунского месторождения и в начале процесса рудообразования на Талатуйском месторождении. На Талатуйском месторождении зафиксировано и самое высокое давление (2040 бар). Рудоотложение на Дарасунском и Теремкинском месторождениях началось при более низких температурах – от 430 °С до 120 °С и от 406 °С до 118 °С соответственно. Давление во время рудообразования снижалось до 65 и 70-410 бар соответственно.

Впервые проведенными определениями абсолютного возраста турмалинов и руд месторождений Дарасунского рудного узла с использованием Sm-Nd метода установлен их возраст в 99 ± 18 млн лет ($MSWD=0,17$), что соответствует этапу рифтообразования в поздней юре–раннем мелу в геодинамическом развитии Монголо-Охотского складчатого пояса (к.г.-м.н. Зорина Л.Д.).

- Продолжено изучение поведения благородных и редких элементов (Au, Ag, Pt, W, Вi и др.) в породах и рудах месторождений золото-кварцевой формации Наталка, Павлик, Дегдекан (Южное Приохотье). Определен Rb-Sr изотопный возраст и изотопный (Sr) состав руд Au-Ag месторождения Кварцевая Сопка (Северное Приохотье). Rb-Sr возраст Au-Ag руд составил 86 ± 3.8 МА. Изохрона характеризуются низкими величинами первичного отношения $^{87}Sr/^{86}Sr_{(0)}=0.7057 \pm 0.0002$, очень близкого к первичным отношениям $^{87}Sr/^{86}Sr_{(0)}$ в неизмененных породах (0.7045-0.7048). Это указывает на преобладание мантийного Sr и в магматических, и в рудных процессах.

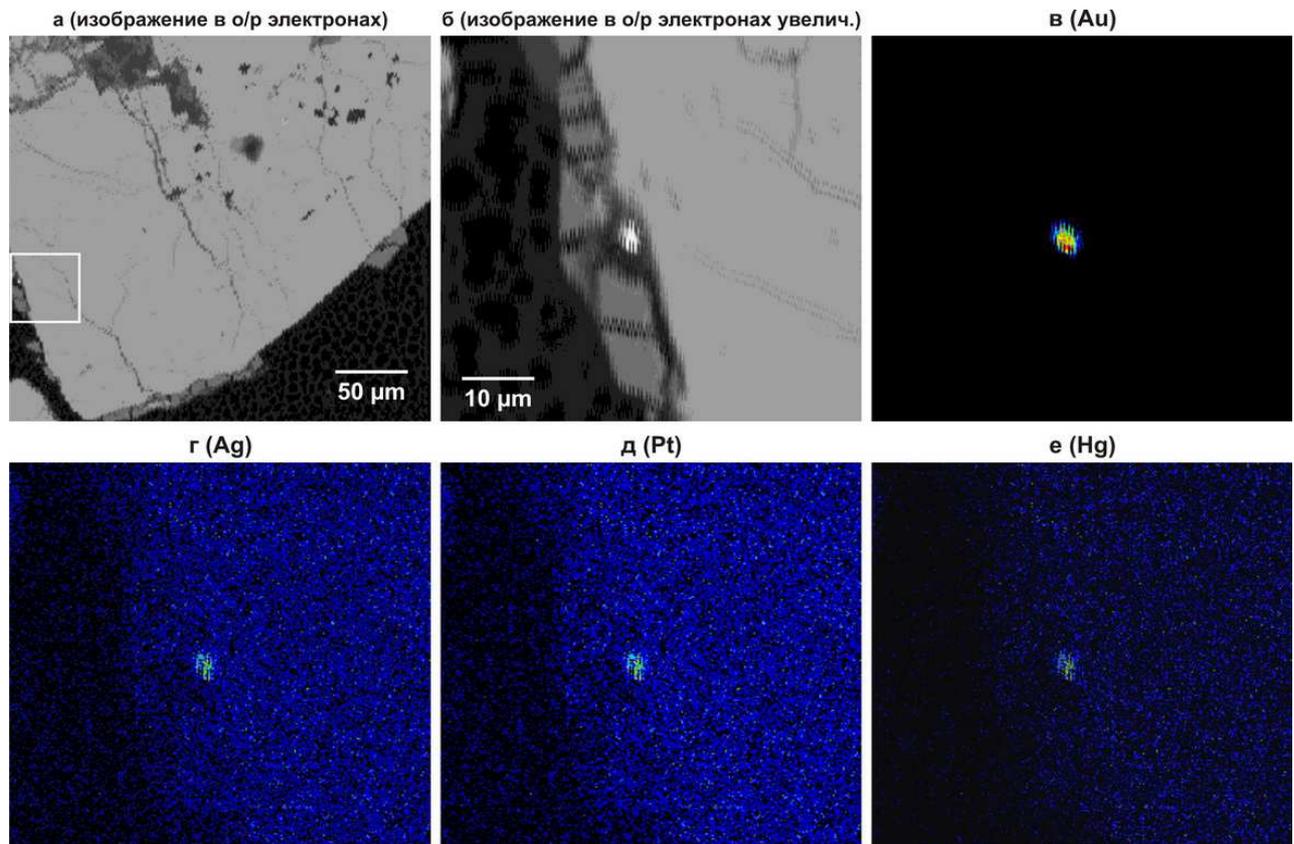


Рис. 12. Микровключение (белое) в зерне арсенопирита (серое) – а, б. Состав микровключения: Au – в, Ag – г, Pt – д, Hg – е (изображение дано в рентгеновских лучах).

- При изучении руд Наталкинского золото-кварцевого месторождения (Северо-Восток России) с содержанием Au более 1 г/т и Pt до 0.1 г/т было установлено, что Au и Pt накапливаются в тонких классах тяжёлых фракций (0.14-0.07 мм, <0.07 мм) и ассоциируют с арсенопиритом (Рис. 12 а, б). Размер микровключений не превышает 3 мкм, их состав (качественное определение) – Au, Ag, Pt, Hg (Рис. 12 в, г, д, е). Предположительно одной из возможных форм нахождения Au и Pt в рудах Наталкинского месторождения могут быть природные интерметаллиды или амальгамы состава Au-Ag-Pt-Hg (д.г.-м.н. Кравцова Р.Г.).

Блок 2. Изучить геолого-геохимические особенности чёрных сланцев кодарской серии (икабийская, аянская и инырская свиты), претерпевших постседиментационные превращения (катагенез, метаморфизм) и роль углеродистого вещества в процессе рудогенеза Удоканского месторождения меди (отв. исполнители: д.г.-м.н. А.М. Спиридонов, к.г.-м.н. А.Е. Будяк, к.х.н. Э.А. Развозжаева).

- В пределах Байкальской горной области (Тонодское и Нечерское поднятия) и Кодаро-Удоканской СФЗ (структурно-формационной зоны) выделяется несколько углеродистых толщ раннепротерозойского возраста, которые

объединены нами в единую кевактинскую углеродисто-терригенную формацию, возникшую в условиях эпикратонного рифтогенного морского бассейна (Рис. 13). На Тонодском поднятии они представлены албазинской и михайловской свитами, на Нечерском – чуйской толщей и ходоканской свитой, а в Кодаро-Удоканской СФЗ – отложениями кодарской подсерии (икабийская, аянская и инырская свиты).

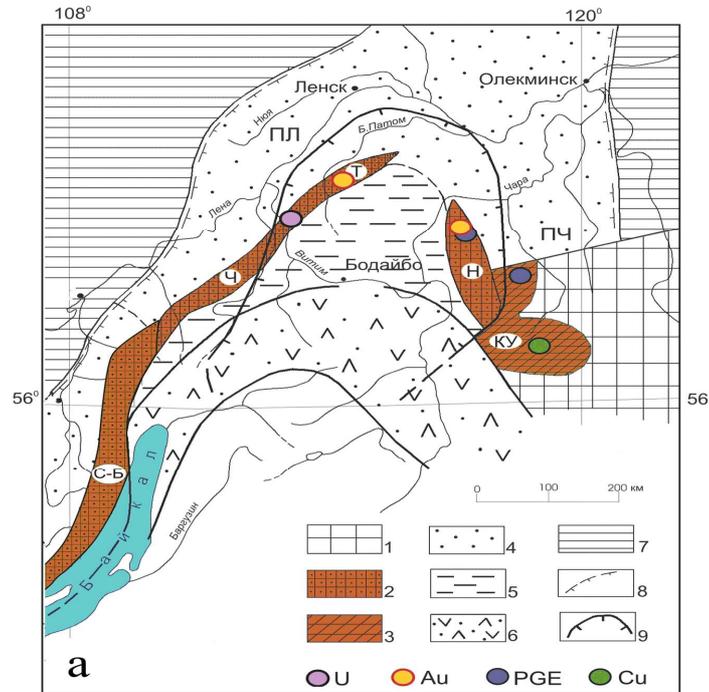


Рис 13. Схема структурно-формационного районирования Байкальской горной области (БГО) (по материалам [Немеров, Станевич, 2001²]с добавлениями авторов):
 1 – дорифейские образования фундамента Сибирской платформы; 2 – выступы дорифейского фундамента в БГО: С-Б – Северо-Байкальский вулcano-плутонический пояс, Ч - Чуйский, Т – Тонодский, Н – Нечерский; 3 – Кодаро-Удоканская (КУ) структурно-формационная зона; 4-6 – рифейские структурно-формационные зоны: 4 – внешние - Прибайкальская (ПБ), Приленская (ПЛ), Причарская (ПЧ); внутренние: 5 – Мамско-Бодайбинская, 6 – Байкало-Муйская; 7 – фанерозойские отложения чехла Сибирской платформы; 8 – северная граница накопления рифейских образований; 9 – границы Ленского золотоносного района

В пределах изучаемой территории известны промышленнозначимые месторождения благородных и редких металлов, наиболее известным из которых является гигантское месторождение меди Удокан, локализованное в зоне развития раннепротерозойских образований в пределах Удоканского синклинория, относящегося к Удоканской СФЗ. Главная роль в локализации рудной минерализации принадлежит карбонатно-терригенному удоканскому комплексу

² Немеров В.К., Станевич А.М. Эволюция рифей-вендских обстановок биолитогенеза Байкальской горной области // Геология и геофизика, 2001, Т. 42, № 3, С. 456-470.

(серии). Образования комплекса делятся на четыре крупные подсерии: джалтуктинскую, кодарскую, чинейскую и кеменскую. Отложения кодарской подсерии, судя по литологическим характеристикам, формировались в условиях дистального шельфа и материкового склона.

Наиболее характерной геохимической чертой всех отложений кевактинской углеродисто-терригенной формации является высокое содержание глинозема в сланцах (Al_2O_3 в среднем 19 мас.%, с максимумами до 27 мас.%) и K_2O (4-6 мас.%). Их накопление можно объяснить активным выветриванием исходных пород под влиянием жаркого гумидного климата. Кроме того, отложения формации обогащены рассеянным углеродистым веществом, что свидетельствует о бурном развитии бактериального бентоса в бассейне осадконакопления с застойным режимом [Терлеев А.А. и др., 2006³]. Концентрации $C_{орг}$ варьируют в пределах от 0,5 до 10 мас.%. Высокоуглеродистые метаалевролиты и метааргиллиты кодарской подсерии (икабийская, аянская и инырская свиты) характеризуются повышенными содержаниями мафических петрогенных элементов (Fe, Mg, Ca, Mn) и ряда халькофильных металлов (Cu, Ni, Zn, Pb, Au, Ag, U), а также ЭПГ – элементами платиновой группы, в единичных пробах достигающими 0,0n - 0,n г/т (Табл. 2).

При рассмотрении исследуемой толщи от нижних стратиграфических горизонтов к верхним заметно, что основная группа элементов, характерных для черносланцевых формаций (V, Mo, Cu, Zn), тесно коррелирует с благородными металлами и группой халькофильных элементов. Учитывая, что повышенные содержания в отложениях икабийской и аянской свит, относительно местного фона, заметны для ограниченного ряда компонентов – Sr, Mo, Cu, Ag, Au, Pt, Pd, можно предположить заражение толщи уже на стадии сидементации за счет поступления дополнительного вещества с бассейн осадконакопления. На нижних стратиграфических уровнях благородные металлы положительно коррелируют с цирконием и бором, содержания которых не достигают кларка для осадочных

³ Терлеев А.А., Постников А.А., Кочнев Б.Б., Наговицин К.Е., Гражданкин Д.В., Станевич А.М. Раннепротерозойская биота из удоканской серии западной части Алданского щита (Россия) // Эволюция биосферы и биоразнообразия. К 70-летию А.Ю. Розанова. М.: Т-во научных изданий КМК, 2006, С. 271-281.

пород, что однозначно указывает на их седиментационный генезис на этапе заложения рифтогенного прогиба и поступления в бассейн осадконакопления продуктов коры выветривания.

Таблица 2.

Содержание благородных металлов в отложениях кодарской и чинейской подсерий (г/т)

Элемент	Ик	Ая	Ин	Чит	Ал
Ag	0.17	0.14	0.10	0.20	0.04
Au	0,002	0,003	0,032	0,044	0,013
Pt	0,011	0,009	0,006	0,006	0,019
Pd	0,034	0,025	0,016	0,009	0,035

Примечание: Ик – икабийская, Ая – аянская, Ин – инырская, Чит – читкандинская, Ал – албазинская свиты.

Такая геохимическая специализация может быть следствием определенной унаследованности химизма пород выделяемого здесь более древнего зеленокаменного пояса [Федоровский, 1972⁴], а также синхронным вулканизмом основного состава, проявленным на раннем, рифтогенном, этапе развития прогиба и способствовавшим формированию металлогенической специализации толщ [Немеров и др., 2005⁵, Немеров и др., 2009⁶]. Рудная минерализация исследуемых углеродистых отложений представлена в основном пиритом, халькопиритом, пирротинном, молибденитом, сульфидом никеля. Элементный состав рудной минерализации также обогащен рядом элементов: Cu, Co, Ni, V, Mo, Ag, U, Pt, As.

Характерным для Кодаро-Удоканской СФЗ является то, что терригенные и карбонатно-терригенные красноцветные отложения прибрежных и дельтовых фаций кевактинской формации, расположенные на одном стратиграфическом уровне с отложениями кодарской подсерии, а также находящиеся выше по

⁴ Федоровский В.С. Стратиграфия нижнего протерозоя хребтов Кодар и Удокан. М.: Наука, 1972. – 130 с.

⁵ Немеров В. К., Спиридонов А. М., Развозжаева Э. А. и др. Основные факторы онтогенеза месторождений благородных металлов сухоложского типа // Отечественная геология, 2005, № 3, С. 17-24.

⁶ Немеров В.К., Будяк А.Е., Развозжаева Э.А., Макрыгина В.А., Спиридонов А.М. Новый взгляд на происхождение медистых песчаников месторождения Удокан // Известия Сиб. Отд. секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений, 2009, №2 (35), С.4-17

стратиграфической вертикали, часто обогащены рядом рудных компонентов: Cu, Zn, Pb, U, Ni, Au, Ag, Pt, Pd и др., вплоть до промышленнозначимых концентраций. Это отмечается для свит кодарской и чинейской подсерий, но наиболее ярко выражено в сакуканской свите, входящей в состав кеменской подсерии, к которой приурочено гигантское Удоканское месторождение меди и ряд его более мелких сателлитов.

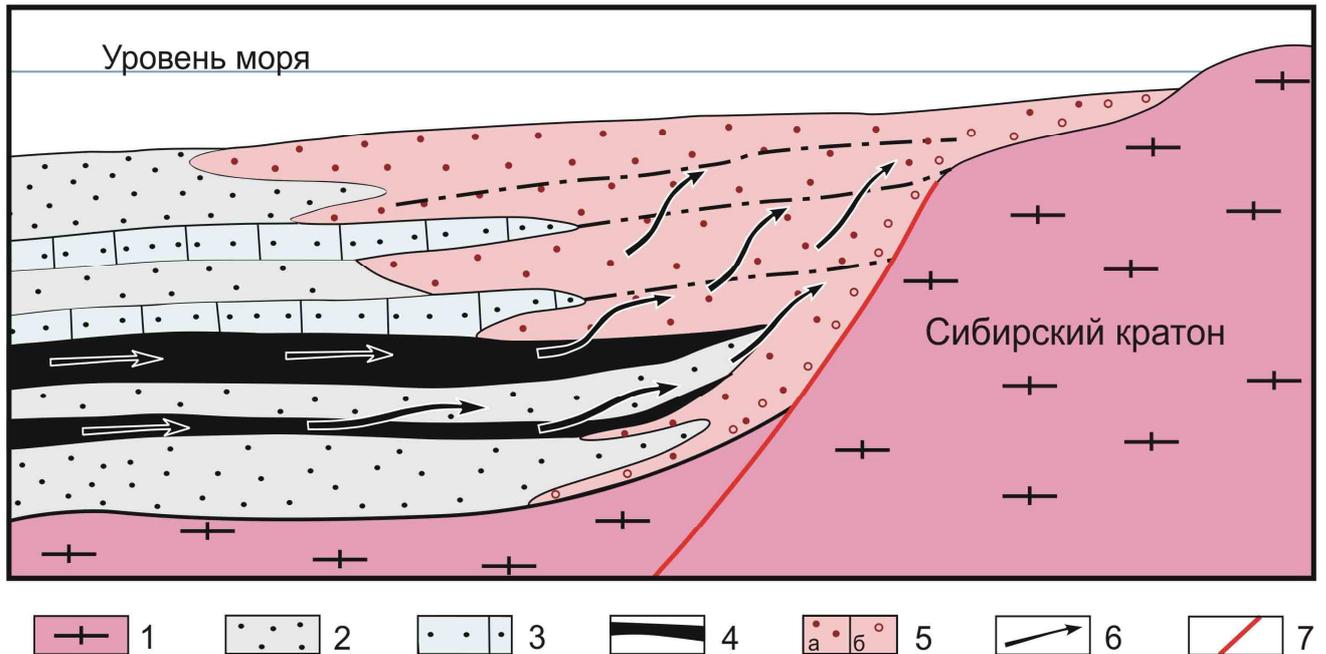


Рис. 14. Схема формирования Удоканского месторождения меди.

1 – породы кристаллического фундамента; 2-4 – сероцветные отложения кодарской и чинейской серий: 2 – песчаники, 3 – известковистые песчаники, 4 – черные сланцы; 5 – рудовмещающие красноцветные отложения прибрежных, дельтовых и лагунных фаций кеменской серии: а) песчаники, б) конгломераты; 6 – направление миграции катагенных металлоносных флюидов (нафтиды, элизионные воды); 7 – рифтогенный разлом.

Обобщая материал с позиции инфильтрационно-эпигенетического генезиса месторождений Кодаро-Удоканской СФЗ [Немеров и др., 2010⁷], можно предположить перераспределение вещества на стадии катагенетических трансформаций с осаждением его на геохимических барьерах (Рис. 14), в результате чего рудные компоненты (Cu, Zn, Pb, U, Ni, Au, Ag, Pt, Pd и др.) осаждаются, образуя характерную рудно-геохимическую зональность ореольного типа от центра (нефтематеринские породы) к периферии: (Au, Pt, Pd) → Cu, Ag →

⁷ Немеров В. К., Станевич А. М., Развозжаева Э. А. и др. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона // Геология и геофизика, 2010, Т. 51, № 5, С. 729-747.

Zn +Pb.

По данным Л.Б.Макарьева с соавторами [Макарьев и др., 1994⁸] углеродистые породы удоканской серии выделяются как один из платиноносных уровней Урага-Холболокского рудного узла, с которым связаны Холболокское, Графитовое, Бортовое и другие Pd-Ir-Pt проявления, поэтому обнаружение платинометалльных и золоторудных проявлений, генетически связанных с углеродистыми образованиями Тонодского и Нечерского поднятий, а также Кодаро-Удоканской СФЗ [Гурская, 2000⁹; Немеров, 2005¹²] становится более актуальным. Полученные результаты позволяют рассматривать кевактинскую углеродисто-терригенную формацию в качестве источника рудных и сопутствующих компонентов и учитывать это при оценке перспектив возможного благородно- и редкометалльного оруденения в пределах Байкальской горной области и Кодаро-Удоканской СФЗ (д.г.-м.н. Спиридонов А.М., к.г.-м.н. Будяк А.Е.).

- С применением физико-химического моделирования при взаимодействии пиритовой (ПИ) матрицы с сульфоарсенидным раствором рассчитана колонка минералообразования в зависимости от параметров состояния системы **Fe – As – S – Na – Cl – H – O**: баланса масс, температуры и состава (кислотности–щелочности) при 350-100 °С, 300 бар и 0.001 m H₂S. Изучены 3 типа фильтрации раствора: перколяции, растекания и стягивания с температурами 100-300°С, 300 бар. Арсенопирит (АПИ) образуется во флюидо(растворо)доминирующей зоне с тонкослойным замещением ПИ матрицы независимо от способа просачивания раствора, рН и температуры. Главными управляющими параметрами являются баланс масс – отношение п/р (пирит/раствор) и повышенное отношение As/Fe в растворе. При взаимодействии ПИ матрицы с сульфоарсенидным раствором между зоной выделения АПИ и переходной зоной возникает разность электрохимических потенциалов, увеличивающаяся на фоне снижения температуры, где формируется

⁸ Макарьев Л.Б. Платинометальность докембрийских углеродистых формаций Северо-Восточного Забайкалья // Платина России. – М.:АОЗТ Геоинформмарк», 1994.

⁹ Гурская Л.И. Платинометальное оруденение черносланцевого типа и критерии его прогнозирования. С.-Пб.:ВСЕГЕИ, 2000. – 208 с.

область электрохимического концентрационного геохимического барьера с отложением золота в АПИ + ПИ рудах. Для крупнейших разломов Байкальской рифтовой зоны: Тункинского, Баргузинского краевого шва Сибирской платформы и приразломного термального поля Кучегер, характеризующимся геохимическими ассоциациями рудных элементов и природных токсикантов As, Tl, Hg, рассчитаны геохимические потоки, функционально зависящие от приразломных тепловых потоков, в которых доминирует конвективная составляющая (Табл. 3) (д.г.-м.н. Вилор Н.В.).

Таблица 3.

Рассчитанные потоки главных рудных элементов и токсикантов в геохимических ассоциациях на региональных разломах Байкальской рифтовой зоны

Разлом	Потоки, кг / км ² · год						ПТП, мВт	F _{гл} , мВт
	As	Tl	Hg	Ag	Mo	Ge		
Тункинский	3.252	0.226	0.020*	0.089	0.189	не опр	707.84	323.37
Баргузинский	0.879	0.139	0.013*	не опр.	не опр.	не опр	587.19	362.14
Краевой шов Сибирской платформы	1.671	0.229	0.037* 0.055**	0.018	0.139	не опр	708.09	289.62
Термальное поле Кучегер	21.440*	0.413**	0.021*	0.479*	не опр	7.267*	74 Вт/м ²	9.553 МВт Макс.

Примечание: ПТП – поверхностный тепловой поток, F_{гл} – глубинно-коровая компонента ПТП.

Миграция рудных элементов происходит как функция приразломных тепловых потоков, поверхностные значения которых оценены по данным дистанционного зондирования Земли с установлением доминанты конвективной составляющей.

Блок 3. Геохимическая характеристика рудоносных ультрабазитов Алхадырского террейна, Шарыжалгайского выступа Сибирского кратона и Канского блока (отв. исполнители: к.г.-м.н. А.С.Мехоношин, д.г.-м.н. О.М.Глазунов).

- Алхадырский террейн является типичной коллизионной структурой, ограниченной с северо-востока Бирюсинским, а с юго-запада – Главным Саянским разломами. В этой структуре в связи с многократными проявлениями пликативных и дизъюнктивных деформаций основная масса ультрабазитовых массивов представляет собой будины, частично разлинзованные и рассланцованные, сохранившие свои первичные черты лишь в наиболее крупных телах.

Ранее [2009¹⁷] было установлено, что рудоносные интрузии относятся к дунит-перидотитовому формационному типу. В пределах террейна выделяются три площади распространения массивов этого типа: Барбитайский, Удинско-Бирюсинский и Бирюсинско-Тагульский рудные узлы. Массивы ультраосновных пород во всех этих районах имеют близкий петрографический состав и минералого-геохимические особенности.

По содержанию кремнезема и суммы щелочей состав пород отвечает низкощелочным ультрабазитам. По кремнекислотности резких различий между массивами не прослеживается. Разброс по содержанию щелочей незначительный. Поведение петрогенных (Al_2O_3 , TiO_2 , CaO) и ряда редких элементов (Ni , Cr , Zr) в ультрабазитах зависит от изменения индекса фракционирования и отвечает магматическим трендам эволюции состава ультраосновных расплавов. Это выражается в закономерном увеличении содержаний Al_2O_3 , TiO_2 , CaO с уменьшением содержаний MgO . На диаграммах $MgO - Al_2O_3$, TiO_2 , CaO фигуративные точки составов пород образуют единый линейный тренд, внутри которого ультрабазиты различных массивов с некоторым перекрытием образуют поля со своим разбросом содержаний элементов от среднего. По характеру спектра распределения содержаний РЗЭ,

¹⁷ Мехоношин А. С., Колотилина Т. Б. Формационная типизация базит-ультрабазитовых комплексов алхадырского террейна (юг Сибири) в связи с их потенциальной рудоносностью // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения. Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, 2009, т. 2., с. 54-57.

нормализованных по таковым в хондрите, ультрабазиты разных массивов демонстрируют согласное изменение и характеризуются 1-10-кратным обогащением легкими РЗЭ. Кривые распределения редкоземельных элементов – без или с небольшими европиевыми аномалиями и имеют слабый наклон в сторону иттербия. Повышенные концентрации лёгких РЗЭ относительно тяжёлых совместно с другими данными позволяют их отнести к производным пикритовых магм. Этот вывод также подтверждается составом силикатных включений в раннемагматических хромитах.

В Шарыжалгайском выступе фундамента Сибирского кратона основные и ультраосновные породы образуют большое число мелких массивов, которые рассеяны на большой площади и залегают среди пород гранулитогнейсового комплекса архея. Наибольшим распространением пользуются высокожелезистые габбронориты с титаномагнетит-ильменитовой минерализацией, меньшим – высокомагнезиальные породы перидотит-габбровой формации, наиболее крупными из которых являются Малозадойский и Черемшанский с сульфидно-никелевой минерализацией, сопровождающейся повышенными содержаниями платиноидов.

По соотношению содержаний SiO_2 и суммы щелочей породы обоих массивов относятся к низкощелочному ряду основных-ультраосновных пород, но для них характерны высокие содержания Rb, Cs, Ba. Средние химические составы пород очень близки, но Малозадойскому массиву присущи более широкие диапазоны содержаний как петрогенных, так и редких элементов. Так содержания TiO_2 в них достигают 1,5 %, а никеля – 4500 ppm.

Породы имеют однотипное распределение редкоземельных элементов со значительным обогащением лёгкими РЗЭ по отношению к тяжёлым – $(\text{Ce/Yb})_N = 2.6-5.8$ и средним – $(\text{La/Nd})_N = 1.7-4$. При этом отмечается увеличение суммы РЗЭ с уменьшением магнезиальности пород. Высокий уровень содержаний РЗЭ характерен и для плагиоклаза из габброидов Малозадойского массива.

¹⁸ Кислов Е.В. Йоко-Довыренский расслоенный массив. Улан-Удэ: БНЦ РАН, 1998. – 264 с.

¹⁹ Медь-никеленосные габброидные формации складчатых областей Сибири / Кривенко А. П., Глотов А. И., Балькин П. А. и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – 237 с.

Наблюдаемые геохимические особенности пород Малозадойского и Черемшанского массивов нельзя связывать только с наложенными процессами. Такой уровень содержаний и похожий рисунок кривых распределения РЗЭ, а также повышенные концентрации Sr, LREE наблюдаются в плагиоперидотитах Йоко-Довыренского массива [Кислов, 1998¹⁸; Медь-никеленосные..., 1990¹⁹], в раннепротерозойских вулканитах Ветреного пояса и в архейских габброидах Западной Гренландии.

Состав породообразующих минералов, высокая магнезиальность пород свидетельствуют о том, что родоначальная магма для перидотит-габбровых массивов Шарыжалгайского выступа фундамента Сибирского кратона имела ультраосновной состав. Повышенные содержания лёгких и средних редкоземельных элементов и ряда крупноионных литофильных элементов, по-видимому, связаны с частичной контаминацией исходных магм коровым материалом.

Работы ведутся совместно с сотрудниками Института геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск) и Геологического института СО РАН (Иркутск) (*к.г.-м.н. Мехоношин А.С.*).

- Проведено структурно-геохимическое сопоставление гипербазитов разновозрастных (архей-протерозойских) Шарыжалгайского, Бирюсинского и Канского гнейсовых террейнов. Рудоносные гипербазиты последних двух террейнов совмещаются в координатах петрогенных компонентов (Рис. 15). Сульфидные руды рудопроявлений Бирюсинского и Канского блоков обнаруживают сходство по составу породообразующих и сульфидных минералов (пирротин, пентландит, халькопирит).

Наращение степени рудоносности гипербазитов от Прибайкалья на СЗ к Канскому террейну, сопровождаемое смещением геохимического профиля интрузий с Pt-Cr на Pd-Cu-Ni, наряду с усложнением их структуры, отражает этапы эволюции во времени по мере аккреции террейнов к Северо-Азиатскому кратону. Завершающая стадия образования наиболее продуктивной Кингашской рудно-магматической системы приходится на период 1,38-1,46 млрд лет.

Опробование и картирование массивов гипербазитов Онотского и Урикско-Ийского грабенов Шарыжалгайского гнейсового выступа выявило их дифференцированный характер при перидотит-пироксенит-габбровом составе.

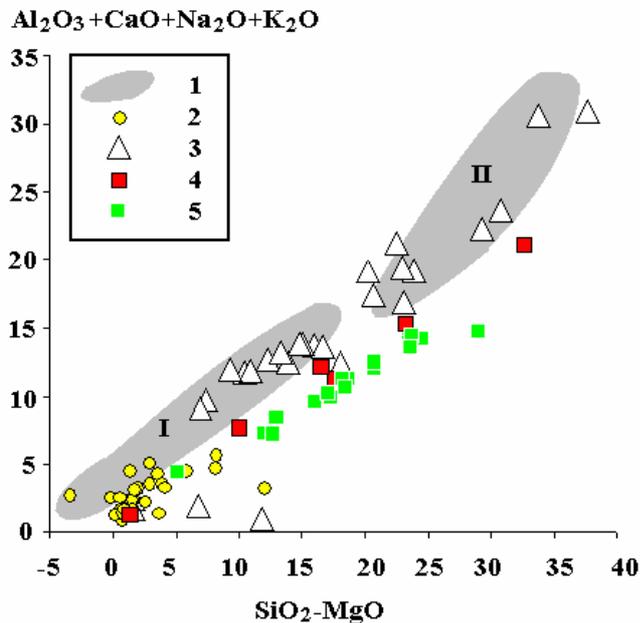


Рис. 15. Положение пород ультрабазитов докембрийских блоков на модифицированной диаграмме по [Барсуков, Дмитриев, 1972²⁰].
1-2 – Идарский блок: 1 – породы Кингашского массива: I – ультраосновные, II – основные, 2 – массивы идарского комплекса; 3 – Бирюсинский блок (пробы Свириной И.Ф., Свирина Г.М., 1990 г.; Колотилина Т.Б., 1999); 4 – Шарыжалгайский блок (Глазунов, Золотина, 1983; Горнова, 1989, 1999); 5 – коматииты Барбертон [Maier et al., 2003²¹].

Большинство массивов несут следы мигматизации и метасоматоза, влияние которых проявилось в повышенном содержании (г/т): Zr – до 120, Ti – до 6000, Zn – до 217, Be – до 2. Сопоставимость протерозойских Хоготского и Кундуйского массивов по аномальной концентрации Ni – до 3000 г/т и Cu – до 1000 г/т с кингашскими массивами (Рис. 16) расширяет перспективы Саянской никель-платиноносной провинции. Стоит отметить в ультраосновных породах Кундуйского массива высокое содержание Cr – до 11100 г/т, соответствие петрогенных элементов в них реститовым гипербазитам идарского комплекса, а рудных – ультраосновным породам кингашского, что даёт возможность выделить новый геохимический подтип.

²⁰ Барсуков В.Л., Дмитриев Л.В. О верхней мантии Земли как возможном источнике рудного вещества // Геохимия, 1972, № 12, С. 1515-1541.

²¹ Maier W.D., Roelofse F., Barnes S.-J. The concentration of the platinum-group elements in South African komatiites: implication for mantle sources, melting regime and PGE fractionation during crystallization // Journ. Petrology, 2003, V. 44, № 10, P. 1787-1804.

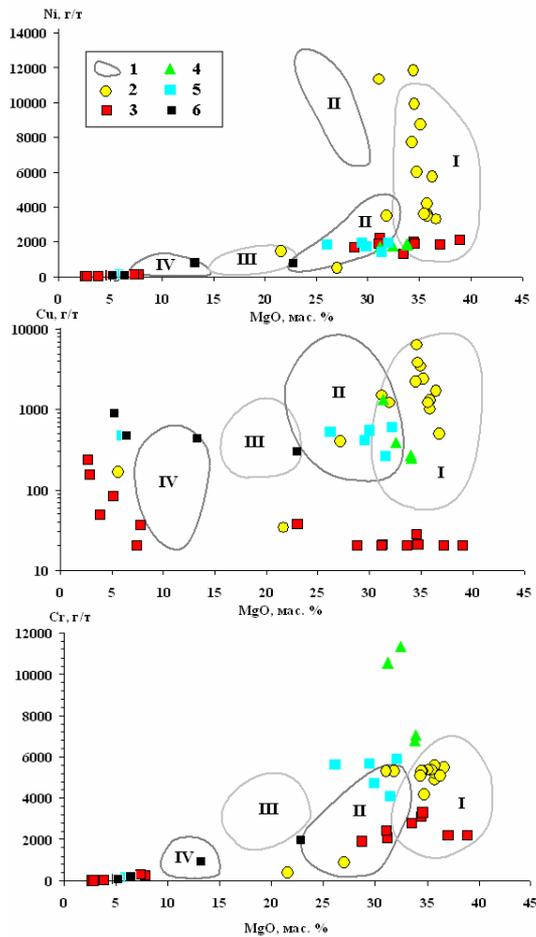


Рис. 16. Бинарные графики зависимости содержаний Ni, Cu, Cr от MgO в ультрабазитах Канского (1-3) и Шарыжалгайского (4-6) докембрийских террейнов. 1 - полями выделены породы эталонного Кингашского массива: I – дуниты и аподунитовые серпентиниты, II – верлиты и аповерлитовые серпентиниты, III – оливиновые клинопироксениты и клинопироксениты, IV – габбро-амфиболиты; 2-6 – массивы: 2 – Верхнекингашский; 3 – массивы идарского комплекса; 4 – Кундуйский; 5 – Хоготский; 6 – Чёрнотагнинский.

В результате дополнения магнитно-плотностных разрезов геохимическими данными впервые вырисовывается модель глубинного строения рудного узла. На фоне общего склонения поверхности Мохо к границе с Сибирской платформой Кингашское рудное поле проектируется на зоны её проседания, приравненные к активным участкам локального плавления. Максимальные её диапиры в Канском секторе отмечены масштабным проявлением протрузий реститовых гипербазитов с Pt-Cr оруденением (Рис. 17). Сонахождение гипербазитов Pt-Cr и Pd-Cu-Ni геохимических типов указывает на разную степень частичного плавления мантии.

Зона влияния глубинного Саянского разлома маркируется активной мигматизацией и наличием ксенолитов с высокобарическим гранатом предположительно алмазного парагенезиса.

Направленное изменение состава и металлогении гипербазитов по южной окраине Северо-Азиатского кратона можно интерпретировать как результат эволюции в докембрии обогащённой мантии типа EM-II.

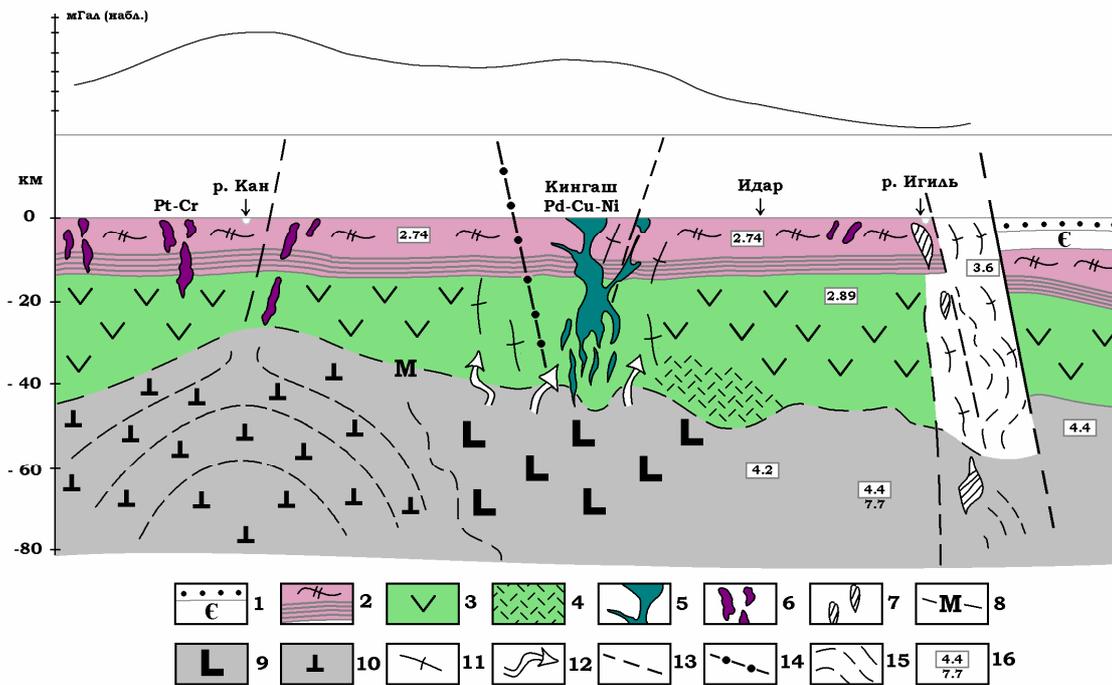


Рис. 17. Глубинный разрез через Кингашское рудное поле, от р. Кан до Сибирской платформы. Составлен О.М. Глазуновым с использованием данных Норильского филиала ВСЕГЕИ. 1 – чехол Сибирской платформы; 2 – кристаллический гранито-гнейсовый фундамент AR₂; 3 – эклогит-базальтовый слой; 4 – условно-редуцированный разуплотнённый эклогит-базальтовый слой; 5 – гипербазиты с Pd-Cu-Ni минерализацией кингашского комплекса; 6 – гипербазиты с Pt-Ni-Cr минерализацией идарского комплекса; 7 – гранатовые перидотиты; 8 – поверхность Мохоровичича (М); 9 – пироксенитовый ингредиент мантии; 10 – перидотитовый ингредиент мантии; 11 – зоны мигматизации; 12 – интрателлурические потоки; 13 – основные разломы; 14 – гравитационная ступень; 15 – деструктивные зоны; 16 – плотность (г/см³) и скорость прохождения сейсмических волн в (км/с).

○ Выявленные аномально высокие концентрации Ni (до 3000 г/т) и Cu (до 1000 г/т) в Хоготском и Кундуйском массивах из грабенов Шарыжалгайского блока специальной запиской рекомендованы *Ангарской геологической экспедиции ФГУНПП «Иркутскгеофизика»* для детализации. Её главным геологом А.В. Салаевым подписан акт внедрения.

Оргкомитетом III Международного Конгресса и Выставки «Цветные металлы-2011» заказан доклад «Железо-титан-ванадиевые руды Саянской провинции и их обогащение при метаморфизме». Раскрытый в докладе механизм преобразования руд при метаморфизме и рекомендации по оконтуриванию блоков руд, обогащённых «свободным» ильменитом, пригодных для «прямого передела», вызвал интерес канадских обогатителей. В результате проф. Fathi Nabashi (Laval University, Quebec City, Canada G1X 4E7) предложил активное сотрудничество с обменом информацией и выездом на крупное Лысанское месторождение в Восточных Саянах, расположенное в 5 км от железной дороги Абакан-Тайшет (д.г.-м.н. Глазунов О.М.).

Блок 4. Построение физико-химических моделей неизотермического формирования рудообразующих систем и оценка их продуктивности с учётом полученных экспериментально коэффициентов распределения благородных

металлов (Au, Ag), химического и фазового состояния элементов, включая неавтономные фазы и наночастицы (отв. исполнители: д.х.н. В.Л.Таусон, д.г.-м.н. К.В.Чудненко).

- Продолжены экспериментальные исследования по распределению РЗЭ между силикатными фазами и щелочным гидротермальным раствором при 500°C и 1 кбар. Содержания РЗЭ определялись ИСП-МС, в эксперименте использовался внутренний пробоотбор. Результаты показывают зависимость K_D от окислительно-восстановительного потенциала среды. Коэффициенты распределения КППШ/Ni-слюда сохраняют приблизительное постоянство по всему ряду РЗЭ, но зависят от концентрации РЗЭ.

- Продолжены экспериментальные исследования двойственного распределения микроэлементов на примере благородных металлов (Au, Pt, Pd) между магнетитом и его твердыми растворами и гидротермальными флюидами при 450°C и 1 кбар. Показано, что содержание примеси благородного металла (БМ) зависит от размера кристалла в пробе или удельной поверхности среднего кристалла в размерной выборке. Методом РФЭС изучена поверхность полученных фаз и формы нахождения БМ. Показано, что элементная (самородная) форма не единственная; окисленные формы, скорее всего, входят в составы поверхностных неавтономных фаз.

- Изучено распределение золота по отдельным кристаллам пирита из термальных полей Камчатки. Обнаружена зависимость концентрации Au от размера кристалла (удельной поверхности среднего кристалла в выборке, Рис. 18). Это явление воспроизводится на разных образцах и, скорее всего, вызвано присутствием неавтономной фазы на поверхности кристаллов, поскольку зависимости хорошо детерминированы ($R^2 = 0.76-0.99$). Экстраполяционные оценки содержания структурной составляющей примеси Au (0.1-0.3 г/т) согласуются с данными для эпитеpmальных золото-серебряных месторождений вулканогенного происхождения Северо-Востока России, причем такие уровни содержания структурного Au фиксируются в пиритах рудных тел; в пиритах околорудных метасоматитов они заметно ниже. Следовательно, значительная часть Au осаждается совместно с пиритом в процессе его образования из

раствора с концентрацией Au порядка 1 г/т. Это позволяет проследить эволюцию золотоносного флюида, имеющего глубинное происхождение.

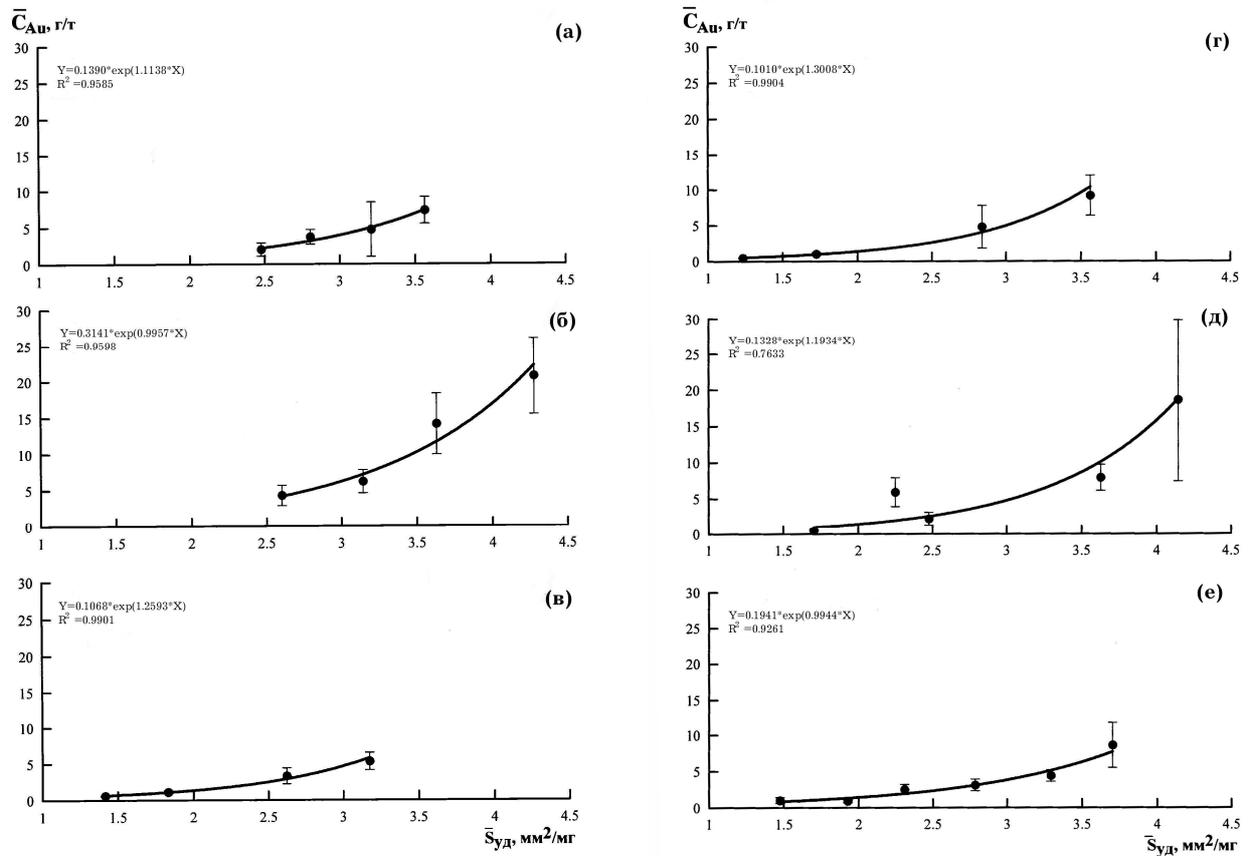


Рис. 18. Зависимости среднего содержания равномерно распределенного Au от удельной поверхности среднего кристалла в выборке. Пириты из гидротермальных глин Верхне-Кошелевского и Восточно-Паужетского термальных полей (Камчатка).

- Установлена закономерность, состоящая в наличии трех мод распределения концентраций микроэлемента (МЭ) в минералах, соответствующих трем основным формам нахождения – структурной, поверхностной и фазовой (собственные, автономные фазы, включая поверхностные микрофазы). Исследования проведены на минералах гидротермально синтезированной трехфазной ассоциации пирит-пирротин-магнетит в присутствии примесей Au, Cd и Mn. Разделение форм методом статистических выборок аналитических данных для монокристаллов (СВАДМ) основано на том, что отдельные кристаллы могут содержать преимущественно одну из форм. На Рис. 19 это демонстрируется на примере примеси Cd в

магнетите, формы нахождения которого диагностированы методом атомно-абсорбционной спектрометрии термовыхода элемента (ААС ТВ). Зависимость содержания МЭ от размера кристалла или удельной поверхности среднего кристалла в пробе обусловлена, главным образом, присутствием на поверхности неавтономных фаз, поглощающих МЭ.

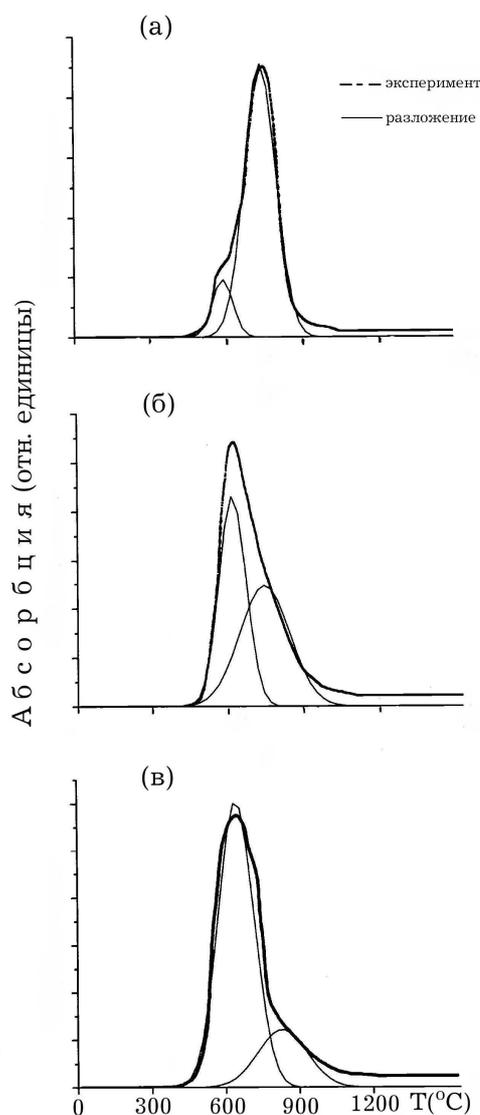


Рис. 19. Кривые термовыхода Cd из образцов магнетита с разным соотношением структурной и неструктурных форм элемента.

На Рис. 20 представлены примеры таких сильно детерминированных зависимостей для Mn и Au в пирите. Показана возможность получения истинных (или близких к ним) коэффициентов межфазного распределения, отвечающих структурной примеси элемента. Они сильно отличаются от эффективных коэффициентов распределения, рассчитанных по валовым содержаниям примесей, за исключением Mn в пирротине и магнетите, в

которых его изоморфная форма является основной. Полученные результаты являются шагом к использованию МЭ в качестве количественных геохимических индикаторов, позволяющих получить корректную информацию о параметрах минералообразования и содержаниях МЭ во флюидной фазе.

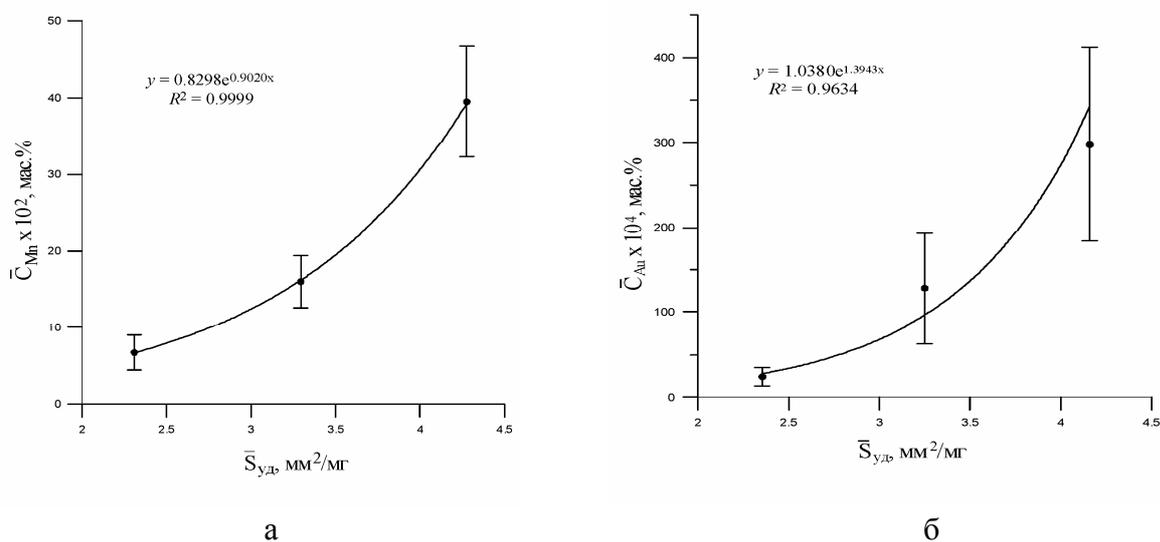


Рис. 20. Зависимость среднего содержания равномерно распределенной примеси микроэлемента (Mn-а, Au-б) в пирите от удельной поверхности среднего кристалла в размерной фракции.

Предэкспоненциальный множитель является оценкой концентрации, относящейся к объему кристалла, т.е. ее структурной составляющей (83 г/т Mn, 1 г/т Au).

- (Инициативная тема). На примере несоразмерно трехмерно-модулированного (НТМ) кубического лазурита из Прибайкалья и его «полиморфных» разновидностей установлено, что Si-O-Al-каркас содалитоподобных минералов, считавшийся жестким, на самом деле легко деформируется и приспособливается к занимающим структурные полости кластерным ионам. Это приводит к обратимости деформации каркаса и восстановлению модуляции, что зафиксировано в высокотемпературном рентгеновском эксперименте (Рис. 21). Полное восстановление НТМ, включая ее период, наблюдалось впервые. Оно противоречит классической термодинамике, поскольку означает самопроизвольный переход системы в состояние с более высокой свободной энергией. Причина заключается в том, что система содержит запасенную энергию структуры упорядоченных кластеров. При снятии модуляции каркаса она ничем не компенсируется, но

если кластеры не могут или не успевают перегруппироваться, эта латентная энергия вызывает наведенную деформацию каркаса, стремясь реализовать энергетический баланс в структуре – состояние вынужденного равновесия. Это состояние может явиться основой получения нового класса материалов с повышенной емкостью и избирательностью ионного обмена. Оно также делает возможным определение окислительно-восстановительного состояния системы и активностей газовых компонентов (д.х.н. Таусон В.Л.).

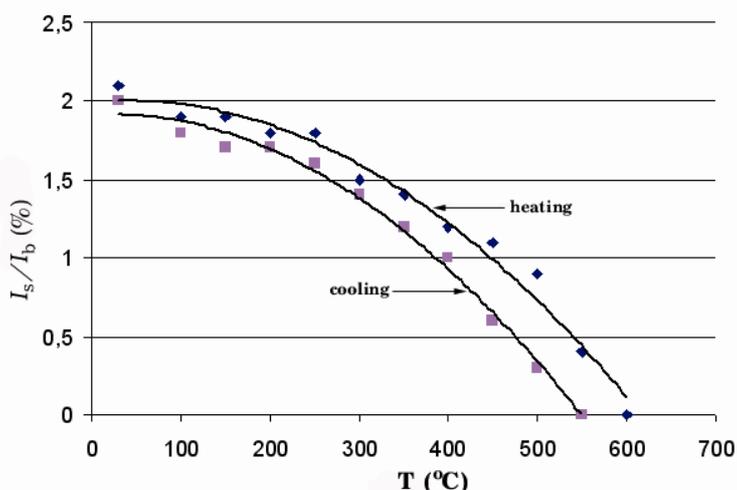


Рис. 21. Степень развития модуляции в кубическом лазурите с НТМ-структурой при нагреве и охлаждении образца в высокотемпературной рентгеновской камере. Отношение интенсивностей сателлита (s) 2-*n*,1-*n*,1 и базового отражения 211 (b), выраженное в процентах, использовалось как мера развития модуляции.

- Предложен новый метод в решении задач геотермобарометрии гранитоидных минеральных систем с участием или без участия флюида. Метод является решением обратной задачи выпуклого программирования и основан на нахождении минимума свободной энергии Гиббса в физико-химической системе на множестве определенных ограничений. Возможности метода продемонстрированы для определения РТ-параметров образования и минерального состава позднемезозойских гранитоидов 4-х крупных массивов по всему простиранию Станового хребта (южное обрамление Алданского щита) (Рис. 22). Эти образования сформированы в различных фациях глубинности от гипабиссальной (<10-12 км) до мезоабиссальной и абиссальной (>20 км).

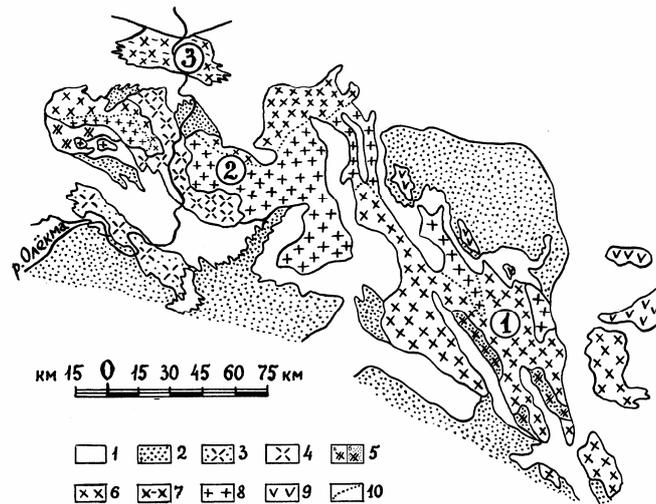


Рис. 22. Геологическая карта гранитоидных массивов центральной и северо-западной частей Станового хребта.

1 – архейские и протерозойские метаморфические образования; 2 – нижнепротерозойские гранитоиды; 3 – кварцевые монзониты нижнепротерозойские; 4-9 – позднемезозойские магматические образования: 4 – кварцевые монзониты, 5 – диориты (а – однородные, б – гнейсовидные), 6 – гранодиориты, 7 – гранодиориты гнейсовидные, 8 – граниты; 9 – вулканические образования; 10 – фациальные границы в массивах гранитоидов. Цифрами в кружках обозначены исследованные гранитоидные массивы: 1 – Тындинский, 2 – Чильчинский и 3 – автохтонный Дырын-Юряхский.

Образцы пород включают (Табл. 4): кварцевый диорит Токско-Нуямского (1) и гранодиорит Тындинского массивов (2), кварцевый монзонит (3), субщелочной биотитовый гранит (4) и лейкогранит (5) Чильчинского массива, а также гнейсовидный кварцевый монзонит автохтонного Дырын-Юряхского массива (6). Расчет выполнялся с помощью программного комплекса (ПК) «Селектор-С». Диапазон искомых параметров 500-720 °С по температуре и 1000-8000 бар по давлению. Моделирование проводилось с учетом моделей

Таблица 4.

Моделирование составов пород и условий кристаллизации гранитоидов Станового хребта

№ п.п.	SiO ₂ (вес.%)	Ps (кбар)	Н (км)	Т _{мод} (°С)	Амф	Би	Пл	КПШ	Кв	Сф	Мг
1	62,9	3,5(3,8)	12,5(13,5)	789	7,3(7,0)	4,1(3,6)	(30,4)	(37,7)	(17,2)	0,3(0,7)	0,1(1,9)
2	64,45	3,5(3,1)	12,5(11,0)	607	7,5(11,8)	7,6(6,2)	45,5(42,0)	17,0(21,4)	19,4(17,2)	2,1(1,0)	1,0(0,3)
3	58,92	4,0(5,0)	14,0(16,6)	708	9,2(11,3)	9,0(13,9)	44,8(42,3)	27,2(24,3)	7,4(5,6)	1,1(2,4)	1,2(-)
4	70,44	(4,1)	(14,6)	592	-(-)	3,8(5,0)	25,5(30,7)	30,9(35,6)	38,7(25,5)	0,6(-)	0,6(0,5)
5	76,11	(3,6)	(12,7)	670	-(-)	1,4(1,2)	17,8(15,1)	49,3(46,4)	30,9(36,4)	-(-)	0,5(0,2)
6	62,56	6,0(6,1)	21,0(21,5)	579	4,5(6,2)	5,9(6,5)	58,9(59,1)	16,0(16,6)	14,0(9,0)	0,6(1,2)	0,1(1,4)

Примечание: Ps – литостатическое давление, Н – глубина, Т_{мод} – температура. Минералы: Амф – амфибол, Би – биотит, Пл – плагиоклаз, КПШ – калиевый полевой шпат, Кв – кварц, Сф – сфен, Мг – магнетит. В столбце Ps цифры без скобок определены с использованием биотит-амфиболового геобарометра [Панеях, Федорова, 1973²²], а в скобках – с помощью ПК

²² Панеях Н.А., Федорова Н.Е. Равновесие биотит роговая обманка в гранитоидах // Вестн. МГУ. Сер. геол., 1973, №4., С. 94-98.

«Селектор». В столбцах с содержаниями тех или иных минералов цифры без скобок получены ручным подсчетом зерен на «Интеграторе», а цифры в скобках – результаты моделирования на ПК «Селектор».

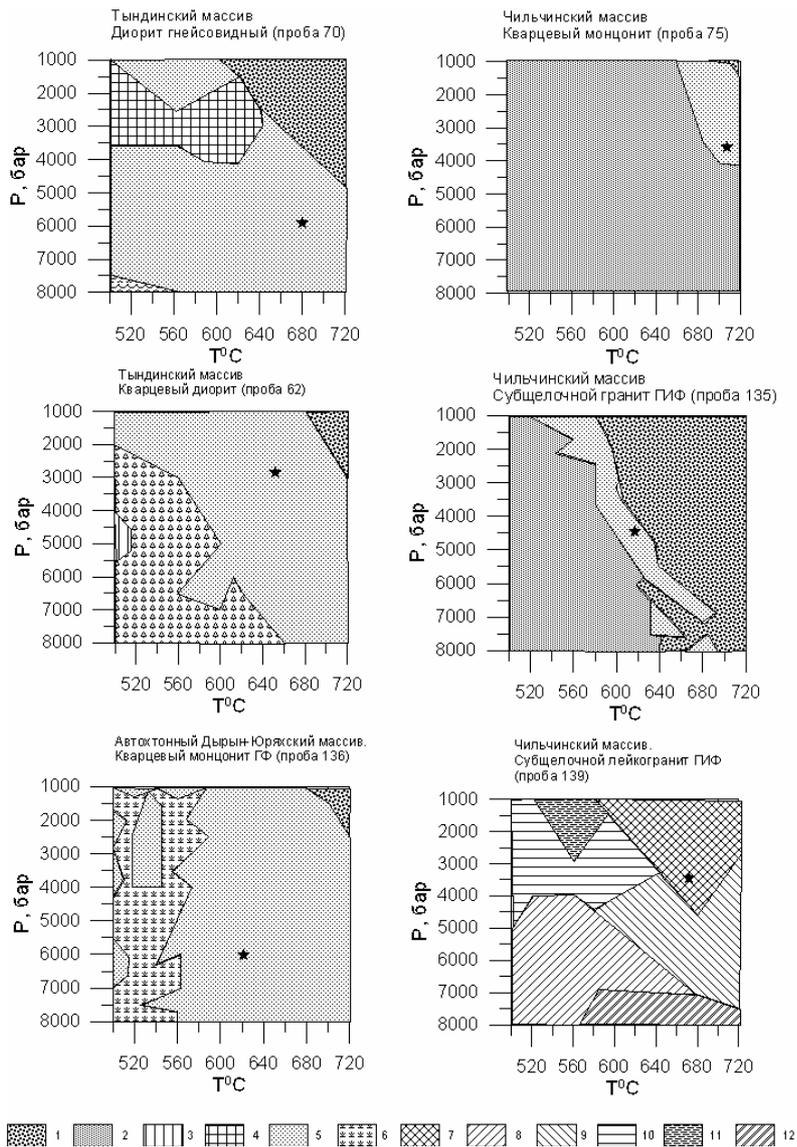


Рис. 23. Поля устойчивости минеральных ассоциаций типовых проб поздемезозойских гранитоидов Станового хребта в P-T координатах. Звездочка соответствует расчетному значению T и P формирования гранитоидов.

твердых растворов для минералов, главным образом, по моделям Холланда и Пауэлла. Полученная оценка условий кристаллизации изученных гранитоидов (Рис. 23) в целом совпадает с геологическими выводами относительно глубин их формирования. Кроме того, она подтвердила и формирование в Чильчинском массиве основных типов гранитоидов по вертикали: монцониты оказались наиболее глубинными, а биотитовые граниты и лейкограниты главной интрузивной фазы (ГИФ) заняли соответственно промежуточное и самое высокое гипсометрическое положение.

- Проведено моделирование изменений составов минеральных ассоциаций

в метapelитах гранулитовой фации Алдано-Станового щита в широкой области P - T условий. Возможная вариация минералогического состава образца метapelита, состоящего из граната, биотита, силлиманита, плагиоклаза, кварца и ильменита, с изменением P - T показано на Рис. 24. Эта диаграмма представляет собой частное сечение многомерной фигуры P - T -флюид («псевдосекцию»). Выполненное исследование показало, что обогащенные трехвалентным железом породы могут буферировать восстановленный флюид, поступающий извне, с помощью внутренних реакций, поддерживающих окислительный потенциал этих пород на определенном уровне. Окислительный потенциал втекающего восстановленного флюида при этом повышается, с изменением общего состава флюида по всем главным компонентам – CO_2 , H_2O , CH_4 , H_2 , CO , O_2 . Моделирование подобных пород позволяет видеть, что реальные минеральные ассоциации могут быть образованы при небольшом весовом отношении флюид/порода – не более 0.01-0.04, что предполагает ограниченную инфильтрацию восстановленного флюида в метаморфические породы. Важной особенностью диаграммы (Рис. 24) является обширное поле мусковитсодержащих минеральных ассоциаций в области повышенных давлений 10-12 кбар, при температурах амфиболитовой фации метаморфизма – 650-700 °С, причем мусковит появляется здесь в парагенезисах даже с амфиболом. Такие парагенезисы отмечаются в широко распространенных мусковитсодержащих гнейсах и амфиболитах удско-майской серии (зейский комплекс). Этот анализ позволяет сделать вывод о том, что по величине давления условия метаморфизма амфиболитовой фации станового комплекса, по крайней мере, в пределах распространения удско-майской зоны, вполне сопоставимы (если не превышают) с условиями метаморфизма наиболее глубоких гранулитовых комплексов Алдано-Станового щита.

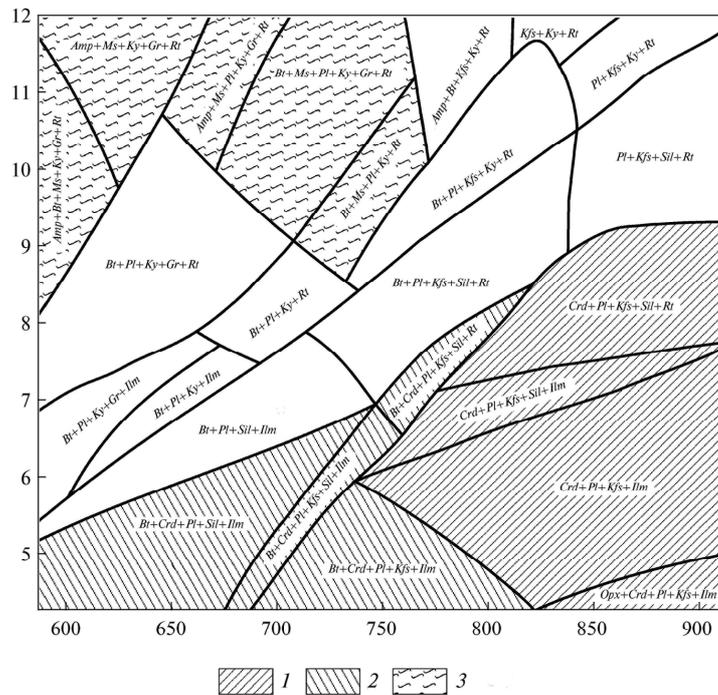


Рис. 24. Поля минеральных парагенезисов для образца метапелита на P - T диаграмме. В каждом поле, помимо указанной на диаграмме минеральной ассоциации, присутствуют гранат + кварц. Заштрихованные поля – парагенезисы: 1 – с кордиеритом и биотитом; 2 – с кордиеритом без биотита; 3 – с мусковитом.

- Разработана термодинамическая модель магматогенно-гидротермальной системы, характерной для геотектонической обстановки Курило-Камчаткой островной дуги. Обобщенная схема формирования различных типов парогидротерм Южной Камчатки рассмотрена в рамках системы из шестнадцати резервуаров (реакторов), в которых происходит подъем флюида по проницаемым зонам, вскипание водного раствора с образованием парогидротерм в области перехода пар-вода, интенсивное смешение восходящих глубинных гидротерм и их конденсата с более холодными подземными и метеорными водами (Рис. 25). На основе предложенной модели было проведено исследование по формам нахождения вещества в гидротермальном растворе в различных термодинамических обстановках.

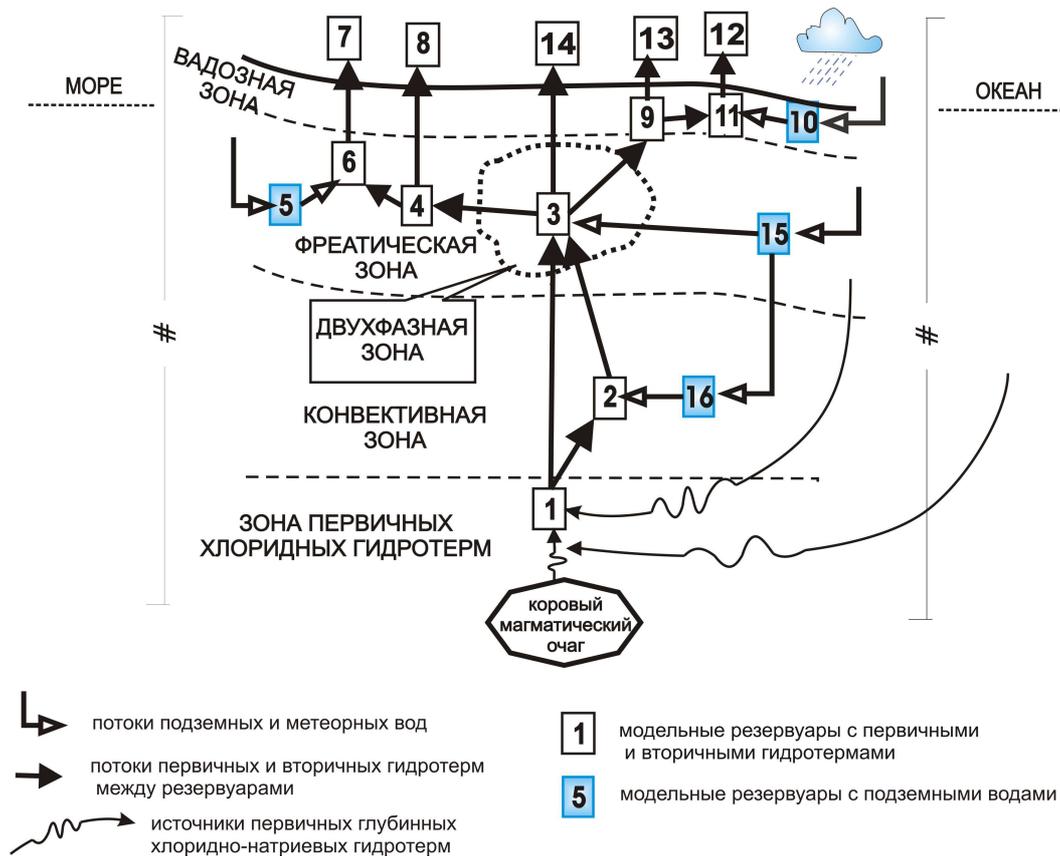


Рис. 25. Концептуальная модель магматогенно-гидротермальной системы Курило-Камчатской островной дуги.

- Создана термодинамическая модель натриевосиликатного расплава, работающая в области составов от 0 до 70 мол.% Na_2O . Термодинамические свойства компонентов расплава рассчитаны, исходя из результатов высокотемпературной спектроскопии КР [Быков и др., 2009²³]. В список вероятных компонентов модели включены силикаты, стехиометрически соответствующие структурным единицам Q^n .

Известно, что при постепенном увеличении соотношения $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ от 0 до 2 силикатная сетка претерпевает закономерные структурные изменения. При содержании Na_2O до 20 мол.% силикатная составляющая в основном представлена структурными единицами Q^4 . С дальнейшим добавлением катиона-модификатора их содержание уменьшается, а содержание Q^3 растет и достигает максимума при 33 мол.% Na_2O , что соответствует составу

²³ Быков В.Н., Королева О.Н., Осипов А.А. Структура силикатных расплавов по данным спектроскопии комбинационного рассеяния и термодинамического моделирования // Геохимия, 2009, № 11, С. 1138-1145.

дисиликата натрия. Содержание Q^2 достигает максимума при 50 мол. % Na_2O , что по составу соответствует метасиликату натрия. В условиях, когда содержание натрия составляет от 55 до 63 мол.% Na_2O , в расплаве преобладают Q^1 , соответствующие диортосиликату натрия. Если содержание Na_2O больше, чем 63 мол.%, то преобладают структурные единицы Q^0 , соответствующие ортосиликату натрия.

На основе этих представлений были построены термодинамические модели (Рис. 26). Состав расплава менялся от чистого кремнезема до ортосиликата натрия (67 мол.% Na_2O), температурный диапазон задавался от 25 до 1200 °С. В базовой мультисистеме Na–Si–O задавался список потенциально возможных веществ в равновесии, который включает 25 зависимых компонентов, в том числе 7 газов и 15 минеральных фаз, включая $NaSiO_{2,5}$, $Na_3SiO_{3,5}$, стехиометрически соответствующие единицам Q^3 и Q^1 (д.г.-м.н. Чудненко К.В.).

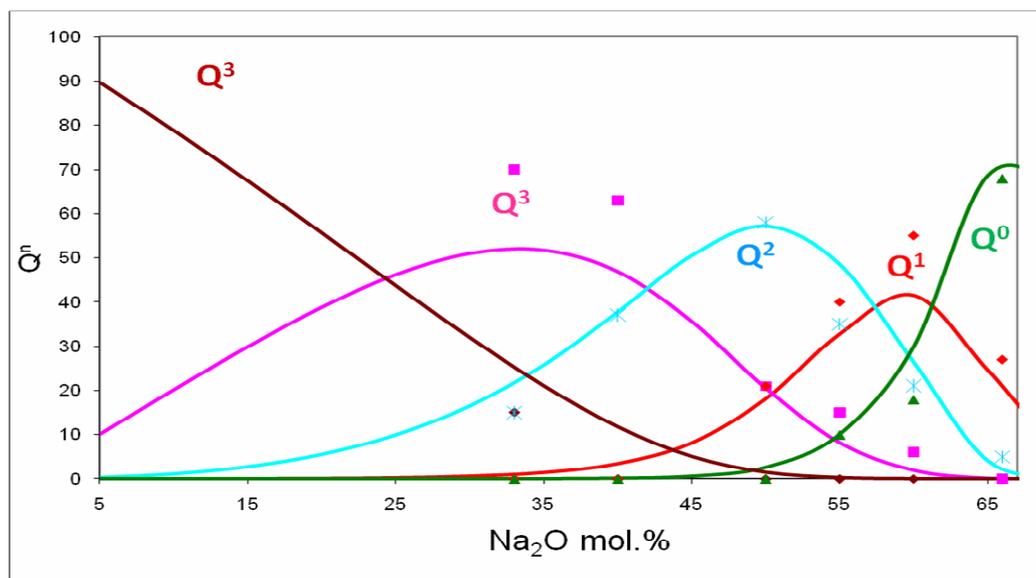


Рис. 26. Результат моделирования распределения структурных единиц в натриевосиликатном расплаве при 1063 °С.