

Н. Л. ДОБРЕЦОВ, А. С. БОРИСЕНКО, А. Э. ИЗОХ

# ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ глубинные мантийные ПЛЮМЫ – ИСТОЧНИК рудного богатства планеты



*В земной коре встречаются богатейшие залежи цветных и благородных металлов. Каково их происхождение? Новосибирские геологи выработали концепцию «термохимического плюма» – глубинного лифта, доставляющего ценный груз от ядра планеты к поверхности. На основе опытных данных и моделирования построена схема формирования рудных месторождений, которая, вероятно, облегчит их поиск и разработку*

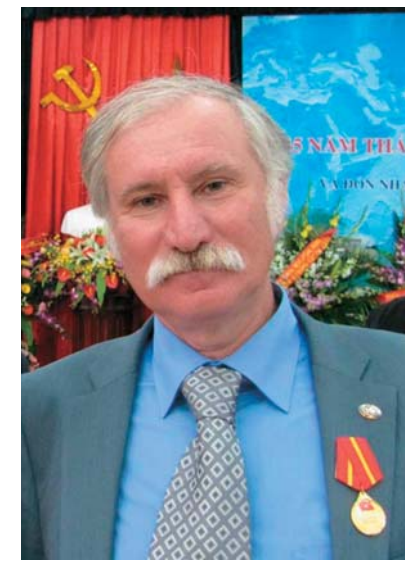
**Ключевые слова:** крупные изверженные провинции, расслоенные интрузивы, петрология.  
**Key words:** large igneous provinces, layered intrusion, petrology



ДОБРЕЦОВ Николай Леонтьевич – академик РАН, доктор геолого-минералогических наук, председатель Объединенного ученого совета наук о Земле РАН, советник РАН Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН. Автор и соавтор 720 научных работ. Главный редактор журнала «НАУКА из первых рук»



БОРИСЕНКО Александр Сергеевич – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией рудно-магматических систем и металлогении Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН. Автор и соавтор 376 научных работ



ИЗОХ Андрей Эмильевич – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией петрологии и рудоносности магматических формаций Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН. Автор и соавтор 250 научных работ

В конце прошлого века в геологии совершилось несколько революций во взглядах на причины глобальных геологических процессов, ответственных за эволюцию оболочек Земли. Во-первых, была создана теория литосферных плит, в рамках которой разработаны модели зон спрединга, где происходит рождение океанической коры, и зон субдукций, где кора погружается в мантию и рождается новая континентальная кора. Основные положения этой теории вошли в школьные учебники. Во-вторых, получила широкое развитие теория мантийных плюмов – подъема тепла и вещества из глубинных зон Земли в виде локальных струй.

Считается, что мантийные плюмы независимы от тектоники плит. В качестве примера можно привести Гавайский и Императорский подводные вулканические хребты, которые представляют собой след на Тихоокеанской океанической плите, движущейся над плюмом – Гавайской горячей точкой. Однако в книге академика В. Е. Хаина (2003) показано, что в истории нашей планеты есть эпохи, в которые преобладала тектоника плит, тогда как в другие более широко была проявлена тектоника плюмов.

Сейчас развивается новая парадигма геологии – глубинная геодинамика, оценивающая природу глобальных процессов с учетом взаимодействия разноглубинных процессов, вплоть до ядра, оболочек Земли (Добрецов, 2011). Такой подход стал возможным благодаря сейсмической томографии, позволяющей выявлять неоднородности в мантии за счет различий в скорости прохождения сейсмических волн сквозь разные среды (Zhao, 2010; Кулаков и др., 2011). Достигнуты успехи в экспериментальной петрологии высоких и сверхвысоких давлений, позволившие обосновать фазовый состав нижней мантии и границы «ядро – нижняя мантия» (*Core Mantle Boundary, CMB*). При этом показано, что в периоды усиления плюмовой активности погружение океанических плит возможно вплоть до этой границы, что вызывает образование на ней слоя пониженной вязкости (слой D<sup>``</sup>).

Данные сейсмотомографии и петрологии показывают, что в слое D<sup>``</sup> на границе CMB фиксируются две крупные неоднородности, которые ответственны за формирование плюмов и суперплюмов. Это Восточно-Африканское и Тихоокеанское горячие поля, которые на основании эмпирических данных



впервые были выделены академиком М. И. Кузьминым и Л. П. Зоненшайном (Кузьмин, Ярмолюк, 2011).

Работы последних 10–15 лет показали широкое участие разномасштабных плюмов в различных тектонических процессах, объясняющих образование суперплюмов. Их проявления привели к выделению и изучению магматизма крупных изверженных провинций (*Large Igneous Province* – LIP), выяснению роли в их формировании мантийных струй (плюмов), мантийно-корового взаимодействия и металлогении.

Анализ геологических процессов, связанных с проявлением мантийных плюмов, позволяет выявить специфическое оруденение в ареалах их развития и объяснить условия зарождения и развития мантийных и мантийно-коровых рудообразующих систем, функционирование которых нередко приводит к формированию крупных и уникальных рудных месторождений. Такой анализ проведен на примере Евразийского континента, где в позднем палеозое и раннем мезозое развивались процессы, связанные с проявлением разновозрастных мантийных плюмов: Центрально-Европейского (320–300 млн лет), Таримского (290–270 млн лет), Сибирского (260–230 млн лет) и Эмейшанского (260–240 млн лет), что привело к образованию LIP со специфической металлогенией.

В настоящей статье рассматриваются лишь некоторые главные вопросы из всего комплекса проблем, связанных с формированием суперплюмов и, соответственно, LIP и освещенных в научной литературе (Добрецов, 2008):

- механизм зарождения плюмов, тепловая и термохимическая модели;
- сейсмограмма и изотопно-геохимические доказательства зарождения плюмов на границе «ядро – нижняя мантия»;
- взаимодействие плюма с астеносферой и литосферой;
- последовательность и длительность формирования магматических и рудных ассоциаций;
- металлогеническая специализация глубинных плюмов и связь с ними уникальных месторождений полезных ископаемых.

## Плюм с добавкой

В ранних экспериментах (Whitehead, Luther, 1975; Olson, Singer, 1985) плюмы моделировались инъекцией малоплотных и маловязких флюидов в более плотные жидкости и была предложена модель структуры плюма (*head-and-tail* – грибообразная голова и тонкая ножка (Campbell, Griffiths, 1990)), которая демонстрируется в Музее естественной истории Ч. Дарвина в Лондоне. Однако эта модель обнаружила много противоречий с реально наблюдаемыми фактами.

Более корректной является модель термохимического плюма, основанная и на физическом эксперименте, и на численном моделировании, подтвержденная геологическими данными (Добрецов и др., 2003, 2005, 2006).

Согласно этой модели, термохимические плюмы представляют собой своеобразную «газовую горелку». Снижение температуры плавления на границе СМВ достигается за счет химической добавки «летучего» компонента. Можно предполагать, что в понижающей температуре плавления добавке главными будут водородные и углеродные соединения, выделяющиеся из металлического ядра (гидриды щелочных металлов, карбиды и элементарный водород). При их окислении железосодержащими окислами нижней мантии образующиеся газообразные оксиды  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  формируют (вместе с водородом и продуктами реакции –  $\text{CH}_4$  и др.) восходящий поток, а восстановленное до металлического состояния железо стекает в жидкое ядро.

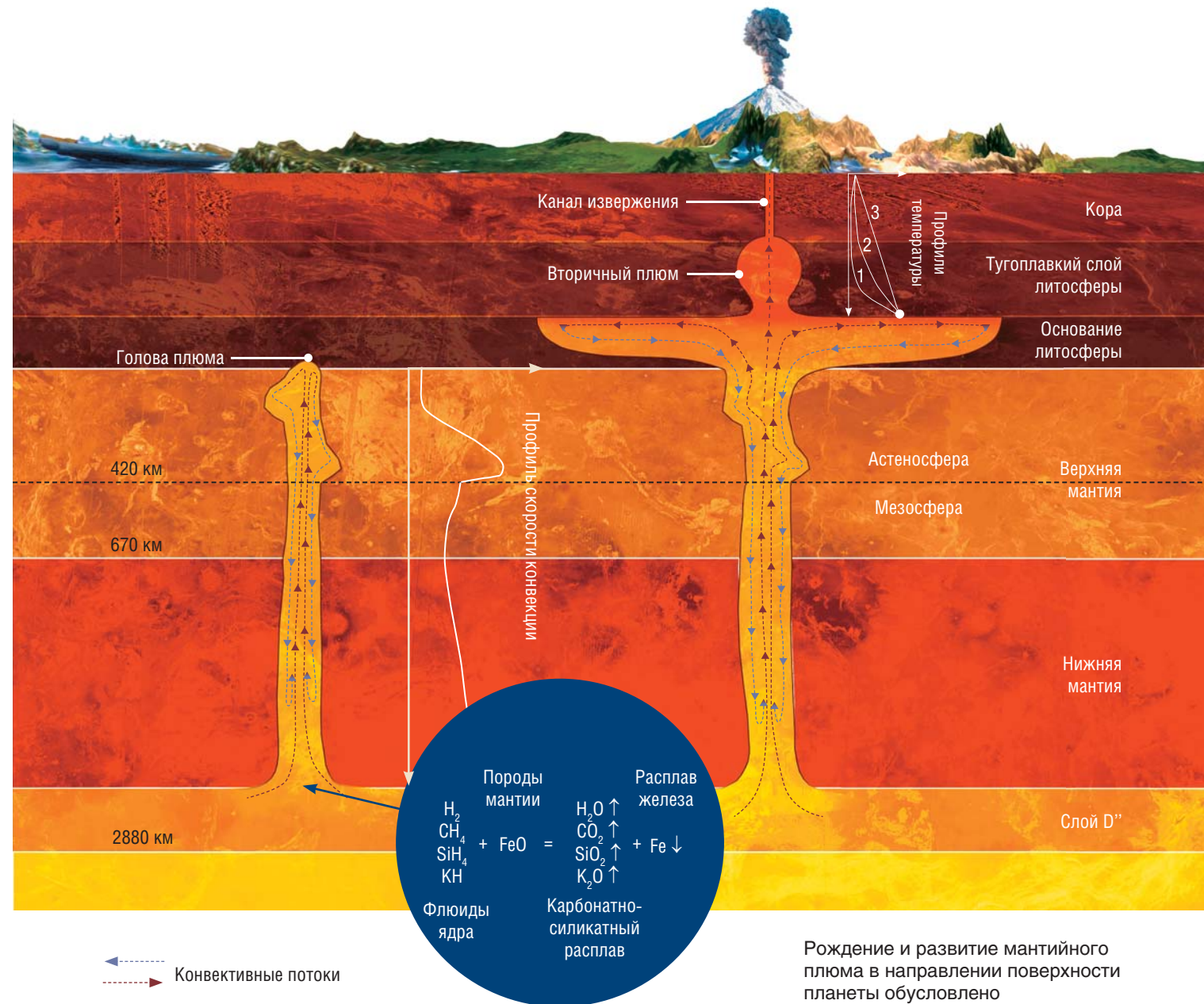
Расчеты показывают, что для начала процесса достаточно около 3%  $\text{CO}_2$  и (или)  $\text{H}_2\text{O}$ . Для глубинных плюмов можно предполагать преобладание  $\text{CO}_2$ . Это подтверждается широким участием карбонатитов и кимберлитов как на ранних, так и на заключительных этапах развития LIP. По-видимому, наиболее глубинными являются калиевые карбонатитовые расплавы, которые обладают минимальной вязкостью и высокой растворимостью оксидно-силикатных компонентов.

Для Гавайского плюма получены детальные сейсмографические изображения, показывающие, что он формируется в слое D'' и поднимается в мантии практически вертикально (Zhao, 2004). Структура Гавайского плюма согласуется с теоретическими расчетами.

К геохимическим признакам глубинности плюмов относится изотопия гелия. В породах океанических плюмов (например, Гавайского и Исландского) обнаруживается большая доля изотопа  $^3\text{He}$ , который является продуктом водородного термоядерного синтеза. Отношение  $^3\text{He}/^4\text{He}$  в этих породах в десятки раз выше, нежели в базальтах срединно-океанических хребтов, генерирующихся из верхней мантии в ходе тепловой конвекции (Толстихин, 2002). Очевидно, «избыточное» количество  $^3\text{He}$  поступает в плюмовый канал из слоя D'' или из внешнего ядра.

Другими геохимическими индикаторами того, что плюмы осуществляют перенос вещества из самых глубин Земли, являются высокие концентрации металлов платиновой группы и изотопия осмия. В гавайских лавах, пикритах и коматиитах о-ва Горгона и пикритах Сибирских траппов установлены высокие отношения  $^{186}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  и  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ , которые трактуются как смешение материала нижней мантии и внешнего ядра (от 1 до 45%).

С LIP связано формирование крупных месторождений элементов платиновой группы, главным образом платины Pt и палладия Pd (ЭПГ\*). Высокие



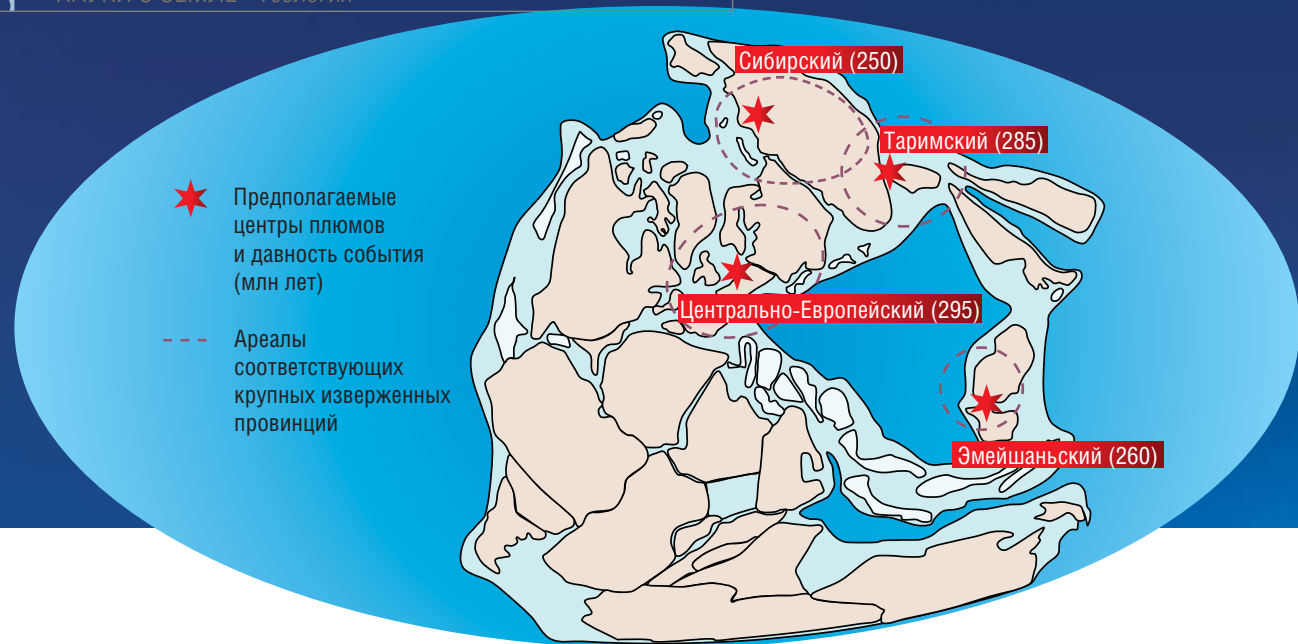
← Конвективные потоки

концентрации таких элементов выявлены в базальтах Норильского района и в Маймеч-Котуйской провинции, где известны и крупнейшие платиновые месторождения. В Северном Вьетнаме в связи с Эмейшанским плюмом описаны проявления коматиитового магматизма с возрастом 260 млн лет. Обычно коматииты со специфической закалочной структурой – *стипифекс* (по названию австралийской травы типа осоки) – характерны для древних эпох (архейской и проторозойской) и свидетельствуют о перегретости расплавов при высокой степени плавления мантии. Изотопно-геохимические исследования этих пород показали, что для них характерны высокие содержания иридия и осмия (до 10 мг/т) и нефракционированные отношения  $^{188}\text{Os}/^{187}\text{Os}$ , что подтверждает их нижнемантийную природу. Получить высокие содержания платины и палладия при высоких степенях плавления и недифференцированную изотопию осмия невозможно без привноса глубинного вещества.

\* ЭПГ – элементы платиновой группы: Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt

Рождение и развитие мантийного плюма в направлении поверхности планеты обусловлено не столько тепловой конвекцией, сколько термохимическими реакциями во флюидной смеси, продукты которых являются более легкоплавкими, чем породы мантии. Когда голова плюма достигает тугоплавкого слоя литосферы, плюм растекается по его подошве. Над плюмовым каналом при этом начинает формироваться вторичный плюм. Растущие термические напряжения приводят к образованию трещин в коре, через которые спустя 7–12 млн лет происходит массовое извержение магмы на поверхность. Рассчитанные профили температуры демонстрируют динамику прогрева коры во времени. По: (Добрецов и др., 2008)





Функционирование мантийных плюмов приводит к формированию крупных изверженных провинций и уникальных рудных месторождений. Евразийский континент в позднем палеозое и раннем мезозое подвергался воздействию разновозрастных плюмов: Сибирского (250 млн лет), Эмейшаньского (260 млн лет), Таримского (285 млн лет) и Центрально-Европейского (295 млн лет). Реконструкция взаимного расположения континентов в раннепермское время (280 млн лет назад). По: (Scotese, 2000)

Рудно-магматические системы, связанные с раннепермскими Сибирским (вверху) и Таримским (внизу) мантийными плюмами. Красным пунктиром показаны ареалы батолитового и щелочного магматизма, синхронного с Таримским плюмом. По: (Кузьмин, Ярмолюк, 2011)

### LIP – эти долгие 30 млн лет

Для объяснения большого объема базальтов на огромных площадях (траппов), что является характерной особенностью LIP, была разработана модель термохимического плюма с учетом расслоения прорыва плюма через холодную литосферу. Плюм при подходе к тугоплавкому основанию литосферы не может ее проплавить и начинает растекаться вдоль основания литосферы, при этом формируется «медленный» вторичный плюм, что вызывает трещинные центры излияния щелочных базальтов.

Такая ситуация может возникать на границе не только астеносферы и литосферы, но и в основании слоя С (между нижней и верхней мантией). Последний вариант предполагается С. Маруямой для Тихоокеанского горячего поля.

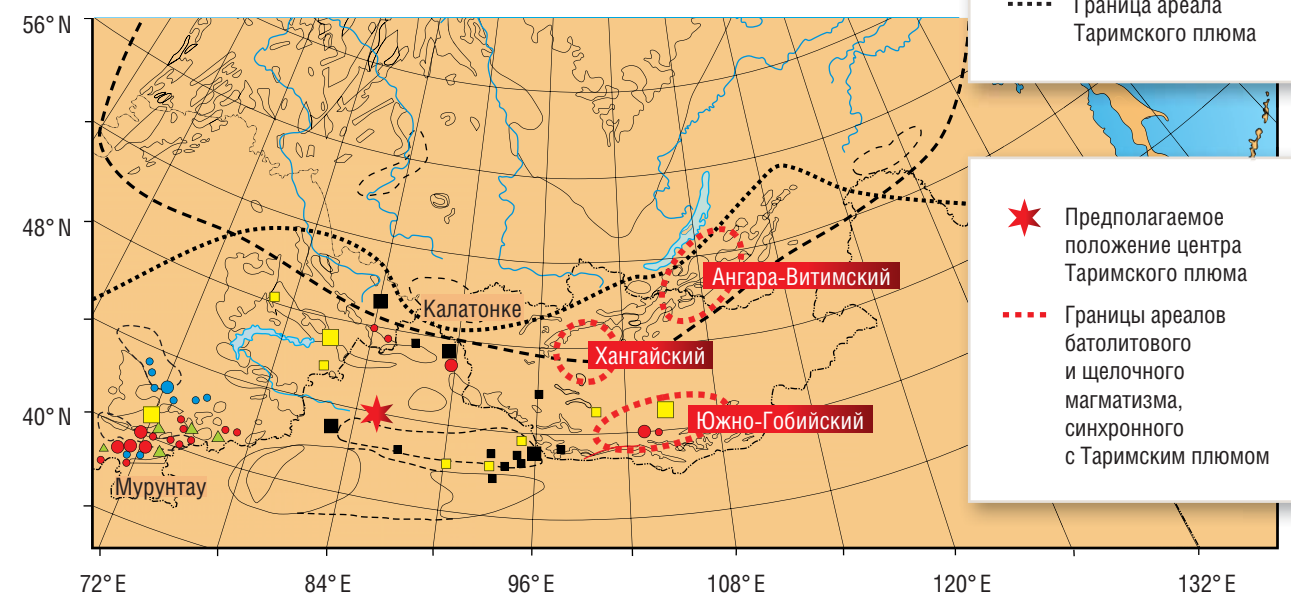
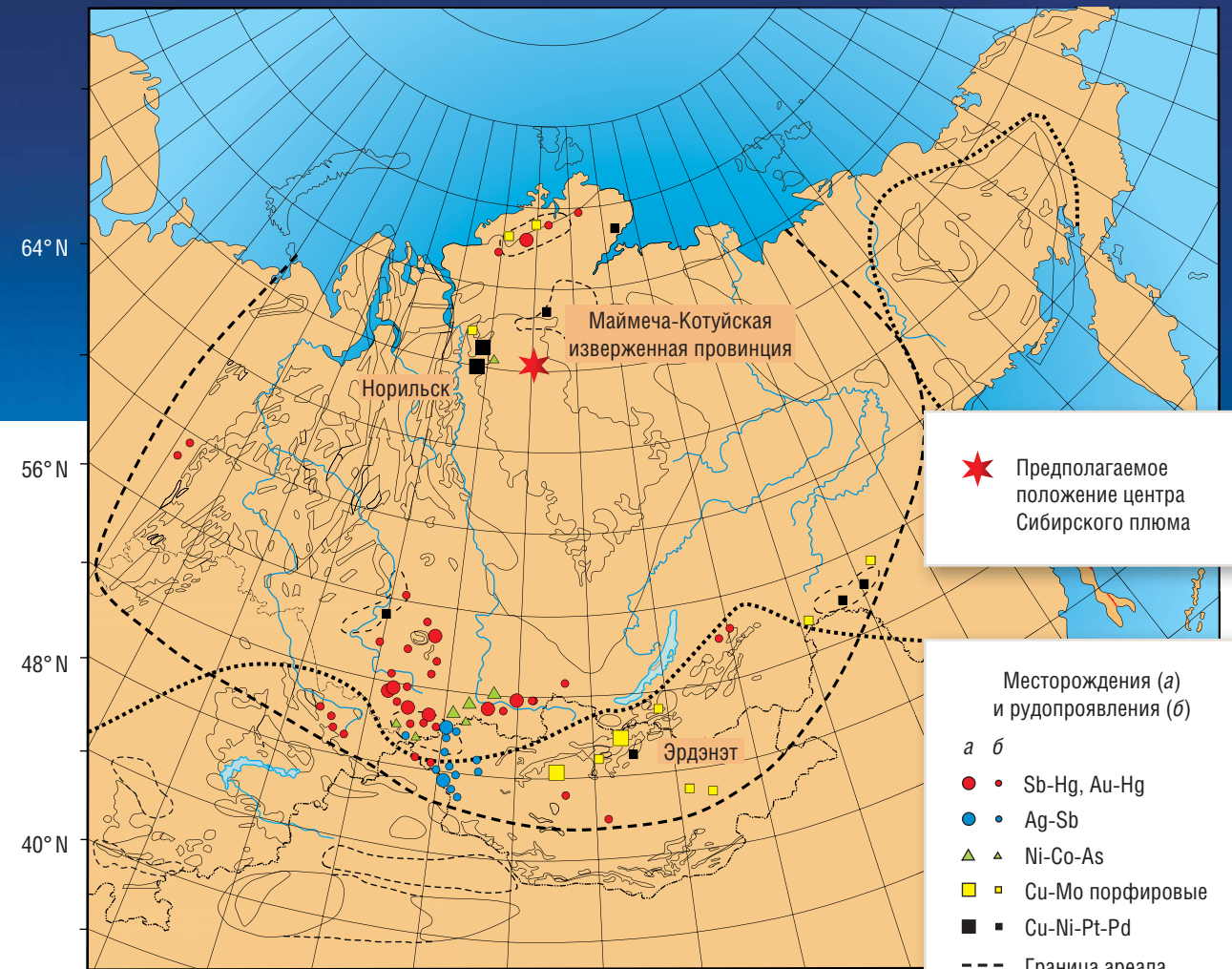
Благодаря тому, что магматические процессы начинаются в центре плюма, именно здесь достигается максимальная степень плавления с образованием высокомагнезиальных расплавов, тогда как по периферии плюма магматизм запаздывает на 10–15 млн лет, и эти области характеризуются щелочными базальтами и кислыми лавами.

Эти особенности хорошо проявляются на примере Сибирской LIP. В центральной области Сибирского

суперплюма установлены наиболее высокотемпературные пикритовые расплавы – маймечиты Маймеча-Котуйской области, температура которых в мантии достигала 1650 °С, а при излиянии на поверхность –1570 °С (Соболев и др., 2009). Это на 300 °С выше температуры конвектирующей верхней мантии.

На основе теоретических разработок модели эволюции термохимического плюма и полученных в настоящее время эмпирических данных предполагается 4-этапная последовательность образования магматических ассоциаций, с которыми сопряжены разнотипные рудные формации:

- воздымание земной коры при подходе плюма из глубины к границе литосферы и формирование рифтовых систем со щелочным и карбонатитовым магматизмом;
- главный (трапповый) этап LIP – растекание плюма вдоль границы литосферы, которое сопровождается излиянием траппов и формированием структур с бимодальным магматизмом по периферии;
- прогрев коры, который сопровождается активным мантийно-коровым взаимодействием, формированием габбро-гранитных серий и гранитоидных батолитов;



★ Предполагаемое положение центра Сибирского плюма

Месторождения (а) и рудопроявления (б)

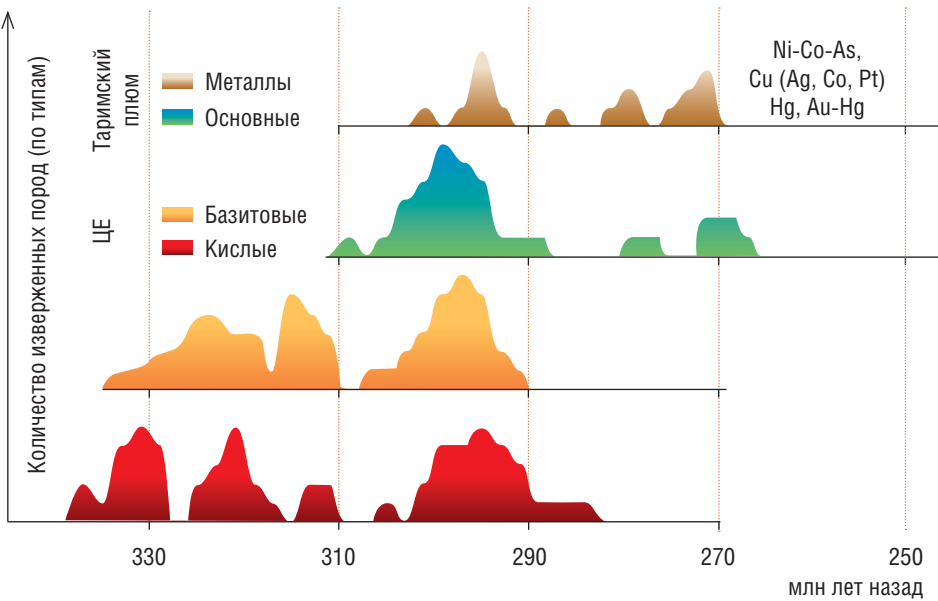
а б

- ● Sb-Hg, Au-Hg
- ● Ag-Sb
- ▲ ▲ Ni-Co-As
- ■ Cu-Mo порфировые
- ■ Cu-Ni-Pt-Pd
- Граница ареала Сибирского плюма
- Граница ареала Таримского плюма

★ Предполагаемое положение центра Таримского плюма

----- Границы ареалов батолитового и щелочного магматизма, синхронного с Таримским плюмом

Таримская и Центрально-Европейская (ЦЕ) изверженные провинции (как и другие крупные магматические провинции Евразии) формировались в несколько этапов на протяжении десятков миллионов лет. Распределение магматических пород и разнотипных металлических руд по возрасту демонстрирует синхронность их выхода на поверхность



• регрессивный этап остывания плюма, характеризующийся формированием гранитоидов, содержащих редкие металлы, и поясов из даек специфического (калиево-лампрофирового) состава.

На примере исследованных ЛIP установлено, что их продолжительность достигает 30 млн лет, а не 1 млн, как считалось ранее, при этом разные этапы разделены интервалами в 10 млн лет. Из модели также вытекает и зональность ареалов, с увеличением степени корово-мантийного взаимодействия к их периферии.

## Ядерные металлы

Главный объем рудных месторождений благородных, цветных и редких металлов формируется в двух обстановках: в зонах субдукции и крупных изверженных провинциях, связанных с мантийными плюмами. Исключением являются только черные курильщички в срединно-океанических хребтах, в которых формируются залежи свинца и цинка. Однако гигантские месторождения (Бушвельд, Норильск, Мурунтау) тесно связаны с крупными изверженными провинциями, при этом устанавливается закономерное их размещение как в пространстве, так и во времени.

Так, в контурах ЛIP, связанных с Сибирским и Таримским плюмами, проявлен широкий комплекс эндогенного оруденения. При этом возникновение рудно-магматических систем и месторождений металлов от кобальта и никеля до золота и ртути во времени коррелирует с проявлениями плюмового магматизма (Pirajno, 2004; Борисенко и др., 2006; Добрецов и др., 2010).

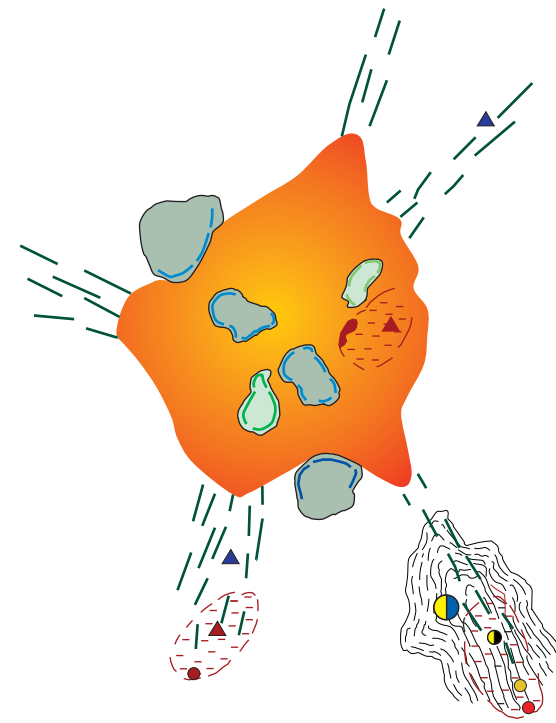
Дискретность мантийного и корового магматизма и связанного с ним оруденения согласуется с этапами, вытекающими из модели взаимодействия термохимического плюма с литосферой. Анализ возрастных и латеральных связей магматизма и оруденения

конкретных ЛIP позволил авторам построить идеализированную схему последовательности и размещения оруденения в ареалах крупных изверженных провинций.

Наиболее тесные пространственно-временные и генетические связи плюмового магматизма выявляются для медно-никелево-платинового оруденения. Достаточно назвать уникальные норильские Cu-Ni-ЭПГ-месторождения, которые выводят Россию на второе место в мире по запасам и уровню добычи этих металлов. Их формирование отвечает трапповому этапу ЛIP. Такой же характер локализации крупных и уникальных рудных месторождений устанавливается и в других аналогичных магматических провинциях мира: Маскокк в Канаде, Скаергард (Au-Pd) в Гренландии и т. д. В менее эродированных областях с трапповым магматизмом связаны низкотемпературные гидротермальные никель-кобальт-серебро-арсенидные месторождения и медистые песчаники.

Золото-арсенидные месторождения в периферийных областях ЛIP могут быть связаны с главным этапом формирования изверженной провинции. В такой геологической позиции локализованы крупные и гигантские раннепермские золоторудные месторождения Тянь-Шаня, Восточного Казахстана и Китайского Алтая, относящиеся к Таримской ЛIP. Однако чаще такие «периферийные» месторождения формируются на следующем этапе — при активном корово-мантийном взаимодействии.

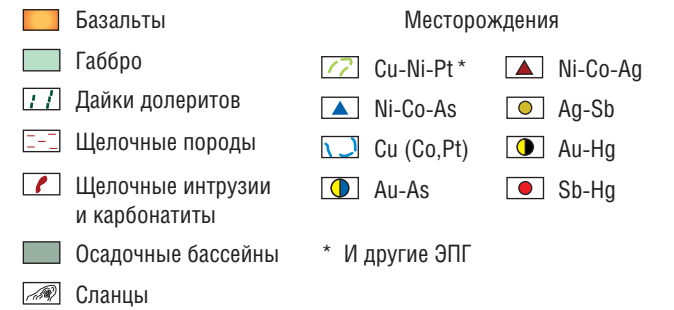
Заключительный этап эволюции ЛIP характеризуется развитием магматизма пестрого состава, включающего ареалы дайковых комплексов щелочных пород и базитов, интрузии габбро-гранитного состава и редкометалльных гранитов. С ними связаны соответствующие типы низкотемпературного гидротермального оруденения: Sb-Hg, Mo-W и др.



Сходная этапность развития магматических процессов и рудообразования обнаружена и в других разновозрастных крупных изверженных провинциях Земли. Полученные данные свидетельствуют о том, что проявление всего специфического комплекса магматогенного и гидротермального оруденения является характерной чертой металлогении ЛIP. Это означает, что специфические типы оруденения могут использоваться в качестве металлогенических индикаторов мантийных плюмов.

Таким образом, на основе анализа магматизма и металлогении Сибирской, Таримской, Эмейшаньской, Центрально-Европейской ЛIP установлено, что термохимическая модель глубинного мантийного плюма хорошо объясняет не только особенности мантийного магматизма, но и специфику металлогении. Выявленные особенности локализации разных типов оруденения в ареалах ЛIP, его возрастные и генетические связи с определенными типами магматизма, своеобразие геологических обстановок формирования оруденения являются основой для разработки комплекса критериев прогноза и оценки перспектив выявления новых промышленных объектов в ареалах ЛIP.

Термохимическая модель глубинного мантийного плюма хорошо объясняет не только особенности мантийного магматизма, но и специфику металлогении. Выявленные закономерности локализации типов оруденения в ареалах крупных изверженных провинций, его возрастных и генетических связей с определенными типами магматизма могут быть основой для разработки комплекса критериев прогноза



Идеализированная схема локализации рудных месторождений в ареалах крупных магматических провинций была построена по закономерностям, найденным при анализе возрастных и пространственных связей магматизма и оруденения, вкуче с результатами моделирования взаимодействия термохимического плюма с литосферой. Общая последовательность формирования крупных рудных месторождений для всех известных ареалов такова: 1. Cu-Ni-ЭПГ + Ni-Co-As + Au-As; 2. Ag-Sb; 3. Au-Hg + Sb-Hg

и оценки перспектив выявления новых промышленных объектов. Приведенные примеры переключаются со статьей М. И. Кузьмина и В. В. Ярмолюка, опубликованной в этом выпуске журнала, и еще раз иллюстрируют, как работает мантия Земли и ее пограничный слой с ядром.

## Литература

Борисенко А. С. и др. Пермотриасовое оруденение Азии и его связь с проявлением плюмового магматизма // Геол. и геофиз. 2006. Т. 47. № 1. С. 166–182.

Добрецов Н. Л. Основы тектоники и геодинамики: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2011.

Добрецов Н. Л., Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН; филиал «Гео», 2001. 409 с.

Соболев А. В. и др. Механизм образования сибирских меймечитов и природа их связи с траппами и кимберлитами // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 12. С. 1293–1335.

Хаин В. Е. Основные проблемы современной геологии. М., 2003.

Coffin M. F., Eldholm O. Large Igneous Provinces – Crustal Structure, Dimensions, and External Consequences // Rev. Geophys. 1994. V. 32. N. 1. P. 1–36.

Pirajno F. Ore deposits and mantle plumes. Kluwer, Academic Publishers, 2004.

Zhao D. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep earth dynamics // Phys. Earth Planet. Interiors. 2004. V. 146. P. 3–34.