

УДК:53.29:553.3/4+553.29:553.3

DOI: 10.31343/1029-7812-2026-20-2-29-34

**А.Э. Изох**

ИГМ им В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск

E-mail: izokh@igm.nsc.ru

## ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ ГЛУБИННЫЕ МАНТИЙНЫЕ ПЛЮМЫ – ИСТОЧНИК РУДНОГО БОГАТСТВА ПЛАНЕТЫ

### АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены проблемы глубинной геодинамики, которые разрабатывались Н.Л. Добрецовым. В его работах сочетаются как теоретические модели динамики глубинных мантийных плюмов, так и иллюстрирующие их конкретные примеры изучения крупных изверженных провинций (LIP) и горячих точек (Добрецов, Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А., 2001; Добрецов, Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г., 2003; Добрецов, Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г., 2006; Добрецов, Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г. и др., 2006; Добрецов, 2010). Предложенная им термохимическая модель глубинного мантийного плюма хорошо объясняет не только особенности мантийного магматизма, но и специфику металлогении связанных с ним LIP (Добрецов, Борисенко, Изох и др., 2010). Анализ эволюции и металлогении крупных магматических провинций Азии, связанных с Сибирским, Таримским, Эмешаньским и другими мантийными плюмами, позволил выявить характерные особенности размещения месторождений полезных ископаемых. Основному этапу отвечает масштабное развитие траппов, формирование крупных Cu–Ni–Pt–носных интрузий, ортомагматических месторождений Fe–Ti–V постмагматических месторождений Fe и месторождений Cu в осадочных толщах в центральных частях LIP, а на заключительных этапах формируются дайковые комплексы лампрофиров, карбонатитов и кимберлитов, перспективных на алмазы и редкие металлы.

*Ключевые слова:* глубинная геодинамика, плюм, крупные изверженные провинции, металлогения, академик Добрецов.

### ABSTRACT

This article examines the problems of mantle geodynamics developed by N.L. Dobretsov. His works combines theoretical models of deep mantle plume dynamics with case studies of large igneous provinces

(LIPs) and hotspots. His proposed thermochemical model of a deep mantle plume explains not only the characteristics of mantle magmatism but also the specific metallogeny of the associated LIPs. Analysis of the evolution and metallogeny of Asian large igneous provinces associated with the Siberian, Tarim, Emeishan, and other mantle plumes has revealed characteristic features of mineral deposits distribution. The main stage is characterized by the large-scale development of traps, the formation of large Cu–Ni–Pt-bearing intrusions, orthomagmatic Fe–Ti–V and postmagmatic Fe-ore deposits, and Cu deposits in sedimentary rocks in central parts of the LIPs. The final stages are characterized by the formation of dike complexes of lamprophyres, carbonatites, and kimberlites, which are promising for diamonds and rare metals.

*Key words:* deep geodynamics, plume, large igneous provinces, metallogeny, academician Dobretsov.



В 2026 году исполнилось 90 лет со дня рождения выдающегося петролога Николая Леонтьевича Добрецова, академика РАН, доктора геолого-минералогических наук, председателя Объединенного ученого совета наук о Земле РАН, советника РАН Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН в последние годы жизни. Н.Л. Добрецов – автор и соавтор 720 научных работ, был основателем и главным редактором журнала «НАУКА из первых рук».

В конце прошлого века в геологии совершилось несколько революций во взглядах на причины глобальных геологических процессов, ответственных за эволюцию оболочек Земли. Была создана теория литосферных плит, в рамках которой разработаны модели зон спрединга, где происходит рождение океанической коры, и зон субдукций, где она погружается в мантию, способствуя рождению новой континентальной коры. Основные положения этой теории вошли в учебники. Н.Л. Добрецов активно воспринял и развил ряд положений тектоники плит.

В начале своей многогранной научной карьеры он, по поручению академика В.С. Соболева, исследовал жадеиты и глаукофановые сланцы, поэтому он легко воспринял процессы, связанные с зонами субдукции. Затем он переключился на исследования офиолитов, как фрагментов океанической литосферы в складчатых поясах. Вместе с Н.А. Богдановым и А.Л. Книппером он посетил офиолиты Восточного Омана, где огромный

фрагмент океанической литосферы Индийского океана надвинут на окраину Аравийской платформы (Богданов, Добрецов, Книппер, 1991). С участием Н.Л. Добрецова вышла серия статей по исследованию офиолитов Западного и Восточного Саян, Полярного Урала, Казахстана, Ирана.

Помимо тектоники литосферных плит 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. В последнее время развивается новая парадигма геологии – глубинная геодинамика, оценивающая природу глобальных процессов с учетом взаимодействия разноглубинных, вплоть до ядра, оболочек Земли (рис. 1) (Добрецов, 2011).



Рис 1. Схема взаимодействия канала термохимического плюма с горизонтальным мантийным течением. Структура течения в канале плюма, подверженного влиянию горизонтального мантийного течения; справа показаны профили скорости горизонтальных течений в нижней мантии ( $v$ ) и астеносфере ( $v_s$ );  $T_{пк}$  – температура границы канала плюма;  $T_0$  – температура окружающей мантии;  $x$ ,  $dx$ , – переменные, характеризующие динамику подъема плюма. (Кирдяшкин А.Г., Добрецов, Кирдяшкин А.А., 2009). Внизу приведена реакция флюидов, выделяющихся из ядра, с FeO и в магнезиевюстите слоя "D" нижней мантии.

В 2005 году на конференции, посвященной 100-летию академика В.А. Кузнецова, Н.Л. Добрецов сделал доклад, в котором попытался связать глубинные мантийные плюмы и металлогению. В дальнейшем это реализовалось в проведение семи международных конференций «Магматизм и металлогения крупных изверженных провинций Азии». Проблемы генезиса крупных магматических провинций (LIP), к которым относятся ареалы развития континентальных платобазальтов, вулканических и интрузивных образований, распространенных и на кратонах, на пассивных континентальных окраинах и в океанических плато, в последнее время вызывают интерес не только среди специалистов магматической петрологии, но и геологов, занимающихся проблемами геодинамики, металлогении, осадочной геологии и палеоклимата. Это связано с тем, что с такими масштабными магматическими процессами связано не только формирование огромного объема изверженных пород, но и крупных или даже уникальных Cu–Ni–Pt, Cu–Mo–порфировых, Ni–Co–As, Au, Sb–Hg и других месторождений, во многом определяющих металлогеническую специфику LIP. На первом совещании, которое прошло в августе 2007 г. в Новосибирске на базе Института геологии и минералогии СО РАН, было обсуждение актуальных проблемы магматизма и металлогении Азии, связанных с закономерностями формирования, строения и возраста крупных магматических провинций. Удалось организовать дискуссию между заинтересованными специалистами России и зарубежных стран. Непосредственное участие в симпозиуме приняли 70 специалистов, включая иностранных ученых из Китая (Д. Мао), Австралии (Ф. Пирайно), Монголии (Энжин), Вьетнама (Ч.Ч. Хоа), Канады (Р. Эрнст), Казахстана, Бразилии, Германии. Следующие совещания проводились в Новосибирске (2009 г.), Иркутске (2011 г., 2015 г.), Ханое (2013 г.), Пекине (2017 г.) и в Томске (2019 г.). К сожалению, из-за ковида проведение конференций прервалось.

Анализ геологических процессов, связанных с формированием крупных магматических провинций и мантийных плюмов, позволяет выявить специфические особенности металлогении таких ареалов, условий зарождения и развития мантийных и мантийно–коровых рудообразующих систем, функционирование которых нередко приводит к формированию крупных и уникальных рудных месторождений.

Наиболее полно такой анализ проведен на примере евразийского континента, где в позднем палеозое и раннем мезозое развивались процессы, связанные с проявлением крупных, разновозрастных мантийных плюмов: Сибирского, Эмейшаньского ( $P_2-T$ ), Таримского ( $P_1$ ) и Центральное–Европейского ( $C_3-P_1$ ), что привело к образованию крупных изверженных провинций со специфической металлогенией. Решением проблем взаимодействия глубинного мантийного плюма с различными корово–мантийными оболочками и выяснение своеобразия металлогении LIP ведется по трем главным направлениям: 1) моделирование процессов зарождения и развития мантийных плюмов; 2) выяснение геохронологических и петролого–геохимических аспектов формирования и эволюции крупных магматических провинций, степени мантийно–корового взаимодействия; корреляция магматических и рудных комплексов; 3) металлогеническая специализация крупных магматических провинций и роль мантийных плюмов в формировании крупных и уникальных месторождений.

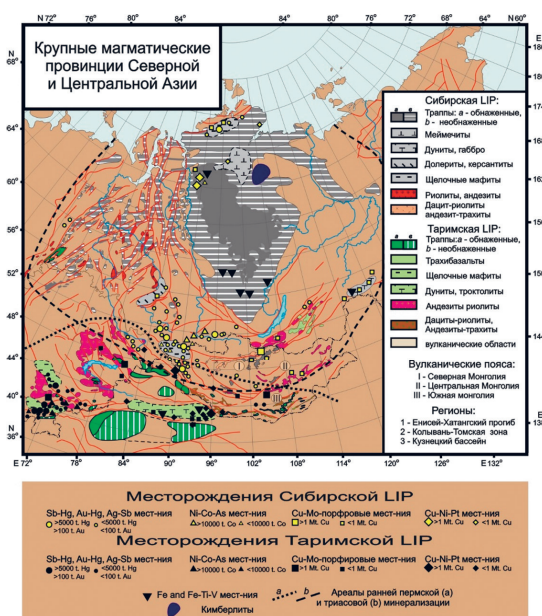


Рис. 2 Схема размещения ареалов пермотриасового магматизма и эндогенного оруденения в областях влияния Сибирского и Таримского мантийных плюмов. Вулканические пояса: I — Северная Монголия, II — Центральная Монголия, III — Южная Монголия.

При анализе эволюции этих провинций было установлено более длительное проявление плюмового магматизма, нежели считалось ранее. Было выделено несколько этапов в их эволюции.

**1. Воздымание земной коры** при подходе глубинного плюма к границе литосферы, формирование общего поднятия и ранний рифтовый этап со щелочно-базитовым, щелочно-пикритовым и карбонатитовым магматизмом. **2. Растекание плюма** вдоль границы литосферы, которое сопровождается ее трансформацией, излиянием траппов на платформах, пикритов и базальтов в складчатых областях и формирование в центральных частях LIP **Cu-Ni-ЭПГ**<sup>1</sup> месторождений. **3. Прогрев коры**, который сопровождается наиболее активным мантийно-коровым взаимодействием, формированием габбро-монцодиоритовых и габбро-гранитных серий, гранитоидных батолитов, синплутонических и минглинг-даек. Формирование Cu-Mo и Au-Ag месторождений «орогенного» типа. **4. Регрессивный этап** – остывание системы и миграция центра плюма, который фиксируется формированием поясов или ареалов даек калиевых лампрофиров, карбонатитов, кимберлитов и щелочных пикритов. На примере исследованных LIP 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. Интересно, что предложенная последовательность эволюции LIP подтверждается на примере Таримской LIP, для которой для раннего этапа выявлены проявления карбонатитов и кимберлитов с возрастом 300 млн лет, а также посттрапповые карбонатитовые комплексы 266 млн лет (Wen Lei Song et al., 2017).

Главный объем рудных месторождений благородных, цветных и редких металлов формируется в двух обстановках: в зонах субдукции и в крупных изверженных провинциях, связанных с мантийными плюмами. Исключением являются только черные курильщики в срединно-океанических хребтах, в которых формируются залежи свинца и цинка. Однако гигантские месторождения Бушвельда (ЭПГ, Cr, Fe-Ti-V), Норильска (Cu-Ni-ЭПГ), Мурунтау (Au) тесно связаны с крупными изверженными провинциями, при этом устанавливается закономерное их размещение как в пространстве, так и во времени. Так, в контурах LIP, 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, Сотников, Изох и др., 2006; Добрецов, Борисенко, Изох 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 LIP позволил 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 верхние позиции в мире по запасам и уровню добычи этих металлов. Их формирование отвечает трапповому этапу LIP. Такой же характер локализации крупных и уникальных рудных месторождений устанавливается и в других аналогичных магматических провинциях мира: Матачиван и Митассини в Канаде и Скандинавии, Скергард (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. Вероятно, Удоканское медное месторождение и Чинейское Cu-ЭПГ и Fe-Ti-V месторождение в Забайкалье связано с центром палеопротерозойской LIP (1880 млн лет). Золото-арсенидные месторождения в периферийных областях LIP 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 LIP. Однако чаще такие «периферийные» месторождения формируются на следующем этапе – при активном корово-мантийном взаимодействии. Заключительный этап эволюции LIP характеризуется развитием магматизма

<sup>1</sup>ЭПГ – элементы платиновой группы (прим. ред.)



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 (рис 3).

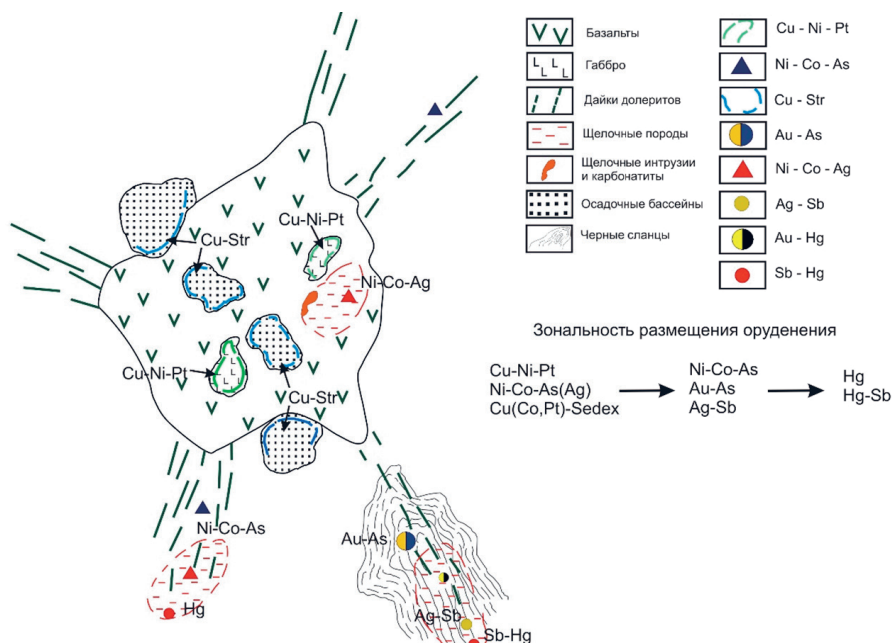


Рис 3. Идеализированная схема локализации рудных месторождений в ареалах крупных магматических провинций была построена по закономерностям, найденным при анализе возрастных и пространственных связей магматизма и оруденения, вкупе с результатами моделирования взаимодействия термохимического плюма с литосферой. 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.

Термохимическая модель глубинного мантийного плюма хорошо объясняет не только особенности мантийного магматизма, но и специфику металлогении. Анализ эволюции и металлогении крупных магматических провинций Азии, связанных с Сибирским, Таримским, Эмейшаньским и другими мантийными плюмами, позволил выявить следующие характерные ее особенности:

Общая длительность развития процессов магматизма и рудообразования в таких LIP составляет около 30 млн лет. Устанавливается многоэтапность проявления плюмового магматизма. Магматизм раннего рифтового этапа проявлен ограниченно и представлен карбонатитовыми и щелочно-ультраосновными комплексами. Основному этапу отвечает масштабное развитие траппов, формирование крупных Cu–Ni–Pt–носных интрузий, Fe–Ti–V, Fe– рудных и осадочных Cu месторождений.

Это связано с высокими содержаниями ЭПГ в плюмовых магмах в центральных частях LIP (Изох, Медведев, Федосеев и др., 2016). Синхронно или немного позже формируются габбро–гранитные ассоциации, с которыми связаны Cu–Mo–Au, Mo–W порфировые и Au месторождения. Заключительный этап характеризуется развитием щелочного магматизма, включающего ареалы дайковых комплексов лампрофиров, карбонатитов и кимберлитов. Общая последовательность формирования характерных для LIP типов рудных месторождений, особенно крупных, для всех известных ареалов устанавливается в следующем виде Cu–Ni–Pt + Ni–Co–As + Au–As → Ag–Sb → Au–Hg и Sb–Hg. Наиболее продуктивными в отношении Cu–Ni–Pt, Ni–Co–As и Au–As оруденения является второй основной этап развития LIP, для гидротермального Ag–Sb, Au–Hg, Sb–Hg и других типов – поздний, заключительный.

## ЛИТЕРАТУРА

- Богданов Н.А., Добрецов Н.Л., Книппер А.Л. Офиолиты и геологическое строение Восточного Омана // *Известия Академии Наук СССР. Сер. геол.* 1991. № 9. С. 1-22.
- Борисенко А.С., Сотников В.И., Изох А.Э., Поляков Г.В., Оболенский А.А. Пермотриасовое оруденение Азии и его связь с проявлением плюмового магматизма // *Геология и геофизика.* 2006. Т. 47. № 1. С. 166-182.
- Добрецов Н.Л. Геологические следствия термохимической модели плюмов // *Геология и геофизика.* 2008. Т. 49. № 7. С. 587-604.
- Добрецов Н.Л. Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели // *Геология и геофизика.* 2010. Т. 51. № 6. С. 761-784.
- Добрецов Н.Л. Основы тектоники и геодинамики: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2011. 488, [3] с.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН; филиал «Гео», 2001. 409 с.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г. Физико-химические условия на границе ядро-мантия и образование термохимических плюмов // *Доклады РАН.* 2003. Т. 393. № 6. С. 797-801.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г. Диаметр и время формирования головы плюма на подошве "тугоплавкого слоя в литосфере" // *Доклады РАН.* 2006. Т. 406. № 1. С. 99-103.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г., Гладков И.Н., Сурков Н.В. Параметры горячих точек и термохимических плюмов в процессе подъема и излияния // *Петрология.* 2006. Т. 14. № 5. С. 508-523.
- Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М. Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для обоснования закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений // *Геология и геофизика.* 2010. Т. 51. № 9. С. 1159-1187.
- Изох А.Э., Медведев А.Я., Федосеев Г.С., Поляков Г.В., Николаева И.В., Палесский С.В. Распределение элементов платиновой группы в пермотриасовых базальтах сибирской крупной изверженной провинции // *Геология и геофизика.* 2016. Т. 57. № 5. С. 1028-1042.
- Кирдяшкин А.Г., Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.А. Тепловое и гидродинамическое воздействие между расплавом в канале термохимического плюма и горизонтальным мантийным течением // *Доклады Академии Наук.* 2009. Т. 426. № 5. С. 674-678.
- Pirajno F. Ore deposits and mantle plumes. Kluwer: Academic Publishers, 2004. 556 p.
- Wen Lei Song, Cheng Xu, Anton R. Chakhmouradian, Jindrich Kynicky, Kang Jun Huang, Zhen Liang Zhang. Carbonatites of Tarim (NW China): First evidence of crustal contribution in carbonatites from a large igneous province // *Lithos.* 2017. № 282-283. P. 1-9.