

## Металлогения мантийных плюмов и ассоциирующих с ними тектономагматических структур

Внутриплитная тектоника и проявления магматизма связаны с глубинными плюмами и астеносферными подъемами. Относящиеся к ним магмы представлены расслоенными мафит-ультрамафитовыми интрузиями, континентальными и океаническими флуд-базальтами, роями даек основного состава и анорогенными гранитоидами А-типа, к которым приурочены интраплитные или анорогенные рудные системы. Они могут рассматриваться как магма-ассоциирующие Ni-Cu-PGE, Cr в мафит-ультрамафитовых породах, магмато-гидротермальные, приуроченные к анорогенным А-типа магмам (как грейzenовые Sn-W и Fe-оксидные-Cu-Au), и гидротермальные, образованные в термальных полях, связанных с внедрением плум-производных расплавов в континентальную кору. Эти гидротермальные рудные системы включают эпитеральные, вулканогенные колчеданные и эксгаляционные рудные типы месторождений.

*Ключевые слова:* мантийные плюмы, апвеллинг, магматизм, металлогения, рудообразование.

S. I. TURCHENKO (IPGG RAS)

## Metallogeny of mantle plumes and related tectono-magmatic structures

Intraplate tectonics and manifestations of magmatism are associated with deep plumes and asthenospheric uplifts (upwelling). The related magmas are represented by layered mafic-ultramafic intrusions, continental and oceanic flood basalts, basic dike swarms, and A-type anorogenic granitoids, to which intraplate or anorogenic ore systems are confined. They can be considered as magma-associated Ni-Cu-PGE, Cr in mafic-ultramafic rocks; magmatic-hydrothermal ore systems confined to anorogenic A-type magmas (greisen Sn-W and Fe-oxide-Cu-Au); hydrothermal ore systems formed in thermal fields associated with the introduction of plume-derived melts into the continental crust. These hydrothermal ore systems include epithermal, igneous-sulfide, and exhalation ore deposit types.

*Keywords:* mantle plumes, upwelling, magmatism, metallogeny, ore formation.

*Для цитирования:* Турченко С. И. Металлогения мантийных плюмов и ассоциирующих с ними тектономагматических структур // Региональная геология и металлогения. – 2021. – № 87. – С. 102–109. DOI: 10.52349/0869-7892\_2021\_87\_102-109

**Введение.** Интраплитные тектономагматические явления и ассоциирующие с ними рудные системы, включающие внедрение расслоенных интрузий, гигантских роев даек, фельзит-базальтовый магматизм, формирование океанических плато и процессы рифтогенеза, связаны с мантийной динамикой. Мантийная динамика обладает свойством принадлежности к апвеллингу мантийного материала или плюм-событиям, которые отмечены как на глубинах 670 км (малоглубинные плюмы), так и границе ядро – мантия (глубинные плюмы). Существенная поддержка проявления глубинных плюмов происходит при изучении сейсмотомографии, которая ясно показала возрастание скорости Р-волн на глубинах около 2500 км [27; 29; 39]. Подобно плейт-тектонике, теория мантийных плюмов стала главной концепцией при изучении моделей внутриплитной тектоники, магматизма и процессов рудообразования. Однако существуют альтернативные взгляды, которые объясняют апвеллинг астеносферного расплава или малоглубинный плюм

явлениями общего растяжения литосферы или ее разрыва [17].

Тектоника и магматические обстановки формирования рудных месторождений, связанных с глубинными и малоглубинными мантийными плюмами, как и с апвеллингом тепловых аномалий, вызывающих гидротермальное рудообразование, показаны схематически на рис. 1.

Регионы интраплитного магматизма являются по своей природе анорогенными и характеризуются по геохимическим и изотопным признакам как произошедшие из мантийных источников. Степень частичного плавления, количество летучих компонентов и природа мантийного материала (обогащение, обеднение, загруженность субдуцированными фрагментами) контролируются плюмовым магматизмом. По этим причинам плюм-производные породы изотопически, гетерогенно и в целом геохимически характеризуются близостью к положому распределению хондрит-нормализованных REE компонентов. Базальты океанических островов

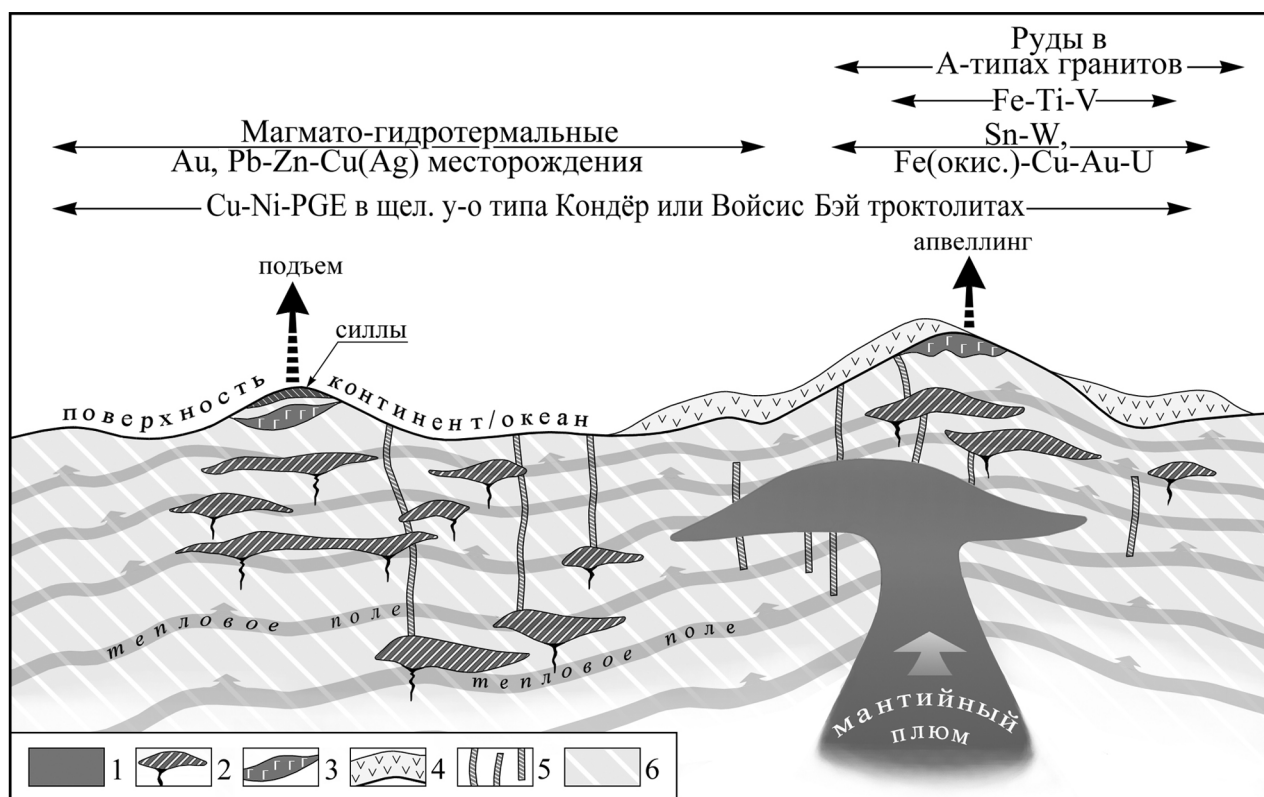


Рис. 1. Внемасштабная схема, иллюстрирующая тектономагматические соотношения с рудоносными системами в обстановках с мантийно-плюмовыми событиями

1 – мантийный расплав; 2 – мафит-ультрамафитовые и А-типа интрузии; 3 – габбро-анортозитовые интрузии; 4 – бимодальные вулканиты; 5 – мафические дайки; 6 – субконтинентальные и океанические породные ассоциации

и континентальные флуд-базальты обладают определенной монотонностью в распределении главных и следовых элементов, но с различием некоторых отношений следовых элементов (например Nb/Y, Nb/Zr) по сравнению с базальтами срединно-океанических хребтов и островных дуг, что частично совпадает с погружением материалов породных клиньев в поднимающиеся плюмы [15]. Внутриплитные базальты обогащены несовместимыми элементами (Rb, Ba, Th, K, Ta, Nb) и обладают положительными Nb-Ta аномалиями для островодужных базальтов, в то время как континентальные флуд-базальты имеют отрицательные Nb-Ta аномалии [14; 33]. Хорошими мантийными трассерами являются отношения  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  [21; 35], изотопные отношения благородных газов  $^3\text{He}/^4\text{He}$  и  $^{\text{н}}\text{Ne}$  [10; 36].

**Плюмы и сопутствующие проявления тектоники, магматизма и оруденения.** В настоящей статье представлен обзор взаимоотношений между мантийной динамикой, тектоно-магматическими процессами и их ассоциацией с рудными системами. В обзоре сконцентрировано внимание на связях между внедрением мафит-ультрамафитовых интрузий, несущих сульфидное Cu-Ni и PGE (платинометалльное) оруденение, и созданием рифтовых систем при взаимодействии мантийных плюмов и континентальной литосферы.

Термальные аномалии, сосуществующие с мантийными плюмами, создают тепловой источник в коре. Они могли способствовать возникновению корового масштаба гидротермальной циркуляции и проявлению высокотемпературного метаморфизма в условиях относительно низкого давления, которые в конечном итоге приводили к производству широкого ранга рудных систем. Поэтому мы можем рассматривать рудные системы, являющиеся производными мантийных плюмов, как конечные члены двух типов рудных систем: ассоциирующие с магмами, которые включают в свой состав ортомагматические и интрузивные магмато-гидротермальные рудоносные системы; и гигантские гидротермальные рудоносные системы, приуроченные к термальным ореолам охлаждающихся в коре анорогенных магматических систем. Ортомагматические сульфидные рудные месторождения отнесены к мафит-ультрамафитовым расслоенным интрузиям, дайкам, силловым комплексам континентальных флуд-базальтов и архей-палеопротерозойским коматиитовым полям. Анорогенные интрузии (А-типа гранитоиды, кимберлиты, лампроиты и карбонатиты) вмещают или с ними ассоциируют рудные месторождения обоих типов: магмато-гидротермальные и гидротермальные. Широкого ранга гидротермальные рудоносные системы могут быть связаны с процессами рифтогенеза, а внутриплитный магматизм являлся результатом

глубинных мантийных плюмов или апвеллинга астеносферной мантии.

Теория мантийных плюмов была обсуждена в работах [12; 13], а здесь можно лишь добавить некоторые примеры проявления тектоники и магматизма, сопутствующие этому явлению, для того чтобы привязать к ним процессы рудообразования. В крупном масштабе по отношению к докембрийским мантийным плюмам рудоносные системы могут быть подразделены на две группы: 1 – ассоциирующие с плюм-производными мантийными магмами и 2 – гидротермальные рудные системы, связанные с термальной энергией, реализуемой при внедрении анорогенных магм в континентальную кору. Эти две специфические рудные системы являются возрастзависимыми – первая находится преимущественно в архейско-палеопротерозойских породах, а вторая в мезо- и неопротерозойских породных комплексах. Причем характерно, что для первой группы комплексов типичны Cr, сульфидные Cu-Ni и Cu-Ni-PGE рудные системы, а для вторых – крупные железорудные, Fe-окисно-Cu-Au и сульфидные Pb-Zn месторождения.

Вероятно, наиболее тесные связи с мантийными плюмами проявлены у мафит-ультрамафитовых расслоенных интрузий и роев мафических даек в пределах полей крупных магматических провинций, вмещающих месторождения сульфидного никеля, хрома и платиноидов. Анорогенный магматизм, как правило, ассоциирует с тектоникой растяжения континентальной коры – интракратонными палеорифтовыми системами, где проявляются магмато-гидротермальные месторождения Cu, Ni, PGE, а большинство жильных гидротермальных месторождений Au, Mo, Pb-Zn, Sn-W ассоциирует с апвеллингом тепловых ореолов малоглубинного плюма под утоняющейся литосферой.

*Мафит-ультрамафитовые системы.* Ортомагматические месторождения, т. е. без признаков гидротермально-метасоматического воздействия, в таких системах встречаются не часто (да и то, если авторы, их рассматривающие, не обращают внимания на это обстоятельство). Они представлены сульфидными Cu-Ni с PGE, малосульфидными PGE, хромититовыми и Fe-Ti-V оксидными месторождениями (комплекс Бушвельд, Великая Дайка в кратоне Каапвааль, Южная Африка). Наиболее распространены магмато-гидротермальные (с явными признаками метасоматоза) рудоносные системы: сульфидные Cu-Ni с PGE месторождения в палеопротерозойских рифтогенных структурах, такие как Садбери, Ист-Булл-Лейк в Канаде; Дулут, Стиллуотер в США; Камбалда, Фортеस्कью в кратоне Йилгарн, Западная Австралия; Мончегорское, Фёдорово-Панские тундры, рифт Имандра-Варзуга и Печенгские месторождения – Никель-Заполярное в пределах палеорифта Печенга в Карело-Кольском кратоне Фенноскандинавского щита [7]. Расслоенные интрузии, образованные при воздействии мантийных плюмов глубинного уровня, обладают

высокими концентрациями совместимых элементов, как Ni, PGE, Cr. Во втором случае – обогащение мантийных расплавов совместимыми элементами расслоенных интрузий происходит в рифтогенных областях земной коры [7], где насыщение флюидными газообразными компонентами (H<sub>2</sub>S, F, Cl) способствует экстракции Cu, Ni, PGE из силикатных мантийных пород и формированию рудных месторождений. Сегрегация Cu-Ni сульфидов и PGE происходит благодаря несмесимости между силикатной магмой и сульфидной жидкостью из-за привнесения серы из коровых пород в не насыщенный ею первичный мантийный расплав. Привнесенная сульфидная жидкость активно поглощала металлы Cu, Ni, PGE. Оксиды Fe-Ti-V появлялись в мафических интрузиях на более высоких стратиграфических уровнях. Рудные системы Cr, Cu-Ni, PGE ассоциируют с магмами, обладающими высокими отношениями Mg/Fe, обедненными Са и щелочами, в то время как Fe-Ti-V оксидные системы – с магмами, богатыми Fe и щелочами +Са.

*Вулканогенные (коматиит-толеитовые) архей-палеопротерозойские колчеданные рудоносные системы.* Коматииты представляют собой ультрамафические вулканогенные породы с содержанием MgO > 18 вес. %, TiO<sub>2</sub> < 1 %, K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O < 1 % в безводном остатке [23] и принадлежат исключительно к архей-палеопротерозойским вулканическим областям, поскольку мантийный температурный потенциал того времени соответствовал порядку 1600 °С по сравнению с современным временем около 1300 °С [8]. Коматиитовые лавы являются важными вместилищами Cu-Fe-Ni оруждения в зеленокаменных поясах Австралии, Канады [37], ЮАР, Бразилии и Карело-Кольском кратоне в России. Коматиит-базальтовые вместилища сульфидных Ni-Cu+PGE месторождений можно подразделить на два типа [24]. Тип 1 представлен каналами в лавах коматиит-толеитовых потоков, заполненных сульфидной минерализацией, тип 2 – сульфидная рассеянная вкрапленность в массивных дунитовых кумулятах.

Предполагалось, что архей-палеопротерозойские коматиит-толеитовые последовательности являются продуктами мантийных плюмов [27] и они могут быть фрагментами океанических плато плюм-происхождения. В провинции Сьюпириор в Канаде коллаж зеленокаменных поясов Абитиби-Вава представляет собой смесь океанических плато и островных дуг, в которых перемежались плюм-тектонические события с субдукционно-аккреционными [38], что отражает проявление рифтового и обширного анорогенного магматизма. Для неорархейско-палеопротерозойских (2,6–2,4 млрд лет) зеленокаменных поясов провинции Голдфилдс кратона Йилгран (Западная Австралия), которые содержат значительное количество сульфид-никеленосных коматиитов, Р. Хилл с соавторами [19] предположили, что они образовались в результате действия выплавов в конечной части мантийного плюма. Формирование коматиитовых пород



в архейских зеленокаменных поясах и сульфидно-никелевого оруденения Карело-Кольского кратона Фенноскандинавского щита за счет действия мантийных плюмов рассматривал также А. Б. Вревский [1; 2].

Вулканогенные сульфидные месторождения или колчеданные в целом образуются гидротермально-эксгальтивным способом вблизи или непосредственно на морском дне действием газовой-водных горячих источников, которые ассоциируют с подводно-морским вулканизмом. Главные тектонические обстановки формирования вулканогенных сульфидных месторождений — заостроводужные и островодужные системы, относящиеся к субдукционным обстановкам, древнейшие из которых установлены в палеоархейских базальт-коматиитовых отложениях кратона Пилбара, Западная Австралия [22]. Восточная часть террейна Пилбара содержит не только коматииты, но также и фельзитовые вулканы возраста 3,51–2,9 млрд лет, образованные в результате действия мантийного плюма, который привел к формированию сгуженных океанических плато, вмещающих железорудные сульфиды с наиболее ранней медной минерализацией.

*Рудные месторождения, ассоциирующие с анорогенным магматизмом.* Этот магматизм в докембрийской коре проявляется в виде трех типов комплексов: 1 — внутриконтинентальные А-типа магматические комплексы, 2 — массивы анортозит-габбро-троктолитовых интрузий, 3 — кимберлиты, лампроиты, карбонатиты и щелочные интрузии. Анорогенные А-типа магматические комплексы вмещают или с ними ассоциирует широкий ряд месторождений, которые охватывают магматические и магмато-гидротермальные виды и обогащены такими элементами, как Ti, P, Y, Nb, K, Th, U, F, Ba, REE. Они также производят суперглиноземистые и перенасыщенные щелочами гранитоиды, которые обычно содержат грейзеновое и гидротермальное жильное оруденение Sn, W, Zn, Cu, U, Ta, Nb.

Рудные месторождения, связанные с А-типом магматизма, включают важные в экономическом отношении Fe-оксидные-Cu-Au-U-REE месторождения (тип Олимпик-Дэм). Этот тип месторождений формируется в неглубоко-корových (4–6 км) обстановках и приурочен к ярко выраженному, богатому летучими компонентами щелочному гранитоидному магматизму [20]. Их распространение связано с планетарного масштаба рифтинговыми событиями, ведущими к распаду суперконтинента, например Родиния [18] в Южном полушарии Земли, произошедшему в неопротерозое (1 млрд лет назад). Этот тип представлен крупным телом Олимпик-Дэм в кратоне Гоулер и небольшим месторождением Эрнст Хенри в структуре Маунт-Айза (Австралия), также Карайс в Бразилии и Палабора в ЮАР. Общими чертами таких месторождений является их обогащение Cu, Au, P, F, REE, U и широкое распространение щелочного метасоматоза как во

вмещающих рудные тела породах, так и в регионах, их содержащих.

Некоторые мезопротерозойские (1,65–1,54 млрд лет) анорогенные гранитоиды в Свекофеннской провинции Фенноскандинавского щита содержат грейзеновую минерализацию с Sn (Еврайоки, Финляндия) или Sn-полиметаллическим оруденением (Стора-Флаттен, Швеция) и олово-редкометалльную минерализацию в Выборгском массиве рапакиви. Относительно крупное Sn-полиметаллическое и редкометалльное оруденение в Питкярантском рудном районе Приладожья ассоциирует с Салминским массивом рапакиви, обладающим возрастом 1,54–1,56 млрд лет. Кроме того, анорогенные вулканоплутонические ассоциации вмещают Mo-W и U минерализацию в металлогенической зоне Арьеплог в Швеции.

Массивы анортозит-габбро-троктолитов также локализируются в рифтовых обстановках или вдоль структурных границ террейнов, вмещающая магматические рудные месторождения. Тип массивов анортозитовых магм распространен в период 1,5–1,3 млрд лет, образуя пояс протяженностью около 5000 и шириной 1000 км вдоль Лаврентийского суперматерика от современной Калифорнии через южную часть Канады и Скандинавию. Анортозитовые массивы (крупные Адирондак, Морин, Сен-Жан, Аллард, горы Мэлай, Найн в США и Канаде, Рогланд в Норвегии) в этом поясе содержат Fe-Ti-V месторождения, изредка Ni-Cu-Co (Войсис Бэй в Канаде). Массивы анортозитов приурочены к разрывам суперконтинентов, происходящим при растяжении коры над головной частью плюмов и производящих ниже-коровое плавление пород. Fe-Ti-V (ильменит-магнетитовые) руды образуются при резком возрастании окислительного потенциала в плавящихся породах и заполняют интерстиции между плагиоклазом и пироксенами в затвердевающих породах. При продавливаниях этих рудных расплавов в контракционные трещины затвердевающих массивов образуются фузивные типы пластово-жильных руд в большинстве подобных месторождений. Таким, например, является Fe-Ti-V месторождение в Гайлес интрузии (1076 млн лет) в структуре Масгрейв Центральной Австралии [32], которая принадлежит к мантийным плюмо-производным [28]. Эта интрузия относится к провинции, где сосредоточены рои мафических даек и силлов, бимодальных вулканитов, А-типов гранитоидных интрузий (1090–1060 млн лет) и мафит-ультрамафитовых интрузий.

Необычный и в некоторой степени загадочный меднорудный район Окиеп в Намакваленде Южной Африки, возможно, также связан с анортозитовыми магматическими системами (1600 млн лет), в которых присутствуют трубообразные и пластовые рудные тела, сложенные немагматическим борнитом [25]. Их образование связано, по мнению автора, с преобразованием первичных магматических руд при процессах высокотемпературного метаморфизма пород

этого региона. Также мезопротерозойские (около 1,3 млрд лет) анортозит-лейконорит-троктолитовые интрузии в провинции Лабрадор (Канада) магматической свиты Нейн (1,33–1,29 млрд лет) содержат Ni-Cu-Co месторождение Войсис Бей. Исследования, основанные на изотопных данных по S, C, O и отношениям Se/S, показали, что внедрение таких рудоносных интрузий связано с подъемом плюм-мантийного теплового фронта и базитовых интрузий в регионе [34]. Подобного типа интрузии в Центральной Австралии также содержат сульфидное Cu-Ni месторождение Бабел-Небо, открытое в последнее десятилетие. Для палеопротерозойского времени (2,5–2,3 млрд лет) может служить примером Fe-Ti-V месторождение в анортозитах Анабарского щита [5].

Анорогенный магматизм также характерен для внедрения кимберлитов, лампроитов, карбонатитов и щелочно-ультраосновных интрузий. Эти локальные проявления пород известны как обладатели изотопными (He, Os, Sr, Nd, Pb, O) признаками плюмового магматизма [11], в которых кимберлиты – носители месторождений алмазов (большая часть фанерозойских трубообразных тел, но залегающих в пределах докембрийских кристаллических щитов в Южной Африке, Восточно-Сибирской платформы и Фенноскандинавского щита – Куопио), хотя и лампроиты возраста около 1,3 млрд лет в Австралии вмещают крупное месторождение алмазов (Аргайл). Широко известна область палеопротерозойского карбонатитового магматизма Палабора в Южной Африке с редкометалльно-редкоземельным оруденением [30], а также весьма редкое сочетание ультрамафитовых перидотитов и щелочно-ультраосновных пород в кольцевой интрузии Кондёр в Аяно-Майском районе Хабаровского края России, несущей уникальное месторождение платины и минералов элементов платиновой группы [4]. Эти интрузивные тела могут представлять собой удаленные плюмовые материалы от ранее существовавших разрывов литосферы, поставлявших вещество обогащенной метасоматизированной мантии в верхне-коровые слои.

**Гидротермальные рудоносные системы.** Вдобавок к генерации широкого спектра мантийно-плюмовых рудоносных магм, глубинные мантийные плюмы или же апвеллинг астеносферного мантийного материала производят создание обширных тепловых полей в земной коре. Это явление ответственно за циркуляцию в коровом масштабе гидротермальных растворов и создание в регионе высокотемпературного метаморфизма с относительно низким давлением флюидов. Результатом этих мантийных процессов могло быть образование широкого круга гидротермальных и метаморфо-гидротермальных рудных месторождений. Примеры такого рода образований – многочисленные поля гидротермальных жильных месторождений Cu, Zn, Ag, W среди базальтоидных силлов (возраста 1075–1060 млн лет) бассейна Каприкорн в Западной

Австралии [31; 32]. Подобно этому же в Южной Африке вокруг охлаждающегося плутона Бушвельд были сформированы поля жильных месторождений Sn, Cu, Au, W в породах бассейна Трансвааль [30].

Такие особенности формирования жильных гидротермальных месторождений были характерны для месторождений неоархея – палеопротерозоя (2,7–2,2 млрд лет) в районах палеорифтовых систем Фортескью в Западной Австралии, Вентерсдорп в Южной Африке, Имандра-Варзуга на Кольском полуострове, Россия [7]. Эти рифтовые системы действуют как проводники магм и гидротермальных флюидов, а также рудных ассоциаций, имеющих отношение к таким системам, которые отражают взаимодействие анорогенных магм и вулканогенно-осадочных последовательностей. Эти вулканогенно-осадочные рифтовые структуры вмещают метаморфогенно-гидротермальные Cu-Ni сульфидные месторождения, как в Печенгской структуре [6; 7], или же Sn-W апоскарновые месторождения Забайкалья [3], имеющие также общегенетическое отношение к стабильным кратонам, благодаря мантийно-плюмовому воздействию [26]. Вулканогенно-осадочные ассоциации палеорифтовых бассейнов вмещают рудосодержащие компоненты будущих месторождений, например гидротермально-эксталяционных Pb-Zn-Ag-Cu – Гамсберг в Южной Африке, Мак-Артур-Ривер, Брокен-Хилл, Маунт-Айза в Австралии, Салливан в Канаде, или осадочно-метаморфогенных медных – Удокан в Восточной Сибири. Хотя упомянутые выше гидротермально-эксталяционные месторождения могли быть образованы и в рифтовых обстановках заострово-дужных бассейнов, стоит обратить внимание, что они были сформированы в палео-мезопротерозое (1,9–1,0 млрд лет назад), а это совпадает с плюмовыми событиями также в возрастной период 1,9–1,0 млрд лет (рис. 2). Д. Аббот и А. Айсли [9] выявили около 30 крупных плюмовых событий в архей-протерозойскую эпоху, в которую достаточно частые плюм-события (вероятно, малоглубинные – апвеллинговые) происходили именно в период образования гидротермально-эксталяционных месторождений 1,9–1,1 млрд лет назад. Плюмы, ассоциирующие с мантийным апвеллингом, способствовали фрагментации суперконтинентов. Таким образом были способны послужить основой для формирования относительно небольших кратонических блоков. Мантийные апвеллинги могли обладать диаметром до 2500 км, и при таких щитовых мантийно-плюмовых событиях объемы и площади континентальной коры, подвергавшейся термальной и соответственно гидротермальной активизации, достигали значительных размеров.

**Заключение.** Теория мантийных плюмов основана на комбинации анорогенного магматизма, рифтогенной тектоники, геофизических данных (сейсмотомографии) и положения, что плюмы были горячее, чем мантийный материал, который

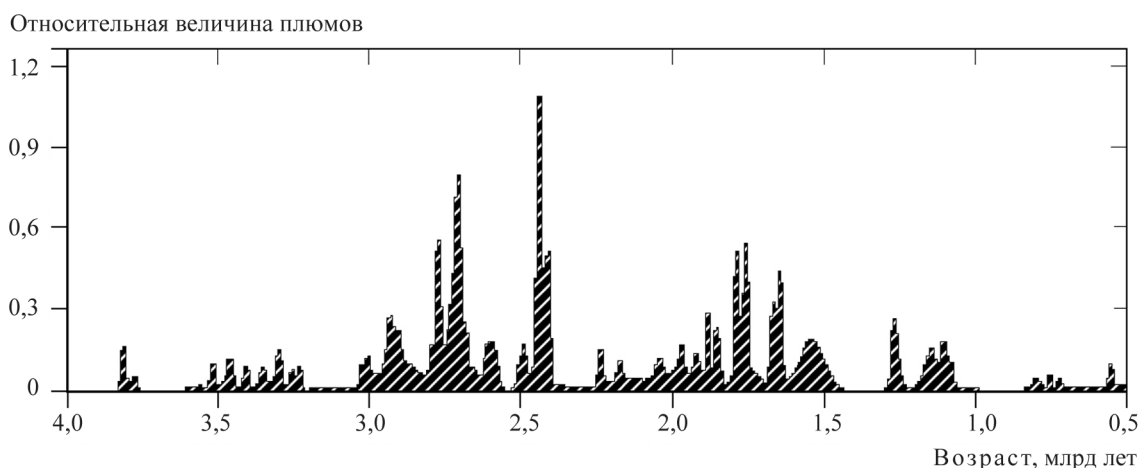


Рис. 2. Распределение мантийно-плюмовых событий в архей-протерозойскую эпоху геологического развития Земли по [9]

происходил из глубин более чем 670 км или ядерно-мантийной границы глубинного слоя Земли. Теория плюмов накладывает глобальные ограничения для понимания связей внутриплитных тектонических и рудообразующих процессов, как и формирования континентальной коры, ее разрыва и рифтинга. В архее и начале палеопротерозоя мантийные плюмы были горячее, чем в более позднее время, и производили плавление мантийного материала вплоть до образования коматиитов. Отсюда следовало, что однослойная ранняя конвекция сменилась на двухслойную, и это контролировало различие в механизме движения континентальных плит в архее, протерозое и особенно в фанерозое [16; 18]. Мантийно-плюмовые события приводили к формированию крупных магматических провинций, сложенных полями базальт-толеитовых лав, вмещающих колчеданные месторождения в возрастном диапазоне от палеоархея и до палеопротерозоя (3,5–2,2 млрд лет). Сейсмические данные демонстрируют, что в этих провинциях существенная роль принадлежит также расслоенным мафит-ультрамафитовым интрузиям, несущим сульфидное Cu-Ni-PGE оруденение. Расслоенные интрузии в таких провинциях представляют как бы крышу, а рои мафических даек — корни подобных крыш в магматических провинциях.

Внутриплитный магматизм, сопровождающий плюмы, прямо или косвенно производит широкий круг рудных месторождений, которые образуются в магматических камерах или дайкообразных корнях, либо заполняют пустоты в лавовых полях. Магмато-гидротермальные рудные системы в различных тектонических обстановках формируются интрузивными комплексами, такими как анортозит-троктолиты, кимберлиты, карбонатиты, или щелочно-ультраосновные кольцевые интрузии создают тепловые поля, способствующие циркуляции флюидов и гидротермальных растворов, образуя фузивные и жильные месторождения Fe-Ti-V, Cu-Co-Ni, Fe-Cu-Au-U и Pb-Zn. Введение в континентальную кору через

мафит-ультрамафитовые породы халькофильных и сидерофильных компонентов может напрямую связать мантийный апвеллинг с литосферой. Дальнейшая концентрация или селективный привнос этих компонентов при гидротермальной конвекции в коре производился при участии мантийных апвеллинговых магм.

Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР 0153-2019-0001 в ИГГД РАН.

1. Вревский А. Б. Петрология и геодинамические режимы развития архейской литосферы (на примере Балтийского щита). — Л.: Наука, 1989. — 143 с.
2. Вревский А. Б. Петрологические проблемы сульфидного никелевого оруденения в раннем докембрии северо-восточной части Балтийского щита // Геология рудных месторождений. — 1991. — № 1. — С. 23–32.
3. Возраст, источники и тектоническое положение оловоносных гранитов язовского комплекса Байкало-Патомского складчато-надвигового пояса / А. М. Ларин, А. Б. Котов, Е. Б. Сальникова, Е. В. Скляр, В. П. Ковач, Ю. В. Плоткина, И. В. Анисимова, М. М. Подольская // Докл. РАН. — 2020. — Т. 490, № 2. — С. 10–14.
4. Мочалов А. Г. Замечательные минералы платины массива Кондёр (Хабаровский край) // Минералогический альманах. — 2019. — Т. 23, вып. 3. — 128 с.
5. Строение земной коры Анабарского щита / Отв. ред. В. М. Моралев. — М.: Наука, 1986. — 197 с.
6. Турченко С. И. Металлогения метаморфогенных сульфидных месторождений Балтийского щита. — Л.: Наука, 1978. — 120 с.
7. Турченко С. И. Металлогения тектонических структур палеопротерозоя. — СПб.: Наука, 2007. — 175 с.
8. Abbot D. H., Burges L., Longhi J. An empirical thermal history of the Earth's upper mantle // Journal of Geophysical Research. — 1994. — Vol. 99. — Pp. 13 835–13 853.
9. Abbot D. H., Isley A. E. The intensity, occurrence and duration of superplume events and eras over geological times // Journal of geodynamics. — 2002. — Vol. 34. — Pp. 265–307.
10. Ballentine C. J. Neon isotopes constrain convection and volatile origin in the Earth's mantle / C. J. Ballentine, B. Marty, B. L. Sherwood, M. Cassidy // Nature. — 2005. — Vol. 433. — Pp. 33–38.



11. Bell K. Carbonatites: relationship to mantle plume activity // Geological Society of America Special Paper. – 2001. – Vol. 352. – Pp. 267–290.
  12. Campbell I. H. Large igneous provinces and mantle plume hypothesis // Elements. – 2005. – Vol. 1. – Pp. 265–270.
  13. Campbell I. H., Davis G. F. Do mantle plumes exist? // Episodes. – 2006. – Vol. 29. – Pp. 162–168.
  14. Condie K. C. Mantle plumes and their record in Earth history. – Cambridge University Press. – 2001. – 306 p. – DOI: 10.1017/CBO9780511810589
  15. Condie K. C. Incompatible element ratios in oceanic basalts and komatiites: Tracking deep mantle sources and continental growth rates with time // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2003. – Vol. 4. – No. 1. – DOI: 10.1029/2002GC000333
  16. Condie K. C. Earth as an evolving planetary system. – Amsterdam: Elsevier Price, 2005. – 447 p.
  17. Elkins-Tanton L. T. Continental magmatism caused by lithospheric delamination // Geological Society of America. Special Papers. – 2005. – Vol. 388. – Pp. 449–461.
  18. Groves D. I. Controls of the heterogenous distribution of mineral deposits through time / D. I. Groves, R. M. Vielmeier, R. J. Goldfarb, K. C. Condie // Geological Society, London. Special Publication. – 2005. – Vol. 248. – Pp. 71–101.
  19. Hill R. H., Campbell I. H., Gritfhiths R. W. Plume tectonics and development of stable continental crust // Exploration Geophysics. – 1991. – Vol. 22. – Pp. 185–188.
  20. Hitsman M. W., Oreskes N., Einandi M. T. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxides (Cu-U-Au-REE) deposits // Precambrian Research. – 1992. – Vol. 58. – Pp. 241–287.
  21. Hoffman A. W. Mantle geochemistry: message from oceanic volcanism // Nature. – 1997. – Vol. 85. – Pp. 219–229.
  22. Huston D. I. Mineralization and regional alteration at the Mons Cupri stratiform Cu-Zn-Pb deposit, Pilbara Craton, Western Australia // Mineral Deposita. – 2006. – Vol. 41. – Pp. 17–32.
  23. Igneous rocks. A classification and glossary of terms / Ed. by R. W. Le Maitre. – Cambridge University Press, 2002. – DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535581>
  24. Leshner C. M., Keyas R. R. Komatiite-associated Ni-Cu-(PGE) deposits: geology, mineralogy, geochemistry and genesis / ed. by L. Cabri // The geology, geochemistry, mineralogy and Mineral beneficiation of the platinum-group elements. Canadian Institute Mining, Metallurgy and Petroleum, 2002. – Vol. 54. – Pp. 579–617.
  25. Maier W. D. Platinum-group elements in Cu-sulfide ores of Calarusberg and East Okiep, Namaqualand, South Africa // Mineralium Deposita. – 2000. – Vol. 35. – Pp. 422–435.
  26. Meinert L. D., Dipple G. M., Nicolescu S. World skarn deposits // Economic Geology. 100th Anniversary Volume. – 2005. – Pp. 299–336.
  27. Montelli R. Finite-frequency tomography reveals a variety of plumes in the mantle / R. Montelli, G. Nolet, F. A. Dahlen, G. Masters, E. R. Engdahl, S.-H. Hung // Science. – 2004. – Vol. 303, iss. 5656. – Pp. 338–343. – DOI: 10.1126/science.1092485
  28. Morris P. A., Pirajno F. Mesoproterozoic sill complexes in the Bangemall Supergroup, Western Australia: geology, geochemistry, and mineralization potential. – Geological Survey of Western Australia, Report 99. – 2005. – 76 p.
  29. Nolet G., Karalo S.-I., Montelli R. Plume fluxes from seismic tomography // Earth and Planetary Science Letters. – 2006. – Vol. 248. – Pp. 685–699.
  30. Pirajno F. Ore deposits and mantle plumes. – Kluwer: Academic Publisher, 2000. – 556 p.
  31. Pirajno F. Metallogeny in the Capricorn Orogen, Western Australia, the result of the ore-forming processes // Precambrian Research. – 2004. – Vol. 128. – Pp. 411–440.
  32. Pirajno F., Smithes H. R., Howant H. M. Mineralization associated with the 1076 Ma Giles mafic-ultramafic intrusions, Musgrave Complex, central Australia: a review // SGA News. – 2006. – Vol. 20. – Pp. 1–20.
  33. Reiners P. W. Temporal compositional trends in intra-plate basalts eruptions implications for mantle heterogeneity and melting processes // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2002. – Vol. 3. – Pp. 1525–2027. – URL: <https://doi.org/10.1029/2001GCC002250> (дата обращения: 08.08.2021).
  34. Ripley E. M., Li C., Shin D. Paragneiss assimilation in the genesis of magmatic Ni-Cu-Co sulfide mineralization at Voisey's Bay, Labrador:  $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  and Se/S evidence // Economic Geology. – 2002. – Vol. 97. – Pp. 1307–1318.
  35. Rogers R. Two mantle plumes beneath the East African Rift System: Sr, Nd and Pb isotope evidence from Kenya rift basalts / R. Rogers, R. McDonald, J. G. Fitton, R. George, M. Smith, B. Barzero // Earth and Planetary Science Letters. – 2000. – Vol. 176. – Pp. 387–400.
  36. Samuel H., Fametami C. G. Thermochemical convection and helium concentration in mantle plumes // Earth and Planetary Science Letters. – 2003. – Vol. 207. – Pp. 39–56.
  37. Tomilison K. Y. The Red Lake greenstone belt, Superior Province: evidence a plume-related magmatism at 3 Ga and evidence an older enriched source / K. Y. Tomilison, R. K. Stewenson, D. J. Hughes, R. P. Hall, P. C. Thurstone, P. Henry // Precambrian Research. – 1998. – Vol. 89. – Pp. 59–76.
  38. Wyman D. N., Kerrich R., Polat A. Assembly of cratonic mantle lithosphere and crust: plume-arc interaction in the Abitibe-Wawa subduction-accretion complex // Precambrian Research. – 2002. – Vol. 115. – Pp. 37–62.
  39. Zhao D.-P. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep Earth dynamics // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2004. – Vol. 146. – Pp. 3–34.
- 
1. Vrevskiy A. B. Petrologiya i geodinamicheskie rezhimy razvitiya arkheyskoy litosfery (na primere Baltiyskogo shchita) [Petrology and geodynamic regimes of the Archean lithosphere development (on the example of the Baltic Shield)]. Leningrad, Nauka, 1989, 143 p.
  2. Vrevskiy A. B. Petrologicheskie problemy sul'fidnogo nikelovogo orudeneniya v rannem dokembrii severo-vostochnoy chasti Baltiyskogo shchita [Petrological problems of sulfide nickel mineralization in the Early Precambrian of the northeastern part of the Baltic Shield]. *Geology of Ore Deposits*, 1991, no. 1, pp. 23–32. (In Russian).
  3. Larin A. M., Kotov A. B., Salnikova E. B., Kovach V. P., Plotkina Y. V., Anisimova I. V., Sklyarov E. V., Podolskaya M. M. The age, sources, and tectonic setting of tin-bearing granites of the Jazov complex of the Baikal-Patom fold-thrust belt. *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 490, no. 2, pp. 10–14. (In Russian).
  4. Mochalov A. G. Zamechatel'nye mineraly platiny massiva Konder (Khabarovskiy kray) [Remarkable platinum minerals of the Konder massif (Khabarovsk Territory)]. *Mineralogicheskiy al'manakh*, 2019, vol. 23, iss. 3, 128 p. (In Russian).
  5. Stroenie zemnoy kory Anabarskogo shchita [The structure of the earth's crust of the Anabar Shield]. Ex. ed. V. M. Moralev. Moscow, Nauka, 1986, 197 p.
  6. Turchenko S. I. Metallogeniya metamorfogennykh sul'fidnykh mestorozhdeniy Baltiyskogo shchita [Metallogeny of metamorphogenic sulfide deposits of the Baltic Shield]. Leningrad, Nauka, 1978, 120 p.
  7. Turchenko S. I. Metallogeniya tektonicheskikh struktur paleoproterozoya [Metallogeny of tectonic structures of the Paleoproterozoic]. St. Petersburg, Nauka, 2007, 175 p.

8. Abbott D. H., Burgess L., Longhi J. An empirical thermal history of the Earth's upper mantle. *Journal of Geophysical Research*, 1994, vol. 99, pp. 13 835–13 850.
9. Abbot D. H., Isley A. E. The intensity, occurrence and duration of superplume events and eras over geological times. *Journal of geodynamics*, 2002, vol. 34, pp. 265–307.
10. Ballentine C. J., Marty B., Sherwood B. L., Cassidy M. Neon isotopes constrain convection and volatile origin in the Earth's mantle. *Nature*, 2005, vol. 433, pp. 33–38.
11. Bell K. Carbonatites: relationship to mantle plume activity. *Geological Society of America Special Paper*, 2001, vol. 352, pp. 267–290.
12. Campbell I. H. Large igneous provinces and mantle plume hypothesis. *Elements*, 2005, vol. 1, pp. 265–270.
13. Campbell I. H., Davis G. F. Do Mantle Plumes Exist? *Episodes*, 2006, vol. 29, no. 3, pp. 162–168.
14. Condie K. C. *Mantle plumes and their record in Earth history*. Cambridge University Press, 2001, 306 p. DOI: 10.1017/CBO9780511810589
15. Condie K. C. Incompatible element ratios in oceanic basalts and komatiites: Tracking deep mantle sources and continental growth rates with time. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, vol. 4, no. 1. DOI: 10.1029/2002GC000333
16. Condie K. C. *Earth as an evolving planetary system*. Amsterdam, Elsevier Price, 2005, 447 p.
17. Elkins-Tanton L. T. Continental magmatism caused by lithospheric delamination. *Geological Society of America. Special Papers*, 2005, vol. 388, pp. 449–461.
18. Groves D. I., Vielmeier R. M., Goldfarb R. J., Condie K. C. Controls of the heterogonous distribution of mineral deposits through time. *Geological Society, London. Special Publication*, 2005, vol. 248, pp. 71–101.
19. Hill R. H., Campbell I. H., Gritfiths R. W. Plume tectonics and development of stable continental crust. *Exploration Geophysics*, 1991, vol. 22, pp. 185–188.
20. Hitsman M. W., Oreskes N., Einandi M. T. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxides (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, 1992, vol. 58, pp. 241–287.
21. Hoffman A. W. Mantle geochemistry: message from oceanic volcanism. *Nature*, 1997, vol. 85, pp. 219–229.
22. Huston D. I. Mineralization and regional alteration at the Mons Cupri stratiform Cu-Zn-Pb deposit, Pilbara Craton, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 2006, vol. 41, pp. 17–32.
23. Le Maitre R. W. (ed.). *Igneous rocks. A classification and glossary of terms*. Cambridge University Press, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535581>
24. Leshar C. M., Keyas R. R. Komatiite-associated Ni-Cu-PGE deposits: geology, mineralogy, geochemistry and genesis. In L. Cabri (ed.): *The geology, geochemistry, mineralogy and Mineral beneficiation of the platinum-group elements*. Canadian Institute Mineral Metallurgy and Petroleum, 2002, vol. 54, pp. 579–617.
25. Maier W. D. Platinum-group elements in Cu-sulfide ores of Calarusberg and East Okiep, Namaqualand, South Africa. *Mineralium Deposita*, 2000, vol. 35, pp. 422–435.
26. Meinert L. D., Dipple G. M., Nicolescu S. World skarn deposits. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume, 2005, pp. 299–336.
27. Montelli R., Nolet G., Dahlen F. A., Masters G., Engdahl E. R., Hung S.-H. Finite-frequency tomography reveals a variety of plumes in the mantle. *Science*, 2004, vol. 303, iss. 5656, pp. 338–343. DOI: 10.1126/science.1092485
28. Morris P. A., Pirajno F. *Mesoproterozoic sill complexes in the Bangemall Supergroup, Western Australia: geology, geochemistry, and mineralization potential*. Geological Survey of Western Australia, Report 99, 2005, 76 p.
29. Nolet G., Karalo S.-I., Montelli R. Plume fluxes from seismic tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, vol. 248, pp. 685–699.
30. Pirajno F. *Ore deposits and mantle plumes*. Kluwer, Academic Publisher, 2000, 556 p.
31. Pirajno F. Metallogeny in the Capricorn Orogen, Western Australia, the result of the ore-forming processes. *Precambrian Research*, 2004, vol. 128, pp. 411–440.
32. Pirajno F., Smithes H. R., Howarth H. M. Mineralization associated with the 1076 Ma Giles mafic-ultramafic intrusions, Musgrave Complex, central Australia: a review. *SGA News*, 2006, vol. 20, pp. 1–20.
33. Reiners P. W. Temporal compositional trends in intraplate basalts eruptions implications for mantle heterogeneity and melting processes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2002, vol. 3, pp. 1525–2027, available at: <https://doi.org/10.1029/2001GCC002250> (accessed 08 August 2021).
34. Ripley E. M., Li C., Shin D. Paragneiss assimilation in the genesis of magmatic Ni-Cu-Co sulfide mineralization at Voisey's Bay, Labrador:  $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  and Se/S evidence. *Economic Geology*, 2002, vol. 97, pp. 1307–1318.
35. Rogers R., McDonald R., Fitton J. G., George R., Smith M., Barzero B. Two mantle plumes beneath the East African Rift System: Sr, Nd and Pb isotope evidence from Kenya rift basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, vol. 176, pp. 387–400.
36. Samuel H., Fametami C. G. Thermochemical convection and helium concentration in mantle plumes. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, vol. 207, pp. 39–56.
37. Tomilison K. Y., Stewenson R. K., Hughes D. J., Hall R. P., Thurstone P. C., Henry P. The Red Lake greenstone belt, Superior Province: evidence a plume-related magmatism at 3 Ga and evidence an older enriched source. *Precambrian Research*, 1998, vol. 89, pp. 59–76.
38. Wyman D. N., Kerrich R., Polat A. Assembly of cratonic mantle lithosphere and crust: plume-arc interaction in the Abitibe-Wawa subduction-accretion complex. *Precambrian Research*, 2002, vol. 115, pp. 37–62.
39. Zhao D.-P. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep Earth dynamics. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2004, vol. 146, pp. 3–34.

Турченко Станислав Иванович – доктор геол.-минерал. наук, гл. науч. сотрудник, Институт геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук (ИГГД РАН). Наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199034. <turchsi@mail.ru>

Turchenko Stanislav Ivanovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Researcher, Institute of Precambrian Geology and Geochronology Russian Academy of Sciences (IPGG RAS). 2 Naberezhnaya Makarova, St. Petersburg, Russia, 199034. <turchsi@mail.ru>