

В. С. Шкодзинский (Институт геологии алмаза и благородных металлов
Сибирского отделения Российской академии наук)

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ГРАНИТОВ И РУДОНОСНЫХ ГИДРОТЕРМ ЗЕМЛИ

Установленное существование трендов магматического фракционирования в мантии и в кристаллической коре, соответствие изотопного возраста и температуры кристаллизации их различных пород, последовательности образования при фракционировании, резкая химическая неравновесность мантийных пород с металлическим железом земного ядра и другие данные свидетельствуют о горячей гетерогенной аккреции Земли и существовании на ней глобального магматического океана. Низкобарическая кристаллизация и фракционирование придонных частей раннего, еще не глубокого магматического океана под влиянием нагрузки формирующихся его верхних частей обусловили образование большого объема кислых остаточных расплавов. Из этих расплавов возникла кислая кристаллическая кора. Фрикционный разогрев и плавление ее под влиянием тектонических деформаций и последующая декомпрессия при подъеме приводят к образованию гранитных магм. С ростом глубинности их затвердевания самостоятельная флюидная фаза появляется при все большей степени кристаллизации, когда в небольшом количестве остаточного расплава достигаются высокие концентрации рудных и выносящих их летучих компонентов. Это объясняет значительно большую рудоносность глубинных гидротерм по сравнению с малоглубинными и связь богатых гидротермальных месторождений с глубинными частями гранитоидных интрузий.

Ключевые слова: магматический океан, фракционирование, фрикционное тепловыделение, граниты, рудоносные гидротермы.

V. S. Shkodzinskiy (*Diamond and Precious Metal Geology Institute
of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences*)

ORIGIN OF GRANITE AND ORE-BEARING HYDROTHERMS OF THE EARTH

The confirmed existence of trends in magmatic fractionation in the mantle and in the crystalline crust, the correspondence of the isotopic age and crystallization temperature of their various rocks to the sequence of formation during fractionation, the sharp chemical nonequilibrium of mantle rocks with metallic iron of the Earth's core, and other data indicate hot heterogeneous accretion of the Earth and the existence of a global magma ocean. Low-pressure crystallization and fractionation of the near-bottom parts of the early still shallow magma ocean under the impact of the load of its forming upper parts led to the formation of large amount of acid residual melts. These melts resulted in the formation of acid crystalline crust. Its frictional heating and melting under the influence of tectonic deformations and subsequent decompression during ascent lead to the formation of granite magma. With an increase in the depth of their solidification, an independent fluid phase appears with an increasing degree of crystallization, when high concentrations of ore and volatile components that carry it out are reached in a small amount of residual melt. This the reason for significantly greater ore content of deep-seated hydrotherms as compared to shallow ones and the relationship of rich hydrothermal deposits with deep parts of granitoid intrusions.

Keywords: magma ocean, fractionation, frictional heat release, granite, ore-bearing hydrotherms.

Для цитирования: Шкодзинский В. С. Происхождение гранитов и рудоносных гидротерм Земли // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 95. – С. 88–96. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_95_88-96

Введение. Граниты являются самыми распространенными магматическими породами на континентах нашей планеты, с ними связано образование большого количества гидротермальных месторождений. Генезис этих пород обсуждался в течение многих десятилетий, особенно интенсивно во время знаменитой «гранитной» дискуссии в прошлом столетии. Однако до настоящего

времени происхождение гранитов остается во многом непонятным. С позиций господствующей гипотезы холодной гомогенной аккреции Земли [6] кислые магмы должны формироваться путем отделения расплавов из первичных ультраосновных пород, слабо подплавленных (на 2–3%) при давлении менее 0,3 ГПа (3 кб). Однако при холодной аккреции Земли на соответствующей

этому давлению глубине менее 12 км не могла существовать температура более 1000 °С, необходимая для начала плавления первичных пород. Иногда предполагаемому их формированию путем обособления выплавок в гранатсодержащих глубинных основных породах [3] противоречит полное отсутствие кислых обособлений в многочисленных ксенолитах эклогитов в кимберлитах и более раннее начало массового образования гранитоидов на Земле (3,8 млрд лет назад), чем основных пород (3,5 млрд лет назад) [1].

Вязкость слабо подплавленных пород, из расплавов которых предполагается формирование гранитных магм, равна 10^{20} – 10^{22} пуаз (рис. 1). Скорость всплывания выплавок W можно оценить по формуле Стокса $W = 2\Delta\rho g R^2 / 9\eta$. При разности плотностей $\Delta\rho = 600 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, ускорении силы тяжести $g = 9,81 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ и вязкости астеносферы $\eta = 1020 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ скорость всплывания капли расплава радиусом $R = 0,01 \text{ м}$ составляет $W = 2\cdot 600 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}\cdot 9,81 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}\cdot 0,012 \text{ м}^2 / 9\cdot 1020\cdot 0,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1} \approx 1,3\cdot 10^{-20} \text{ м/с}$. Следовательно, за 5 млрд лет ($1,575\cdot 10^{17} \text{ с}$), то есть больше чем за всю историю Земли, капля всплывет всего на $1,3\cdot 10^{-20}\cdot 1,575\cdot 10^{17} \approx 2\cdot 10^{-3} \text{ м}$, то есть на миллиметры. Поэтому слабо подплавленные породы не могут быть источником магм вследствие их огромной вязкости. Это подтверждается результатами изучения единственного доступного наблюдению примеру массового частичного плавления – мигматитов. Прямолинейность средних линий корреляции на рис. 2 показывает, что в огромных полях мигматитов на древних щитах не происходило отделение анатектического жильного материала даже при содержании его 40% (линия 1).

Происхождение геосфер. К настоящему времени получено множество доказательств ошибочности гипотезы холодного образования Земли и, наоборот, фактов, говорящих в пользу свидетельств возникновения ее в результате горячей гетерогенной аккреции. На такое ее происхождение указывают плавление и частичное испарение падающих метеоритов, существование трендов магматического фракционирования в мантийных ксенолитах (линия MgO на рис. 3) и ортогнейсах кристаллической коры, полное соответствие температуры кристаллизации и изотопного возраста их различных по составу пород последовательности образования при фракционировании (линии T, По и ВА на рис. 3) и проекции наиболее ранних геотермических градиентов в область очень высокой температуры (до 1000 °С) на земной поверхности [7].

В 20 тыс. раз большая фугитивность кислорода в мантийных породах, чем в металлическом железе ядра [10], неравновесность этих пород с железом в отношении содержания хорошо растворимых в нем сидерофильных элементов [3] и другие данные указывают на то, что силикатные и железные частицы никогда не были перемешаны в земных недрах, как предполагается в гипотезе гомогенной аккреции, а выпадали раздельно.

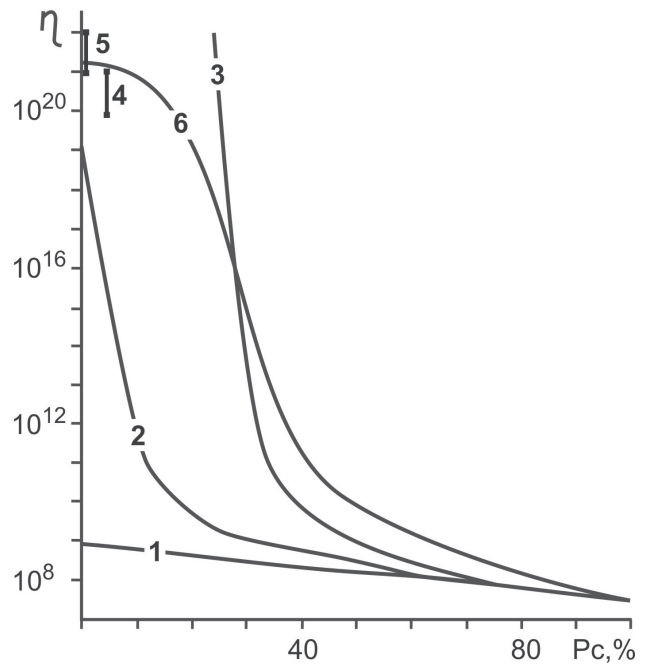


Рис. 1. Вязкость гранитных магм (η , пуаз)
1 – стекла; 2, 3 – рассчитанная по формулам Эйнштейна–Рошке при неодинаковых и одинаковых размерах твердых шаров; 4 – астеносферы; 5 – земной коры; 6 – принятая. Pс, % – содержание расплава

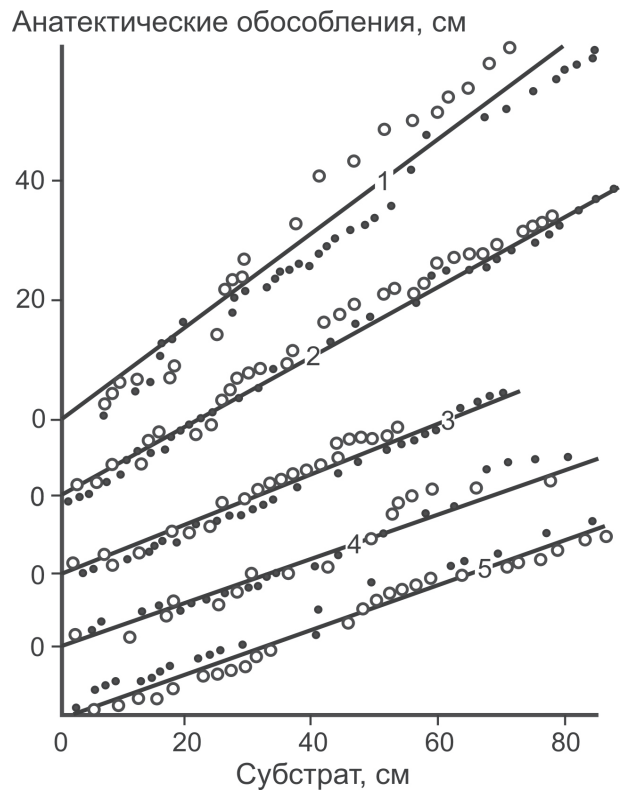


Рис. 2. Соотношение последовательных сумм мощностей (см) анатектических обособлений и тел субстрата в биотит-гранатовых мигматитах р. Амедици Алданского щита
Прямолинейность линий соотношений и близкое положение точек разных замеров свидетельствуют о равномерном распределении обособлений в породах одинакового состава. Цифры на линиях – номера замеров [7]

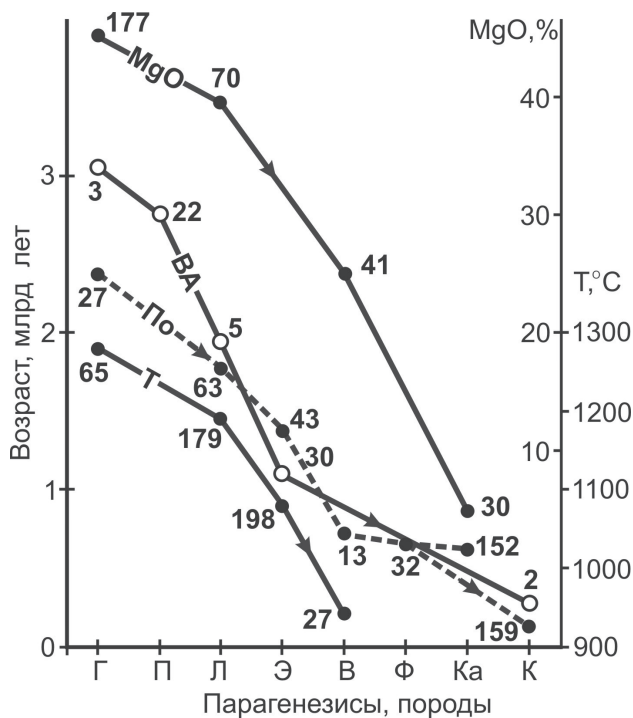


Рис. 3. Средние изотопные возрасты пород из ксенолитов в кимберлитах (линия По) и из включений в алмазах (линия BA), средняя температура образования при 5 гПа (линия T), среднее содержание магния (линия MgO)

Состав пород и включений в алмазах: Г – гарцбургитовый; П – перидотитовый нерасчлененный; Л – лерцолитовый; Э – эклогитовый; В – верлитовый и вебстеритовый; Ка – карбонатитовый, К – кимберлитовый; Ф – флогопитсодержащие породы. Числа у точек – количество использованных определений [7]

В десятки тысяч раз большая скорость объединения магнитных частиц по сравнению с немагнитными [8] свидетельствуют, что намагниченные магнитным полем Солнца железные частицы протопланетного диска объединились раньше силикатных и сформировали земное ядро. На него выпадали силикатные частицы и образовали мантию.

Вследствие гигантского импактного тепловыделения на ранней стадии аккреции мантии возник глобальный магматический океан. Представления о его существовании описаны в литературе [3; 9 и др.]. Для объяснения происхождения земного ядра иногда предполагается, что магматический океан имел очень большую глубину (до нескольких тысяч километров). Такая большая его глубина не согласуется с относительно небольшой степенью магматической дифференцированности мантийных пород. Не учитывается синаккреционная эволюция океана, хотя ею образован на порядок больший объем мантии (2660 км ее мощности), чем постаккреционной эволюцией (240 км) [7]. Это не позволяло правильно оценить роль магматического океана в образовании Земли.

Генезис кислой коры и раннедокембрийских кристаллических комплексов. Полученные доказательства горячей гетерогенной аккреции

Земли полностью объясняют все особенности генезиса гранитов и других магматических пород. Наибольшее давление, зафиксированное в минеральных парагенезисах мантийных ксенолитов, выносимых придонными кимберлитовыми расплавами магматического океана, достигает 8 гПа [7]. Это указывает на максимальную его глубину около 250 км. В период аккреции придонная часть магматического океана кристаллизовалась и фракционировала под влиянием роста давления формирующихся его верхних частей. Небольшая еще глубина раннего океана и пониженная сила гравитации на небольшой Земле обусловили относительно низкое давление (менее 0,3 гПа) при его придонном фракционировании и поэтому формирование кислых остаточных расплавов. Легкие кислые расплавы всплывали по мере образования, эффективно накапливались в верхней части океана и после завершения аккреции сформировали раннедокембрийские кристаллические комплексы и кислую кору. Эти комплексы слагают кристаллическое основание континентов и в наиболее эродированных областях (Алданский и Анабарский щиты) являются монофаціальными и не имеют постепенных переходов в слабо метаморфизованные толщи.

С позиций господствующей гипотезы холодной гомогенной аккреции обычно предполагается, что раннедокембрийские кристаллические комплексы являются метаморфизованными осадочно-вулканогенными толщами. Однако при таком происхождении непонятна причина выдержанной на всей Земле магматической температуры (800–850 °C, рис. 4) образования их минеральных парагенезисов, тогда как залегающие на кристаллическом основании континентов метаморфические толщи обычно более низкотемпературные и имеют зональное распределение температуры кристаллизации. В этих комплексах присутствует только регрессивная последовательность минералообразования, как в типичных магматических породах, тогда как в молодых метаморфических толщах прогрессивная последовательность широко распространена. Непонятно отсутствие их постепенных переходов в неметаморфизованные породы и мощных (десятки километров) перекрывающих толщ, гипотетическим теплоизолирующим влиянием которых обычно объясняют высокотемпературность их минеральных парагенезисов. Не ясна природа часто более молодого изотопного возраста их глубинных частей по сравнению с малоглубинными.

Значительное возрастание в слоистом магматическом океане плотности с глубиной (от 2,3 г/см³ в кислом слое и до 2,8 г/см³ в ультраосновном) объясняет отсутствие в нем обширной конвекции расплавов после завершения аккреции. Поэтому он остывал и кристаллизовался сверху вниз в результате преимущественно кондуктивных теплотерь через земную поверхность. Большая продолжительность (до начала фанерозоя) остывания гигантского магматического океана является причиной огромного периода образования ранне-

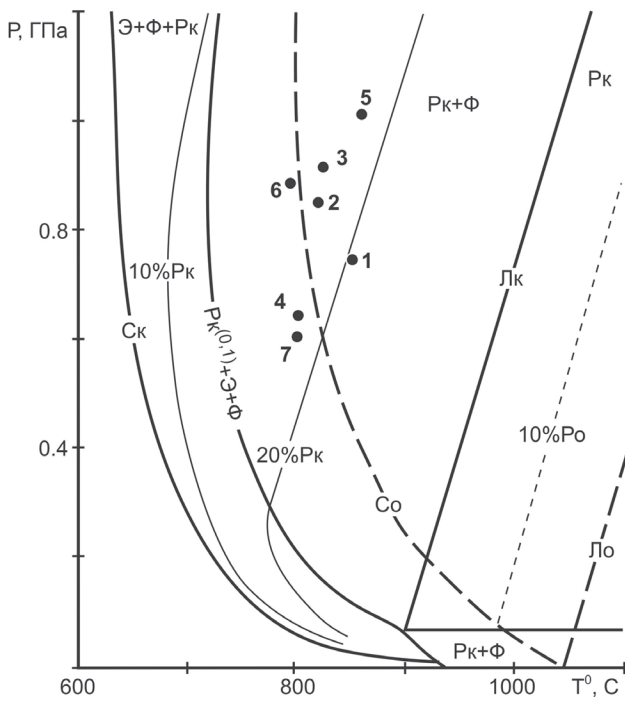


Рис. 4. Средние параметры образования кристаллических комплексов Алданского щита (1, среднее из 36 определений), Анабарского щита (2, 12 определений), Лапландского пояса (3, 11 определений), Украинского щита (4, 4 определения), Антарктиды (5, 1 определение), Урала (6, 10 определений), Беломорья (7, 12 определений)

Лк и Ло, Ск и Со – соответственно ликвидусы и солидусы кислых и основных магм; Рк и Ро – расплавы соответственно кислые и основные; Ф – флюид; Э – минералы гранитов; 10%Рк и 10%Ро – содержания соответственно кислого и основного расплавы; Рк(0,1) – кислый расплав с отношением количества CO_2 к H_2O , равным 0,1

докембрийских кристаллических комплексов (от 3,8 до примерно 1,8 млрд лет назад). Как показали расчеты [7], кристаллизовавшиеся верхние части магматического океана становились плотнее нижних расплавленных. Поэтому они тонули вместе с начавшими формироваться на них осадками, и на их место всплывали нижние, обычно более основные магмы. Это объясняет чередование ортогнейсов, парагнейсов и кристаллических сланцев различной основности в большинстве раннедокембрийских комплексов.

Не тонули, видимо, только наиболее легкие, самые кислые, локально распространенные части верхнего слоя в случае присутствия под ними магм повышенной основности и плотности. Это привело к образованию наиболее древних (обычно более 3 млрд лет назад) относительно однородных гранит-тоналит-трондьемитовых (серогнейсовых) комплексов. Выделение из магм кислотных газов (HCl , HF , H_2S) и их реакция с водой привели к выщелачиванию затвердевших приповерхностных пород. Это обусловило широкое распространение кварцитов и высокоглиноземистых гнейсов среди парапород. Вследствие текучести не затвердевших частей магматического океана на ранней Земле не было гор. Это объясняет отсутствие конгломератов

и гравелитов в раннедокембрийских кристаллических комплексах.

Более позднее затвердевание является причиной чаще всего пониженного (2,8–1,8 млрд лет) изотопного возраста гнейсово-кристаллосланцевых комплексов по сравнению с тоналит-трондьемитовыми. Еще меньший возраст имеют более глубинные дифференциаты магматического океана (1,1 и 0,75 млрд лет в среднем в ксенолитовых эклогитов и пироксенитов из кимберлитов, рис. 3). Это обусловлено более поздними остыванием и кристаллизацией глубинных частей океана по сравнению с малоглубинными. Следовательно, в раннедокембрийских кристаллических комплексах, в отличие от осадочно-вулканогенных толщ, изотопный возраст не повышается с ростом глубины положения в земной коре, а в среднем понижается. Это противоречит принципу Н. Стенсона, согласно которому в осадочных толщах нижний слой является более древним по сравнению с верхним, и подтверждает преимущественно магматическое происхождение кристаллических комплексов.

Гистограммы распределения температуры в гиперстенных и безгиперстенных гнейсах не различаются [7]. Это указывает на то, что образование пород, относимых к гранулитовой фации метаморфизма, обусловлено меньшим содержанием воды в исходных магмах и не связано с их гипотетической большей высокотемпературностью, как обычно принимается. Это подтверждается частым переслаиванием гиперстенных и безгиперстенных гнейсов в одних и тех же обнажениях, несовместимое с разной температурой их гипотетического метаморфизма, и отсутствием явлений более позднего развития гиперстена в гнейсах. Всеземное распространение и большая глубина родоначального магматического океана объясняют огромную мощность (до десятков километров) кристаллических комплексов.

Вследствие увеличения импактного тепловыделения по мере аккреции на ранней Земле температура мантии увеличивалась снизу вверх (на 800–3000 °C). В ней существовал обратный геотермический градиент и поэтому отсутствовали нижнемантийные плюмы. Происходило лишь всплывание расплавы из различных частей магматического океана [7]. Увеличение интенсивности геологических процессов и появления значительного количества офиолитов (реликтов океанической коры), начиная с неопротерозоя [2], указывает на прогрев мантии изначально очень горячим ядром, на возникновение в ней прямого геотермического градиента и конвекции и на начало образования океанических областей в это время.

Происхождение гранитов. Отделение остаточных расплавы из кристаллизовавшегося сверху вниз магматического океана объясняет эволюцию магматизма на древних платформах от кислого к основному, затем к щелочно-ультраосновному карбонатитсодержащему и кимберлитовому (рис. 5). Раннедокембрийские гранитоиды часто

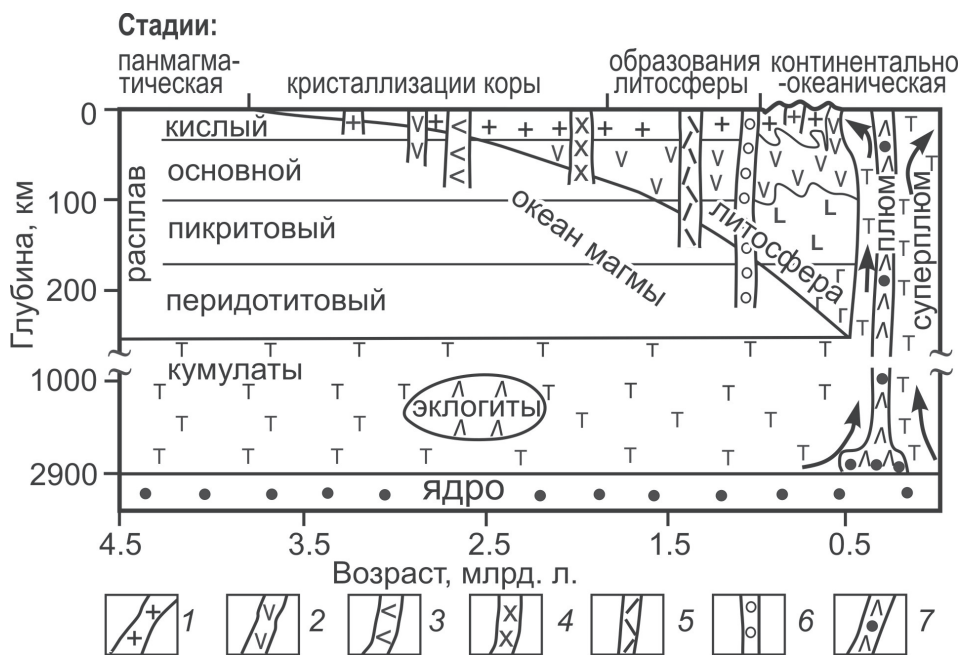


Рис. 5. Схема образования различных геодинамических обстановок и магм

1 – кислых; 2 – основных; 3 – анортозитовых; 4 – щелочно-основных; 5 – щелочно-ультраосновных карбонатитсодержащих; 6 – кимберлитовых; 7 – океанических и траппов, иногда содержащих ксенолиты ядра

слагают однородные тела различной мощностью среди гнейсов и основных кристаллических сланцев и, видимо, образовались в результате всплытия остаточных расплавов из кислого слоя магматического океана в период формирования кристаллических комплексов. В участках тектонических деформаций возникали значительные по размеру интрузии. Они имеют состав от аляскитов и лейкогранитов до мезократовых гранитов и гранодиоритов и образованы с участием тектонического выжимания вещества кислого слоя. Аляскиты и лейкограниты сформировались из малоглубинных остаточных расплавов этого слоя.

В зонах поздней тектонической активизации древних платформ возникали многочисленные интрузии разнообразных гранитоидов в результате фрикционного разогрева и подплавления дифференциатов кислого слоя и дальнейшего их переплавления под влиянием декомпрессии при подъеме. Большая мощность этого слоя способствовала часто огромному размеру возникавших интрузий. Только выжимание и всплытие продуктов затвердевания гигантского кислого слоя глобального магматического океана позволяет объяснить быстрое образование огромных батолитов площадью до миллионов квадратных километров в зонах активизации. Вариации состава батолитов от диоритов до лейкогранитов, видимо, обусловлены в основном неоднородностью затвердевшего кислого слоя магматического океана. Широко распространенные батолиты высокоглиноземистых гранитов, судя по повышенному содержанию в них химических компонентов, накапливавшихся в остаточных расплавах (калия,

натрия, рубидия), сформировались из верхних, наиболее лейкократовых частей кислого слоя. Накопление воды в остаточном расплаве при фракционировании объясняет высокое ее содержание в гранитных магмах (1% и более). Глубокое низкобарическое фракционирование кислых магм привело к образованию литий-фтористых гранитов и онгонитов. Высокобарическое фракционирование обусловило возникновение щелочных гранитов. Такое происхождение подтверждается относительно небольшим размером интрузий этого состава, приуроченностью их к областям широкого распространения обычных гранитоидов и более молодым возрастом.

Количественная модель кислых магм (рис. 6) показывает, что относительно гомогенные в приповерхностных условиях магмы в глубинных условиях (при 5–17 кб) содержат повышенное количество (80–60%) твердых фаз, обусловленное высоким давлением. Следовательно, при появлении 20–40% расплава при фрикционном разогреве затвердевших частей кислого слоя магматического океана происходит их всплытие и выжимание и преобразование магмы в результате декомпрессионного переплавления при подъеме. Это подтверждается неразрывной связью процессов гранитообразования с тектоническими деформациями и широким распространением гранитоидов на активизированных участках древних платформ, в которых присутствуют продукты затвердевания кислого слоя магматического океана.

P-T диаграмма кислых магм (рис. 6) показывает, что траектории подъема подавляющего их большинства (с приповерхностной температурой

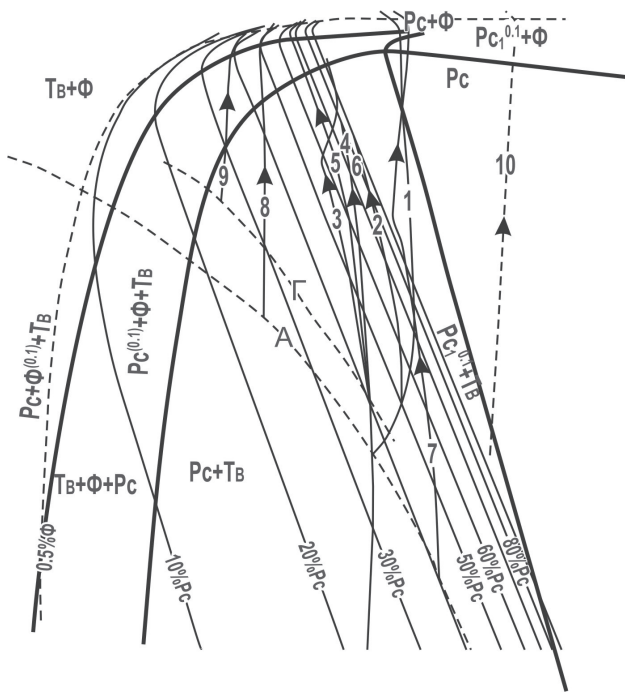


Рис. 6. P-T диаграмма фазового состава и эволюции (линии со стрелками) кислых магм с содержанием 1% H₂O и 0,1% CO₂. Прямолинейность линий соотношений и близкое положение точек разных замеров свидетельствуют о равномерном распределении обособлений в породах одинакового состава. Цифры на линиях – номера замеров [7]

менее 900 °C) пересекают изоконцентраты расплава с понижающимися значениями и линию солидуса гранитов в присутствии флюидной фазы (Pс + Ф^{0.1} + Э). Из этого следует, что такие магмы затвердевают при подъеме под влиянием декомпрессии в результате снижения в расплаве концентрации летучих компонентов вследствие их выкипания. Под влиянием выделения скрытой теплоты кристаллизации температура декомпрессионно затвердевших магм могла повышаться на многие десятки градусов. Такие магмы не способны изливаться на земную поверхность и формировать кислые вулканы. Это объясняет формирование кислыми магмами в основном гранитов и относительно редкое присутствие в гранитных поясах кислых вулкаников. В таких поясах (например, в Главном батолитовом поясе Верхоянья [7]) апикальные части гранитных интрузий обычно располагаются на одном уровне и сложены мелкозернистыми гранитами с аллотриоморфнозернистой структурой. Это свидетельствует о быстром остекловании расплавов при подъеме после вскипания и о раскристаллизации стекла в твердом состоянии под влиянием его высокой температуры. Основные магмы формируют преимущественно вулканические породы – базальты. Это обусловлено меньшей степенью фракционирования при образовании основного слоя в магматическом океане и поэтому значительно меньшим содержанием в нем и в основных магмах летучих компонентов, небольшим размером флюидсодержащего поля на P-T диаграмме и эволюцией основных магм

преимущественно в бесфлюидном поле, в котором не происходило декомпрессионное затвердевание расплава [7].

Всемирное распространение магматического океана обусловило присутствие кислой коры и образованных из ее вещества гранитов на всех древних платформах. Раздвижение кислой коры поднимавшимися мантийными плюмами после начала мантийной конвекции при образовании океанических областей является причиной нехарактерности гранитов для этих областей. При аккреции небольших железо-каменных планет (Луны, Меркурия) придонное компрессионное фракционирование магматического океана могло не происходить вследствие небольшой его глубины и пониженной силы тяжести. Поэтому на небольших планетах может отсутствовать существенное количество кислых магматических пород. Их присутствие наиболее вероятно на Венере, поскольку она близка по размеру к Земле.

Происхождение рудоносных гидротерм.

С гранитоидами связано образование огромного количества гидротермальных месторождений. Непонятными являются причины разнометалльности и различной рудоносности гидротерм одних и тех же интрузий, стадийности рудообразования и зональности размещения оруденения. Ответить на эти вопросы позволяет P-T диаграмма поведения рудных и выносящих их летучих в кислых магмах (рис. 7), рассчитанная на основании P-T диаграммы фазового состава этих магм (см. рис. 6) и опубликованных экспериментальных данных [7]. На диаграмме толстые линии 2,5CO₂/H₂O^Ф и 0,1CO₂/H₂O^Ф разграничивают поля разного фазового состава магм и отражают, соответственно, первое появление флюидной фазы при кристаллизации с принятым массовым отношением в ней CO₂ к H₂O, равным 2,5, и полное затвердевание магм при отношении CO₂ к H₂O во флюиде 0,1, равном исходному отношению этих компонентов в магме. Сплошными тонкими линиями показаны изоконцентраты флюида (0,2%Ф, 0,4%Ф) и расплава (5%Pс, 10%Pс и 20%Pс), равные содержания рудных и летучих компонентов и отношений CO₂ к H₂O во флюиде (5 моль Cl^Ф, 1г/тAu^Ф, 1CO₂/H₂O^Ф и др.). Пунктирные линии (0,45Cl^{Рс}, 10мг/тAu^{Рс} и др.) – изоконцентраты летучих и рудных компонентов в расплаве.

Очень толстые изогнутые линии отражают P-T условия максимумов содержания рудных и некоторых летучих компонентов во флюиде при субизобарической кристаллизации и фракционирования магм. Они показывают области зарождения наиболее высокорудоносных гидротерм. Толщина их пропорциональна величине максимумов, пунктирные линии рассчитаны приближенно в связи с недостатком экспериментальных данных. Существование этих максимумов обусловлено наличием двух противоположных тенденций в магмах. При высокой температуре и низком содержании твердых фаз кристаллизация магм приводит к увеличению в остаточном расплаве концентраций

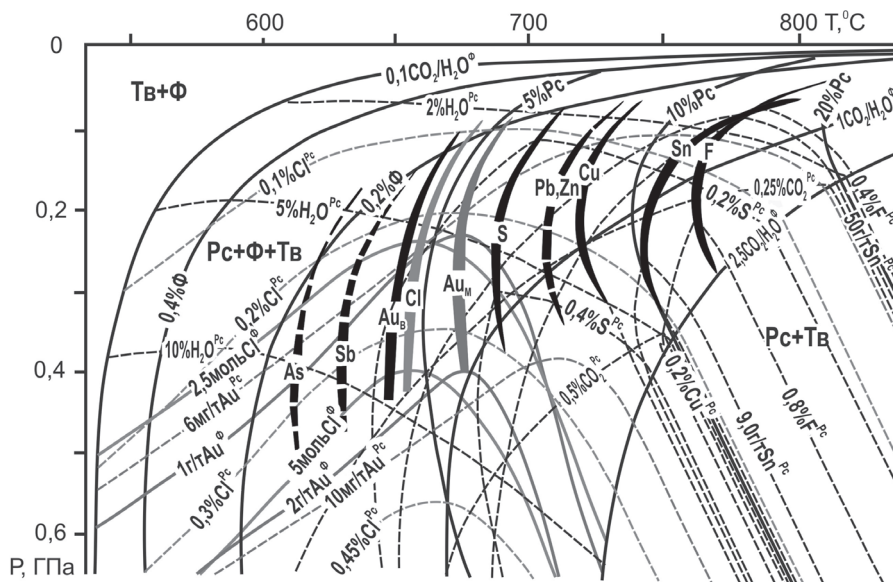


Рис. 7. P-T диаграмма распределения рудных и летучих компонентов в фракционирующих высокотемпературных кислых магмах с исходным содержанием H_2O – 1%, CO_2 и F – по 0,1%, Cl – 0,03%, S – 0,05%, Sn – 10 г/т, Au – 0,002 г/т, Cu и Pb – по 2 г/т, Zn – 6 г/т, Sb – 0,2 г/т, As – 0,15 г/т при коэффициентах распределения этих компонентов между расплавом и твердыми фазами соответственно 2; 2; 10; 2; 4; 5; 1; 5; 2; 2; 5; 5 [7]

Толстые изогнутые линии – условия отделения наиболее высоко рудоносных гидротерм

большинства рудных компонентов, поскольку для них коэффициент распределения между расплавом и твердыми фазами значительно больше единицы. При достижении высоких концентраций начинается выделение фаз, содержащих рудные или летучие компоненты в большом количестве, например, касситерита, вольфрамита, сульфидов, топаза. При дальнейшей кристаллизации содержание, соответственно, олова, вольфрама, серы, фтора в расплаве начинает уменьшаться, так как емкость образованных ими фаз в отношении соответствующих компонентов выше, чем у расплава. То есть максимумы концентраций рудных и некоторых летучих компонентов во флюиде совпадают с областями первого появления фаз, содержащих эти компоненты в очень большом количестве.

Существование данных максимумов позволяет объяснить многие непонятные явления в гидротермальном рудообразовании. Как частично иллюстрирует диаграмма, изливающиеся на земную поверхность высокотемпературные магмы с незначительным содержанием твердых фаз потеряют летучие при низкой концентрации рудных компонентов в расплаве и в них не смогут возникнуть высокорудоносные гидротермы. Это объясняет обычно незначительное распространение автохтонного оруденения в кислых лавовых толщах. Если же медленная кристаллизация сопровождается отсадкой твердых фаз и происходит, например, при 4 кб, то при содержании остаточного расплава 4% концентрация золота и хлора в нем будут соответственно в 5 и 10 раз выше, чем в исходной магме. Хлор очень сильно повышает растворимость золота и многих других рудных компонентов во флюиде. Так, при высоком

окислительном потенциале (буфер $Fe_2O_3-Fe_3O_4$) повышение его концентрации в этой фазе с 0,2 до 5 молей приведет к увеличению содержания золота в ней при неизменной концентрации последнего в расплаве в 100 раз, а с учетом повышения этой концентрации – в $5 \times 100 = 500$ раз [7]. Этот упрощенный расчет наглядно иллюстрирует существование тенденции резкого повышения рудоносности гидротерм с увеличением глубины их отделения от кристаллизующихся магм.

Эта тенденция объясняет обычно наблюдающуюся небольшую рудоносность малоглубинных частей интрузий и связь богатого оруденения с глубинными их частями. Л. В. Таусон [5] сформулировал это следующим образом: «...как показывает геологическая практика, максимальный промышленный эффект связан с рудными телами, возникшими за счет гидротермальных растворов, генерируемых в нижних камерах низкотемпературных расплавов» (с. 248). Такое явление различные исследователи объясняли отжиманием растворов вниз по мере кристаллизации верхних частей интрузий или притоком в нижние части последних богатых рудными компонентами флюидов из мантии. Но отжимание легкого флюида в магмах вниз и зарождение гидротерм в сухой высокотемпературной мантии с физико-химической точки зрения нереальны. Рассчитанная диаграмма свидетельствует, что высокая рудоносность глубинных гидротерм связана с появлением и отделением флюида в остывающих при высоком давлении кислых магмах на поздней стадии кристаллизации, когда в последних остаточных расплавах достигаются высокие концентрации рудных и выносящих их летучих компонентов.

Положение максимумов для разных компонентов на диаграмме различно. Из их распределения следует, что с увеличением глубины отделения гидротерм должна закономерно изменяться рудная специализация последних за счет возрастания роли компонентов с низким исходным содержанием в магме, с малыми коэффициентами накопления в остаточных расплавах и с высокими концентрациями насыщения. Будет расти средняя удаленность сформированного ими оруденения от вскрытых частей гранитных интрузий, что вместе с изменяющейся их рудной специализацией приведет к формированию рудной зональности рудно-магматических узлов. Должен уменьшаться его возраст вследствие повышенной длительности кристаллизации магм в глубинных условиях и понижаться температура его образования вследствие остывания гидротерм при длительном подъеме.

Названные явления характерны для рудно-магматических узлов и давно служат предметом дискуссии. В первой половине прошлого столетия была широко распространена гипотеза В. Х. Эммонса о связи рудной зональности с изменением состава остывающих растворов по мере удаления их от интрузии. С. С. Смирнов [4] выдвинул пульсационную гипотезу происхождения рудной зональности и стадийности рудообразования, связывая их с периодическим отделением из магм гидротерм разного состава при приоткрытии рудопроводящих трещин в процессе тектонических движений. Однако причина изменения состава гидротерм была недостаточно ясной. Полученные результаты свидетельствуют, о том, что эти изменения состава являются следствием существования различных по Т и Р максимумов концентраций рудных компонентов во флюиде кристаллизующихся магм и последовательного достижения этих максимумов фронтом появления и отделения флюидной фазы в кристаллизующихся интрузиях.

Диаграмма на рис. 7 показывает, что при субизобарической кристаллизации магм состав отделяющихся гидротерм должен последовательно проходить через максимумы концентраций олова (и вольфрама), меди, цинка, свинца, серы, золота, сурьмы и мышьяка. Очевидно, что просачивание гидротерм по одним и тем же каналам приведет к стадийному отложению этих компонентов. Рассчитанная последовательность рудоотложения соответствует природной и объясняет ее происхождение. При разных изобарических сечениях диаграммы последовательность достижения максимумов концентраций во флюиде при кристаллизации магм остается примерно одинаковой, хотя величины этих максимумов различаются. Это является причиной, казалось бы, парадоксального факта близости стадий рудообразования на связанных с гранитоидами разнометалльных месторождениях – вольфрамовых, оловянных, полиметаллических, золоторудных.

Отделение разнометалльных гидротерм от фракционирующей гранитной магмы с образованием хорошо выраженной рудной зональности

возможно в основном в случае пологонаклонного залегания интрузий и является редко встречающимся вариантом. Чаще всего главная масса гидротерм должна отделяться на уровне существующих в кровле интрузий куполов и выступов, куда всплывал остаточный расплав и где происходило отделение от него флюида. Состав и рудная специализация формировавшихся гидротерм определялись значениями изоконцентрат рудных компонентов во флюиде на диаграмме на уровне глубинности куполов, а их объем и количество вынесенных компонентов – объемом магм, расположенных ниже купола. Видимо, это является главной причиной неполноты проявления зональности гидротермального оруденения вокруг большинства интрузий и широкого развития лишь отдельных типов оруденения. Вследствие всплывания остаточного расплава во фракционирующих магмах в крупных субвертикальных интрузиях с четко выраженной куполообразной формой кровли летучие всего огромного объема магмы должны отделяться на уровне этой кровли с формированием крупных месторождений. Для таких интрузий не характерны мелкие месторождения и рудопроявления. На локализацию оруденения большое влияние оказывает структура вмещающих пород и положение геохимических и структурных барьеров.

В наиболее низкотемпературных и глубинных мигмах реоморфических (фрикционно подплавленных) гнейсо- и мигматит-гранитов вследствие их высокой вязкости почти не происходили процессы эманационной и кристаллизационной дифференциации. Это является причиной безрудности огромных полей глубинных гранитоидов в метаморфических комплексах.

Возрастание первичной температуры, глубины зарождения и средней основности магм с уменьшением геотермических градиентов при переходе от подвижных складчатых зон с тонкой литосферой к устойчивым жестким областям приводили в соответствии с рассмотренными выше закономерностями к увеличению разнообразия гидротермального оруденения, к уменьшению в среднем глубины его зарождения, к возрастанию содержания в нем серы и халькофильных компонентов. Обычно выдержанность величин геотермических градиентов и магмогенерирующих тектонических деформаций в земной коре на больших площадях является причиной огромной протяженности многих однотипных по составу и фаціальности магматических поясов и связанных с ними металлогенических провинций.

Заключение. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют, что главным магмообразующим процессом является не отделение выплавов в частично расплавленных глубинных породах, а фракционирование глобального магматического океана и продуктов фрикционного и декомпрессионного плавления его дифференциатов. Это обусловлено в секстиллионы раз меньшей вязкостью (первые паузы) расплавов

по сравнению со слабо подплавленными породами (10^{21} – 10^{22} пуаз) и примерно во столько же раз большей скоростью магматического фракционирования по сравнению со скоростью гипотетической дифференциации подплавленных пород. С ростом глубинности самостоятельная флюидная фаза появляется при все большем содержании твердых фаз, когда в небольшом количестве расплава достигаются высокие концентрации рудных и выносящих их летучих компонентов. Это объясняет значительно большую рудоносность глубинных гидротерм по сравнению с малоглубинными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балашов Ю. А. Изотопно-геохимическая эволюция мантии и коры Земли. – М. : Наука, 1985. – 221 с.
2. Добрецов Н. Л. Основы геотектоники и геодинамики. – Новосибирск : Изд-во НГУ, 2011. – 492 с.
3. Риигвуд А. Е. Происхождение Земли и Луны. – М. : Недра, 1982. – 294 с.
4. Смирнов С. С. Избранные труды. – М. : Наука, 1985. – 248 с.
5. Таусон Л. В. Геохимические типы и рудоносность гранитоидов. – М. : Наука, 1977. – 279 с.
6. Шкодзинский В. С. Генезис литосферы и алмазов. Модель горячей гетерогенной аккреции Земли. – Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015. – 687 с.
7. Шмидт О. Ю. Происхождение Земли и планет. – М. : Изд-во АН СССР, 1962. – 132 с.

8. Harris P. G., Tozer D. C. Fractionation of iron in the Solar system // *Nature*. – 1967. – Vol. 215, no. 5109. – Pp. 1449–1451.

9. Hofmeister A. M. Effect of hadean terrestrial magma ocean on crust and mantle evolution // *J. Geophys. Res.* – 1983. – Vol. B88, no. 6. – Pp. 4963–4983.

10. O'Neil H. S. Oxygen fugacity and siderophile elements in the mantle: implications for the origin of the Earth // *Meteoritics*. – 1990. – Vol. 25, no. 4. – Pp. 395.

REFERENCES

1. Balashov Yu. A. *Izotopno-geokhimicheskaya evolyutsiya mantii i kory Zemli*. Moscow, Nauka, 1985, 221 p.

2. Dobretsov N. L. *Osnovy geotektoniki i geodinamiki*. Novosibirsk, Izdatel'stvo NGU, 2011, 492 p.

3. Riigvud A. E. *Proiskhozhdenie Zemli i Luny*. Moscow, Nedra, 1982, 294 p.

4. Smirnov S. S. *Izbrannyye trudy*. Moscow, Nauka, 1985, 248 p.

5. Tauson L. V. *Geokhimicheskie tipy i rudosnost' granitoidov*. Moscow, Nauka, 1977, 279 p.

6. Shkodzinskiy V. S. *Genezis litosfery i almazov. Model' goryachey geterogennoy akkretsii Zemli*. Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing, 2015, 687 p.

7. Shmidt O. Yu. *Proiskhozhdenie Zemli i planet*. Moscow, Izdatel'stvo AN SSSR, 1962, 132 p.

8. Harris P. G., Tozer D. C. Fractionation of iron in the Solar system. *Nature*, 1967, vol. 215, no. 5109, pp. 1449–1451.

9. Hofmeister A. M. Effect of hadean terrestrial magma ocean on crust and mantle evolution. *J. Geophys. Res.*, 1983, vol. B88, no. 6, pp. 4963–4983.

10. O'Neil H. S. Oxygen fugacity and siderophile elements in the mantle: implications for the origin of the Earth. *Meteoritics*, 1990, vol. 25, no. 4, pp. 395.

Шкодзинский Владимир Степанович – доктор геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук. Пр. Ленина, 39, Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия, 677000. <shkodzinskiy@diamond.ysn.ru>

Shkodzinskiy Vladimir Stepanovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences. 39 Prospect Lenina, Yakutsk, Respublika Sakha (Yakutiya), Russia, 677000. <shkodzinskiy@diamond.ysn.ru>