

ПРИРОДА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ



В. С. Шкодзинский

Протекание разнообразных геологических процессов на Земле приводило к формированию месторождений различных полезных ископаемых, к преобразованию рельефа, климата и экологии. Поэтому выяснение направления и природы эволюции данных процессов имеет большое значение и для оценки будущего нашей планеты. Решение этих задач требует знания особенностей геологических процессов на разных стадиях развития Земли и, следовательно, изучения пород разного возраста во всех регионах нашей планеты.

В XVIII – XIX столетиях знания об этих процессах были очень ограниченными и часто ошибочными. Поэтому единственно возможным подходом в то время были попытки выделять в далёком прошлом те же геологические процессы, которые существуют в настоящее время. В соответствии с этим Ч. Лайелем был выдвинут принцип актуализма, согласно которому прошлые геологические процессы не

отличались от современных. Такой подход во многом сохранился и до настоящего времени. Этому способствует господствующая в геологии гипотеза О. Ю. Шмидта [1] о холодной гомогенной аккреции нашей планеты, согласно которой температура земной поверхности в раннем докембрии (4,0 – 1,6 млрд лет назад) существенно не отличалась от современной.

Однако в XX столетии появились данные об отсутствии в раннем докембрии типичных для поздних этапов эволюции Земли глубоководных осадков, мощных толщ крупновалунных конгломератов, щелочных магматических пород, крупных месторождений олова и вольфрама, свидетельствующие о направленной необратимой эволюции геологических процессов [2]. Однако причины этой эволюции были непонятны. Полученные в последние десятилетия данные о горячей гетерогенной аккреции Земли [3] полностью объясняют эти причины.



**Владимир Степанович
Шкодзинский,**

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН

На фото вверху – так могла выглядеть поверхность Земли на начальной стадии её геологической эволюции (fishki.net/36738-krasivye-fotografii-vulkanov-100-foto.html).

По этим данным земное ядро сформировалось раньше силикатной мантии и изначально имело более высокую температуру, вследствие значительно большей скорости слипания железных частиц под влиянием магнитных сил, чем силикатных [4, 5]. Это подтверждается отсутствием признаков истощения мантийных пород хорошо растворимыми в железе сидерофильными элементами [6] и кислородом, свидетельствующим о том, что вещество ядра и мантии никогда не было перемешано в земных недрах. Такое образование согласуется с данными по короткоживущим изотопам о возникновении ядра не позже чем через 30 – 50 млн лет после начала формирования Солнечной системы [7], то есть практически одновременно с Землёй. Оно подтверждается существованием скачка температуры примерно в 1000°C на границе мантии с ядром [8]. Следовательно, аккреция была гетерогенной.

Выпадавшие на сформировавшееся ядро силикатные частицы плавилась в результате импактного тепловыделения. Придонные части возникшего океана магмы частично кристаллизовались под влиянием роста давления новообразованных верхних частей и сформировали из осаждавшихся кристаллов (кумулятов) породы нижней мантии, а из остаточных расплавов – различные слои магматического океана. Вследствие незначительной ещё его глубины и пониженной силы тяжести на ранней небольшой Земле такое придонное фракционирование магм длительное время было малобарическим, поэтому в соответствии с экспериментальными данными остаточные расплавы варьировали по составу от толеитов (бедных щелочами и богатыми кальцием пород) до гранитов. Только существование массовых малобарических процессов раннего синаккреционного фракционирования объясняет широкое распространение на Земле гранитов и толеитов. Происхождение магм древних гранитоидов до сих пор не удавалось убедительно объяснить никакими другими процессами. Разные по составу остаточные расплавы сформировали расслоенный магматический океан глубиной около 240 км. Вследствие возрастания плотности с глубиной в нём не возникла обширная конвекция, и он в течение всей истории Земли затвердевал сверху вниз преимущественно в результате кондуктивных теплопотерь в атмосферу и космос [3].

Представления о гетерогенной горячей аккреции Земли впервые без допущения существования нереальных процессов полностью объясняют все особенности раннедокембрийской и более поздней эволюции нашей планеты. Она сформировалась около 4,56 млрд лет назад. Вследствие существования океана магмы до 4 млрд лет назад земная поверхность была полностью покрыта расплавом, что является причиной казавшегося загадочным отсутствия на Земле более древних пород и кратеров гигантской метеоритной бомбардировки, завершившейся около 3,9 млрд лет назад. Такие кратеры широко распространены на Луне, Марсе и Меркурии. Это обусловлено относительно небольшим размером этих тел и поэтому затвердеванием на них океанов магмы до окончания гигантской бомбардировки.

После завершения аккреции кристаллизация верхнего кислого слоя магматического океана привела к формированию огромного количества гнейсов из кумулатов и древних гранитов из остаточных расплавов. Это объясняет раннее образование кристаллической коры континентов, её выдержанный на всей Земле преимущественно кислый состав и большую мощность (до 30 – 40 км). Природу этих особенностей невозможно понять, исходя из предполагавшихся ранее взглядов о возникновении кристаллической коры в результате метаморфизма (изменения) осадочных пород под влиянием гипотетических потоков глубинного тепла. Однако такие мощные осадочные толщи и потоки тепла в хорошо изученной поздней истории Земли не были известны, поэтому трудно объяснить их природу.

Частичное обособление остаточных расплавов при кристаллизации магматических гнейсов (ортогнейсов) обусловило образование в них большого количества незначительных изолированных гранитоидных выделений. Это полностью решает проблему природы региональной гранитизации докембрия, которая приблизительно в последние две сотни лет была предметом острой бесплодной дискуссии среди специалистов.

Рост плотности с глубиной в расслоенном магматическом океане препятствовал опусканию в нём остывавших расплавов. Но после начала их кристаллизации они вместе с начавшими формироваться на них осадочными породами тонули вследствие значительного (до 10%) возрастания их плотности. Ниже расположенные более основные (богатые кальцием и магнием) расплавы всплывали. Это объясняет пёстрый состав гнейсовых комплексов, значительные колебания их основности, частое присутствие среди них пород осадочного происхождения (мраморов, кварцитов, высокоглинозёмистых гнейсов).

Большая пластичность высокотемпературной земной коры обусловила невозможность существования на ней высоких гор и глубоких впадин и явилась причиной отсутствия среди раннедокембрийских пород высокометаморфизованных глубоководных осадков и мощных толщ конгломератов. Большая температура коры препятствовала конденсации в ней рудоносных эманаций магматического океана и привела к рассеиванию их в газопаровой оболочке. Это является причиной отсутствия в гнейсах синхронного с ними богатого гидротермального оруденения и возникновения крупных стратиформных (осадочных) месторождений преимущественно в протерозое (2,5 – 0,54 млрд лет назад), когда газопаровая оболочка интенсивно остывала [3].

Высокотемпературность минералов гнейсов определяется магматическим происхождением большинства из них, а не проявлением труднообъяснимых более поздних процессов разогрева земной коры, как обычно предполагается. Это подтверждается высокотемпературностью всех огромных объёмов гнейсов, отсутствием в них температурной зональности и идентичностью их минералов с таковыми гранитоидов.

Температура процессов аккреции была прямо пропорциональна квадрату радиуса падавших тел

вследствие сокращения удельных теплотерь на излучение при увеличении их размера [6]. Поэтому неизбежное постепенное укрупнение планетезималей в протопланетном диске приводило к резкому возрастанию температуры накапливавшегося материала. По расчётам различных исследователей величина такого возрастания температуры составляла от 800 до 3500° С (кривые ВА и КА на рис. 1). Первичная температура мантии (кривые К и Р) была равна температуре аккреции, увеличенной на её прирост за счёт адиабатического сжатия (на величину до 700°). Следовательно, температура нижней мантии сначала была значительно меньше, чем верхней, а не наоборот, как всегда предполагается. Поэтому геотермический градиент в земных недрах в раннем докембрии был обратным по отношению к современному. Аналогичный вывод был получен для Луны [6].

Несмотря на очевидность этого положения, оно не учитывается во всех многочисленных публикациях, посвящённых ранней истории Земли. Между тем из него следует очень важный вывод о том, что в раннем докембрии из нижней мантии не мог всплывать более

холодный и поэтому плотный материал в горячую верхнюю. Следовательно, в это время не существовали нижнемантийные плюмы (восходящие потоки более горячего вещества), являющиеся главным двигателем современных геологических процессов. Поэтому не было океанических областей и геодинамических обстановок современного типа. Это определяло неповторимость ранней истории Земли и свидетельствует о бесперспективности многочисленных поисков аналогов современных обстановок в этот период.

Вследствие отсутствия нижнемантийных плюмов магмы зеленокаменных поясов (обширных областей распространения почти метаморфизованных древних вулканических пород) поднимались из верхнемантийного постаккреционного магматического океана, а не из нижней мантии, как в более поздние этапы. Это подтверждается участием в формировании этих поясов всех магм постаккреционного океана (ультраосновных, основных, средних и кислых), а также пониженным в среднем содержанием в основных породах зеленокаменных поясов и гнейсовых комплексов СаО и TiO₂ по сравнению с типичными плюмовыми базитами молодых срединно-океанических хребтов и траппов (рис. 2). Это связано с тем, что данные компоненты являются самыми высокотемпературными конденсатами

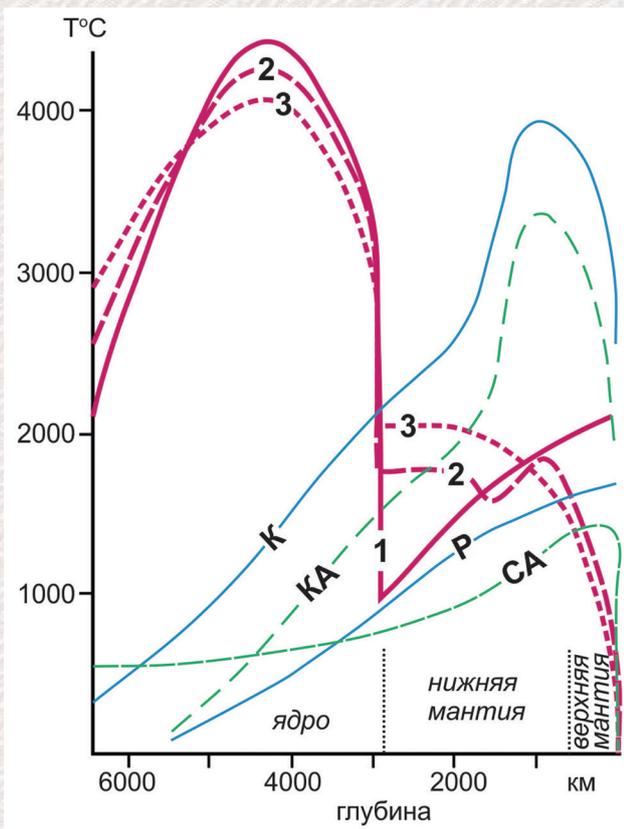


Рис. 1. Эволюция значений температуры аккреции Земли, по расчетам Каулы (КА) и В. С. Сафронова (СА) [9]. Первичная зависимость температуры от глубины, по данным Каулы (К), А. Е. Рингвуда (Р) [9, 6], и зависимость, принятая для раннего докембрия (1), позднего протерозоя (2) и настоящего времени (3)

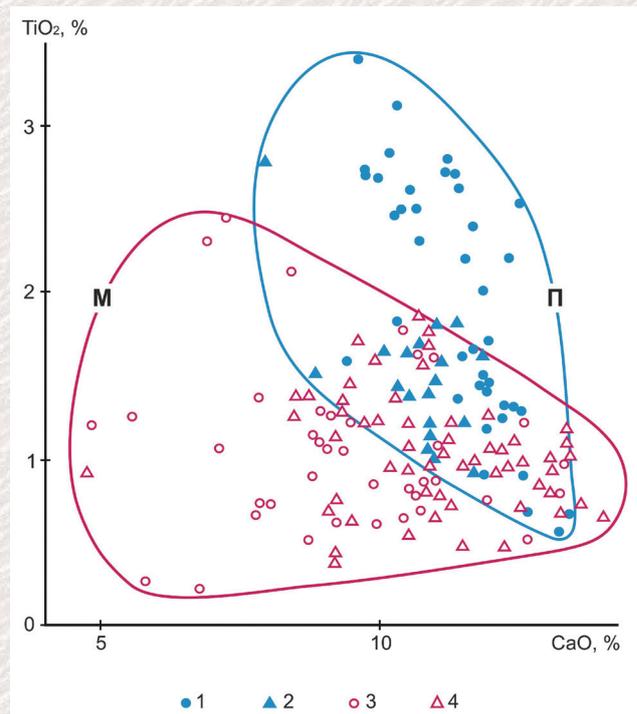


Рис. 2. Соотношение содержаний TiO₂ и СаО в базитах, зарождавшихся в нижнемантийных плюмах (П) и в постаккреционном магматическом океане (М):
1 – 4 – базиты срединно-океанических хребтов (1), траппов (2), зеленокаменных поясов (3) и Курультинского гранулитового комплекса Алданского щита (4). Используются данные [10, 11]

протопланетного диска (более 1400 К) [6]. Поэтому они наиболее интенсивно выпадали при аккреции нижней мантии, и содержание их в ней выше, чем в верхней.

Магматический океан, вследствие его высокой текучести, и сформировавшаяся из него кислая кристаллическая кора сначала должны были покрывать всю поверхность Земли. Перемещения вещества при рассмотренной выше плотностной дифференциации приводили, в основном, к пластическим деформациям коры. Деформациям способствовала большая величина силы Кориолиса в это время. Как показали выполненные расчёты [3], вследствие примерно в 8 раз большей скорости вращения Земли в раннем докембрии, вещество постаккреционного магматического океана под влиянием этой силы в области экватора всплывало под углом около 8° к земной поверхности (то есть почти горизонтально), сильно отклоняясь к западу (рис. 3, а). Это приводило к интенсивному пластическому течению вещества, к возникновению в нём гнейсовидных текстур, к складчатым деформациям кристаллической коры, к широкому распространению субмеридиональных прогибов и восточных падений тел гнейсов. Такие залегания до сих пор характерны для гнейсовых комплексов Алданского и Анабарского щитов.

Вследствие пластических деформаций происходило большое постепенное сокращение площади кристаллической коры, судя по очень широкому развитию

в ней интенсивной складчатости и крутых падений тел метаморфических пород. По имеющимся оценкам углы падения тел архейских пород (древнее 2,5 млрд лет) в среднем составляют $60 - 70^\circ$ [12]. В этом случае площадь их выхода на земной поверхности в результате складчатости уменьшилась в $1:\sin 65^\circ = 1:0,4226 \sim 2,3$ раза. Площадь содержащих кристаллическую кору древних платформ составляет 105 млн км². Площади складчатых и субокеанических областей, содержащих её фрагменты, равны соответственно 42 и 93 млн км² [13]. При этих значениях до времени тектонических деформаций кристаллическая кора должна была занимать площадь примерно $(105 + 42 + 93) \times 2,3 = 558$ млн км². С учётом существования сдвоенных по надвигам разрезов эта величина должна быть ещё больше. Современная площадь поверхности Земли оценивается в 510 млн км². Следовательно, приведённый примерный расчёт подтверждает, что кислая кристаллическая кора сначала покрывала всю земную поверхность. Это согласуется с выводом об отсутствии в раннем докембрии океанических областей современного типа.

Под влиянием сокращения площади кристаллической коры в конце протерозоя (850 – 540 млн лет назад), видимо, возникали участки, где она частично отсутствовала, и на земной поверхности обнажались верхнемантийные породы. Эти участки не содержали магматические породы, типичные для современных океанов. Они занимали площади между протократонами (наиболее устойчивыми областями) с мощной кристаллической корой. На них преимущественно возникали молодые осадочные бассейны и складчатые пояса.

Таким образом, вследствие горячего образования Земли и существования на ней глобального магматического океана геологические процессы в раннем докембрии принципиально отличались от более поздних. Эти отличия полностью объясняют специфику самых древних пород нашей планеты.

С течением времени нижняя мантия постепенно разогревалась под влиянием горячего ядра, а верхняя остывала вследствие теплоотдачи в более холодную земную кору (линия 2 на рис. 1). По мере разогрева в прилегающей к ядру нижней мантии начали формироваться потоки всплывавшего горячего вещества (см. рис. 3, а). Они достигали ещё непрогретых частей мантии и приводили к более быстрому повышению их температуры. Под влиянием этого произошла инверсия распределения температуры и возник современный геотермический градиент (линия 3 на рис. 1). Это явление не могло не отразиться на геологических процессах. Оно обусловило существенные отличия фанерозойских процессов (протекавших в последние 540 млн лет) от раннедокембрийских.

Казалось бы, в ходе эволюции должна уменьшаться интенсивность протекавших на ней геологических процессов вследствие остывания нашей планеты и завершения её гравитационной дифференциации. Однако геологические данные свидетельствуют об обратном. Ярким доказательством этого является показанное на рис. 4 возрастание средней мощности осадочных

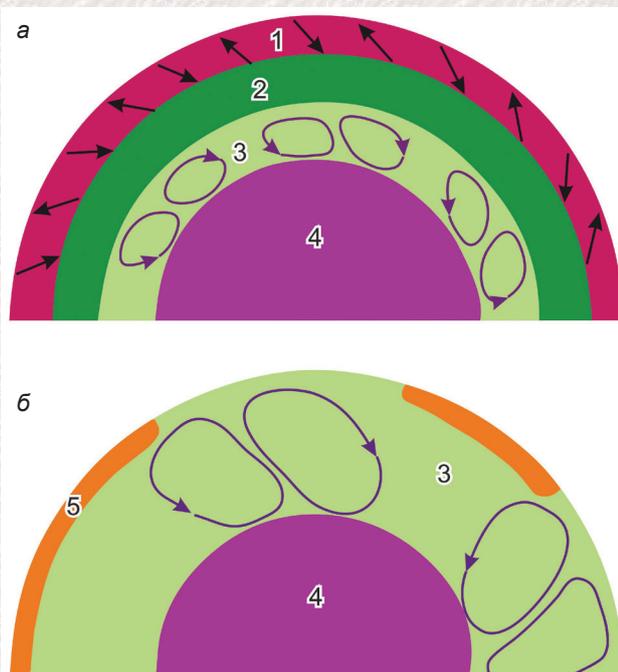


Рис. 3. Характер мантийной конвекции в раннем докембрии (а) и в фанерозое (б):

1 – постаккреционный магматический океан;
2 – неконвектирующая мантия; 3 – конвекция в мантии; 4 – ядро; 5 – континентальная литосфера.
Стрелками указано направление перемещений вещества

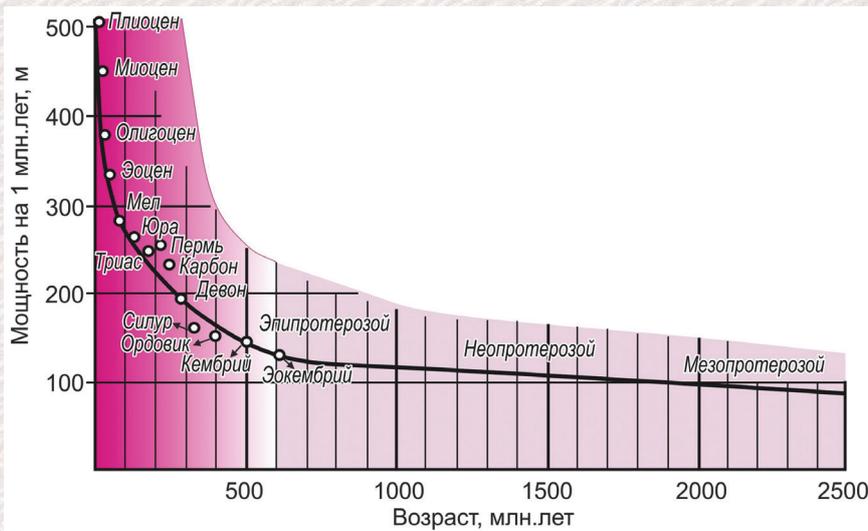


Рис. 4. Возрастание мощности образующихся осадочных пород в течение истории Земли [14].

Возрастание интенсивности цвета примерно отражает увеличение интенсивности тектонических процессов

пород, накопившихся за 1 млн лет, от 150 м в конце протерозоя до 500 м в плиоцене (5,3 – 1,8 млн лет назад) [14]. Это указывает на возрастание скорости накопления осадков и тектонической активности в течение фанерозойской истории. Эвгеосинклинальные (самые ранние) основные магматические породы складчатых поясов появились в конце протерозоя [10, 14]. Это событие, видимо, означает начало прорыва из нижней мантии не крупных плюмов, возникновение в участках их подъема первых зон растяжения литосферы, столкновения и поддвига литосферных плит и относительно небольших океанических впадин.

В начале этого события интенсивность протекания тектонических и вулканических процессов была минимальной, так как подъем магм из постагреционного магматического океана в основном завершился вследствие его значительного затвердевания, а существенно его подъема плюмов из нижней мантии еще не было. Небольшое проявление вулканических процессов привело к уменьшению содержания углекислоты в атмосфере, к ослаблению связанного с ней тепличного эффекта и возникновению грандиозного оледенения в криогении (850 – 635 млн лет назад). В это время моря были покрыты льдом даже в районе экватора.

Самая древняя океаническая кора имеет юрский возраст [14]. Следовательно, океаны современного типа появились только около 200 млн лет назад, а самые глубокие из них еще позже. Примерно в это же время появились высокие горы, судя по возникновению мощных (до 10 км) толщ конгломератов [2]. Это свидетельствует о том, что к данному периоду произошла полная инверсия распределения температуры в мантии и появились мощные нижнемантийные плюмы (см. рис. 3, б). Это привело к образованию современных океанических областей и обширных магматических провинций, к

появлению значительных перемещений литосферных плит и высоких гор в областях их столкновения. Таким образом, в фанерозое тектоническая и магматическая активность на Земле неуклонно возрастала, что связано с завершением инверсии температуры в мантии и с увеличением количества и размера поднимающихся нижнемантийных плюмов.

В кристаллизовавшихся магмах осаждение образующихся твердых фаз происходило в среде расплава с вязкостью в тысячи раз меньшей, чем слабо подплавленных пород. Поэтому разделение расплава и кристаллов (магматическое фракционирование) в них происходило относительно быстро и является единственной причиной разнообразия состава магматических пород. Подъем остаточных расплавов из нижних частей кислого

слоя сопровождался формированием различных кислых магм. Это объясняет массовое образование гранитоидов в раннем докембрии. В фанерозое выжимание и всплытие наиболее кислых пластичных частей кристаллической коры в областях сжатия (коллизии) приводило к их фрикционному и декомпрессионному плавлению и образованию характерных для этих областей огромных гранитных батолитов. Выжимание еще не затвердевших плагиоклазовых кумулатов объясняет формирование огромных тел автономных анортозитов преимущественно в протерозое.

Процессы высокobarического фракционирования в придонном перидотитовом слое магматического океана обусловили образование щелочных, карбонатитовых и кимберлитовых магм на древних участках континентов. Очень длительное (почти 4 млрд лет) накопление расплавофильных компонентов в остаточных расплавах являются причиной гигантского содержания редких элементов (до десятков тысяч хондритовых норм) в карбонатитах и в щелочных породах. Вследствие кристаллизации расслоенного магматического океана сверху вниз его придонный слой фракционировал наиболее поздно. Это обусловило формирование большинства карбонатитов и кимберлитов в последние полмиллиарда лет [3].

Декомпрессионное плавление наиболее легкоплавких пород нижней мантии, эклогитов (затвердевших расплавов раннего синаккреционного океана), в поднимающихся в фанерозое плюмах привело к образованию большого количества толеитовых магм и их щелочных и кислых остаточных расплавов.

Таким образом, учет современных данных о горячей гетерогенной аккреции Земли позволяет убедительно объяснить все особенности её геологической эволюции. В последние полмиллиарда лет тектоническая и магматическая активность нашей планеты неуклонно

возрастала. Такая тенденция может существенно увеличивать в будущем частоту возникновения интенсивных геологических явлений.

Список литературы

1. Шмидт, О. Ю. Происхождение Земли и планет / О. Ю. Шмидт. – М. : Изд-во АН СССР, 1962. – 132 с.
2. Яншин, Н. Л. Вероятная эволюция геофизических полей в истории Земли / Н. Л. Яншин // Эволюция геологических процессов в истории Земли. – М. : Наука, 1993. – С. 81–88.
3. Шкодзинский, В. С. Петрология литосферы и кимберлитов (модель горячей гетерогенной аккреции Земли) / В. С. Шкодзинский. – Якутск : Издательский дом СВФУ, 2014. – 452 с.
4. Harris, P. G. Fractionation of iron in the Solar system / P. G. Harris, D. C. Tozer // Nature. – 1967. – 215 (5109). – P. 1449–1451.
5. Войткевич, Г. В. Происхождение и химическая эволюция Земли / Г. В. Войткевич. – М. : Недра, 1983. – 168 с.

6. Рингвуд, А. Е. Происхождение Земли и Луны / А. Е. Рингвуд. – М. : Недра, 1981. – 294 с.

7. Литасов, К. Д. Современные представления о составе ядра Земли / К. Д. Литасов, А. Ф. Шацкий // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 50, № 1. – С. 31–63.

8. Bukowski, M. S. Taking the core temperature / M. S. Bukowski // Nature. – 1999. – № 6752. – P. 432–433.

9. Федорин, Я. В. Модель эволюции ранней Земли / Я. В. Федорин. – Киев : Наукова думка, 1991. – 112 с.

10. Магматические горные породы. Основные породы / Андреева Е. Д. [и др.]. – М. : Наука, 1985. – 368 с.

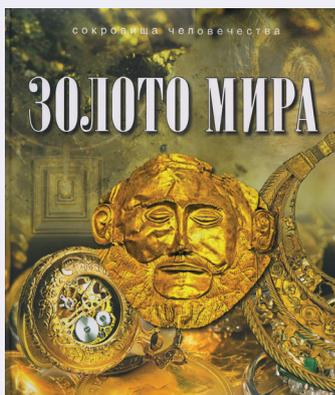
11. Геологическое строение западной части Алдано-Станового щита и химические составы пород раннего докембрия (Южная Якутия) / А. П. Смелов [и др.]. – Якутск : Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2009. – 168 с.

12. Черкасов, Р. Ф. Архей Алданского щита / Р. Ф. Черкасов. – М. : Наука, 1976. – 161 с.

13. Таблицы физических величин / В. Г. Аверин [и др.]. – М. : Атомиздат, 1976. – 1006 с.

14. Салоп, Л. Н. Геологическое развитие Земли в докембрии / Л. Н. Салоп. – Л. : Недра, 1982. – 334 с.

НОВЫЕ КНИГИ

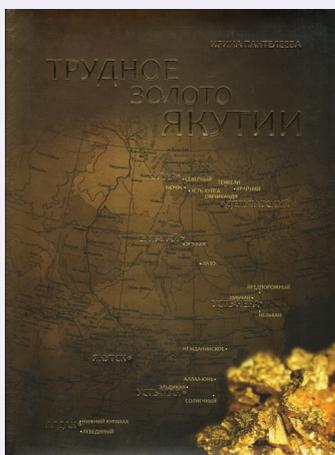


Баженов, Ю. М. Золото мира / Ю. М. Баженов. – М. : ОЛМА Медиа Групп, 2016. – 143, [1] с. : ил. – (Подарочные издания. Сокровища человечества).

Блеск и роскошь золота неотразимо притягательны. Из него делаются уникальные по своей красоте и ценности ювелирные изделия, золото используется для украшения и подчеркивания сакральности предметов культа всех религий, является мерилем ценности и играет важнейшую роль в экономике. Получение именно этого драгоценного металла было главной целью алхимиков средневековья.

Поиски месторождений золота послужили стимулом Великих географических открытий, в результате чего были открыты целые континенты! В попытках быстро разбогатеть тысячи искателей приключений подхватывали «золотую лихорадку» и, покидая насиженные места, устремлялись к своей мечте. Государства снаряжали и снаряжают поисковые экспедиции для обнаружения месторождений золота на своей территории. Важно отметить, что целый ряд интереснейших материалов публикуется на русском языке впервые.

Книга богато иллюстрирована, она послужит прекрасным подарком для любителей истории, географии и ценителей красоты.



Пантелеева И. Трудное золото Якутии : к 90-летию золотодобывающей промышленности Республики Саха (Якутия) / И. Пантелеева. – Якутск, 2014. – 336 с.

Книга лауреата республиканских премий «Золотое перо» и «За вклад в журналистику» Ирины Пантелеевой (Гусевой) рассказывает об истории государственной золотодобычи в Якутии, ее флагмана – ордена Трудового Красного Знамени производственного объединения «Якутзолото». На основе документов Национального архива РС(Я) восстановлена хроника становления и развития первого в республике государственного золотодобывающего предприятия – от «Ягзолтреста», образованного 17 марта 1924 г., до ПО «Якутзолото», производственная деятельность которого оборвалась в 1991 г.