

УДК: 550.2+553.078

В. М. ЧАЙКА, Э. В. УЖГАЛИС, Э. М. НЕКРАСОВ

РЕЛИКТОВАЯ КОСМИЧЕСКАЯ
МЕТАЛЛОГЕНИЯ ЗЕМЛИ

При изучении глобальной геологии и металлогении земного шара в аспекте влияния на историю Земли космических факторов в последние 10 лет были получены важные научные обобщения и факты, требующие нового осмысливания и анализа. Это касается, прежде всего, сферы вопросов возникновения и развития нашей планеты как космического тела.

К числу наиболее интересных и ранних обобщений следует отнести установление М. И. Калгановым [3] в структуре древних материков глобальных «железных поясов» Земли. Последние состоят из природных скоплений железных руд на участках поясов, пересекающих наиболее древние—архейские участки земной коры (докембрийские щиты). Как известно, М. И. Калганов впервые показал, что эти гигантские полосовые структуры ранней Земли имеют космическое происхождение и составляющее их железо внеземной природы.

За 10 лет, прошедших с момента публикаций работ М. И. Калганова, авторы настоящей работы—его товарищи и друзья, разделяющие эти идеи, продолжали исследования в рамках проблемы. Были собраны и проанализированы многочисленные факты, позволяющие более глубоко обосновать представления о влиянии космических источников на состав Земли. Этой работе способствовали психологические тенденции современного глубокого взаимопроникновения наук о Космосе и наук о Земле. Сейчас в геологии имеются важные научные синтезы, явившиеся следствием этого взаимопроникновения фундаментальных разделов естествознания (сравнительная планетология, космическая геология и геохимия и т. д.). Железорудные пояса Земли выражены на ее поверхности в виде прерывистых структур локального преобразования под влиянием последующих тектоно-магматических процессов первичной земной коры. Наибольшее значение при этом играют процессы гранитизации протокры [6, 11], обуславливающие периодическую регенерацию руд и рудных структур с соответствующей миграцией части рудного вещества [19]. В этой связи в качестве важнейших свидетелей существования ранних железорудных поясов Земли следует считать наиболее древние месторождения железных руд на щитах (с возрастом 2,8 млрд. лет и древнее), менее всего измененные процессами деформаций, метаморфизма и гранитизации. Такие железные руды известны в Западной Гренландии, на щитах Африки, Австралии и в дру-

гих регионах мира, представляя реликтовые структуры первичной коры континентов.

Именно для этих руд отмечаются необычно высокие концентрации ряда элементов (германий, золото и др.), первичные источники которых следует, скорее всего, искать в космическом железном веществе, вошедшем, вероятно, в состав рудных железистых кварцитов. Эта вероятность становится все более обоснованной из-за прямых указаний на космические источники вещества. Наиболее ярким фактором является установление Аппелом [12] в древнейших гренландских рудах из Исуа (возраст более 3,7 млрд. лет) многочисленных округлых, реже угловатых зерен хромита с составом, тождественным составу метеоритных хромитов из океанических осадков.

Известно также, что древнейшие магнетитовые кварциты отличаются сравнительно высокими концентрациями германия в ассоциации с рядом халькофильных элементов [2]. При этом характерно, что германий отчетливо коррелируется с базитовым вулканическим материалом, составляющим основу архейских железорудных формаций. Эти же кварциты местами сильно обогащены золотом; так, железистые кварциты ЮАР содержат до 2—8 г/т золота. Концентрации золота отмечаются также и в архейских железных рудах Якутии и КМА [4]. Золото в железистых кварцитах архея ассоциирует с концентрациями никеля, кобальта, сурьмы, мышьяка, германия и галлия [19].

В современной структуре щитов железорудные пояса, вернее их фрагменты, входят в свою очередь в состав так называемых зеленокаменных поясов—главных структур докембрийских щитов. С зеленокаменными поясами связана практически вся высокая металлоносность докембрия; с ними связаны, в частности, месторождения золота, урана, титана, цветных и редких металлов. Согласно модели Гликсона-Анхаузера, зеленокаменные пояса представляют реликтовые зоны, оставшиеся от гранитизации «первичной андезитовой» коры. Эта модель лучше всего объясняет высокую насыщенность зеленокаменных поясов металлами, причем в месторождениях среди поясов отмечаются подвижные при гранитизации элементы цветных металлов, сера и др., поступавшие сюда из коры, а также малоподвижные сидерофильные элементы и металлы, остающиеся на месте. Железорудные пояса ранней коры оставались при гранитизации весьма устойчивыми, сохраняясь в первичном залегании внутри зеленокаменных комплексов, либо в виде реликтовых залежей среди окружающих гранитов и гнейсов (по направлению простиранья поясов).

Месторождения железистых кварцитов находятся в очень тесных структурных взаимоотношениях с сульфидными месторождениями ряда металлов. В зонах, смежных с железорудными на архейских щитах, известны промышленные концентрации полиметаллов с необычно высокими примесями редких и рассеянных элементов (сурьма, ртуть, висмут, олово, платиноиды и др.), часть из которых совершенно не свойственна металлогении архея. В Намибии, например, на месторождении Цумеб полиметаллические сульфидные руды содержат крайне высокие промышленные концентрации сульфидов германия и галлия. Отметим, что

эти металлы обычно ведут себя как сидерофилы или накапливаются при эпигенезе, а также в органическом веществе. Колчеданные и полиметаллические руды архея Австралии, Марокко и Алжира также характеризуются необычными примесями сурьмы, висмута, ванадия, олова, вольфрама, урана и др. металлов [11].

В Южной Африке железорудным поясам оказывается смежным знаменитый золото-сурьмяный пояс Мерчисон с мировыми запасами сурьмы и проявлениями необычных концентраций ряда металлов, в частности, ртути [27]. В архее Финляндии имеется целая серия сульфидных месторождений (Оутокумпу, Сайняйски и др) с необычными для таких месторождений примесями сурьмы, олова, золота и др. металлов. Интересны составы архейских сульфидных месторождений Австралии, в особенности месторождения пирит-полиметаллических руд Найрие [22]. Здесь в рудах развиты скопления манганохромита в сростках с палладиевой сурьмой, в которой содержится: палладия 31%, сурьмы 67,4%, железа 0,7%, меди 0,5%. По новым представлениям такая пестрота состава сульфидных руд является характерной особенностью металлогении архея [8].

Если суммировать и проанализировать все имеющиеся факты по концентрации необычных металлов в архейских рудах, то намечается определенный ряд рудных компонентов и их количественных сочетаний типа железо, никель, кобальт, фосфор, золото, мышьяк, медь, сурьма, цинк, германий, галлий. Независимо от наших оценок массы упомянутых металлов в металлогении архея, в космохимии выделен совершенно аналогичный ряд примесей в железных метеоритах [5, 31, 33], а сам ряд отражает порядок конденсации металлов в первичной Солнечной туманности.

В этом «космическом» ряду германий в ассоциации с сурьмой и медью (группа умеренно летучих) характеризует космохимический «порог» отделения железа от хондритового расплава. Этим можно объяснить, в частности, широкое распространение указанных трех элементов в архейских рудах различных типов и их «сквозную» роль в формировании как сидерофильных, так и халькофильных природных рудных концентраций. Отметим также, что в железных метеоритах имеется отчетливая положительная корреляция никеля с кобальтом, золотом и мышьяком и отрицательная—с металлами платиновой группы. В то же время низкие концентрации германия в этих метеоритах—признак длительного остывания вещества метеоритов [33], что является следствием зарождения метеоритов в центральной части первичной Солнечной туманности. По современным выводам астрономов внутренняя часть туманности состоит из металлической фазы конденсации, а внешняя—из неметаллической. Как известно, именно этим обусловлено различие в строении Земли, Венеры и Меркурия с крупными металлическими ядрами, Луны и Марса, имеющими небольшие ядра [17].

Ряд исследователей [16, 21] полагает, что известная загадка дефицита массы ядра Земли может быть объяснена также наличием в ядре примеси металлов рассматриваемого ряда, а также таких элементов как калий, углерод и азот. Согласно модели Ганапати-Андерса, боль-

шинство из элементов космического ряда содержится в коре и мантии Земли в количествах, недостаточных к их космическим отношениям с кремнеземом.

В свое время А. П. Виноградов [1] показал, что хондритовая модель зарождения и эволюции Земли не обеспечивает баланса между железом в предполагаемом базальтовом исходном веществе Земли, массой железных руд в месторождениях и массой ядра. Дефицит масс может быть снят только за счет привлечения метеоритного железа, накапливающегося при процессах аккреции и аккумуляции исходного вещества протопланеты. В этой связи следует отметить, что модель хондритовой мантии как исходного вещества для выплавления коры Земли совершенно не обеспечивает, судя по многочисленным расчетам разных авторов, формирования в известных объемах калиевых гранитов и многих месторождений, особенно урана. Известны представления Ван Беммелена [34], который, исходя из этих данных, пришел к выводу, что вся гранитная кора Земли возникла извне на самой ранней стадии ее зарождения, независимо от того, горячим или холодным путем образовалась наша планета. Только после докембрия эта «внеземная» кора объединилась с мантией с образованием коры субокеанического типа.

Другая проблема, вытекающая из хондритовой модели,—это источники энергии, поскольку энергия аккреции и радиораспада урана, тория и калия недостаточна для всего переплавления аггломерированного вещества протопланеты. Современная астрономия наметила новые возможности и нетрадиционные источники внешней энергии—это энергия от вспышек сверхновых [29] или энергия от радиоактивного распада сверхтяжелых элементов [10].

Другая точка зрения высказана Дж. Смитом [9] и рядом других авторов, которые полагают, что гравитационное ускорение во время аккреции, образования ядра и радиоактивного разогрева обеспечивает более чем достаточную энергию, чтобы полностью расплавить Землю.

Имеются достаточно многочисленные факты о присутствии материала сверхновых во включениях метеоритов Алленде, Оргилл, Мурчисон и др. [15, 24]. Материал содержался также в первичной Солнечной туманности, создавая известные аномалии металлов и их изотопов, типичные для примитивных метеоритов, лучше всего отражающих состав первичной солнечной туманности. Именно эти аномалии могут быть объяснены вспышками сверхновых, имитирующих образование первичных газовых туманностей в Космосе [17]. С другой стороны, в тех же примитивных метеоритах типа Алленде обнаруживаются изотопы (типа ^{26}Al), свидетельствующие о ядерных процессах сверхтяжелых элементов. Особый интерес при интерпретации космохимических данных представляют, конечно, аномальные металлы, которыми может объясняться намеченная необычность металлогении месторождений архея. Прежде всего, это относится к ртути, накапливающейся в примитивных метеоритах в ассоциации с углеродом и платиноидами [26], устойчивой при температуре около 900°K . Накапливается все более сведений об участии вещества планетеземалей в формировании и развитии Земли.

Более того, известная гетерогенность в строении земной коры и мантии может быть объяснена, исходя из динамичной структуры Земли, состоящей из отдельных трансформированных планетеземалей [30]. Можно привести к этому многочисленные петрохимические и геохимические факты, такие, например, как: а) тождество отношений $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ в железных метеоритах, глубинных мантийных породах и атмосфере Земли [18]; б) тождество отношений $\text{Металлы платиновой группы} + \text{Золото} / \text{иридий}$ в породах мантии и хондритовых метеоритах [16]; в) наличие в ультраосновных породах внутри зеленокаменных поясов и железорудных месторождений природных сплавов платины, которые могли образоваться только при сверхвысоких температурах космической энергии [13] и т. д.

Следовательно, имеется достаточно оснований, чтобы попытаться объяснить парадоксальные особенности ранней архейской металлогении Земли с позиций космического происхождения многих металлов в месторождениях ранней Земли [28]. Здесь возникает возможность постановки проблемы о космическом первоисточнике целого ряда металлов, выходящих за границы баланса вещества между средним составом метеоритов и Земли, включая ядро. Речь идет о реликтовой металлогении докембрийской коры, которая унаследовала некоторые допланетные особенности формирования Земли.

При этом, авторы настоящей работы разделяют точку зрения, согласно которой современные процессы материковой аккреции в островных дугах и активных окраинах имеют принципиальное сходство по условиям образования с возникновением самой ранней гранитной коры. Главнейшим фактором, резко изменившим металлогению ранней Земли на границе архея и протерозоя (около 2,8 млрд. лет назад) было именно образование гранитов на месте примитивной базальтовой коры. В этот период геологической истории гранитные флюиды существенно преобразили примитивную металлогению, сконцентрировав отдельные металлы в более поздних рудоносных структурах и преобразовав бывшие сплошные «железные пояса» в отдельные фрагменты их. Существование в земной коре реликтовых металлогенических зон отмечено в последние годы французскими металлогенистами во главе с Рутье, которые выделяют в структуре гранитизированных областей «теневые» рудные структуры как основу для поисков скрытых месторождений.

Имея первичным источником метеоритное железо, древние железорудные пояса Земли в истории ее ранней эволюции представляются как захваченные (экспанированные) протокорой геофизические поля железа, как бы отставшие от основных гравитационных потоков создающегося железо-никелевого ядра [28]. Аналогичное явление неполной гравитации сидерофилов в ядро отмечается и для Луны [20]. Здесь избыточные сидерофильные элементы в брекчированных породах лунных нагорий представляют последние стадии аккреции металлсодержащих планетеземалей на Луне после ее первичной дифференциации. Поскольку возраст ядра оценивается разными авторами в интервале 4,3—4,9 млрд. лет, то истинный возраст наиболее ранних железных руд в древнейших породах Земли может достигать этой величины; имею-

шие данные возраста пород железистой формации архея (2,8—3,7 млрд. лет) характеризуют последующие термальные события. Рама Меерти [8] полагает также, что вследствие относительно большой массы ядра Земли по сравнению с массой планеты процесс образования ядра должен был бы привести к глобальной дифференциации и образованию протокры. Этот автор также приходит к выводу, что отделение железа в ядро было неполным и исходит из того факта, что во внешней зоне Земли (несколько сотен километров) содержание сидерофилов—никеля, кобальта, меди, золота и рения обычно выше ожидаемого при равновесной сегрегации богатого железом ядра.

Во всех случаях, согласно космогеническим моделям, железные метеориты Солнечной системы образовались из тяжелых конденсатов металлов на месте внутренней части газового облака. Последующая зонная плавка первичной «холодной» Земли обеспечивала гравитационное движение тяжелого железного расплава с наружной части Земли во внутренние. Этот механизм удачно объясняется моделью Эльзассера, согласно которой железо выплавлялось из смеси хондрита и палассита и накапливалось под верхним расплавленным слоем в виде асимметричной зоны. По современным представлениям [32], ядро сформировалось в результате кратковременного гравитационно-энергетического процесса, чем и обусловлено скопление оставшихся масс железа в виде огромных масс руд в архее. Модель Эльзассера асимметричного накопления железного расплава в протомантии недавно дополнена представлениями Грейбайна [23] о том, что эта «капля» расплава железа накоплена со стороны Земли, обращенной к Луне в раннюю стадию геосинхронного вращения Земли и Луны. Это дополняется также и геологическим материалом, свидетельствующим о том, что этим местом в архейской Земле была Южная Африка. Именно здесь на небольшом участке в 500 км² древнейших пород ЮАР и Зимбабве сосредоточено около 80% всех природных ресурсов архейских железных руд Земли [7].

В период формирования ядра центральная часть Земли, исходя из современных расчетов, должна быть разогретой до 3000—5000°K и оставаться жидкой доныне. Это вполне согласуется с данными глубинной геофизики, сравнительной планетологии и некоторыми выводами современной геотермики [25], которые могут свидетельствовать в пользу выноса ряда элементов со сверхвысоких глубин Земли (Гоетел) тепловыми потоками и конвекцией в мантии. Тепловые потоки и создаваемые ими условия плавления вещества мантии и выноса некогерентных элементов, по всей вероятности, проявлялись на протяжении всей геологической истории и способствовали периодическим процессам наложения и регенерации пород и руд со стиранием прежних черт первичной металлогении Земли.

Институт литосферы
АН СССР

Поступила 12. I. 1982.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов А. П. Образование металлических ядер планет. Геохимия, № 10, 1975.

2. *Воскресенская Н. Т.* Геохимия таллия и германия в марганцевых месторождениях разного генезиса. Геохимия, № 6, 1976.
3. *Калганов М. И.* Космическое железо как один из возможных первоисточников для формирования железистых кварцитов. Известия АН Арм. ССР, Науки о Земле, т. 24, № 5, 1971.
4. *Калганов М. И., Ужгалис Э. В.* Условия образования докембрийской коры выветривания региона КМА. В сб.: Докембр. коры выветривания, М., 1975.
5. *Лаврухина А. К.* Дифференциация химических элементов в протопланетном облаке и в первичном веществе Земли. Геохимия, № 12, 1978.
6. *Лазаренко Э. А.* Об образовании гранитного слоя земной коры и железорудных месторождений на древних щитах. Деп. ВИНТИИ, № 242—80, 1980.
7. *Попов Ю. В., Чайка В. М.* Основные черты металлогении щитов. М., ВНЭМС, 54, 1981.
8. *Рама Мэрти В.* Состав ядра и ранняя химическая история Земли. В кн.: Ранняя история Земли. М., 1980.
9. *Смит Дж. В.* Развитие системы Земля-Луна и выводы применительно к геологии ранней Земли. В кн.: Ранняя история Земли. М., 1980.
10. *Толстов К. Д.* Сверхтяжелые элементы в эволюции Земли и малых планет. В кн.: Объед. ин-т ядерн. исслед., Дубна, Сообщения, № Р6-11677, 1978.
11. *Чайка В. М.* Рифенды Центральной Сахары. М., 1978.
12. *Appel P. W. U.* Cosmic grains in an iron-formation from the early Precambrian Isua supracrustal belt West Greenland. J. Geol., 1979, v. 85, № 5.
13. *Bird J. M., Bassett W. A.* Evidence of deep mantle history in ferrestria osmium-iridium-uthenium alloys. "J. Geophys. Res.", 1980, 1385, № 10.
14. *Blander M.* Non-equilibrium effects in the formation of chondrites. Meteoritics 1977, v. 12, № 3.
15. *Boynnton W. V.* Supernova material in Allende inclusions. Meteoritics, 1979, 14 № 4.
16. *Chou C.—L.* Fractionation of siderophile elements in the Earth's upper mantle. Proc. 9th Lunar and Planet. Sci. Lett. Conf., Tex., Houston, 1978, v. 1, New York e. a., 1978.
17. *Clayton R. N.* Isotopic anomalies in the early solar systems. Origin and Distribution Elem. Proc., 2nd Symp., 1977. Oxford e. a., 1979.
18. *Dewning R. G., Manuel O. K.* $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$: An interpretation to the puzzle. Meteoritics, 1979, 14, № 4.
19. *Frlipp R. E.* Stratabound gold deposits in Acchaen banded iron-formation, Rhodesia. Econ. Geol., 1976, v. 71, № 1.
20. *Ganapathy R., Morgan J. W., Krähenbühl V., Anders E.* Early intense bombardment of the Moon Clues from meteoritic elements in Apollo 15 and 16 samples. Geochim. et Cosmochim. acta Suppl 4, New-York, 1973.
21. *Goettel K. A.* Potassium in the Earth's core: evidence and implications. Phys. and Chem. Miner. and Rocks. London e. a., 1976.
22. *Graham J.* Manganochromite, palladium antimonide and Some unusual mineral associations at the Nairne pyrite deposit South Australia. Amer. Miner., 1978, 63, № 11—12.
23. *Grjeline T.* The moon as the origin of the Earth's continents. Moon and Planets, 1980, 22, № 3.
24. *Grossman L.* Refractory inclusions in the Allende meteorite. Annu. Rev. Earth and Planet Sci., v. 8, Palo Alto. Calif., 1980.
25. *Jeanloz R., Richter F. M.* Convection, composition and thermal state of the lower mantle. J. Geophys. Res., 1979, v. B 84, № 10.
26. *Jovanovic S., Reed G. W.* Hg and Pt-metals in meteoritic carbonrich residues suggestions for possible host phase for Hg. Geochim. et Cosmochim. acta, 44, № 10.
27. *Maff R.* The antimony deposits in the Murchison Range of the northeastern Transvaal, Republic of South Africa. Monogr. Ser. Miner. Depos., 1978, № 16, X.
28. *Napier W. M., Clube S.V. M.* A theory of terrestrial catastrophism. Nature, 1979, v. 282, № 5738.

29. *O'Nions R. K., Evensen N. M., Hamilton P. J., Carter S. R.* Melting of the mantle past and present: isotope and trace element evidence. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1978, v. 288, № 1355.
30. *Ransford G. A., Kaula W. M.* Heating of the Moon by heterogeneous accretion. *J. Geophys. Res.* 1980, B 85, № 11.
31. *Rambaldi E. R., Cendales M.* Moderately volatile siderophiles in ordinary chondrites. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, v. 44, № 3.
32. *Shaw G. H.* Core formation in terrestrial planets. *Phil. Earth and Planet. Sci. Lett. Intern.*, 1979, v. 20, № 1.
33. *Scott E. R. D.* Primary fractionation of elements among iron meteorites. *Geochim. et Cosmochim. acta*, 1978, v. 52, № 9.
34. *Bemmelen R. W.* On the origin and evolution of the earth's crust and magmas. *Geol. Rundschau*, 1968, 57, № 3.
35. *Wood J. A., Motylewski K.* Meteorite research. *Rev. Geophys. and Space Phys.* 1979, 17, № 4.