



Рис.4. Рассчитанная эволюция движения океанической коры толщиной $d=0.01$ с фазовым переходом базальт–эклогит для безразмерного времени $t_0=0.100$, $t_1=0.102$, $t_2=0.104$, $t_3=0.110$

ВЫВОДЫ

Результаты моделирования показали, что скорость затягивания легкой коры в мантию зависит от интенсивности конвекции, плавучести, вязкости и толщины. Высокая толщина и высокая плавучесть сильно тормозят затягивание коры в мантию. Высокое вязкое сцепление коры с океанической литосферой способствует затягиванию коры в мантию.

Как видно из рис. 1–4 несмотря на несовершенство рассмотренной простой модели, результаты численного моделирования не только качественно, но и в определенной мере количественно описывают наблюдаемые данные о затягивании океанической коры, включая базальтовые плато, в мантию в зонах субдукции. При этом более легкая континентальная кора не затягивается в зонах субдукции и плавает на мантии. Осадки, имеют малую плотность, но и малую толщину, и поэтому в основном затягиваются в мантию, частично скупиваясь на поверхности в виде аккреционных призм. Благодаря переходу базальта в эклогит со скачком плотности 15–20% вещество океанической коры может накапливаться на дне мантии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука. 1986. 736 с.
2. Трубицын В.П., Симакин А.Г., Баранов А.А. Влияние пространственных вариаций вязкости на структуру мантийных течений // Физика Земли. 2006а. № 1. С. 3–15.
3. Трубицын В.П., Баранов А.А., Евсеев А.Н., Трубицын А.П. Точные аналитические решения уравнения Стокса для тестирования уравнений мантийной конвекции с переменной вязкостью // Физика Земли. 2006б. № 7. С. 00–00.
4. Christensen, U.R., Heat transport by variable viscosity convection for the Earth's thermal evolution // Phys. Earth and Planet. Interiors. 1984. V. 35. P. 264–282.
5. Fortin M., Fortin A.A. Generalization of Uzawa's algorithm for the solution of the Navier-Stokes equations // Comm. Appl. Numer. Methods. 1985. V. 1. P. 205–210.
6. Hughes T.J.R., Liu W.K., Brooks A. Finite Element Analysis of Incompressible Viscous Flows by the Penalty Function Formulation // J. Comput. Phys. 1979. V.30. P.1–60.
7. Pelletier D., Fortin A., Camarero R. Are FEM solutions of incompressible flows really incompressible? // Intern.J. for Numerical Methods in Fluids. 1989. V. 9. P. 99–112.
8. Schubert G., Turcotte D.L., Olson P., Mantle Convection in the Earth and Planets. Cambridge Univ. Press. 2001. p. 940.
9. Taira A., Mann P., Rahardiavan R. Incipient subduction of the Ontong Java plateau along the North Colomon trench // Tectonophysics. 2004. V. 389. P. 247–266/

МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ РАННЕДОКЕМБРИЙСКИХ КРАТОНОВ ПРОТОМАТЕРИКОВ ЛАВРАЗИИ И ГОНДВАНЫ: ГЕОТЕКТОНИЧЕСКИЕ И КОСМОГЕНИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ

Турченко С.И.

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, г. Санкт-Петербург, turchsi@mail.ru

Проблемам тектонического развития коры протоматериков Гондвана и Лавразия посвящены многочисленные исследования. Однако анализ металлогенической эволюции обеих протоматериков в докембрии и их сравнение не было проведено ни в одной известной нам работе. Обобщение материалов по тектонической и металлогенической эволюции протоматериков Лавразии и Гондваны в докембрийское время показало не только их временную неоднородность, но и геотектоническую, т.е. коро-мантийную неоднородность, а отсюда и металлогеническую неоднородность.

Неоднородный характер верхней оболочки Земли ясен уже из геохимического и геодинамического ее различия, выраженного в делении на континентальную и океаническую кору, а также на кору и мантию. Неоднородность Земли достаточно ярко выражена в ее асимметрии, которая выявляется в различии двух ее полушарий: Тихоокеанском – преимущественно океаническом и Индо-Атлантическом, где сосредоточено большинство раннедокембрийских кратонов и протерозойско-палеозойских аккреционно-коллизийных орогенических поясов, составляющих основу континентальной коры континентов, разделенных новообразованными океанами. Глобальный характер неоднородности Земли подтверждается особенностью распределения на ее поверхности континентов и океанов, обладающих разным типом коры (сиалической и симатической). Концепция тектоники плит оказалась не в состоянии ответить на вопрос о причинах существующей неоднородности Земли, поскольку объектом ее приложения является относительно тонкий в масштабах планеты слой земной коры, где даже в раннедокембрийских структурах отмечается подобие сейсморазрезов, хотя есть и различия.

Причины же неоднородности Земли, как современной, так и геологического прошлого, следует искать в существовании глобальных неоднородностей в ее мантийных оболочках. Сейсмическая томография, проведенная для исследования мантии на всех континентах по международной программе «Deep structure, composition and evolution of continents», подтверждает наличие подобных неоднородностей вплоть до глубинных оболочек Земли. Эти исследования показали, что под всеми докембрийскими кратонами наблюдаются высокие скорости упругих волн до глубин не менее 200 км. Глубже установлена зона понижения скорости упругих волн, которая интерпретируется как зона частичного плавления вещества мантии, сопоставляемая с астеносферой. На этом основании был сделан вывод, что литосфера древних кратонов прослеживается до глубины 200 км. Результаты изучения мантийных ксенолитов изотопно-геохимическими и геохронологическими методами свидетельствуют, что кора древних кратонов до глубин приблизительно 200 км и подстилающая их мантия имеют возраст от 1 до 3 млрд лет. Таким способом были установлены литосферные корни докембрийских структур, составляющие вместе с земной корой мощностью около 50 км, тектоносферу Земли. Построение сейсмотомографических карт и разрезов разных глубинных уровней Земли, вплоть до ее ядра выявило, что по крайней мере до глубины 2900 км сохраняется глобальная мантийная неоднородность Земли, хотя и меняющая свою конфигурацию от одного уровня к другому, но особенно заметная в Тихоокеанской части полушария Земли. Такая глубинная неоднородность, в которой отчетливо сохраняется локализация всех континентальных докембрийских масс с хорошо выраженным сейсмотомографическим положительным эффектом, свидетельствует об изначальном образовании, вероятно именно в Индо-Атлантическом континентальном полушарии, единого архейско-раннепротерозойского протоконтинента, положившего начало этой глобальной неоднородности. Все это указывает на то, что глобальная неоднородность Земли, а, следовательно, и определяющие ее крупнейшие неоднородности в мантийных оболочках существовали с древнейших эпох геологической истории.

По изотопно-геохимическим и возрастным данным в период 3.8-1.3 млрд лет происходило преимущественное слипание древних континентальных масс, в результате чего к рубежу 1 млрд лет образовался единый суперконтинент Родиния. Этот достаточно сложный и длительный по времени процесс характеризовался преобладанием конструктивной тенденции тектонического развития континентов, которая определяла наращивание автохтонной коры древнейших протоконтинентов Ур, Нена и Атлантика, которые были сконцентрированы по данным палеомагнетизма в южной части Панталлассы. Деструктивные процессы в эти временные интервалы играли подчиненную роль и выражались в образовании интракратонных рифтовых структур с возрастом 2.45-2.35 млрд лет, игравших существенную роль в формировании металлогенического облика протоконтинентов (Рундквист, Турченко, 1990; Турченко, 2007). Таким образом, глобальная неоднородность тектоносферы Земли, а, следовательно, и определяющие ее крупнейшие неоднородности в мантийных оболочках существовали с древнейших докембрийских эпох геологической истории. Это является важным аргументом в пользу представлений о первичной природе неоднородности глубинных оболочек Земли.

Поскольку Земля является частью Солнечной системы, представляется уместным обратить внимание на временные космологические данные, которые позволяют показать космохимические причины первичной неоднородности глубинных оболочек Земли и соответственно унаследованных неоднородностей древней литосферы. В космохимии в настоящее время не осталось места для идеи, что Солнечная система образовалась из хорошо перемешанного химически и изотопно однородного горячего газового облака. Публикации, базирующиеся на исследованиях изотопного состава метеоритов обобщенные в фундаментальном научном труде «Meteorites and the Early Solar System» (The University of Arizona Press Tuscon, 1269 p., 1998), подтверждают гетерогентность небулы на основе данных о стабильных изотопах. В этой работе приведены данные об изотопах кислорода, отличных от земных (метеорит Альенде), которые должны были иметь различные источники. Затем также показано, что были установлены изотопы внеземного происхождения таких элементов, как Mg, Si, Ca, Ba, Sr, Ti, Ag, Nd, Sm, подтверждающие, что досолнечная небула являлась неоднородной. Показательны в этом же смысле изотопы благородных газов (Xe, Ne), а также N и C, представляющие частицы досолнечного происхождения в метеоритах, а именно материал звезд и межзвездных облаков. Кроме того, в метеоритах установлено также более высокое отношение дей-

терия к водороду, чем в породах земной группы. Ю.А.Шуколюков (1996), обобщая имеющиеся сведения по изотопам, заключает, что выявленные изотопные аномалии можно интерпретировать только как образования досолнечного происхождения и что они были сохранены в Солнечной системе как реликты газообразного вещества вспышки сверхновой. Тем самым, вещество Солнечной системы с возрастом 4.6 млрд. лет гетерогенно и включает в свой состав изотопные частицы самого разнообразного происхождения. Поскольку Земля является планетой Солнечной системы, то к ней в полной мере также относится и первичная неоднородность ее аккреции.

Существует ряд моделей аккреции Земли, но среди них, для наших построений относительно первичной мантийной неоднородности и металлогенических следствий из этого, наибольшее значение имеют представления Д. Андерсена (Andersen, 1981). По его мнению нижняя мантия, обособившаяся из вещества ранних конденсатов в до геологический период развития Земли (древнее 4.3 млрд лет), на границе с ядром, наряду с железом, обогащена Ca, Al, W, Ni, Cr, тяжелыми REE. С мантийными неоднородностями связано и неоднородное распределение рудных месторождений, в особенности мантийного происхождения, которые рассматривались академиком А.Д. Щегловым (1987) в качестве главных предметов его представлений о нелинейной металлогении. А.Д.Щеглов, рассматривая смысл и значение понятия «нелинейной металлогении и роли эмбриональной рудоносности мантии» и ссылаясь на публикации Д. Ватсона (Watson, 1980), приводит данные о связи ряда «мантийных» рудных месторождений с неоднородностями в подкорковых оболочках. К таким месторождениям он относит месторождения Cr, Pt, Ni, U, W, Au, Ag. Так, для хромитовых месторождений Южной Африки он показал, что в течение 1.5 млрд лет хромитовые ультрамафитовые интрузии локализовались в структурах континентальной коры, расположенной над мантийной областью обогащенной хромом. Д.Ватсон отмечает также возможность существования «никелевых» неоднородностей в мантии, предопределяющих положение крупных сульфидно-никелевых месторождений. При этом можно сослаться на территорию Канады, где в одном регионе располагаются месторождения никеля, заключающие в себе около половины мировых запасов этого металла. Д.Ватсон высказывает также предположение, что мантия геохимически неоднородна в масштабе сотен километров по латерали, причем геохимические аномалии были характерны для архейской мантии и существовали на протяжении 1-2 млрд. лет. Анализ рудоносности материков при создании Атласа металлогенической зональности докембрия Мира (Генеральный координатор академик Д.В.Рундквист) показал, что крупные сульфидно-никелевые месторождения распределены крайне неравномерно. На территории Канады сосредоточено около 50% мировых запасов никеля в раннепротерозойских интрузиях трех областей, обрамляющих архейскую провинцию Сьюпириор: Садбери, пояса Томпсон и Унгава. Вторая половина мировых запасов сосредоточена лишь в трех крупнейших провинциях скопления этого металла в пределах других континентальных блоков: 1) в группе архейских зеленокаменных поясов кратона Йилгарн в Зап. Австралии (рудные районы Камбалда и Эгню в коматититах), 2) в раннепротерозойских габбро-верлитах Печенгского палеорифта на Кольском полуострове и 3) в рифтогенных триасовых габбро-норитах Норильского района на севере древней Сибирской платформы. Никелевая геохимическая специализация особенно свойственна мафит-ультрамафитовым породам мантийного происхождения, которые были выведены из промежуточных магматических очагов в верхние коровые уровни под воздействием интенсивных процессов рифтогенеза и астеносферного плавления обогащенной Ni мантии. Таким образом, наиболее важные особенности строения и состава оболочек Земли были заложены еще в догеологический и раннегеологический периоды, а вся последующая коровая история – это лишь дальнейшее развитие тех особенностей состава, которые формировались на ранних этапах существования Земли.

Сохранившиеся до настоящего времени древнейшие блоки континентальной коры Капваал, Зимбабве и Пилбара, возраст которой порядка 3.8-4 млрд. лет, принадлежали единому континенту. В Индии и Восточной Антарктиде также установлены континентальные блоки меньших размеров, но того же возраста, составлявших вместе с другими древнейшими блоками континентальной коры единый суперконтинент в позднем архее. Архейские блоки, слагающие ядра континентальной коры, в раннем протерозое (2.5-2.1 млрд. лет) были подвержены интракратонному рифтогенезу, выразившемуся в формировании глобальных палерифтов (Печенга-Имандра-Варзуга, Северонорвежско-Карельский на Балтийском, Криворожский на Украинском, Эллиот Лейк – Садбери, Пояс Томпсон на Канадском щитах), роев мафических даек (Пяозерский, Печенгский, Херст-Матачеван, Джимберлина-Биннерджи в Австралии, Великая Дайка в Ю. Африке) и рифтогенных эпикратонных бассейнов (Ятулийский, Гуронский, Хамерсли, Витватерсранд и др.). Все эти структуры верхней коровой оболочки являются рудоносными и несут специфическую металлогеническую нагрузку (Cr, Cu-Ni, Pt-Pd, Au, U). Для более позднего этапа раннего протерозоя (2.0-1.75 млрд. лет) было характерно формирование аккреционных (Свекофеннский на Балтийском щите, Транс-Гудзонский в Канаде, Паттерсон-Наберру в Сев. Австралии) и коллизионных (Лимпопо-Мозамбикский в Африке, Лапландский Балтийского щита и др.) орогенических поясов с ювенильной раннепротерозойской корой, наращивающей континентальную кору раннего суперматерика.

Неоднородность строения литосферы Земли, прослеживаемая с раннего докембрия отражается в неоднородном характере распределения месторождений в докембрийских кратонах, составляющих их минерально-сырьевой потенциал. Для сравнения минерально-сырьевого потенциала докембрийских тектонических структур протоконтинентов Лавразии и Гондваны использована потенциальная ценность минеральных ресурсов (ПЦМР) по

Л.И.Красному (2000), определяемая их стоимостью в млрд. долларов. Докембрийские блоки в пределах этих протоконтинентов обладают максимальным металлогеническим потенциалом – на них приходится более 42% суммарной ПЦМР. По составу ПЦМР Cu, Pb, Zn, Sn, Nb+Ta, Ni, PGE, Au, алмазов и U выражена неоднородность в их распределении в докембрийских регионах Лавразии и Гондваны. Особенно заметна эта неоднородность по ПЦМР Au, PGE, Ni и сумме ПЦМР Ta+Nb. В отношении Au и PGE по ПЦМР чрезвычайно выделяется докембрий Африки среди всех материков. Примерно равные соотношения по Au характерны для Канадского щита, докембрийских регионов Евразии, Ю. Америки и Австралии. По ПЦМР PGE докембрий Евразии в несколько раз превышает докембрий Канадского щита. По Ni выделяются четыре, упомянутые ранее, региона концентрации ресурсов: 1) палеопротерозойские расслоенные интрузии группы Ист Булл Лейк, габбро-верлиты и серпентиниты пояса Томпсона и, главным образом, гигантское месторождение Садбери; 2) в Евразии никелевые ресурсы сосредоточены в аналогичных по возрасту интрузиях Кольского полуострова, но в существенной мере (90%) ПЦМР по Ni составляют запасы и продукция Норильского ГПР, что также относится и к ПЦМР PGE в Евразии. Месторождения Норильского ГПР включены в выборку по докембрию Евразии и соответственно Лавразии, поскольку они образованы при мезозойской рифтовой активизации докембрийской мантии севера Сибирской платформы; 3) палеопротерозойский расслоенный комплекс Бушвельд и Великая Дайка составляют 90% ПЦМР Ni в Ю. Африке, они же дают основные ресурсы PGE в мире; 4) докембрий Зап. Австралии (кратон Йилгарн), где месторождения Ni присутствуют в коматитах архейских зеленокаменных поясов.

Заметны неоднородности распределения запасов по ПЦМР в отношении редких металлов: максимальные значения для них определяются, например, суммой ПЦМР Nb+Ta в Ю. Америке, главным образом, на Бразильском щите, где они сконцентрированы в крупных месторождениях карбонатитовых и щелочных гранитных интрузий. Высокая ПЦМР редкометалльных месторождений Евразии, сравнимая с Бразильским щитом Гондваны, определяется локализацией их в двух гигантских месторождениях в щелочно-ультраосновных массивах Ловнозерском на севере Балтийского щита и Томторском на севере Анабарского щита. На фоне равномерного распределения ПЦМР алмазов (от 5 до 7 млрд. дол.) среди докембрийских регионов Гондваны (Ю.Америка, Австралия, Ю.Китай и Индостан) ПЦМР алмазов докембрия Африки, составляя около 200 млрд. дол. определяет существенную неоднородность размещения месторождений по материкам Гондваны. ПЦМР алмазов Лавразии близка общей ПЦМР алмазов материков Гондваны, причем преобладающее значение имеет ПЦМР алмазов Евразии, определяемая месторождениями севера Восточно-Европейской платформы и, главным образом, месторождениями севера Сибирской платформы. Заметны неоднородности и в размещении месторождений U: наибольшая концентрация их характерна для материков Гондваны, но все же максимальные значения ПЦМР U сконцентрированы в крупных месторождениях Канады, Австралии и Ю. Африки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красный Л.И. (Ред), 2000. Геолого-минералогическая карта Мира. Объяснительная записка. Ч.2, Минерально-сырьевые ресурсы континентов и активных транзиталей. Изд. СПб картфабрики ВСЕГЕИ. 34 с.
2. Рундквист Д.В., Турченко С.И., 1990. Тектонические структуры докембрия Сибирской платформы и их рудоносность. Геология и геохронология докембрия Сибирской платформы и ее обрамления. Л., Наука, с. 7-20.
3. Турченко С.И. Металлогения тектонических структур палеопротерозоя // СПб, «Наука», 2007, 175 с.
4. Шуколюков Ю.А. Звездная пыль в руках. Соросовский образовательный журнал. 1996, N7, с. 74-80.
5. Щеглов А.Д. Основные проблемы современной металлогении. Недра, 1987, 231 с.
6. Andersen D. L. A global geochemical model for evolution of the mantle. In: Evolution of the Earth. Geodynamic series. Washington, 1981, v. 5, p. 6-18.
7. Watson J.V. Metallogenesis in relation to mantle heterogeneity. Geol. Trans. Royal Soc. London, 1980, N1430, p. 347-352.

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗА СОСТОЯНИЕМ СКВАЖИННОГО ПРОСТРАНСТВА КОЛЬСКОЙ СВЕРХГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ

Тюремнов В.А., Осипенко Л.Г.

Геологический институт Кольского НЦ РАН, г. Апатиты, raevsky@geoksc.apatity.ru

Анализ закономерностей скоростей упругих волн в породах разреза СГ-3 позволил установить существенное различие скоростей, полученное на образцах и по данным дистанционных методов (АК, ВСП). Наблюдается значительное уменьшение скоростей упругих волн в керне с первых часов его подъема на поверхность и этот тренд сохраняется в течение ряда лет при проведении регулярного контроля эталонных образцов. Изменение скоростей упругих волн во времени отражает, по видимому, энергетические процессы, следствием которых является дезинтеграция пород и релаксация скоростей упругих волн (рис. 1).