

Современные проблемы геодинамики: Доклад академика Н. Л. Добрецова на бюро Отделения наук о Земле РАН

Е. Ю. Фирсова¹

Получено 30 ноября 2009; опубликовано 12 декабря 2009.

Данная статья представляет собой краткое изложение доклада академика РАН Н. Л. Добрецова, представленного на заседании бюро Отделения наук о Земле РАН и посвященного современным проблемам геодинамики, а также замечания и комментарии участников заседания. В качестве онлайн-ового приложения к статье публикуется также РРТ презентация Н. Л. Добрецова. **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** геодинамика, происхождение Земли, мантия, современные движения, магнитное поле.

Ссылка: Фирсова, Е. Ю. (2009), Современные проблемы геодинамики: Доклад академика Н. Л. Добрецова на бюро Отделения наук о Земле РАН, *Вестник ОНЗ РАН*, 1, NZ4001, doi:10.2205/2009NZ000008.

17 ноября 2009 года в здании Президиума РАН состоялось очередное заседание бюро Отделения наук о Земле под председательством академика-секретаря отделения А. О. Глико. На нем с докладом о современных проблемах геодинамики выступил академик РАН *Николай Леонтьевич Добрецов*. Доклад был посвящен широкому спектру вопросов, начиная от происхождения Земли через всю ее динамику, и заканчивая современными процессами, которые происходят в мантии и ядре. В докладе были обобщены результаты работ, проводимых группой исследователей под руководством Н. Л. Добрецова, на основе лабораторного и численного моделирования различных геодинамических процессов. Выступление продолжалось около часа, но докладчик лишь успел показать наиболее интересные модели и коротко рассказать об основных результатах работ.

Эволюция Земли представляет сочетание следующих процессов: непрерывное остывание Земли, по крайней мере с рубежа четыре миллиарда лет; непрерывное, но ступенчатое окисление поверхности Земли, которое прежде всего фиксируется по изменению осадконакопления – с 3,5 млрд до 1,8 млрд лет образуются железистые кварциты, затем красноцветы; ступенчатое изменение парциального давления кислорода в атмосфере сопровождается соответствующим изменением биоты; и, наконец, периодические колебания всех главных параметров, но прежде всего параметров мантии. На сегодняшний день все больше данных свидетельствуют в пользу модели аккреции с ранней горячей Землей, и все меньше сторонников гипотезы постепенного разогрева и холодной аккреции. На ранней стадии развития Земли температура на границе



верхней и нижней мантии, вероятно, составляла 3000°C, а на современном этапе 2000–2100°C, а тепловой поток уменьшился за это время в результате на порядок – от 600 ед. до 60–56 ед., и на три порядка возросла вязкость в мантии. В соответствии с моделью Холлоуэа аккреция Земли и образование ядра и дегазация в основном закончились около 4,47 млрд. лет. Тогда, по всей вероятности, возникли горячая плотная атмосфера и близкоповерхностный магматический океан. В этот период поверхность Земли подвергалась интенсивной бомбардировке, которая могла разрушать тонкую поверхностную корку, вызвать повторное расплавление, испарение гидросферы.

¹Геофизический центр РАН, Москва, Россия

Если к тому времени на Земле и появилась жизнь, то в результате бомбардировок она могла исчезнуть, и развиваться более чем однократно.

Есть один из спорных вопросов – это происхождение древнейших цирконов, которые считались, и сегодня многими считаются доказательством существования ранней континентальной коры. Но дело в том, что в них были обнаружены включения алмазов, а кроме того необычная внутренняя структура и изотопия ванадия и тория. Необычная структура этих цирконов больше всего напоминает импактные цирконы Луны. По мнению *Н. Л. Добрецова*, это все же импактные цирконы, и они не говорят о том, что у Земли была ранняя гранитная кора. Возраст этих цирконов около 4 – 4,4 млрд. лет, и он как раз совпадает по времени с возрастом бомбардировки, которая в этом интервале была оценена по независимым данным. Конец интенсивной бомбардировки и стабильные океаны и моря появились на рубеже 4, 0 млрд. лет, и с этого момента шло непрерывное остывание Земли. И тогда возникает вопрос – когда возникло магнитное поле (МП). Во многих работах считается, что МП возникло вместе с ядром, т.е. в первые 100 млн. лет. Есть и другие гипотезы, утверждающие, что оно возникло еще раньше, на этапе протопланетной туманности. И именно это раннее МП способствовало тому, что первым аккрецировало железо, и тогда ядро не выделялось, а сразу возникло как ранняя стадия аккреции. Сильное МП обычно связывают с появлением внутреннего ядра, возникшего в результате остывания мантии и Земли в целом, в интервале около 3,2 – 3,5 млрд. лет.

На протяжении всего существования МП происходило периодическое изменение интенсивности его напряженности. В статье *А. Ю. Куражковского* и других, представленной в журнал “Геология и Геофизика”, показано, что изменения напряженности МП находятся в противофазе с изменением числа магнитных инверсий, и есть гипотеза, что с этим связано появление наиболее сильных оледенений. В периоды минимума МП существенно меняла свою структуру и ионосфера.

Далее докладчик дополнительно остановился на плохо объясненном явлении – магнитных инверсиях. В работе приведена диаграмма, на которой показано наиболее известное отсутствие инверсий во время мелового мегахрона, от 84 до 124 млн. лет. В тот период в течение 40 млн. лет вообще не было изменения полярности МП. А в течение последних 90 млн. лет шли периодические колебания – от шести инверсий до нуля в течение одного миллиона лет. Оказалось, что минимумы магнитных инверсий совпадают с максимумами мантийного магматизма. Одна из моделей предлагает возможное объяснение этого факта. Модель показывает вероятную структуру течений на границе ядро – мантия. Здесь очень интересны конусовидные вихревые структуры во внешнем ядре, которые возникают в области восходящих потоков. Наиболее сильны они там, где рождаются мантийные плюмы.

Поскольку при рождении мантийных плюмов происходят окислительно-восстановительные реакции, выделяется самородное железо, которое может быть сразу в виде заряженных частиц, и тогда эти вихревые структуры, и их количество и определяет напряженность МП, и соот-

ветственное изменение числа магнитных инверсий. Приведенные в докладе диаграммы служат наглядной иллюстрацией удивительного соответствия между напряженностью, частотой инверсий и интенсивностью мантийного магматизма. На одной из диаграмм показан максимум мантийного магматизма, который возник около 120 – 90 млн. лет, как раз совпадающий с интервалом, когда не было инверсий МП. Таким образом, когда появляется много плюмов и отвод тепла от ядра усиливается, то конвекция в ядре успокаивается, МП становится спокойным, инверсии не происходят. Если к этому добавить кривую Куражковского и его соавторов, то в этот же период максимума достигает напряженность МП. И все это объясняется вихревыми структурами во внешнем ядре. При увеличении этих вихрей растет количество плюмов, растет напряженность МП, и падает до нуля число инверсий. В работе также приведена диаграмма В. Куртийи, которая показывает изменение суперплюма на границе верхней и нижней мантии, где получают вторичные плюмы.

Следующая модель показывала взаимосвязь внутренней истории Земли и биосферы. Те самые максимумы мантийного магматизма и одновременно минимумы магнитных инверсий – это и наиболее крупные вымирания в биосфере. Самое крупное из них было на границе перми и триаса, где и возник один из крупных максимумов мантийных плюмов.

Далее *Н. Л. Добрецов* рассказал о том, как ведущие ученые-исследователи в США и Японии (Юн, Маруяма и др.) объясняют современную тектонику. По их данным максимальные подъемные потоки, или суперплюм, в течение 700 млн лет происходил в центре Тихого океана, а максимально холодное нисходящее движение – под Юго-Восточной Азией. Представляют интерес их оценки: на границе ядра и мантии температура равна 4000°C, а на границе верхней и нижней мантии – около 2000°C, что соответствует вышеприведенным результатам моделирования группы Добрецова.

Важно то, что продукты субдукции накапливаются в слое С, реститы начинают тонуть, и осаждаются на поверхности внешнего ядра. Эта гряда материала начинает переплавляться и здесь рождаются суперплюмы. Это отражает современное представление о том, что внутренние процессы гораздо более сложные, чем просто тектоника плит. С одной стороны, это многослойная конвекция, с другой – возможность накапливаться и тонуть крупным каплям реститового материала из зон субдукции и, наконец, возможное объяснение рождения плюмов и суперплюмов.

Прежде чем перейти к теме плюмов, *Н. Л. Добрецов* упомянул о возможном влиянии космических причин на геотектонические процессы. По крайней мере до фанерозоя, космические причины, или эффекты изменения солнечной радиации, известные как циклы Миланковича, связанные с орбитой Земли относительно Солнца, играли существенную роль в развитии поверхностных явлений, а именно изменении температуры поверхности, объема ледников, условий осадконакопления и развития биоты. Но в прошлом внутренний тепловой поток был в 10 раз больше, а излучение Солнца в несколько раз меньше, поэтому на ранней Земле, конечно, преобладало внутрен-

нее тепло, а никак не солнечное. Постепенно происходило окисление поверхности Земли, на начальном этапе прежде всего связанное с диссипацией водорода в космос, а затем с развитием жизни и фотосинтезом. Но опять же, здесь очень важную роль играло также и окисление мантии. Окисление мантии первоначально произошло из-за образования магматического океана, но интенсивным стало тогда, когда началась интенсивная субдукция, потому что только тогда происходило погружения окисленных поверхностных пород в глубины мантии с помощью субдукции. Здесь очень важен рубеж около 3,2 млрд. лет, близкий к рубежу появления внутреннего ядра, связанного тоже с остыванием Земли, когда появились первые многочисленные алмазы. Возраст древних алмазов, составляющих около 90% всех алмазов, как раз 3,2–2,9 млрд. лет, и это связано, во-первых, с утолщением литосферы. К рубежу 3,2 млрд. лет литосфера превысила мощность 100 км, а до этого она была 50 км и меньше, как сегодня в океанах. Во-вторых, наступило заметное окисление мантии, когда появились и карбонатиты, и растворы, обогащенные CO_2 . Они реагировали с метаном с возможным образованием алмазов. Этот алмазный рубеж являлся тоже очень важным показателем изменения теплового режима и окисления мантии.

На диаграммах, приведенных в докладе, были показаны различные виды плюмов – кимберлитовые и трапповые поля (самые крупные – сибирские), и третья группа плюмов – современные плюмы (гавайский, исландский, и др.). Сибирский суперплюм тоже, вероятно, эволюционировал, и сегодня он проявлен в виде исландского суперплюма. Южнее ареала этого плюма располагались так называемый Таримский плюм, затем ареал Сибирского плюма в Баренцевом море, затем в район хребта Альфа Ридж в центре Ледовитого океана и дальше вдоль Гренландии плюм вышел на современную позицию в Исландии. Во всяком случае эта гипотеза смещения магматического ареала из-за движения плит при относительно постоянной позиции плюма не вызывает сегодня сильных возражений.

Далее была продемонстрирована модель образования термохимического плюма на фоне изменения температур в мантии на границе верхней и нижней мантии 2000°C , на границе с ядром – 4000°C . Эта температура ниже температуры плавления (ТПС) сухого вещества в мантии. А снижение температуры плавления при химической добавке (ТПХ) зависит от количества добавляемого вещества, точнее, его концентрации, и коэффициента пропорциональности, который зависит от характера химического вещества. Наибольшее снижение температуры плавления будет при окислении водорода до состояния воды. Как дальше следует из расчетов, достаточно снижения температуры плавления на 20° и концентрации летчих в эквиваленте воды всего 3%, чтобы плюм работал как газовая горелка. Расчетный диаметр плюма – 70–100 км, исходная концентрация C_1 в эквиваленте воды 3%, вязкость расплава в плюме $2 \text{ м}^2 / \text{сек}$, перепад между средней температурой в мантии и температурой на границе с ядром 400° (но в ходе моделирования уточнилось до 380° – 370°). В результате оказывается, что концентрация воды на кровле плюма, там где плюм прожигает мантию как

газовая горелка – 2,2%, и скорость подъема – около метра в год, тогда как все остальные движения в мантии будут на порядок ниже. Только такая газовая горелка может обеспечить очень быстрый подъем плюма, в результате чего плюм поднимается от границы ядро-мантия на поверхность за три – пять миллионов лет. Очень важная особенность этого плюма – это возникновение в нем шляпы, если этот плюм достигает тугоплавкого вещества литосферы. В этом случае плюм начинает растекаться вдоль подошвы литосферы. И это растекание происходит до тех пор, пока поднимается вторичный плюм, в котором более легкий расплав начинает всплывать в виде пузыря. Это всплывание медленное, на порядок и даже на два порядка более медленное, чем “прожигание” плюмов, и поэтому длительное (10–15 млн лет), так что возникающая шляпа может достигать больших размеров. Для сибирских плюмов диаметр шляпы равен 4000 км. И длительность растекания, и размер шляпы зависит от мощности плюма и от толщины литосферы, которую должен преодолеть этот вторичный плюм. Здесь еще важно, что при мощном плюме будет центральный прорыв, а при меньшей мощности плюма, возникает кольцевое – периферическое прорывание, поскольку максимальное тендициальное напряжение будет по краям. Это подтверждается на реальных примерах, таких как Гавайский плюм. Диаметр его равен 120 км, а в модели около 100 км; внутренний диаметр около 80 км, температура внешней зоны 1450° – 1500° (по оценке А. В. Соболева и других), а в центральной части – 1600° – 1500° . Все это соответствует оценкам температур, полученных при моделировании.

Следующая модель – это экспериментальное воспроизведение плюма. Можно поставить сильный нагреватель, а можно впрыскивать вещество, понижающее температуру плавления. Тогда этот плюм будет возникать при постоянной температуре, только за счет этой химической добавки. Видно, что такие тепловые или термохимические плюмы никакой шляпы не дают, пока они не встречаются с тугоплавким слоем, во-вторых, они начинают вращаться. Диаметр вращения – примерно два диаметра плюма, и это верифицируется на примере Удоканского плюма, самого северного среди современных байкальских плюмов. На схеме нарисована двойная петля в виде восьмерки – след вращения этого плюма, причем первая петля возникла за 10 млн. лет, а вторая петля за 2,5 млн лет. Такие же вращения устанавливаются для Гавайского плюма, с периодом вращения тоже около 2,5 млн. лет. Таким образом, верификация подтверждает диаметр и скорость этого вращения, установленные при моделировании. Далее – еще два хорошо изученных плюма – эфиопский и танзанийский. Эфиопский плюм более мощный и за счет этого произошло утонение литосферы и прорыв в центре, танзанийский менее мощный, и в нем возник кольцевой режим прорыва, как было предсказано во время моделирования. Это подтверждено сейсмографическими изображениями, которые построил И. Ю. Кулаков в 2007 г.: под толстым танзанийским кратоном находится маломощный плюм, вследствие этого плюм растекается вдоль подошвы и сформировал кольцевой рифт, а мощный эфиопский плюм привел к утонению и прямому прорыву литосферы. В данном случае и характер излия-

ния, и вариации возраста излияний довольно точно соответствуют модели. Можно приводить и другие примеры. Сейчас накоплено особенно много данных по Сибирскому и Таримскому плюмам. Для этого случая особенно важным является направление, связанное с металлогенией и рудными месторождениями, в частности окисление флюидов и расплавов как фактор рудообразования при развитии плюмов.

Далее *Н. Л. Добрецов* привел результаты экспериментов по моделированию картины мантийных течений в мантии, а именно двуслойной конвекции в нижней и верхней мантии, а также детали этих моделей, показывающей валиковые течения как причины трансформных разломов и расчеты спрединга в районе Срединно-Атлантического хребта, где была рассчитана и сопоставлена с наблюдаемой мощность литосферы. На оси хребта она равняется 10–20 км, под океаном от 30–80 км и затем быстро нарастает до 250 км под континентами.

Валиковые течения возникают вследствие наличия пограничного слоя и формируются параллельно трансформным разломам. Расстояние между двумя трансформными разломами равно двум диаметрам валика, поэтому максимальное расстояние между разломами должно быть равно мощности астеносферы, т.е. около 300 км – это близко к наблюдаемому в океане. В результате возникает спиральное течение в астеносфере: вещество течет под литосферой от оси срединного хребта и одновременно вращается в валиковых течениях. Это можно было установить только в эксперименте, любое двумерное численное моделирование не дает валикового течения.

Сейчас становится ясно, что дунитовые жилы – это результат просачивания или фильтрации расплавов. Как было показано в статье *В. Г. Батановой* и *Г. Н. Савельевой*, чтобы объяснить составы срединно-океанических базальтов, нужно создать модель канализированного просачивания, при котором возможно смешение продуктов плавления с разных глубин. Исходя из идеи о канализированном течении построена и продемонстрирована модифицированная схема Келемена и др., напоминающая легкие человека. В ее центральной зоне идет медленное, но сплошное просачивание, в боковой зоне канализированного просачивания в каналах идет более быстрое просачивание, остаются жилы дуниты в виде реститов.

Наконец, лишь кратко *Н. Л. Добрецов* затронул тему субдукции. Японские авторы доказывают, что при субдукции в слое “С” возникает накопление реститов, которые потом начинают погружаться до ядра. Предполагается, что это может быть относительно холодная капля, поскольку температура вблизи границы верхней и нижней мантии понижается до 1600°. Но такая картина возможна только при супербыстрой субдукции, более 10 см в год, возможно до 300 см в год. Но это нужно доказать, а пока высказывается только общее предположение, которое в целом отражает общее ускорение остывания Земли.

В заключение докладчик подчеркнул, что на первом этапе моделирования необходимо максимально учитывать накопленные геолого-геофизические и геохимические данные. Второй этап, не менее важный – прямое лабораторное моделирование, позволяющее в полной мере оценить соотношение параметров и использовать тео-

рию подобия. Во многих случаях невозможно проверить численное моделирование без лабораторного моделирования. Алгоритмы численного моделирования настолько сложны, что необходимо проверять их соответствие физике и геологии процессов. Результаты физического и численного моделирования верифицируются по надежно измеряемым параметрам, геохимическим балансам и расчетам. С учетом верификации решение повторяется, и строится уточненная замкнутая система, чтобы получить полную картину глубинных геодинамических процессов.

После выступления докладчику были заданы вопросы. Отвечая на вопрос о нерешенных проблемах геодинамики, *Н. Л. Добрецов* заметил, что геофизики очень увлекаются обратными задачами. Как известно, такие задачи не имеют единственного решения, поэтому надо решать прямые задачи, но формулировать варианты решения задачи на стадии отбора тех геофизических и геохимических данных, которые положены в начальные и граничные условия модели. Прежде чем решается прямое численное моделирование, обязательны лабораторные эксперименты. И потом уже должно выполняться численное моделирование, как прямая задача. Когда получишь результаты и возвращаешься назад, то тогда можно решать и обратные задачи. Что касается нерешенных проблем, то было бы очень интересно понять, как образуются дуниты и сопряженные базальты в срединно-океанических хребтах, и решить эту очень сложную задачу трехскоростной фильтрации. Также нет и решения моделирования быстрой субдукции с накоплением реститов. При плавлении в зонах субдукции пока были построены упрощенные простые модели плавления вещества вдоль верхней поверхности погружающегося слэба. Уже сейчас очевидно, что происходит большое взаимодействие поднимающегося флюида с горячим астеносферным расплавом, особенно там, где молодая зона субдукции. Существует и целый ряд других нерешенных задач.

Докладчику был также задан вопрос о том, что явилось физическим генератором магнитного поля. *Н. Л. Добрецов* сказал, что есть ряд работ, которые доказывают, что слабое МП возникло еще на стадии протопланетного облака. Если это так, то сначала начали слипаться именно частицы железа, потому что они оказывались заряженными. Здесь главный вопрос – в скорости и механике аккреции. Как образовались первые крупные тела? Одно из объяснений – это, что могло быть слипание в слабом МП именно железных частиц. Некоторые исследователи (*В. Н. Снытников* и др.) считают, что на этом этапе уже могло сформироваться органическое вещество, и это был органический клей, благодаря которому склеивались частицы. Существенную роль в возникновении сильного магнитного поля сыграло появление внутреннего ядра. Совершенно очевидно, что оно возникло за счет остывания и кристаллизации жидкого ядра. Когда оно возникло? *Н. Л. Добрецову* больше нравится оценка в 3,2 млрд. лет, потому что она совпадает с рубежом, когда в результате остывания мантии, создалась достаточно мощная литосфера, и в нижней части этой литосферы могли кристаллизоваться алмазы. Совокупность данных говорит о том, что такой рубеж был действительно около 3,2 млрд лет.

Академик РАН Э. М. Галимов назвал доклад очень интересным. Он сказал, что в нем представлена определенная система взглядов, но по каждому вопросу есть совершенно иные представления. Стройную картину геодинамики и ее корней мы, в сущности, пока не можем понять. Например, интересный момент связан с тем, как в действительности слипаются частицы в планетном облаке. В последней, предсмертной статье академика РАН А. П. Виноградова также говорилось о том, что железные ядра возникают раньше, чем планеты. Потом это было оставлено, потому что здесь есть много противоречий. Проблема возникновения первичных твердых тел остается все еще нерешенной. Есть и другая возможность ее решения, связанная с тем, что происходит эволюция не твердых тел, а сгущений, а потом происходит коллапс этого сгущения. Это совсем иная гипотеза. И также очень большой интерес представляет проблема образования системы Земля-Луна. Здесь две позиции, по меньшей мере. Первая связана с тем, что происходили мегаимпакт-соударения крупных тел планетарного размера: протоземля столкнулась с астероидом размером с Марс, произошел выброс большой массы мантийного вещества, что и привело к образованию Луны. Вторая гипотеза – образование Земли и Луны из одного очага. А это совсем другая история. Спорными также являются и вопросы, связанные с ранним окислением мантии, с вопросами возникновения плитотектоники, с образованием ядра и т.д. Ситуация сегодня такова, что можно быть очень свободным и в суждениях, и в соответствующих исследованиях. Не хотелось бы, чтобы аудитория думала, что Н. Л. Добрецов изложил хрестоматийную систему взглядов, где осталось только выяснить некоторые моменты.

А. О. Глико поблагодарил Н. Л. Добрецова за исключительно интересный доклад, и также коснулся вопроса о различных гипотезах. В частности, напомнил эксперимент, в ходе которого пытались установить, как происходило слипание частиц при горячей аккреции. Исследователи сделали устройство, напоминающее пистолет, и стреляли в мишень. Удалось доказать, что действительно

но, железные частицы слипаются гораздо лучше, чем силикатные. Но потом оказалось, что это скорости очень большие, а когда взяли скорости поменьше, то оказалось, что силикатные частицы слипаются лучше, чем железные. Поэтому специалисты, которые этим занимаются, находятся в состоянии некоторой неопределенности, и апеллируют не к таким свойствам частиц, как слипание, а к другим, прежде всего, геохимическим особенностям, и считают, что аккреция была преимущественно однородная, но с некоторой все же и неоднородностью. А в отношении происхождения МП, конечно, все признают сейчас, что было геомагнитное динамо, и рассчитывают модели, но все, что можно сделать даже на суперкомпьютерах, это магнитные числа Рейнольда, которые на четыре порядка меньше, чем те, которые установлены в Земле. Но даже эти компьютерные эксперименты показывают, что внутреннее свойство такой системы – генерировать магнитные экскурсы, и все относительно хорошо получается. В 1992–93 гг. была опубликована работа Г. Глацмайера и П. Робертса, там есть замечательная визуализация, но, наверное, эта гипотеза не исключает других подходов.

Завершая дискуссию, Н. Л. Добрецов сказал, что существует много противоречивых моделей, но задача исследователей состоит в том, чтобы уменьшить поле неопределенности. Для этого есть два пути: во-первых, строить систему моделей, и потом ее развивать и совершенствовать; и, во-вторых, проводить лабораторные эксперименты. Большое значение имеет также и накопление фактов и все более тонкие исследования, уточняющие полученные модели. Неопределенности еще много, но наша задача ее шаг за шагом уменьшать.

Благодарность. Автор выражает искреннюю признательность Николаю Леонтьевичу Добрецову, ознакомившемуся с этими заметками и внесшему необходимые коррективы.

Е. Ю. Фирсова, Геофизический центр РАН, ул. Молодежная, 3, Москва, 119296, Россия (efirs@wdcb.ru)