

О ПРИЧИНАХ СУПЕРХРОНОВ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2006 г. С.Л.Шалимов

В рамках простой модели предложена возможная причина квазипериодичности появления суперхронов геомагнитного поля, связываемая с внешним возмущением процесса геодинамо достаточно слабым воздействием (например, со стороны Луны или структурных элементов Галактики) или обусловленная такими (внутренними) процессами, как развитие суперплюмов.

Введение

Существование инверсий магнитного поля Земли (смена полярности поля, происходящая в среднем несколько раз за миллион лет) надежно установлено по палеомагнитным данным, а также с помощью численного моделирования геодинамо. Вместе с тем в геомагнитном поле, согласно выводам палеомагнитологов, обнаруживаются долгопериодные вариации интенсивности и направления магнитного поля, которые пока отсутствуют в численных моделях.

Ярким примером долгопериодных вариаций геомагнитного поля служат суперхроны – достаточно длительные периоды (более 20 млн. лет), когда геомагнитное поле практически не меняет своей полярности. По данным палеомагнитологии, эти периоды имели место 118–81 млн. лет назад (Cretaceous Normal Superchron – CNS), 312–262 млн. лет назад (Permo-Carboniferous Reverse Superchron – PCRS, или Kiaman Reverse Superchron) и 502–470 млн. лет назад (Ordovician Superchron – OS, или Moyero Reverse Superchron), причем последний подтвержден совсем недавно [Johnson et al., 1995; Pavlov, Gallet, 2005]. Таким образом, все известные суперхроны сосредоточены в пределах фанерозоя (рис. 1), хотя из-за недостаточности экспериментальных данных нет оснований предполагать, что их не было и раньше этого времени.

Геофизические процессы, приводящие к возникновению суперхронов, неизвестны. Среди возможных называют: продолжающуюся эволюцию внутреннего ядра Земли, тепловые процессы на границе мантия–внешнее ядро (суперплюмы), блуждание полюса, а также внешние причины – резонансы между собственными частотами внешнего ядра Земли и некоторыми частотами солнечного прилива, прохождение Земли через спиральные галактические рукава (галактическое магнитное поле и потоки космических лучей). Ниже кратко обсуждены экспериментальные данные, которые показывают,

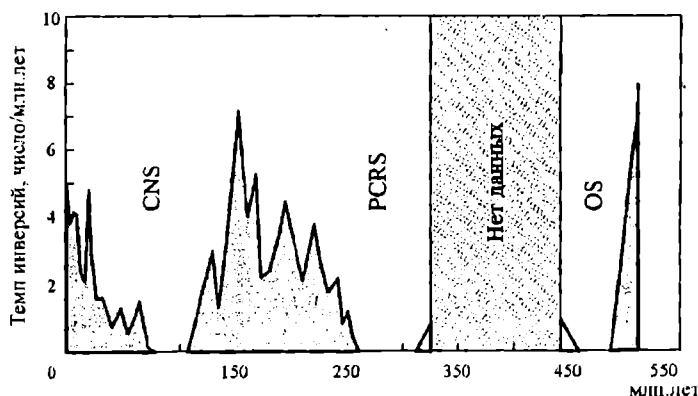


Рис. 1. Схематическая картина изменения частоты инверсий геомагнитного поля за фанерозой, полученная по морским магнитным аномалиям и магнитостратиграфическим данным [Pavlov, Gallet, 2005]

что возникновение суперхронов действительно требует специального объяснения и, видимо, эти явления не следует представлять просто как флуктуации геомагнитного поля. Кроме того, рассмотрены недостатки и противоречия существующих взглядов на причины суперхронов. Вместе с тем, исходя из предположения о том, что при эволюции Земли ее ядро может испытывать внешнее гравитационное возмущение, выдвинута гипотеза об основной роли динамики ядра в процессе генерации суперхронов.

Понятно, что, указав вероятную физическую причину суперхронов, необходимо продемонстрировать ее действие хотя бы на самой простой модели, позволяющей описывать инверсии геомагнитного поля, ибо суперхроны можно рассматривать как перерыв (достаточно длительный) в инверсиях. Поэтому будет использована предложенная сравнительно недавно простая нелинейная модель [Шалимов, 2004], которая позволяет связать нестабильность геодинамо (инверсии и экскурсы) с неустойчивостью магнито-гидродинамических течений в жидком ядре Земли. В частности, полученная при определенных предположениях из уравнений магнитной гидродинамики система уравнений Лоренца позволит смоделировать явление суперхрона.

Эволюция внутреннего ядра

Этот и следующий раздел будут посвящены решению вопроса о том, могут ли суперхроны быть обусловленными только процессами внутри Земли?

Внимание к эволюции внутреннего ядра вполне понятно, поскольку оно может влиять на конвекцию во внешнем ядре (изменяя свой радиус в процессе эволюции). Кроме того, может оказаться существенной его “магнитная инерция” (из-за предполагаемой высокой электропроводности внутреннего ядра), которая в этом случае будет определять характерные времена вариаций (например, инверсий) геомагнитного поля.

Если по какой-то причине увеличивается тепловой поток через границу жидкое ядро–мантия (СМВ), это должно приводить к уменьшению температуры на границе жидкого и твердого ядра (ICB), инициируя процесс затвердевания, при котором тяжелая фракция расплава (Fe) остается внизу (вызывая рост ядра), а легкая – всплывает, вовлекаясь в гравитационную конвекцию. По оценкам [Buffett et al., 1996], вклад композиционной конвекции равен 2/3, а остальная часть (1/3) приходится на тепловую конвекцию. Предполагается, что на ранней стадии эволюции Земли, когда размер внутреннего ядра был меньше, вклады в интенсивность конвекции могли быть сравнимыми или даже обратными. Хотя вопросы о времени зарождения твердого ядра и скорости его роста остаются дискуссионными, однако, если предположить, что для существования инверсий геомагнитного поля необходимо наличие твердого ядра, то дата самой древней зарегистрированной инверсии (приблизительно 3.23 млрд. лет назад [Layer et al., 1996]) указывала бы на чрезвычайно раннее его возникновение.

Согласуется ли этот вывод с современными экспериментальными теоретическими представлениями? Согласно последним, одним из основных параметров, определяющих относительный вклад тепловой и композиционной конвекции в ядре, служит скачок плотности на границе жидкого и твердого ядра – $\Delta\rho_{ICB}$. Используя эту величину, можно вычислить [Stacey F.D., Stacey C.H.B., 1999] долю энергии, затраченную на формирование твердого ядра (включая расход на композиционную конвекцию, остывание и затвердевание ядра) в процессе эволюции Земли (эта энергия порядка $27 \cdot 10^{27}$ Дж). При адиабатических условиях во внешнем ядре мощность теплового потока, теряемого внутренним ядром, оценивается как $3.7 \cdot 10^{12}$ Вт [Stacey, 1992]. Отсюда можно оценить время формирования твердого ядра ($2.3 \cdot 10^9$ лет назад) и среднюю мощность композиционной конвекции, которая пропорциональна скачку плотности и затрачивается на поддержание геодинамо ($5 \cdot 10^{11}$ Вт). В работе [Stacey F.D., Stacey C.H.B., 1999] было

принято $\Delta\rho_{ICB} = 0.457 \text{ г/см}^3$. Из модели PREM, основанной на результатах, полученных методом нормальных мод, следует, что $\Delta\rho_{ICB} \approx 0.6 \text{ г/см}^3$ [Masters, 1979]. Самые последние оценки скачка плотности по методу, основанному на измерении отношения амплитуд сейсмических волн PKiKP/РсР на эпицентральных расстояниях $0-70^\circ$ [Cao, Romanowicz, 2004], дают иную величину – $\Delta\rho_{ICB} \approx 0.85 \text{ г/см}^3$, что согласуется и с новым анализом по методу нормальных мод [Masters, Gubbins, 2003], где получено $0.82 \pm 0.18 \text{ г/см}^3$. Если мощность конвекции увеличивается пропорционально скачку плотности, то при той же доступной энергии время начала формирования ядра будет около $1.3 \cdot 10^9$ лет назад. Эта величина согласуется с последними модельными расчетами [Labrosse, 2003; Gubbins et al., 2004], где показано достаточно позднее формирование внутреннего ядра – $(0.3-1.8) \cdot 10^9$ лет назад.

Между тем тепловая история Земли, в частности земного ядра, должна быть также согласована с историей геомагнитного поля. Палеомагнитные исследования показывают, что Земля имеет магнитное поле в течение большей части своей истории – не менее $3.5 \cdot 10^9$ лет [McElhinny, Senanayake, 1980]. Достаточно позднее формирование твердого ядра порождает проблему определения механизма генерации геомагнитного поля на ранней стадии эволюции Земли, поскольку в отсутствие композиционной конвекции, инициируемой твердым ядром, остается только тепловая конвекция и прецессия. Хотя все последствия отказа от композиционной конвекции для ранней стадии эволюции Земли еще не изучены, уже можно сказать, что при наличии только тепловой конвекции потребуется очень большая скорость охлаждения ядра, и трудно будет удержать температуру палеоядра ниже точки ликвидуса нижней мантии. Заметим, что предположение о присутствии радиоактивных элементов в земном ядре только обостряет проблему избыточного теплового потока, но в то же время позволяет увеличить возраст твердого ядра. Эти затруднения не возникают, если учесть возможность эффективной генерации магнитного поля посредством механизма прецессии (подробнее см. [Шатимов, 2006]).

Данные по вариациям интенсивности геомагнитного поля за последние 3 млрд. лет были проанализированы лишь совсем недавно [Macouin et al., 2004]. На рис. 2 они усреднены по интервалу 20 млн. лет. Несмотря на пробелы в данных (на интервалах 300–800 и 1400–2000 млн. лет), можно отметить заметное увеличение дипольного момента в интервале между 2.5 и 3 млрд. лет и постепенный его рост, который начинается в интервале между 1000 и 800 млн. лет. Хотя эти результаты отражают поведение только

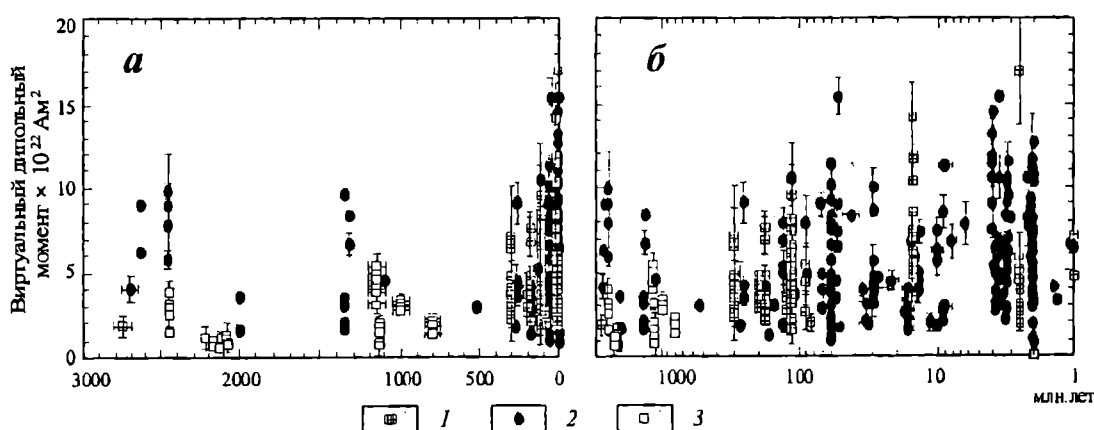


Рис. 2. Эволюция виртуального дипольного момента (по палеомагнитной базе данных) в линейной (а) и логарифмической (б) временной шкале

1, 2 – величины из палеомагнитной базы данных: 1 – Pint97, 2 – Pint02; 3 – данные докембрия. В интервалах 300–800 и 1400–2000 млн. лет данные отсутствуют [Macouin et al., 2004]

полоидальной компоненты диполя (тороидальная компонента скрыта в ядре), интересно сопоставить их с модельными представлениями об эволюции ядра. В частности, согласно работам [Labrosse et al., 1997, 2001], кристаллизация ядра не могла начаться ранее 2.7 млрд. лет и, скорее всего, имела место 1000 ± 500 млн. лет назад. Если предполагать взаимосвязь между движениями в жидком ядре и интенсивностью геомагнитного поля, то по модельным представлениям на интервале до 1000 млн. лет не следует ожидать каких-либо особенностей в эволюции поля. Постепенный рост дипольного момента между 1000 и 300 млн. лет можно связать с формированием твердого ядра и, как следствие, с усилением интенсивности движений в жидком ядре за счет композиционной конвекции.

По другим палеомагнитным данным [Hale, 1987], формирование твердого ядра соответствует границе архея и протерозоя и демонстрирует начало резкого увеличения палеоинтенсивности геомагнитного поля около 2.7 млрд. лет назад. Эта оценка также согласуется с ростом в это время дипольного момента, показанным на рис. 2. Заметим, что, как правило, сценарии эволюции твердого ядра предполагают монотонный рост его радиуса, начиная с момента формирования, что может не соответствовать действительности. Нельзя исключить существования нескольких интервалов активизации роста ядра, инициированных, например, внешними причинами.

Между тем при численном моделировании геодинамо не удалось обнаружить влияния вариаций размеров внутреннего ядра на структуру магнитного поля [Bloxham, 2000].

В последнее время часто подчеркивается роль внутреннего ядра, обусловленная его возможной высокой проводимостью, в стабилизации геодинамо [Hollerbach, Jones, 1993]. Действительно, новейшие палеомагнитные данные за последний 1 млн. лет указывают на существование 14 экскурсов поля (для 6 из которых удалось установить глобальный характер), что свидетельствует о нестабильности геодинамо [Langereis et al., 1997], причина которой неизвестна. Предполагалось, что достаточно малое характерное время оборота конвективной ячейки в жидком ядре (порядка нескольких сотен лет, если принять скорость конвекции проводящей жидкости порядка скорости западного дрейфа) должно указывать на достаточно быструю динамику внешнего ядра и, соответственно, на частую перестройку магнитного поля в нем [Gubbins, 1999]. Геомагнитное поле, однако, не следует этой быстрой динамике, по-видимому, из-за присутствия внутреннего ядра.

Магнитное поле, вмороженное в твердое ядро, имеет характерное время затухания поля из-за омической диссипации порядка $3 \cdot 10^3$ лет. С одной стороны, более высокочастотные вариации поля, благодаря такой "магнитной инерции", не могут проявиться (не говоря уже о том, что экспериментально подтвердить или опровергнуть нестабильность геодинамо на таких временах пока затруднительно). С другой стороны, внутреннее ядро определяет верхнюю временную границу того, что еще можно назвать экскурсом: его длительность не может превышать удвоенного времени омической диссипации твердого ядра, иначе может произойти инверсия. Наблюдаемые характерные времена экскурсов (5–10 тыс. лет) [Langereis et al., 1997] приблизительно соответствуют этому критерию.

Отсюда следует, в частности, что на временах более 10 тыс. лет (тем более на интервалах в миллионы лет, которые характеризуют суперхроны) проводящие свойства внутреннего ядра уже не могут играть заметной роли в эволюции геомагнитного поля. Этот вывод подтверждается в численном моделировании [Wicht, 2002].

Таким образом, можно сделать вывод о непричастности магнитной инерции внутреннего ядра к механизму генерации суперхронов.

Граница внешнего ядра и мантии

Причину возникновения суперхронов искали не только на границе жидкого и твердого ядра (ICB), но и на границе жидкого ядра и мантии (CMB). Идея таких поисков проста – длительность интервалов между суперхронами (150–200 млн. лет) одного порядка со временем изменения тепловой структуры в мантии (из-за субдукции тектонических плит или генерации тепловых плюмов в слое D'', вызывающих конвекцию в мантии). Тем самым подразумевается, что конвекция в мантии способна оказывать влияние на конвекцию в жидком ядре, благодаря их общей границе. Следовательно, появляется возможность контролировать частоту инверсий геомагнитного поля, поскольку принято считать, что частота инверсий коррелирует с мощностью, необходимой для создания геодинамо [Jacobs, 1984] (даже при том, что такая корреляция может быть как положительной, так и отрицательной [Loper, McCartney, 1986; Sheridan, 1987]), а эта мощность прямо связана со скоростью передачи тепла от ядра к мантии [Loper, 1991]. Однако оценка характерного времени такой передачи тепла приводит ко времени порядка 10^9 лет [Loper, 1992] – значительно большему, чем типичные времена долгопериодных вариаций геомагнитного поля. Поэтому, во-первых, вариации поля не могут предшествовать проявлению плюмов на поверхности Земли, как можно было бы думать, а скорее, должны отставать от интенсификации магматической активности. Во-вторых, большая “тепловая инерция” общего теплового потока из ядра как отклика на мантийные процессы, по-видимому, свидетельствует о действии других механизмов, которые обуславливают вариации частоты инверсий.

Если обратиться к суперхронам, то в рассматриваемой схеме подразумевается, что могут существовать такие процессы в мантии, при которых частота инверсий стремится к нулю (что, по определению, и будет суперхроном). Однако анализ результатов численного 3D-моделирования показывает, что скорее нужно исходить из процессов, происходящих в жидком ядре, а не в мантии.

Действительно, для стабильного геодинамо (когда частота инверсий стремится к нулю, т.е. при суперхроме) надо, чтобы на CMB поток тепла был аксиально и экваториально симметричным с максимальными его величинами на полюсах [Glatzmaier et al., 1999]. Но такая конфигурация представляется естественной для усредненного по времени потока из ядра в мантию (на вращающемся объекте), хотя вопрос о ее стабильности не был рассмотрен. При этом было получено, что: 1) генерируется магнитное поле без инверсий с высокой величиной дипольной компоненты, 2) длиннопериодные вариации поля (вековые вариации) подавлены. Таким образом, поле оказалось стабильным и в отношении инверсий, и в отношении секулярных вариаций. Последний признак, однако, прямо противоречит наблюдениям в период суперхрона [Kruiver et al., 2002]. Другими словами, имеет место “неполная” стабильность поля во время суперхрона, и это, по-видимому, обусловлено нелинейными свойствами геодинамо.

Если все же связывать возникновение суперхронов с рассмотренной структурой теплового потока на CMB, то это позволяет в корне изменить постановку вопроса о физической причине суперхронов. Ведь тогда можно принять исходным для Земли наиболее естественное состояние (с максимумом теплового потока из ядра на полюсах) и полем без инверсий, но необходимо будет указать причину, благодаря которой происходит квазипериодический процесс разрушения и восстановления такой структуры, ибо известные на сегодняшний день суперхроны во времени имеют квазипериодическое проявление. Тогда роль мантии заключается в квазипериодическом (с периодом обращения конвективной ячейки в мантии) разрушении этого состояния. В результате надо будет объяснить не квазипериодичность возникновения суперхронов самих по себе

(которые в данной схеме соответствуют естественному состоянию), а квазипериодичность разрушения стабильного (теплового и магнитного) состояния Земли.

Вместе с тем последние экспериментальные результаты [Hulot, Gallet, 2003] не подтверждают значительную роль граничных условий на СМВ в механизме формирования суперхронов. В частности, из представлений о медленно меняющихся (мантийных) граничных условиях следовало ожидать постепенного снижения частоты инверсий по мере приближения к моменту наступления суперхрона. Между тем анализ данных для CNS за 40 млн. лет до события не выявил никакого длиннопериодного предвестника суперхрона в виде снижения частоты инверсий. При этом допускалось, что более короткопериодные (менее или порядка 10 млн. лет) процессы в мантии могли влиять на вариации частоты инверсий. Эти вариации, как отмечено в работе [Hulot, Gallet, 2003], могут быть обусловлены и нелинейными эффектами геодинamo.

Более того, согласно результатам численного моделирования влияния различных граничных условий [Glatzmaier et al., 1999], необходимое (в среднем) количество инверсий получится при почти однородных граничных условиях, тогда как топографическая модель (учет тепловой структуры мантийной конвекции в граничных условиях) приводит к слишком частым инверсиям. На первый взгляд это означает, что нужно отказаться от основной идеи о влиянии мантии на конвекцию в жидком ядре. Однако авторы работы [Glatzmaier et al., 1999] поступают осторожнее. Действительно, топографическая модель, построенная по аномалиям сейсмических скоростей в нижней мантии, предписывает значительные латеральные вариации теплового потока. Именно эти вариации требуется теперь редуцировать, чтобы выдержать почти однородные граничные условия. Но латеральные вариации теплового потока можно уменьшить, если аномалии сейсмических скоростей приписать в основном композиционным, а не тепловым вариациям. Тогда вывод о возможном влиянии граничных условий, создаваемых мантийной конвекцией, может сохраниться. Другой вариант: под “теплой” мантией на СМВ, где принято считать тепловой поток малым (поток пропорционален градиенту), он на самом деле может оказаться значительно выше предполагаемого. Это может быть связано с обогащением мантии (в этих местах) железом из жидкого ядра и/или мелкомасштабной конвекцией в зонах ультранизких скоростей распространения сейсмических волн (ULZ), локализованных в этих же местах. Решить эти вопросы можно только экспериментальным путем.

Общий вывод этого раздела таков, что объяснение возникновения суперхронов с использованием только процессов, протекающих на СМВ, не позволяет пока согласовать существующие представления с экспериментальными данными. Поэтому необходимо привлечение новых идей.

Спиральные рукава Галактики и суперхроны

Как видно из предыдущих разделов, структуру геомагнитного поля и вариации его интенсивности можно смоделировать без привлечения внешнего (по отношению к Земле) воздействия [Glatzmaier, Roberts, 1995; Glatzmaier et al., 1999]. В этом смысле геодинamo можно рассматривать как самоорганизующуюся систему.

Однако сравнительно давно (впервые [Crain et al., 1969], см. также [Negi, Tiwari, 1983]) были выделены долгопериодные (в диапазоне 200–300 млн. лет) модуляции частоты инверсий геомагнитного поля, интерпретировать которые можно не только в рамках представлений о взаимодействии ядра и мантии (с характерным временем порядка 300 млн. лет), но и предполагая соответствующие изменения космической среды на пути Земли (в составе Солнечной системы) при перемещении по галактической орбите. Вычисления для нашей Галактики [Vallee, 2002] показывают, что Солнечная система

обращается вокруг галактического центра приблизительно за 250 млн. лет со скоростью, которая несколько превышает скорость четырех спиральных рукавов Галактики, которые характеризуются большой плотностью звезд, избытком межзвездных облаков и сравнительно сильными магнитными полями. Существует несколько моделей, устанавливающих моменты прохождения спиральных рукавов Солнечной системой. Согласно одной из них [Shaviv, 2002], это происходит приблизительно каждые 143 млн. лет, а по другой [Leitch, Vasisht, 1998] – каждые 183 млн. лет (этот период близок к так называемому аномалистическому периоду, т.е. интервалу времени между двумя последовательными прохождениями Солнца через апоцентр его галактоцентрической орбиты, но такое совпадение периодов может оказаться случайным). Различие обусловлено разной скоростью движения спиральных рукавов: в модели [Leitch, Vasisht, 1998] скорость движения спиральных рукавов ниже, чем в модели [Shaviv, 2002], в результате этого в первой модели суперхроны практически соответствуют времени прохождения спиральных рукавов, во второй модели суперхроны ассоциируются с прохождением Солнечной системы между спиральными рукавами, тогда как частые инверсии геомагнитного поля соответствуют ее нахождению в спиральных рукавах.

Можно ли получить уверенность в том, что имеет место отклик геомагнитного поля на внешнее (галактическое) воздействие? Из рис. 3 следует, что частые инверсии геомагнитного поля коррелируют с повышением потока космических лучей, тогда как суперхроны ассоциируются с периодами понижения интенсивности этого потока. Если это не простое совпадение, то можно сделать заключение, по меньшей мере, о том, что вариации геомагнитного поля обязаны своим происхождением не только внутренним процессам, протекающим в Земле.

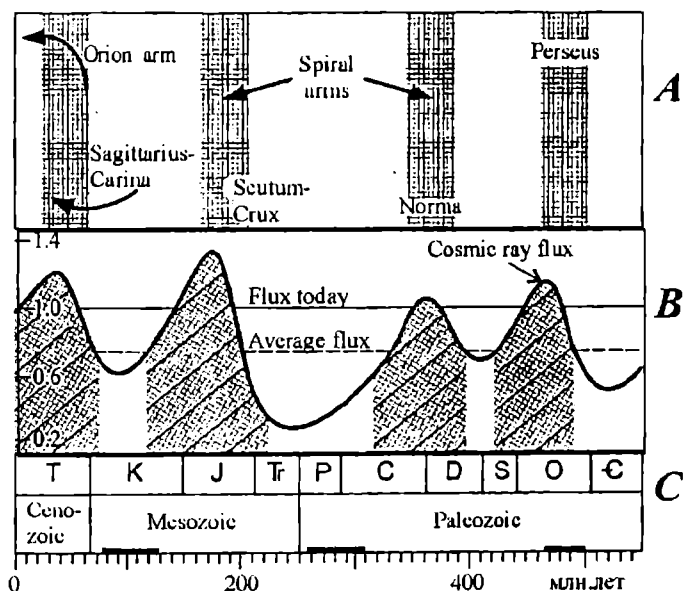
Ответ же на вопрос о том, могут ли приливные силы (например, “галактический прилив” или приливные силы со стороны структурных элементов Галактики) действовать на тела Солнечной системы при ее орбитальном движении, пока не получен.

Между тем, согласно [Machetel, Thomassot, 2002], имеет место ускорение вращения Земли приблизительно за 30 млн. лет до вхождения Солнечной системы в спиральные рукава (для модели [Shaviv, 2003]).

Необходимо отметить еще один возможный фактор галактического воздействия на геомагнитное поле. Речь идет о галактическом магнитном поле, которое различно в областях между рукавами и внутри этих областей. В частности, внутри спиралей магнитное поле хаотично, а вне – однородно [Beck, 2002]. Если бы галактическое магнитное

Рис. 3. Вариации потока галактических космических лучей [Shaviv, 2003]

А – последовательное пересечение галактических спиральных рукавов; В – интенсивность потока галактических космических лучей (в единицах интенсивности современного потока), достигающих Солнечной системы, по диффузионной модели; С – шкала геологического времени, утолщения показывают интервалы суперхрон



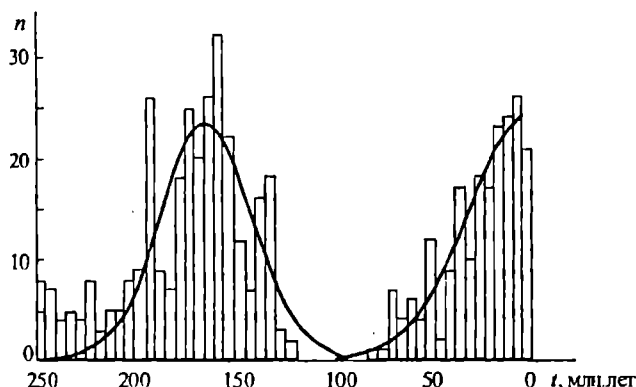


Рис. 4. Распределение частот 506 геомагнитных инверсий в зависимости от геологического времени [Гончаров, Орлов, 2003]

поле оказывало непосредственное влияние на геомагнитное, то внутри рукавов действительно можно было ожидать частые инверсии, а вне рукавов – стабилизацию направления поля, т.е. суперхроны. Однако интенсивности галактического ($4\text{--}15$ мкГс [Beck, 2002]) и геомагнитного ($3 \cdot 10^5$ мкГс) полей несопоставимы. Более того, галактическое магнитное поле экранировано магнитным полем гелиосферы (50 мкГс), поэтому прямое влияние галактического поля на геомагнитное, по-видимому, исключено.

Наконец, отметим еще один результат, касающийся времени наступления максимумов частот геомагнитных инверсий, который также можно интерпретировать как реализацию отклика Земли на прохождение областей различной плотности в Галактике. На рис. 4 дана гистограмма распределения частот инверсий, суммированных в пределах интервала 5 млн. лет для последних 250 млн. лет. Видны два широких максимума, аппроксимированных гауссоидами, которые разделены интервалом 160 ± 30 млн. лет, близким к аномалистическому периоду. Этот же интервал, как следует из рис. 1, сохраняется и для третьего (ордовикского) суперхрона.

Вместе с тем в работе [Галаягин и др., 2000], где с помощью вейвлет-анализа исследовано поведение нескольких характеристик геомагнитного поля (включая частоту инверсий, знак полярности, модуль напряженности, вариации ее направлений и величины) для достаточно большого временного интервала 1700 млн. лет (и детальнее для фанерозоя), выраженной ритмичности обнаружено не было. Это можно интерпретировать как неспособность геомагнитного поля в неогее реагировать на периодические процессы при движении Солнечной системы в Галактике. Исключение составляют колебания полярности в интервале $1500\text{--}800$ млн. лет (4 периода, длительностью 180 млн. лет каждый, что близко к аномалистическому периоду).

Система Земля–Луна и суперхроны

Гораздо большее (по сравнению с галактическим) значение в эволюции геомагнитного поля может иметь взаимодействие Земли с Луной в поле притяжения Солнца.

Отклик геодинamo на внешнее воздействие на длительных интервалах времени был рассмотрен в работе [Greff-Lefitz, Legros, 1999], где в качестве внешней силы были представлены лунно-солнечные приливы. Для собственной частоты движения жидкости во внешнем ядре и некоторых частот волн солнечного прилива был обнаружен резонанс, имевший место 3000 , 1800 и 300 млн. лет назад. Предполагалось, что он активизирует процессы вязкого и магнитного трения на границе внутреннего и внешнего ядра, а следовательно, генерацию суперплюмов в слое D'' , большой температурный градиент на СМВ (так как при образовании суперплюма слой D'' становится тоньше) и,

как следствие, интенсивные конвективные процессы во внешнем ядре, что может приводить к частым инверсиям. Авторы работы [Greff-Lefftz, Legros, 1999] считают, что именно с последним по времени резонансом связано прекращение PCRS (но не отвечают на вопрос о происхождении суперхронов).

В другой схеме приливной эволюции системы Земля–Луна [Авсюк, 1996] акцентируется возмущение орбитального движения Земли Солнцем и влияние этого возмущения на движение внутреннего ядра Земли. Напомним основные моменты этой концепции. Земля, как и Луна, обращается вокруг центра масс (барицентра) системы Земля–Луна. Плоскость эклиптики – это плоскость орбиты барицентра. Приливное воздействие Луны и Солнца на Землю оцениваются (по формуле Кеплера) как $58 \cdot 10^{-6} \text{ см/с}^2$ и $25 \cdot 10^{-6} \text{ см/с}^2$, соответственно. Возмущение же орбитального движения Земли Солнцем (произведение градиента поля Солнца на расстояние между центром Земли и барицентром) по модулю равно $19 \cdot 10^{-6} \text{ см/с}^2$, т.е. эта величина одного порядка с приливным воздействием. С удалением Луны от Земли кеплеровская часть воздействия уменьшается, а возмущение орбитального движения растет. Если в центре Земли находится взвешенное твердое ядро, то возмущение орбитального движения приводит к его смещению и, следовательно, возмущению силы тяжести. Указанное изменение в соотношении момента прямого приливного воздействия и момента, соответствующего изменению силы тяжести из-за смещения внутреннего ядра, согласно рассматриваемой гипотезе, приводит к формированию такой динамической фигуры гидросферы, которая будет соответствовать не удалению Луны от Земли, а ее приближению. И, наоборот, по мере приближения Луны кеплеровская часть начнет расти, а возмущение орбитального движения (воздействие на внутреннее ядро) уменьшаться, так что динамический процесс пойдет в обратном порядке. Период такого процесса “прихода–ухода” постулируется равным периодичности глобальных оледенений (около 200 млн. лет). Сами события глобальных оледенений в излагаемой схеме соответствуют фазе сближения Луны с Землей (минимальное сближение около $55R_E$, что меньше современной величины $60R_E$; при этом угол наклона экватора к эклиптике минимальный – около 17°) [Авсюк, 1996].

Зададимся вопросом: как в рамках рассмотренных представлений о приливной эволюции системы Земля–Луна изменение ее динамических характеристик может способствовать возникновению суперхронов?

Учитывая приблизительность, с которой дана привязка процесса “прихода–ухода” Луны (по отношению к Земле) к квазипериоду глобальных оледенений (200 млн. лет) и реальную повторяемость суперхронов с квазипериодом около 180 млн. лет, можно предположить, что суперхроны соответствуют фазе удаления Луны от Земли. Это приводит к более возмущенному движению внутреннего ядра, увеличению угла наклона оси вращения к плоскости эклиптики, замедлению вращения Земли и уменьшению кеплеровской части приливного воздействия.

В результате можно предложить следующую схему процессов. Более возмущенное движение внутреннего ядра и рост угла наклона оси вращения способствуют более асимметричной картине конвективных течений во внешнем ядре, что может привести к увеличению интенсивности геомагнитного поля. Сопутствующее замедление вращения мантии также может увеличить интенсивность поля (из-за ускорения вращения ядра). Ряд экспериментальных результатов [Tarduno et al., 2001; Kruiver et al., 2002] прямо свидетельствуют о наличии сильного геомагнитного поля в периоды суперхронов.

При достаточном удалении Луны от Земли возросшая роль возмущения в движениях жидкого ядра Земли может оказаться существенной. Здесь вероятны различные сценарии, гарантирующие возникновение суперхронов. Чтобы продемонстрировать это влияние, рассмотрим простую нелинейную модель [Шалимов, 2004], позволяющую исследовать механизм инверсий и экскурсов геомагнитного поля в связи с неустойчиво-

стью магнитогидродинамических течений в жидком ядре Земли. При определенных предположениях из уравнений магнитной гидродинамики можно получить систему уравнений Лоренца, с помощью которых моделируется процесс эволюции геомагнитного поля. Для описания внешнего воздействия в уравнение, описывающее движение в жидком ядре, добавим малое слагаемое, соответствующее непотенциальному вкладу в уравнение Навье–Стокса (что можно согласовать, например, с возмущением орбитального движения Земли Солнцем). В результате система Лоренца примет вид [Шалимов, 2004]

$$\begin{aligned} \frac{dX}{d\tau} &= (Y - X)Pr + f \cos \theta, \\ \frac{dY}{d\tau} &= rX - Y - XZ, \\ \frac{dZ}{d\tau} &= -bZ - YX, \end{aligned} \quad (1)$$

где $Pr = \nu/\eta$ – магнитное число Прандтля; $\tau = t(4\pi^2\eta/bd^2)$ – безразмерное время; $f \cos \theta$ – слагаемое, моделирующее приливное воздействие, с амплитудой f и фазой θ ; константы определены как $b = 4/(1+a^2)$, $r = Ra/Ra_c$, $Ra_c = 64\pi^2/a^2b^3$, $Ra = (d^4/4\rho\nu\eta)(\partial B_{0x}/\partial z)(\partial B_{0z}/\partial x)$, $a^2 = 1/2$, $b=8/3$. Переменные X и (Y, Z) описывают поле скоростей и быстро меняющуюся компоненту магнитного поля, соответственно.

Применяя полученную систему уравнений к описанию процесса эволюции геомагнитного поля, выберем оценки величин, обычно используемых в теории геодинамики [Fearn, 1998]: $\eta \approx 1$ м²/с; $\rho \approx 10^4$ кг/м³ – массовая плотность; $\partial B_{0x}/\partial z \approx B_{0x}/r_c$; $B_{0x} \approx 0.001$ Тл; $r_c \approx 3500$ км – радиус ядра; $B_{0z} \approx B_{0x}/8$; $d=10^3$ км – характерный горизонтальный масштаб. Для слагаемого, моделирующего приливное воздействие, примем $f=10^{-3}$, $\theta=7\pi/18$. Ограничиваясь для вязкости ν оценками, полученными по вариациям магнитного поля и распространению сейсмических волн [Lumb, Aldridge, 1991], выберем эффективную величину $\nu=15$ м²/с. Тогда для остальных параметров системы (1) получаем $Pr=15$, $r=28$. Численное решение системы (1) с учетом модельного приливного воздействия и без него показано на рис. 5. Поскольку характерное время имеет порядок $2 \cdot 10^3$ лет, то для фиксированной медленной компоненты поля в единицах безразмерного времени τ длительность модельного решения (для переменной $Y(\tau)$) будет 20 млн. лет. Из рис. 5, а видно, что даже слабое воздействие способно существенно повлиять на эволюцию магнитного поля, т.е. нарушить обычный случайный процесс инверсий

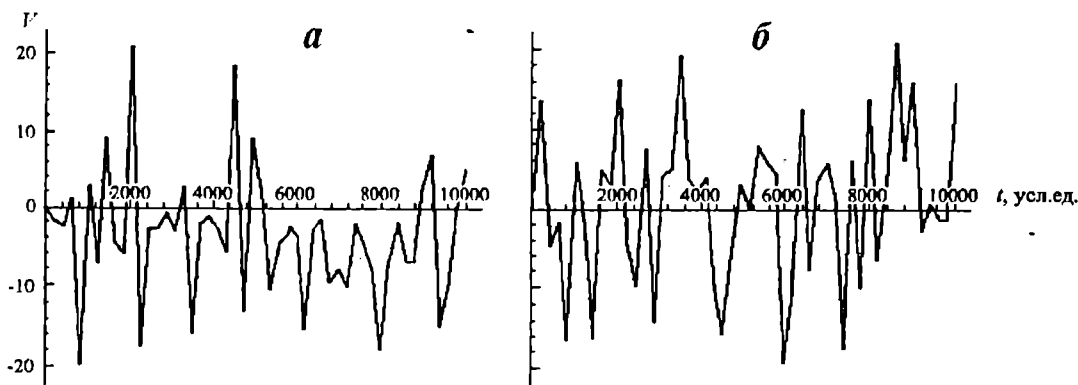


Рис. 5. Численное решение системы (1) (см. текст) при $f \neq 0$ (а) и при $f=0$ (б). По оси абсцисс – вариации быстрой компоненты поля, по оси ординат – безразмерное время

геомагнитного поля (рис. 5, б). В частности, из рис. 5, а следует, что направление магнитного поля способно “зависнуть” на длительный промежуток времени порядка 10 млн. лет, что уже сравнимо с длительностью суперхронов.

Процесс прекращения суперхрона в рассматриваемой схеме приливной эволюции системы Земля–Луна связывается с приближением Луны к Земле. Это соответствует $f=0$ в системе (1) и возвращению к случайному процессу инверсий (рис. 5, б).

Таким образом, в рамках простой модели можно предложить вероятную физическую интерпретацию суперхронов как внешнее возмущение процесса геодинамо, обусловленное достаточно слабым воздействием со стороны Луны или структурных элементов Галактики. Квазипериодичность некоторых геологических событий (с периодом, близким к аномалистическому году) указывает именно на такую интерпретацию. В то же время нельзя исключить влияния на процесс геодинамо (при определенном согласовании с экспериментальными данными) и внутренних физических причин (например, развитие суперплюмов, которые, тем не менее, остаются внешними причинами по отношению к механизму динамо). При согласованности внутренних и внешних причин указанная квазипериодичность ассоциируется с внешним (по отношению к Земле) воздействием. Возможно также независимое воздействие на процесс геодинамо со стороны внутренних и внешних причин, но тогда необходим механизм их синхронизации для интерпретации квазипериодичности возникновения суперхронов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-05-64862).

Литература

- Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 188 с.
- Галагин Д.К., Решетняк М.Ю., Печерский Д.М. и др. Вейвлет-анализ геомагнитного поля в неогее // Физика Земли. 2000. № 4. С.82.
- Гончаров Г.Н., Орлов В.В. Глобальные повторяющиеся события в истории Земли и движение Солнца в Галактике // Астрон. журн. 2003. Т. 80, № 11. С.1002-1012.
- Шалимов С.Л. О механизме нестабильности геодинамо // Докл. РАН. 2004. Т. 395, № 2. С.258-260.
- Шалимов С.Л. О прецессионном геодинамо // Физика Земли. 2006. № 6. С.14-20.
- Beck R. Galactic and extragalactic magnetic fields // Space Sci. Rev. 2002. V.99. P.243-260.
- Bloxham J. The effect of thermal core-mantle interactions on the palaeomagnetic secular variations // Phil. Trans. Roy. Soc. London. Ser.A. 2000. V.358. P.1171-1179.
- Buffett B.A., Huppert H.E., Lister J.R., Woods A.W. On the thermal evolution of the Earth's core // J. Geophys. Res. 1996. V.101. P.7989.
- Сао А., Романович В. Constraints on density and shear velocity contrasts at the inner core boundary // Geophys. J. Int. 2004. V.157. P.1146.
- Crain I.K., Crain P.L., Plaut M.G. Long period fourier spectrum of geomagnetic reversals // Nature. 1969. V.223. P.283.
- Fearn D.R. Hydromagnetic flow in planetary cores // Rep. Prog. Phys. 1998. V.61. P.175-235.
- Glatzmaier G.A., Coe R.S., Hongre L., Roberts P. The role of the Earth's mantle in controlling the frequency of geomagnetic reversals // Nature. 1999. V.401. P.885-890.
- Glatzmaier G.A., Roberts P. A three-dimensional self-consistent computer simulation of the geomagnetic field reversal // Nature. 1995. V.377. P.203-209.
- Greff-Leffiz M., Legros H. Core rotation dynamics and geological events // Science. 1999. V.286. P.1707-1709.
- Gubbins D., Alfe D., Masters G., Price G.D., Gillan M. Gross thermodynamics of two-component core convection // Geophys. J. Int. 2004. V.157. P.1407-1414.
- Gubbins D. The distinction between geomagnetic excursions and reversals // Geophys. J. Int. 1999. V.137. P.F1-F3.
- Hale C.J. Palaeomagnetic data suggest link between the Archaean-Proterozoic boundary and inner-core nucleation // Nature. 1987. V.329. P.233-237.

- Hollerbach R., Jones C.A. Influence of the Earth's inner core on geomagnetic fluctuations and reversals // *Nature*. 1993. V.365. P.541-543.
- Hulot G., Gallet Y. Do superchrons occur without any palaeomagnetic warning? // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. V.210. P.191-201.
- Jacobs J.A. Reversals of the Earth's magnetic field. Bristol: Adam Hilder, 1984. 229 p.
- Johnson H.P., Patten D.V., Tivey M., Sager W.W. Geomagnetic polarity reversal rate for the Phanerozoic // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V.22, N 3. P.231-234.
- Kruiver P.P., Langereis C.G., Dekkers M.J. et al. The implication of non-suppressed geomagnetic secular variation during the Permo-Carboniferous Reversed Superchron // *Phys. Earth Planet Inter.* 2002. V. 131. P.225-235.
- Labrosse S. Thermal and magnetic evolution of the Earth's core // *PEPI*. 2003. V.140. P.127-143.
- Labrosse S., Poirier J.P., Le Mouel J.L. On cooling of the Earth's core // *Phys. Earth Planet Inter.* 1997. V.99. P.1-17.
- Labrosse S., Poirier J.P., Le Mouel J.L. The age of the inner core // *Earth Planet Sci. Lett.* 2001. V. 190. P.111-123.
- Langereis C.G., Dekkers M.J., Lange G.J. et al. Magnetostratigraphy and astronomical calibration of the last 1.1 Myr from an eastern Mediterranean piston core and dating of short events in the Brunhes // *Geophys. J. Int.* 1997. V. 129. P.75-94.
- Layer P.W., Kroner A., McWilliams M. An Archean geomagnetic reversal in the Kaap valley Pluton, South Africa // *Science*. 1996. V. 273. P.943-946.
- Leitch E.M., Vasisht G. Mass extinctions and the sun's encounters with spiral arms // *New Astronomy*. 1998. V. 3. P.51-56.
- Loper D.E., McCartney K. Mantle plumes and the periodicity of magnetic field reversals // *Geophys. Res. Lett.* 1986. V.13. P.1525-1528.
- Loper D.E. Thermal interactions twixt mantle and core // *J. Geomag. Geoelectr.* 1991. V.43. P.79-91.
- Loper D.E. On the correlation between mantle plume flux and the frequency of reversals of the geomagnetic field // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V.19, N 1. P.25-28.
- Lumb L.I., Aldridge K.D. On viscosity estimates for the Earth's fluid outer core and core-mantle coupling // *Geomag. Geoelectr.* 1991. V.43. P.93-110.
- Machetel P., Thomassot E. Cretaceous length of day perturbation by mantle avalanche // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. V.202. P.379-386.
- Macouin M., Valet J.P., Besse J. Long-term evolution of the geomagnetic dipole moment // *Phys. Earth Planet Inter.* 2004. V.147. P.239-246.
- Masters G. Observational constraints on the chemical and thermal structure of the Earth's deep interior // *Geophys. J. RAS*. 1979. V.57. P.507.
- Masters G., Gubbins D. On the resolution of density within the Earth // *Phys. Earth Planet Inter.* 2003. V.140. P.159.
- McElhinny M.W., Senanayake W.E. Paleomagnetic evidence for the existence of the geomagnetic field 3.5 Ga ago // *JGR*. 1980. V.85. P.3523.
- Negi J.G., Tiwari R.K. Matching long term periodicities of geomagnetic reversals and galactic motions of the solar system // *Geophys. Res. Lett.* 1983. V.10. P.713-716.
- Pavlov V.E., Gallet Y. A third superchron during the Early Paleozoic // *Episodes*. 2005. V.28, N 2. P.1-7.
- Shaviv N.J. Cosmic ray diffusion from the galactic spiral arms, iron meteorites, and a possible climatic connection // *Phys. Rev. Lett.* 2002. V.89. P.051102-1-051102-4.
- Shaviv N.J. The spiral structure of the Milky Way, cosmic rays, and ice age epochs on Earth // *New Astronomy*. 2003. V.8. P.39-77.
- Sheridan R.E. Pulsation tectonics as the control of long-term stratigraphic cycles // *Paleoceanology*. 1987. V.2. P.97-118.
- Stacey F.D. *Physics of the Earth*. 3rd edn. Brisben: Brookfield Press, 1992. 513 p.
- Stacey F.D., Stacey C.H.B. Gravitational energy of core evolution: implications for thermal history and geodynamo power // *Phys. Earth Planet Inter.* 1999. V.110. P.83.
- Tarduno J.A., Cottrell R.D., Smirnov A.V. High geomagnetic intensity during the Mid-Cretaceous from Thellier analyses of single plagioclase crystals // *Science*. 2001. V.291. P.1779-1783.
- Vallee J.P. Metastudy of the spiral structure of our home galaxy // *Ap. J.* 2002. V.566. P.261-266.
- Wicht J. Inner-core conductivity in numerical dynamo simulations // *Phys. Earth Planet Inter.* 2002. V.132. P.281-302.