

ТРИ РЕЖИМА РАБОТЫ ГЕОДИНАМО

© 2016 г. Ив Галле¹, В. Э. Павлов^{2,3}

¹Парижский институт физики Земли, Сорбонна Париж Сите, Университет Париж Дидро, УМР 7154, ИЦНИ, F-75005, г. Париж, Франция

²Институт физики Земли им. О.Д. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

³Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия

E-mail: pavlov-home@rambler.ru

Поступила в редакцию 21.10.2015 г.

Данные, полученные при изучении поведения геодинamo на протяжении геологической истории, указывают на существование внезапных и значительных изменений частоты геомагнитных инверсий. Это касается периодов установления и завершения суперхронов, а также, вероятно, интервалов времени с крайне высокой частотой геомагнитных инверсий (>10–15 инверсий за 1 млн лет). Такое поведение может быть объяснено в рамках предлагаемой модели, которая предполагает существование трех рабочих режимов в инверсионном процессе, а именно: 1) нормального инверсионного режима, в течение которого распределение геомагнитных инверсий описывается случайным стационарным процессом с частотой инверсий порядка 3 инверсий за 1 млн лет; 2) неинверсионного “суперхронного” режима, для которого свойственно существование длительных интервалов времени без инверсий; 3) гиперактивного инверсионного режима, характеризующегося крайне высокой частотой геомагнитных инверсий. Наша модель также предполагает, что переход от одного режима работы геодинamo к другому может совершаться внезапно (в масштабах первых миллионов лет). В развитее предшествующих исследований мы допускаем, что переход от одного режима к другому может модулироваться характером распределения теплового потока на границе ядро–мантия. При этом до формирования внутреннего ядра в докембрии такие переходы могли быть более частыми из-за более сильного влияния термальных условий на границе ядро–мантия на работу геодинamo.

DOI: 10.7868/S0002333716020046

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является частью проекта, реализуемого нами в последние годы и направленного на изучение характера изменений частоты геомагнитных инверсий на протяжении фанерозоя и протерозоя. Целью проекта является выяснение причин этих изменений и развитие представлений о характере влияния мантийной динамики на процесс генерации геомагнитного поля. Хотя эти проблемы обсуждаются уже не первое десятилетие, они продолжают оставаться предметом острых дискуссий, особенно в той их части, которая касается самой природы процессов, вызывающих долговременные изменения частоты геомагнитных инверсий (см., напр., [Merrill et al., 1996; Hulot, Gallet, 1997; Glatzmaier et al., 1999; Courtillot, Olson, 2007; Driscoll, Olson, 2011; Aubert et al., 2009; 2011; Biggin et al., 2012; Olson et al., 2013]).

Несколько магнитостратиграфических исследований, выполненных в рамках проекта, были сфокусированы на интервале времени, отвечающем раннему палеозою [Gallet, Pavlov, 1996; Pavlov, Gallet, 1998; 2001; 2005; Gallet et al., 2003a]. В ходе этих работ [Pavlov, Gallet, 2001; Gallet et al., 2003a] нами были получены доказательства существования в ордовике третьего фанерозойского суперх-

рона “Мойеро”, а также предшествующего этому суперхрону кембрийского интервала, характеризующегося высокой частотой геомагнитных инверсий (~7 инверсий за 1 млн лет). Следующий шаг состоял в магнитостратиграфическом изучении ряда позднепротерозойских осадочных разрезов Сибири и Урала, возраст которых составляет ~1050 и ~850 млн лет [Pavlov, Gallet, 2010; Gallet et al., 2000a; 2012]. Результатом этих исследований явилось получение уникальной записи изменений полярности геомагнитного поля, включающей более сотни магнитополярных интервалов и являющейся наиболее детальной среди имеющихся на настоящий момент для докембрия. Важной характеристикой этой записи является наличие резких переходов между интервалами с высокой и низкой частотой геомагнитных инверсий (или с полным отсутствием таковых). Наиболее длительный из последних, названный нами суперхрон “Мая”, существовал около 1 млрд лет назад [Pavlov, Gallet, 2010; Gallet et al., 2012].

В настоящей работе мы представляем попытку обобщения наших данных с учетом знаний, полученных ранее при изучении долговременной эволюции инверсионного процесса на протяжении последних 150 млн лет по результатам исследований морских линейных аномалий (см., напр.,

[Cande, Kent, 1992; Channell et al., 1995; Opdyke, Channell, 1996]) и более древних периодов геологической истории по данным магнитостратиграфических исследований. Выполненный анализ позволяет предложить довольно простой сценарий, объясняющий многообразие форм проявления инверсионного процесса на протяжении его эволюции в ходе геологической истории.

ПРОБЛЕМЫ В ОПИСАНИИ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ ГЕОМАГНИТНЫХ ИНВЕРСИЙ В ТЕЧЕНИЕ ПОСЛЕДНИХ 150 МЛН ЛЕТ

Кажется парадоксальным, однако несмотря на наличие довольно детальной записи изменений полярности геомагнитного поля для последних 150 млн лет, все еще имеются серьезные трудности в установлении характера инверсионного процесса для этого временного интервала [Constable, 2000; McFadden, Merrill, 2000; Hulot and Gallet, 2003]. До последнего времени считалось общепризнанным, что начиная, по крайней мере, с поздней юры при приближении к меловому суперхрону (~121–84 млн лет назад), частота геомагнитных инверсий постепенно уменьшалась, а после его завершения — постепенно увеличивалась (см., напр., [McFadden, Merrill, 1984; Courtillot, Besse, 1987; Tarduno et al., 2002]). Галле и Юло [Gallet, Hulot, 1997; Hulot, Gallet 2003]) были первыми, кто поставил под сомнение существование медленной эволюции в частоте геомагнитных инверсий и вытекающую из этого вывода идею о нестационарности инверсионного процесса на всем рассматриваемом интервале времени за исключением суперхрона. Напротив, в работе [Hulot, Gallet, 2003] было указано на возможность быстрой блокировки процесса геомагнитных инверсий накануне суперхрона. Эти авторы показали, что, вероятно, только два хрона магнитной полярности, CM3g и CM1n, статистически могут рассматриваться как предвестники геомагнитного суперхрона, указывающие на уменьшение частоты инверсий на протяжении последних ~10 млн лет перед его “включением”. Внезапность установления суперхрона может указывать на то, что его причину следует связывать с нелинейной природой геодинamo. Другим возможным объяснением может являться “пороговый” характер ответа геодинamo на внешнее воздействие, обусловленное, в частности, мантийной динамикой [Courtillot, Olson, 2007].

Ответ на вопрос о характере изменения частоты геомагнитных инверсий после завершения мелового суперхрона также не очевиден, хотя существование тренда постепенного увеличения частоты инверсий до времени ~25–30 млн лет назад по-прежнему представляется достаточно вероятным [Courtillot, Gallet, 1995; Gallet, Hulot, 1997; Lowrie, Kent, 2004]. В работе [Lowrie, Kent, 2004], однако указано, что этот тренд определяется, главным образом, наличием двух наиболее длинных (~4 и ~5 млн лет) хронов сразу после заверше-

ния суперхрона. Эти хроны (C33g и C33n) сами по себе интересны, поскольку содержат несколько криптохронов, обнаруженных [Bouligand et al., 2006] при анализе магнитных профилей над океаническими линейными аномалиями. Несколько лет назад, в ходе магнитостратиграфических исследований в Канаде было показано [Lerbekmo, Evans, 2012], что некоторые из этих криптохронов (в частности, 6, отвечающих хрону C33n) могут соответствовать коротким хронам с длительностью около 50000 лет. В том случае, если эти результаты будут подтверждены (и новые хроны будут включены в Шкалу геомагнитной полярности), гипотеза о постепенном увеличении частоты геомагнитных инверсий после мелового суперхрона вступит в противоречие с наблюдениями и должна будет уступить место идее об относительно быстром восстановлении после суперхрона инверсионного процесса с частотой порядка 2–3 инверсий за 1 млн лет.

ЭПИЗОДЫ КРАЙНЕ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ ГЕОМАГНИТНЫХ ИНВЕРСИЙ

Если суперхроны известны уже почти 50 лет (см., напр., [Helsley, Steiner, 1969; Opdyke, Channell, 1996]), то сам факт существования интервалов времени с очень высокой частотой инверсий (более 10 за 1 млн лет) все еще остается предметом острых дискуссий. Анализ результатов исследований морских линейных аномалий указывает на то, что такие интервалы могли существовать в средней юре (см., напр., [Handschumacher et al., 1988; Sager et al., 1998; Tivey et al., 2006; Tominaga et al., 2008]). Амплитуда соответствующих аномалий относительно невелика, что существенно затрудняет их сопоставление с хронами магнитной полярности. Тем не менее, представляется вероятным, что в течение нескольких миллионов лет вблизи временного уровня ~160 млн лет назад, геодинamo находилось в гиперактивном состоянии. Последнее характеризовалось значительно более высокой частотой инверсий (≥ 12 инверсий за 1 млн лет [Tivey et al., 2006]), чем та, которая установилась вскоре после, в течение поздней юры и раннего мела (~3 инверсий за 1 млн лет, см. [Hulot, Gallet, 2003; Biggin et al., 2012]).

Новые результаты, полученные в ходе магнитостратиграфических исследований последних десятилетий (Беломорское побережье — [Popov et al., 2005; Южный Урал — [Bazhenov et al., 2015; Енисейский кряж — [Shatsillo et al., 2015]) указывают на возможность существования другого интервала гиперактивности с очень высокой частотой инверсий в позднем венде (эдиакарии). Выполненные оценки, основанные, в значительной степени, на данных о скорости осадконакопления изученных осадочных разрезов, указывают на возможность того, что частота инверсий в течение некоторых интервалов времени вблизи границы фанерозоя и докембрия могла существенно превышать значе-

ние в 10 инверсий за 1 млн лет. Отметим при этом, что такая интерпретация хорошо согласуется с палеомагнитными данными, полученными [Halls et al., 2015] по дайкам Канадского щита с возрастом около 585 млн лет. Высокая частота геомагнитных инверсий (не менее 7 инверсий за 1 млн лет) была отмечена также для среднего кембрия [Pavlov, Gallet, 2001, Gallet et al., 2003a] по результатам магнитостратиграфических исследований разрезов северо-запада (Кулюмбэ) и северо-востока (Хорбусунка) Сибирской платформы. Не исключено, что при более детальном исследовании этих разрезов, могут быть получены еще более высокие оценки частоты инверсий.

ОБСУЖДЕНИЕ

Идея о том, что инверсионный процесс медленно эволюционирует в масштабе времени порядка десятков миллионов лет, возникла в 80-х годах прошлого столетия и до сих пор широко используется при описании последовательности геомагнитных инверсий в течение последних 150 млн лет. В значительной степени эта идея опирается на видимое постепенное нарастание частоты геомагнитных инверсий после завершения мелового суперхрона (см., напр., [McFadden, McElhinny, 1984]). Однако, как это уже обсуждалось выше, вывод о прогрессивном нарастании частоты инверсий существенным образом зависит от длительности нескольких магнитополярных хронов, чья целостность может быть поставлена под сомнение [Lerbekmo Evans, 2012]. Более того в статье [Gallet et al., 2012] обратили внимание на то, что в конце перми – самом начале триаса, т.е. практически сразу после завершения каменноугольно-пермского суперхрона Киама [Gallet et al., 2000b; Hounslow, Muttoni, 2010], частота геомагнитных инверсий была относительно высока и составляла ~3 инверсии за 1 млн лет. Отметим, что подобное быстрое восстановление инверсионного процесса после выхода из суперхрона, обнаруженного вблизи временного уровня ~1.4 млрд лет, было отмечено в статье [Elston et al., 2012]. С другой стороны, внезапная остановка инверсионного процесса при “включении” суперхрона поддерживается результатами исследований, выполненных [Hulot, Gallet, 2003] для мелового суперхрона и [Pavlov, Gallet, 2010] для мезо-неопротерозойского суперхрона Мая.

Приведенные примеры позволяют говорить о резких и внезапных изменениях в эволюции инверсионного процесса. Это касается моментов установления и прекращения суперхронов, а также, по-видимому, эпизодов, отвечающих крайне высокой частоте геомагнитных инверсий. Представляется, что такие эпизоды с крайне высокой частотой инверсий (>10–15 инверсий за 1 млн лет) не могут быть сопоставлены с интервалами времени, когда частота инверсий была 3–5 инверсий за 1 млн лет (напр., миоцен, поздняя юра,

проздный триас – [Channell, Opdyke, 1996; Gallet et al., 1992; 2003b] или даже несколько выше (средний кембрий, ранняя юра – [Gallet et al., 2003a; Biggin et al., 2012]).

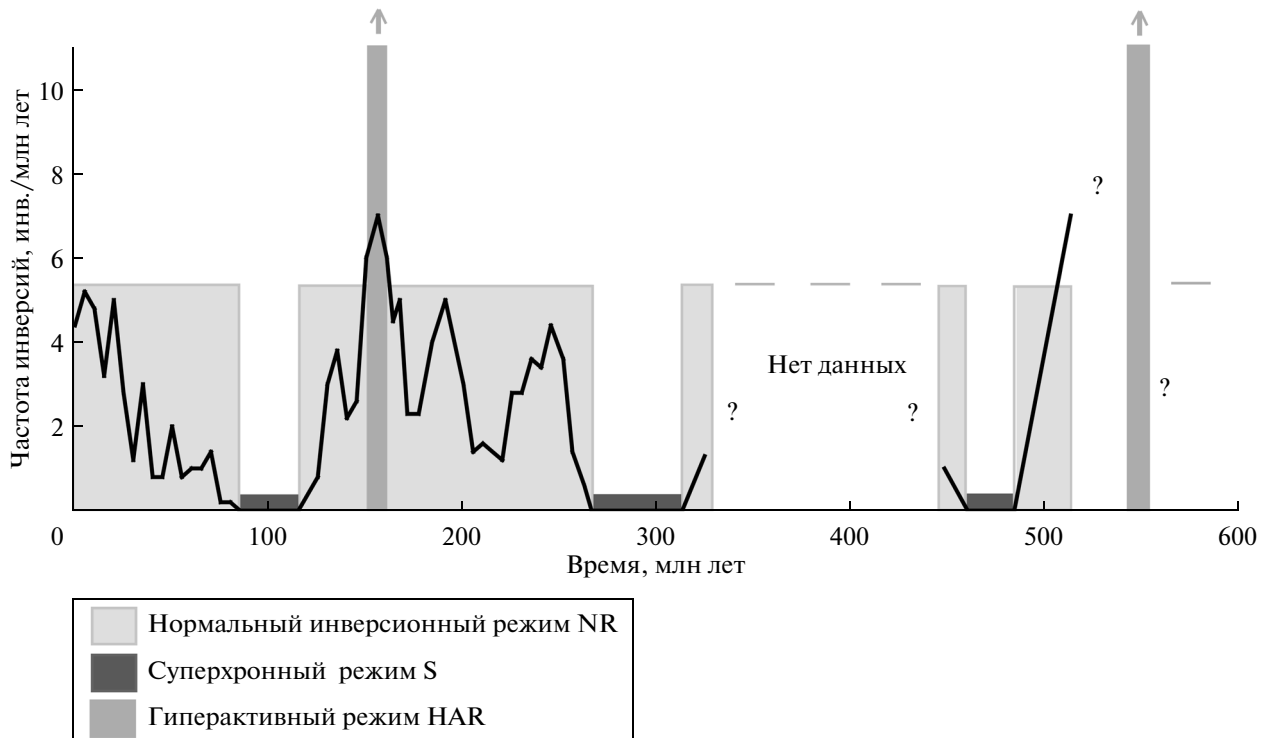
Таким образом, попытки описания эволюции частоты геомагнитных инверсий путем ее представления как постепенного процесса сталкиваются с существенными трудностями, которые побуждают нас к рассмотрению альтернативной, одновременно радикальной и простой идеи, согласно которой в инверсионном процессе существует три рабочих режима, внезапно (в масштабах первых миллионов лет) сменяющих друг друга, а именно:

1) *нормальный инверсионный (normal reversing – NR) режим*, в течение которого распределение геомагнитных инверсий описывается случайным стационарным процессом (отражающим нелинейную природу магнито-гидродинамического процесса, действующего в ядре [Hulot, Gallet, 2003] с частотой инверсий порядка 3 за 1 млн лет. В частности, такой режим реализовывался с момента завершения суперхрона Киама в поздней перми до момента наступления среднеюрского эпизода гиперактивности, а также на всем протяжении времени после завершения мелового суперхрона (или хрона C33n – см. ниже). Отметим, что мы не выделяем на последнем интервале времени два различных стационарных сегмента, как это делается в работе [Lowrie, Kent, 2004].

2) *неинверсионный “суперхронный” режим S*, для которого свойственно существование длительных интервалов времени без инверсий, как это было на значительном протяжении мела, каменноугольно-пермского времени и ордовика. Вслед за изложенным в статье [Lowrie, Kent, 2004] мы относим к проявлениям этого режима также все хроны с длительностью порядка 4 млн лет и более. В частности, это касается хронов C33n и C33g, существовавших сразу после завершения мелового суперхрона.

3) *гиперактивный (hyper-active reversing – HAR) режим*, характеризующийся крайне высокой (более 10–15 за 1 млн лет) частотой геомагнитных инверсий. По крайней мере, 2 эпизода, соответствующих этому режиму, имели место в течение последних 600 млн лет – в средней юре [Tivey et al., 2006] и вблизи границы докембрия и фанерозоя [Popov et al., 2005; Bazhenov et al., 2015].

Интересно, что предлагаемая нами схема (см. рисунок) переключается с поведением солнечного динамо, рассматриваемым в масштабе времени порядка тысяч лет, хотя процессы, лежащие в основе описываемых явлений, и их характерные времена совершенно различны. В статье [Usoskin et al., 2014] показано, что эволюция солнечной активности на протяжении последних 3 тысячелетий может быть описана как смена трех мод: преобладающей “нормальной” моды, моды, связанной с Большими Минимумами и третьей, более редкой модой, связанной с Большими Максиму-



Схематическое изображение долговременной эволюции инверсионного процесса геодинамо в течение фанерозоя. Черная линия (взято из [Gallet et al., 2012]) представляет характер изменения частоты геомагнитных инверсий в течение последних 150 млн лет (получено по данным изучения океанических линейных магнитных аномалий с использованием скользящего окна размером 5 млн лет) и ранее (получено по данным магнитостратиграфических исследований). В последнем случае частота инверсий была рассчитана с использованием данных о длительности соответствующих геологических эпох. Смена режимов работы геодинамо показана: светло-серый цвет соответствует режиму NR; серый — режиму S, а темно-серый — режиму HAR.

мами. Опираясь на эту аналогию, суперхроны и HAR эпизоды, подобно солнечным Большим Максимумам и Большим Минимумам, должны рассматриваться не как “хвосты” распределения, свойственного нормальной моде, но, скорее, как события, отражающие существование ограниченного числа особых режимов работы геодинамо, способных резко переключаться между собой (см. также [McFadden, Merrill, 1995]).

Наша модель включает в себя возможность модуляции долговременной эволюции геодинамо мантийной динамикой. В этом отношении другая аналогия с поведением солнечного динамо могла бы быть полезна. В статье [Usoskin et al., 2015] показано, что в течение голоцена частота Солнечных Больших Минимумов и Больших Максимумов варьировала согласно так называемому циклу Холстатта, имеющему период ~2400 лет (см. также [Steinilber et al., 2012]). Выполненный этими авторами анализ показал, что циклы Холстатта модулируют вероятность реализации мгновенных переходов между различными модами функционирования солнечного динамо. При этом Большие Минимумы (Максимумы) соответствуют нижним (верхним) интервалам цикла.

В нашей схеме мы принимаем, что мантийная конвекция, связанная с циклами Вильсона, может играть ту же роль в переключении режимов геодинамо, что и процессы, определяющие цикл Холстатта, в переключении мод солнечного динамо. Контролируя термальные условия на границе ядро—мантия, мантийная динамика может обуславливать внезапное установление различных рабочих режимов инверсионного процесса и/или их переключение.

В этом смысле предлагаемая нами гипотеза хорошо согласуется со взглядами многочисленных исследователей на роль мантийной конвекции в работе геодинамо (см., напр., [McFadden, Merrill, 1984; Courtillot, Besse, 1987; Glatzmaier et al., 1999; Tarduno et al., 2002; Courtillot, Olson, 2007; Driscoll, Olson, 2011; Pétrélis et al., 2011; Aubert et al., 2009; 2011; Biggin et al., 2012; Olson et al., 2013]). Например, используя численное моделирование динамо, [Driscoll, Olson, 2011] обнаружена корреляция между минимумами (максимумами) теплового потока из ядра и суперхронами (периодами с высокой частотой инверсий); в статье [Lhuillier et al., 2013] отмечается, что при однородных тепловых условиях на границе ядро—мантия, динамо не испытывает спонтанных переходов от инверсионного состояния к суперхронному; в статье

[Pétrellis et al., 2011] показано, что на инверсионный процесс существенное влияние оказывает характер распределения потоков внутри ядра, который может зависеть от мантийной динамики.

Если вслед за рядом авторов принять возможность позднего (позднее 1 млрд лет назад — [Labrosse et al., 2003; Aubert et al., 2009] образования ядра, то, исходя из предлагаемой схемы, можно предположить, что на протяжении большей части докембрия переходы геодинамо от одного режима к другому совершались более часто. Этого следует ожидать в силу того обстоятельства, что влияние распределения теплового потока на границе ядро-мантия на работу геодинамо было значительно сильнее до нуклеации ядра, чем позже [Wicht et al., 2011; Gallet et al., 2012].

Наша модель, несмотря на то, что она носит предварительный характер, видимо уже сейчас в значительной степени может объяснить многообразие проявления инверсионного процесса на протяжении геологической истории и его сложность. Эта сложность может возникать за счет перекрытия двух процессов с сильно различающимися характерными временами — процесса геодинамо с внезапными (в масштабах миллионов лет) переходами и процесса мантийной конвекции, чьи характерные времена составляют многие десятки и сотни миллионов лет. Мы признаем, что тестирование нашей модели представляет собой непростую задачу. Важным шагом в ее подтверждении явилось бы обнаружение периодов гиперактивности внутри суперхронов. К сожалению, эта “идеальная” ситуация может оказаться крайне редкой, если мантийная динамика действительно оказывает сильное влияние на долговременную эволюцию геодинамо. Другим хорошим тестом было бы обнаружение двух или нескольких суперхронов на относительно коротком временном интервале.

Тем не менее настоящая работа подчеркивает важность дальнейших исследований, как суперхронов, так и периодов гиперактивности, из которых последние до сих пор остаются плохо изученными. С этой точки зрения особый интерес представляет интервал времени между поздним ордовиком и каменноугольным периодом (т.е. между завершением суперхрона Мойеро и установлением суперхрона Киама), для которого современные надежные магнито-стратиграфические данные практически отсутствуют.

Эта работа частично выполнялась на средства гранта Министерства образования и науки РФ № 14.Z50.31.0017 частично — за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров, а также при поддержке Парижского института физики Земли (публикация № 3683). Мы благодарим В. Куртийо и Г. Юло за их комментарии, которые оказались очень полезными при подготовке статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Aubert J., Labrosse S., Poitou C. Modelling the palaeo-evolution of the geodynamo // *Geophys. J. Int.* 2009. V. 179. P. 1414–1428.
- Aubert J., Tarduno J.A., Johnson C.L. Observations and models of the long-term evolution of Earth's magnetic field // *Space Sci. Rev.* 2010. V. 155. P. 337–370.
- Bazhenov M.L., Levashova N.M., Meert J.G., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Fedorova N.M. Late Ediacaran magnetostratigraphy of Baltica: Evidence for Magnetic Field Hyperactivity? // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2015. in review.
- Biggin A., Steinberger B., Aubert J., Suttie N., Holme R., Torsvik T., van der Meer D., van Hinsbergen D. Possible links between long-term geomagnetic variations and whole-mantle convection processes // *Nature Geoscience.* 2012. № 5. P. 526–533.
- Bouligand C., Dyment J., Gallet Y., Hulot G. Geomagnetic field variations between chrons 33r and 19r (83–41 Ma) from sea-surface magnetic anomaly profiles // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2006. V. 250. P. 541–560.
- Cande S.C., Kent D.V. A new geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous and Cenozoic // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 13.917–13.951.
- Channell J., Erba E., Nakanishi M., Tamaki K. Geochronology, Time Scales and Stratigraphic Correlation / Berggren W., Kent D., Aubry M., Hardenbol J. (Eds.), *SEPM Spec. Publ.* 1995. V. 54. P. 51–64.
- Constable C.G. On rates of occurrence of geomagnetic reversals // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2000. V. 118. P. 181–193.
- Courtillot V., Besse J. Magnetic field reversals, polar wander, and Core-Mantle coupling // *Science.* 1987. V. 237. P. 1140–1147.
- Courtillot V., Olson P. Mantle plumes link magnetic superchrons to Phanerozoic mass depletion events // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. V. 260. P. 495–504.
- Driscoll P.E., Olson P. Superchron cycles driven by variable core heat flow // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38(9), L09304.
- Elston D.P., Enkin R.J., Baker J., Kisilevsky D.K. Tightening the Belt: Paleomagnetic-stratigraphic constraints on deposition, correlation, and deformation of the Middle Proterozoic (ca. 1.4 Ga) Belt-Purcell Supergroup, United States and Canada. *GSA Bulletin* 114. 2002. P. 619–638.
- Gallet Y., Besse J., Krystyn L., Marcoux J., Théveniaut H. Magnetostratigraphy of the Boücektasi Tepe section (southwestern Turkey): Implications for changes in magnetic reversal frequency // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1992. V. 73. P. 85–108.
- Gallet Y., Courtillot V. Geomagnetic reversal behaviour since 100 Ma // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1995. V. 92. P. 235–244.
- Gallet Y., Pavlov V. Magnetostratigraphy of the Moyero river section (northwestern Siberia): Constraints on geomagnetic reversal frequency during the early Paleozoic // *Geophys. J. Int.* 1996. V. 125. P. 95–105.
- Gallet Y., Hulot G. Stationary and non-stationary behaviour within the geomagnetic polarity time scale // *Geophys. Res. Lett.* 1997. V. 24. P. 1875–1878.
- Gallet Y., Pavlov V., Semikhatov M., Petrov P. Late Mesoproterozoic magnetostratigraphic results from Siberia: Paleogeographic implications and magnetic field behavior // *J. Geophys. Res.* 2000a. V. 105(16). P. 481–16499.
- Gallet Y., Krystyn L., Besse J., Saidi A., Ricou L.E. New constraints on the Upper Permian and Lower Triassic geomagnetic

- polarity timescale from the Abadeh section (central Iran) // *J. Geophys. Res.* 2000b. V. 105. P. 2805–2815.
- Gallet Y., Pavlov V., Courtillot V.* Magnetic reversal frequency and apparent polar wander of the Siberian platform in the earliest Palaeozoic, inferred from the Khorbusuonka river section (northeastern Siberia) // *Geophys. J. Int.* 2003a. V. 154. P. 829–840.
- Gallet Y., Krystyn L., Besse J., Marcoux J.* Improving the Upper Triassic numerical time scale from cross-correlation between Tethyan marine sections and the continental Newark basin sequence // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003b. V. 212. P. 255–261.
- Gallet Y., Pavlov V., Halverson G., Hulot G.* Toward constraining the long-term reversing behavior of the geodynamo: A new “Maya” superchron 1 billion years ago from the magnetostratigraphy of the Kartochka Formation (southwestern Siberia) // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2012. V. 339–340. P. 117–126.
- Glatzmaier G.A., Coe R.S., Hongre L., Roberts P.H.* The role of the Earth’s mantle in controlling the frequency of geomagnetic reversals // *Nature* 1999. V. 401. P. 885–890.
- Halls H.C., Lovette A., Hamilton M., Söderlund U.* A paleomagnetic and U-Pb geochronology study of the western end of the Grenville dyke swarm: Rapid changes in paleomagnetic field direction at ca. 585 Ma related to polarity reversals? // *Precambrian Research*. 2015. V. 257. P. 137–166.
- Handschumacher D., Sager W., Hilde T., Bracey D.* Pre-Cretaceous tectonic evolution of the Pacific plate and extension of the geomagnetic polarity time scale with implications for the origin of the Jurassic “quiet zone” // *Tectonophysics*, 1988. V. 155. P. 365–380.
- Helsley C.E., Steiner M.B.* Evidence for long intervals of normal polarity during the Cretaceous period // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1969. V. 5. P. 325–332.
- Hounslow M.W., Muttoni G.* The geomagnetic polarity timescale for the Triassic: linkage to stage boundary definitions. From Lucas, S.G. (Ed.). *The Triassic Timescale*, 334. Geological Society, London. 2010. P. 61–102. Special Publication.
- Hulot G., Gallet Y.* Do superchrons occur without any palaeomagnetic warning? // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. V. 210. P. 191–201.
- Labrosse S.* Thermal and magnetic evolution of the Earth’s core // *Phys. Earth Planet. Int.* 2003. V. 140. P. 127–143.
- Lerbekmo J., Evans M.* Cryptochrons and tiny wiggles: New magnetostratigraphic evidence from chrons 32 et 33 in Western Canada // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2012. V. 202–203. P. 8–13.
- Lhuiller F., Hulot G., Gallet Y.* Statistical properties of reversals and chrons in numerical dynamos and implication for the geodynamo // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2013. V. 220. P. 19–36.
- Lowrie W., Kent D.* Geomagnetic polarity timescales and reversal frequency regimes, in: *Timescale of the paleomagnetic field*, Geophysical Monograph Series 145, AGU. 2004. P. 117–129.
- Merrill R., McElhinny M., McFadden P.* The Magnetic Field of the Earth, Paleomagnetism, the Core and the Deep Mantle, Academic Press, San Diego, CA. 1996.
- McFadden P., Merrill R.* Lower mantle convection and geomagnetism // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. P. 3354–3362.
- McFadden P., Merrill R.* Fundamental transitions in the geodynamo as suggested by paleomagnetic data // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1995. V. 91. P. 253–260.
- McFadden P., Merrill R.* Evolution of the geomagnetic reversal rate since 160 Ma: Is the process continuous? // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 28.455–28.460.
- Olson P., Deguen R., Hinnov L.A., Zhong S.* Controls on geomagnetic reversals and core evolution by mantle convection in the Phanerozoic // *Phys. Earth Planet. Sci.* 2013. V. 214. P. 87–103.
- Opdyke N., Channell J.* *Magnetic Stratigraphy*, Academic Press, San Diego, CA. 1996.
- Pavlov V., Gallet Y.* Upper Cambrian to Middle Ordovician magnetostratigraphy from the Kulumbe river section (northwestern Siberia) // *Phys. Earth planet. Inter.* 1998. V. 108. P. 49–59.
- Pavlov V., Gallet Y.* Middle Cambrian high magnetic reversal frequency (Kulumbe River section, northwestern Siberia) and reversal behaviour during the Early Palaeozoic // *Earth planet. Sci. Lett.* 2001. V. 185. P. 173–183.
- Pavlov V., Gallet Y.* A third superchron during the Early Palaeozoic, Episodes. 2005. V. 28. P. 78–84.
- Pavlov V., Gallet Y.* Variations in geomagnetic reversal frequency during the Earth’s middle age // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2010. V. 11. Q01Z10.
- Pétreils F., Besse J., Valet J.-P.* Plate tectonics may control geomagnetic reversal frequency. // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L19303.
- Popov V.V., Khramov A.N., Bachtadse V.* Palaeomagnetism, magnetic stratigraphy, and petromagnetism of the Upper Vendrian sedimentary rocks in the sections of the Zolotitsa River and in the Verkhotina Hole, Winter Coast of the White sea, Russia // *Russ. J. Earth Sci.* 2005. V. 7(2). P. 1–29.
- Sager W.W., Weiss C.J., Tivey M.A., Johnson H.P.* Geomagnetic polarity reversal model of deep-tow profiles from the Pacific Jurassic Quiet Zone // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 5269–5286.
- Shatsillo A.V., Kouznetsov N.B., Pavlov V.E., Fedonkin M.A., Priyatkina N.S., Serov S.G., Rud’ko S.V.* First magnetostratigraphic data on stratotype of the Lopata Fm (northeast of the Enisey Range): problems of its age and of paleogeography of the Siberian platform at the Proterozoic – Phanerozoic boundary // *Doklady Akademii Nauk.* 2015. V. 465. № 4. P. 1–5.
- Steinhilber F., Abreu J.A., Beer J., Brunner I., Christl M., Fischer H., Heikkilä U., Kubik P.W., Mann M., McCracken K.G., Miller H., Miyahara H., Oerter H., Wilhelm F.* 9.400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings // *Proc. Natl Acad. Sci. USA.* 2012. V. 109(16). P. 5967–5971.
- Tarduno J.A., Cottrell R.D., Smirnov A.V.* The Cretaceous Superchron geodynamo: Observations near the tangent cylinder, Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. 2002. V. 99. P. 14020–14025.
- Tivey M.A., Sager W.W., Lee S.-M., Tominaga M.* Origin of the Pacific Jurassic Quiet Zone // *Geology.* 2006. V. 34(9). P. 789–792.
- Tominaga M., Sager W.W., Tivey M.A., Lee S.-M.* Deep-tow magnetic anomaly study of the Pacific Jurassic Quiet Zone and implications for the geomagnetic polarity reversal timescale and geomagnetic field behavior // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. B07110.
- Usoskin I.G., Hulot G., Gallet Y., Roth R., Licht A., Joos F., Kovaltsov G.A., Thébaud E., Khokhlov A.* Evidence for distinct modes of solar activity, *Astronomy, Astrophysics.* 2014. V. 562. L10.
- Usoskin I.G., Gallet Y., Lopes F., Kovaltsov G.A., Hulot G.* Solar activity during the Holocene: Hallstatt cycle and its consequence for Grand Minima and Maxima // *Astronomy, Astrophysics.* 2015. in review.