

ИНФОРМАЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛИТОСФЕРЕ, ГИДРОСФЕРЕ, АТМОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В.В. Козодеров, Р.Н. Кузьмин

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119992 Москва, ГСП-2, Ленинские горы
E-mail: vkozod@mes.msu.ru*

Рассматриваются особенности спутниковых наблюдений возникновения и последствий известного явления Эль-Ниньо аномального нагревания температуры поверхности океана в тропических широтах Тихого океана и последующего нагона перегретых вод на западное побережье Южной Америки. Показано, что объяснение соответствующих атмосферно-океанических проявлений можно получить в магнитно-гидродинамическом приближении при исследовании колебаний океанической плиты Наска у западных берегов этого континента вследствие характерных изменений силовых линий магнитного поля Земли в астеносфере под данной плитой. Дается обзор существующих возможностей описания формирования геомагнитного поля за счет процессов в твердом и жидком ядре Земли в применении к рассматриваемым эффектам.

Введение

Систематизация инструментальных спутниковых наблюдений за последние 30-40 лет позволила установить дипольный механизм конвективной активности атмосферы в тропических широтах Тихого океана за счет аномалий температуры поверхности океана (ТПО). Данный механизм характерен тем, что основным является состояние геофизической системы, когда конвективная облачность преобладает в центральной части тропических широт Тихого океана, в то время как на этих же широтах в районе Индонезии такая облачность развита слабо [1]. Атмосферная конвекция стимулируется аномально высокими значениями ТПО при данном состоянии системы. Однако регулярно один раз каждые 4-7 лет в центральной части рассматриваемого региона в летние месяцы, когда отмечается максимальный подъем уровня океана, происходит сбой типичных восточных пассатных ветров в нижних слоях атмосферы. Возникающие изменения циркуляции атмосферы и океана обеспечивают нагон в течение нескольких месяцев (обычно до конца декабря соответствующего года) аномально теплых вод к западным берегам Южной Америки, где в нормальных условиях преобладает океанический апвеллинг, т.е. подъем глубинных холодных вод. После этого начинает работать другая ветвь указанного «диполя» с преобладанием конвективной облачности над континентом и ее значительным ослаблением над океаническими акваториями данного региона. Затем система постепенно переходит в «нормальное состояние», при котором снова начинает превалировать конвективная активность над океаном.

Следствием указанных аномалий ТПО является возникновение характерных конфигураций волн атмосферного давления в глобальном масштабе, что приводит к катастрофическим наводнениям в одних частях земного шара и сильным засухам в других его частях. В самом процессе возникновения таких аномалий циркуляции атмосферы и океана, известном как Эль-Ниньо, остается неясным, за счет чего происходит сбой пассатных ветров и как запускается механизм нагонных явлений. Можно увязать этот механизм с изменениями уровня поверхности океана за счет колебаний океанической литосферной плиты Наска (простирается приблизительно от экватора до 40° ю.ш. и от 75° з.д. до 110° з.д.). При общей толщине менее десятка километров эта плита может рассматриваться как жесткая пластина, у которой характерные поперечные размеры значительно меньше ее продольных размеров.

Проведенные исследования собственных колебаний данной плиты как жесткой оболочки за счет волн изгиба, характерных для тонких пластин, показали [2], что приближение теории упругости не может объяснить возникновение длинноволновых колебаний плиты Наска с указанным периодом около 50-80 месяцев. Гидродинамические модели также не дают обоснования возможности существования таких колебаний данной плиты. В то же время рассмотрение магнитно-гидродинамического приближения для слоя астеносферы под плитой Наска (между океанической корой и мантией Земли) позволило установить [3] физический механизм возникновения поперечных волн, связанных с натяжением силовых линий магнитного поля Земли. Полученные оценки периодов проявления волновых процессов в астеносфере оказались соответствующими указанной повторяемости возникновения Эль-Ниньо.

Когда в летние месяцы в тропических широтах Тихого океана вблизи района смены дат (180°) его уровень начинает превышать уровень океана на этих же широтах, но к востоку от указанного района,

возникают условия для нагона теплых приповерхностных вод на побережье Перу. «Срабатывание» механизма появления некоторой критической разности уровней океана за счет летнего нагревания приэкваториальных вод в первом случае и опускания плиты Наска во втором случае неизбежно происходит в один из этих 50-80 месяцев. Нарушение квазиравновесного состояния океанической системы вследствие аномального нагревания верхнего слоя воды происходит не каждый год, а только в периоды прохождения впадин соответствующих волновых образований в астеносфере под указанной плитой. Построение магнитно-гидродинамических моделей колебаний плиты Наска охватывает таким образом условия возникновения самоподдерживающегося геодинамо за счет процессов в твердом и жидком ядре Земли, формирования поля магнитной индукции в турбулентной среде жидкого ядра и типичной структуры переноса силового поля через силикатную мантию до астеносферы, представляемой в терминах физики плазмы.

Ниже приводится обзор основных положений магнитно-гидродинамического приближения как наиболее общего подхода, позволяющего увязать модели геофизических процессов в твердой оболочке Земли и информационно-динамические модели, которые строятся на основе анализа временных рядов спутниковых наблюдений облачности, температуры, радиационного баланса Земли.

Магнитно-гидродинамическое приближение

Основу современных представлений о магнитном поле Земли составляют его измерения на земной поверхности и исследования в области палеомагнетизма, включая взятие проб горных пород в придонных слоях океана, застывших образований лавовых потоков вблизи вулканов и т.п. Анализ намагниченности геологических пород в разных частях земного шара показывает, что магнитное поле Земли много раз изменяло полярность за свою геологическую историю. Существующие исследования в этом направлении показывают [4], что в последние столетия отмечается тенденция уменьшения интенсивности магнитного поля. Изучение соответствующих особенностей палеомагнетизма Земли показывает, что в предшествующие исторические эпохи такое уменьшение предшествует эффекту возможной смены знака геомагнитного поля, т.е. когда стрелка магнитного компаса должна поменять направление на противоположное [5]. Это может произойти через сотни лет, но уже сейчас можно представить катастрофические последствия таких возможных изменений для навигации, телекоммуникационных систем, миграции птиц, ориентирующихся на магнитное поле Земли и т.п. Последствия могут быть и еще более катастрофическими, если представить, что изменения в структуре геомагнитного поля приведут к изменениям характерных направлений перемещения заряженных частиц в верхних слоях атмосферы с возможным разрушением защитного слоя стратосферного озона, что приведет к усилению интенсивности ультрафиолетового излучения на земной поверхности и т.д. Возникнут дополнительные угрозы для биологической жизни на Земле.

Считается, что основным механизмом возникновения магнитного поля Земли является электромагнитная индукция, вызываемая токами в проводящем ядре Земли. Как известно, твердая оболочка Земли имеет слоистое строение и состоит из коры, мантии и ядра [6]. Земная кора представляет собой самый верхний слой твердой Земли и отличается от нижележащих оболочек строением и химическим составом. Выделяют два основных типа земной коры: «базальтовая» океаническая и «гранитная» континентальная. Различия в базальтовых и гранитных горных породах в том, что первые из них образуются при значительно более быстром охлаждении базальтовых пород в сравнении с более медленным охлаждением при образовании гранитных пород. Океаническая кора достаточно тонкая (всего несколько километров) в сравнении с континентальной корой, толщина которой достигает многих десятков километров.

Силикатная оболочка Земли (ее мантия) расположена между слоем земной коры и поверхностью земного ядра. По современным представлениям ядро Земли состоит из жидкого ядра, радиус которого около 3500 км (составляет почти половину радиуса Земли, который близок к 6400 км), и более плотного твердого ядра с радиусом около 1200 км.

В ограниченном проводящем теле постоянных размеров любая система электрических токов будет затухать со временем. Поле или токи можно разложить на нормальные моды, каждая из которых убывает со временем по экспоненциальному закону со своим коэффициентом затухания. Коэффициент затухания пропорционален σl^2 , где σ – электропроводность, l – характерный линейный размер, на котором поле меняется заметным образом. В соответствии с уравнениями Максвелла можно найти, что для шара размером с Землю амплитуда наиболее медленно затухающей моды уменьшается в e раз за время порядка 100 тыс. лет. Поскольку возраст Земли составляет около 4 млрд. лет, геомагнитное поле не может быть реликтовым. Требуется нахождение механизма генерации электрических токов, поддерживающих существование магнитного поля. Наиболее вероятным источником электродвижущей силы, обеспечивающей поддержание этих токов, считаются движения вещества ядра Земли поперек силовых линий геомагнитного поля. Исследование процесса, в котором токи обеспечивают усиление магнитного поля, а магнитное поле в свою очередь создает электродвижущую силу, составляет так называемую проблему однородного динамо.

Динамо (точнее, динамомашинa) – устаревшее название генератора электрического тока. Под гидродинамическим динамо в настоящее время понимают механизм, способный генерировать магнитное поле при движении проводящей среды. Магнитное поле вызывается движением проводящей жидкости и в свою очередь воздействует на это движение. Однако в первом приближении можно считать движение жидкости заданным. Это приближение называют кинематическим динамо.

В первых исследованиях магнитного поля Земля рассматривалась в виде однородного намагниченного шара [7]. Для такого шара с радиусом R и намагничиванием J значения магнитного момента M отличаются от J на величину объема шара, т.е. в этом случае $M = (4/3)\pi R^3 J$. Магнитный момент шара совпадает с моментом эквивалентного диполя. Значения и направления вектора \mathbf{J} (или \mathbf{M}) тогда можно найти с помощью сферического гармонического анализа аналогично тому, как соответствующая математическая процедура используется для нахождения гравитационного поля Земли. Часть магнитного поля, которая может быть представлена таким образом в соответствии с вектором намагничивания \mathbf{J} , называется нормальным полем Земли, остальная – аномальным. Магнитная ось, т.е. диаметр, направление которого совпадает с направлением намагничивания, пересекает поверхность Земли в точках, называемых нормальными геомагнитными полюсами. В действительности магнитные полюсы, т.е. точки на поверхности Земли, где магнитные силовые линии направлены вертикально, не совпадают с указанными нормальными геомагнитными полюсами. Следует отметить, что напряженность нормальной части магнитного поля убывает обратно пропорционально кубу расстояния от центра Земли, тогда как поле тяготения ослабевает обратно пропорционально квадрату этого расстояния [8].

В еще более ранних исследованиях магнитного поля Земли исходили из следующих соображений [9]. Вращение небесных тел с большими размерами и массами создает такой магнитный момент, что отношение между механическим моментом количества движения и магнитным моментом по порядку величины равно произведению $cG^{-1/2}$, где c – скорость света, G – гравитационная постоянная. Это соотношение хорошо выполняется в случае Земли. Однако в дальнейшем от этой гипотезы по какой-то причине отказались и стали больше ориентироваться на то, что магнитное поле Земли обусловлено исключительно токами, текущими в металлической оболочке ядра Земли (самовозбуждающееся динамо). Происхождение этих токов не ясно. Между тем, одно из указанных предположений может не противоречить другому: намагничивание внутренних слоев Земли за счет ее вращения может служить источником появления токов в твердом ядре, которые в свою очередь создают систему индукционных токов в жидком ядре. Последние и определяют распределение измеряемого магнитного поля на поверхности Земли.

Исходные положения для построения моделей геодинамо Земли

Еще в начале 1930-х годов было показано, что магнитное поле, обладающее осью симметрии, не может создаваться действием динамо. Этот вывод составляет содержание специальной теоремы, которая гласит, что для генерации магнитного поля движения проводящей жидкости не должны быть осесимметричными [10].

Из уравнений Максвелла следует, что скорость изменения индукции магнитного поля равна сумме двух слагаемых: ротора векторного произведения скорости и индукции; оператора Лапласа по координатам, умноженного на магнитную вязкость проводящей жидкости (см. ниже). Первые численные решения соответствующего уравнения в приближении постоянства вектора индукции магнитного поля со временем были получены в работе [11]. Основные выводы из этой работы состояли в том, что тороидальные поля в ядре, которые должны существовать при напряженности дипольного поля на поверхности Земли около 0.6 Гс , имеют величину около 100 Гс (в системе $CGSM$). Максимальные скорости, необходимые для поддержания такого поля, составляют около 0.01 см/с в радиальном направлении и 0.04 см/с в горизонтальном. В самых последних публикациях (Glatzmaier G.A., Roberts P.H. 3D modeling of the Earth's dynamo. <http://ScientificAmerican.com>. 29 April 2004), описывающих получаемые решения на основе наиболее совершенных на настоящий момент полных уравнений магнитной гидродинамики, указанная величина магнитного поля ядра Земли оказалась приблизительно в 5 раз больше, чем в первых публикациях по данной проблеме.

Механизм генерации геомагнитного поля остается одной из центральных нерешенных проблем в геофизике. Имеющиеся данные геомагнитных измерений дают полное основание считать, что магнетизм Земли как планеты создается механизмом так называемого «самоподдерживающегося динамо», обусловленного движениями жидкости в ядре Земли. Возникает главный вопрос, каков источник энергии, приводящий к возникновению этих движений. Еще в первых работах начала 1950-х годов была сделана гипотеза, что внутреннее твердое ядро является результатом замерзания внешнего жидкого ядра. Было высказано предположение [12], что высвобождение скрытого тепла на границе твердого ядра с жидким ядром в процессе такого замерзания способствует тепловой конвекции в жидком ядре. Было также высказано предположение [13], что высвобождение легких элементов во время разделения фракций разных элементов на указанной границе обеспечивает некую форму плавучести системы, когда более легкие фракции оказываются выше данной границы. Считается, что эти два основных источника (изначально твердое внутреннее

ядро и гравитационная дифференциация вещества на границе твердого и жидкого ядра) обеспечивают существование геодинamo с энергией его поддержания на масштабах геологического времени при отсутствии радиоактивности в ядре Земли. Более современные идеи объясняют существование твердого ядра Земли его сверхпроводящими свойствами с характерным поведением типичного диамагнетика как следствие коллапса земной геофизической системы на рубеже архея и протерозоя (около 2.7 млрд. лет назад) с образованием границ между твердым и жидким ядром, а также жидким ядром и мантией.

Независимо от истинного механизма возникновения геодинamo необходимо понимание магнитно-гидродинамических (МГД) свойств ядра Земли. Поскольку молекулярная диффузия тепла и массы на этих глубинах весьма незначительна, исходят из необходимости рассмотрения крупномасштабных турбулентных эффектов в ядре. Говорят о быстром динамо, которое может усиливать магнитное поле на характерных масштабах возникающих течений в жидком ядре, и о медленном динамо, обусловленном магнитной диффузией проводящей среды. Обычная гидродинамическая вязкость ν характеризует изменения движения среды, связанные с суммой вторых производных по координатам от скорости (изменения выражаются с помощью оператора Лапласа), в то время как магнитная вязкость ν_m является величиной, обратной проводимости среды, и при заданной магнитной проницаемости среды характеризует связь между векторным произведением от ротора магнитного поля и самим полем. Последнее выражение получается исходя из того, что сила, действующая на единичный объем и вызываемая током с плотностью \mathbf{j} и магнитным потоком с индукцией \mathbf{B} , равна векторному произведению этих величин. Соответственно, МГД-сила приобретает вид $[\mathbf{rot} \mathbf{B} \bullet \mathbf{B}]$ с учетом того, что одно из уравнений Максвелла равно $\mathbf{rot} \mathbf{B} = 4\pi\mu\mathbf{j}$, где μ – магнитная проницаемость среды. При этом магнитная вязкость оказывается равной $\nu_m = 1/(4\pi\mu\sigma)$, где σ – проводимость среды. Наличие тока при этом увязывается с силой Лоренца $\mathbf{j} = \sigma [\mathbf{vB}]$ воздействия поля на единичный заряд, движущийся со скоростью \mathbf{v} .

Основные уравнения и описание динамических эффектов формирования магнитного поля Земли на микро- и макроуровнях

Для понимания МГД- и динамо-эффектов ядра Земли необходимо решить систему уравнений изменения во времени векторов скорости \mathbf{v} (в зависимости от градиента давления, силы тяжести, отклоняющей силы вращения Земли – силы Кориолиса, силы вязкости и отмеченной выше МГД-силы) и магнитной индукции \mathbf{B} (с учетом ротора от векторного произведения \mathbf{v} и \mathbf{B} , а также силы магнитной вязкости).

Следует отметить, что в конкретных приложениях на сферической Земле используются различные приближения при решении первого из указанных уравнений. Если можно пренебречь влиянием силой гравитации на движение системы и вязкий член не представляет большого интереса, то наиболее часто используемыми являются два следующие приближения. Первое из них называется геострофическим, когда градиент давления приравнивается к силе Кориолиса. Второе приближение называется магнитно-гидродинамическим, когда динамика процессов определяется силой Кориолиса и МГД-слагаемым. При этом пренебрегают так называемыми инерционными членами $(\mathbf{v}\nabla) \mathbf{v}$, характеризующими адвекцию скорости за счет наличия горизонтальных градиентов скорости (как обычно, оператор ∇ характеризует производные от соответствующих скалярных или векторных величин).

В случае бесконечной проводимости среды ($\sigma \rightarrow \infty$) слагаемое, обусловленное магнитной вязкостью, во втором из упомянутых уравнений оказывается равным нулю, что соответствует так называемому «вмороженному полю» (силовые линии оказываются как бы «приклеенными» к частицам среды). В этом случае в среде возникают волны, называемые альвеновскими (по имени исследователя с фамилией Alfvén), которые являются поперечными и могут быть представлены как колебания магнитных силовых линий вместе с веществом, в которое они вморожены. Однако альвеновские волны существуют и в проводящей жидкости, когда ее проводимость не равна нулю [14]. Скорость этих волн $c_A = [B^2/(4\pi\rho)]^{1/2}$ определяется значениями магнитной индукции поля B , магнитной проницаемости среды μ и ее плотности ρ .

Турбулентное движение жидкости влияет на магнитное поле двояким образом: с одной стороны, при турбулентности магнитные силовые линии растягиваются, что приводит к увеличению магнитного поля; с другой стороны, турбулентность увеличивает диссипацию, приводя к затуханию поля. Если в пространстве не существует какого-либо выделенного направления, то статистические свойства турбулентности не зависят от направления в пространстве. Такую турбулентность называют локально-изотропной. Если же статистические свойства турбулентного движения не изменяются при отражении относительно произвольной плоскости, то турбулентность называется отражательно-инвариантной. Турбулентность, не являющуюся отражательно-инвариантной, называют гиротропной.

С учетом турбулентных эффектов второе из упомянутых выше уравнений можно записать относительно среднего поля магнитной индукции, оставляя в правой части, наряду с ротором от векторного произведения средних значений \mathbf{v} и \mathbf{B} , ротор от среднего значения \mathbf{B} , умноженный на некоторую постоянную величину α . При гиротропной турбулентности, когда создается магнитное поле, параллельное ротору поля, для турбулентного динамо в пренебрежении двумя другими слагаемыми в правой части этого уравнения

остаётся именно слагаемое с коэффициентом α . Этот процесс, называемый α -эффектом, играет важную роль в теории гидродинамического динамо. А именно, благодаря α -эффекту тороидальное магнитное поле генерирует полоидальное поле, осуществляя таким образом, обратную связь, которая отсутствует в теории ламинарного динамо. Оказывается, что при определенных условиях, когда $k < \alpha/v_m$ (волновой вектор \mathbf{k} при заданном радиус-векторе точки \mathbf{r} характеризует фурье-гармоники поля магнитной индукции), крупномасштабные магнитные поля возрастают, тогда как мелкомасштабные поля, для которых выполняется противоположное неравенство, убывают (поле либо генерируется, либо диссипирует).

Если придерживаться упомянутой выше гипотезы относительно «замерзшего твердого ядра», то неизбежно рассмотрение проблемы неустойчивости, которая обычно ассоциируется с возникновением пузырьков, распространяющихся в жидком ядре и формирующих магнитное поле очень мелких масштабов. Когда возникают условия для замерзания тяжелых элементов (например, железа) на границе внутреннего твердого и внешнего жидкого ядра, высвобождаемое скрытое тепло и более легкие элементы в виде отдельных (более легких, чем их окружение) пузырьков начинают подниматься в жидком ядре и могут достигать границы «жидкое ядро – мантия» [15].

Существует достаточно большое число приверженцев этой идеи. Имеются и оппоненты. Например, авторы работы [16] считают, что турбулентность в ядре Земли в корне отличается от классической теории турбулентности Колмогорова. В соответствии с этой теорией образуются каскады энергии от вихревых образований больших масштабов к малым. Турбулентность в ядре Земли не оказывается связанной и с классической МГД – турбулентностью, при которой обратные каскады энергии могут создавать магнитное поле за счет возникновения средней электродвижущей силы (ЭДС), параллельной среднему магнитному полю (упомянутый выше α -эффект). Возражения указанных авторов сводятся к тому, что микромасштабные поля настолько малы, что они не создают существенного эффекта турбулентности и тем более не способствуют усилению диффузии среднего поля. Тем не менее, турбулентная диффузия средних тепловых и химических неоднородностей намного больше молекулярной диффузии, по крайней мере, для некоторых направлений. Вследствие того, что сила Кориолиса и сила Лоренца оказывают существенное влияние на всех масштабах осреднения, турбулентность должна быть сильно анизотропной с формированием вихрей плоского типа, параллельных оси вращения Земли. Такие вихри должны вносить преимущественный вклад в формирование тороидального поля, которое должно убывать по мере удаления от оси вращения.

Переходя к макроуровню описания магнитного поля Земли, следует отметить, что большинство моделей формирования геодинамо осесимметричны. Реальный интерес представляют неосесимметричные модели, поскольку только в этом случае в соответствии с упомянутой выше теоремой Каулинга (Cowling) можно получить самоподдерживающееся магнитное поле, создаваемое соответствующими компонентами течения жидкости. ЭДС создается в этом случае с помощью асимметричных волн (неустойчивостей) глобального масштаба.

С точки зрения динамики вращающейся жидкости, заполненной вихревыми линиями, параллельными оси вращения, инерционные волны, обусловленные скалярным произведением $(\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v}$, вызывают неустойчивость течения жидкости, когда данное слагаемое становится больше «сил вязкости» $\nu\Delta\mathbf{v}$, сглаживающих возмущения ($\Delta \equiv \nabla^2$ - оператор Лапласа). В невращающейся электрически проводящей жидкости упругость силовых линий преобладающего магнитного поля, как сказано выше, ответственна за распространение альвеновских волн. В быстро вращающейся проводящей среде инерционные и альвеновские волны заменяются так называемыми «быстрыми» и «медленными» волнами, соответственно.

Медленные волны иногда называются *MC*-волнами, поскольку они поддерживают динамический баланс между магнитной (*M*) силой Лоренца и силой (*C*) Кориолиса, возникающей только на вращающейся Земле. Прохождение этих волн неизбежно должно приводить к неустойчивостям в структуре магнитного поля ядра Земли. Эти неустойчивости могут играть существенную роль в механизме смены полярности геомагнитного поля. Некоторые из этих неустойчивостей могут быть короткопериодными, другие могут проявляться на временных масштабах 10^3 лет. Это так называемые «идеальные неустойчивости» в отличие от неустойчивостей, определяемых конечным сопротивлением жидкой среды. Оба типа неустойчивостей известны по экспериментам с лабораторной плазмой, но в ядре Земли при наличии сил Лоренца и Кориолиса они развиваются на очень длинных масштабах времени.

В работах [17, 18 и др.] изучались так называемые *MAC*-волнами, где буква *A* обозначает наличие архимедовой силы плавучести. В этих работах было показано существенное влияние проводимости границ в жидкой среде на появление рассматриваемых неустойчивостей.

В некоторых работах по изучению процессов формирования геодинамо не учитывалось наличие твердого ядра на том основании, что оно составляет не более 4-5% от объема или массы всего ядра. Однако еще в работе [19] было показано, что вследствие быстрого вращения Земли возникают значительные воздействия сдвиговых напряжений на динамику жидкого ядра. Авторы работ [20, 21] отметили, что эти сдвиговые напряжения неизбежно сказываются и на отмеченном выше эффекте распространения магнитно-гидродинамических волн в ядре Земли наподобие того, как в атмосфере Земли существует слой Экмана переходных потоков от вязкого приземного слоя к свободной атмосфере. Было введено понятие «тангенти-

ального цилиндра» (tangent cylinder), который вписан в жидкое ядро, имеет ось вращения и касается границы твердого ядра на экваторе.

Основная идея введения понятия тангенциального цилиндра в том, что при сравнительно малых размерах твердого ядра на обоих основаниях такого цилиндра магнитное поле больше, чем на его боковой поверхности. Поле твердого ядра как бы «пробивает» расплавленное жидкое ядро, мантию и кору, выходя из оснований указанного цилиндра в направлении к северному и южному магнитным полюсам. Если жидкое ядро действительно состоит из расплавленного железа, то в обоих околополюсных областях наиболее сильного магнитного поля должна возникать более значительная турбулентность среды в жидком ядре, чем на боковых поверхностях цилиндра, т.е. поле в приполярных областях жидкого ядра должно быть более хаотичным. Считается, что там, где такое более сильное поле касается земной коры, должны возникать особые следы хаотизации поля в соответствующих кристаллических породах.

С точки зрения новых приложений наибольший интерес представляет сравнительно быстрая миграция магнитных полюсов Земли. Например, по данным инструментальных измерений южный магнитный полюс уже давно сошел с Антарктиды и находится в Индийском океане, сместившись более, чем на 1000 км за последние около 150 лет от южного географического полюса [22]. Магнитный момент системы неизбежно связан с ее механическим моментом (перемещение слоев, их сжатие и т.п.), что усиливает практическую направленность рассматриваемого в данном обзоре подхода к построению моделей отдельных оболочек твердой Земли.

Существующие модели геодинамо и перспективы построения новых моделей

Возвращаясь к двум основным уравнениям формирования гемагнитного поля и его изменений в твердой оболочке Земли, отметим, что модели динамо, которые основаны исключительно на решении уравнений для индукции магнитного поля, обычно называют кинематическими. Решение полных уравнений динамики обычно называется проблемой «МГД-динамо» или проблемой «самоподдерживающегося динамо»; в ней уравнения для индукции решаются совместно с полной системой уравнений движения. Естественно, решение такой нелинейной проблемы представляет значительные трудности, поскольку, как сказано выше, модели должны быть неосесимметричными и трехмерными. Такие модели могут быть реализованы только на суперкомпьютерах. На обычных компьютерных системах реализуются двумерные осесимметричные модели, но они не представляют большого практического интереса, поскольку магнитное поле в них близко к нулю до тех пор, пока не будет обеспечена генерация ЭДС для требуемых асимметричных течений за счет α - эффекта. Возникновение меридиональных токов при наличии зонального магнитного поля обеспечивается в таких упрощенных моделях либо за счет сил Лоренца, либо за счет рассмотрения единой системы «кора – мантия».

Двумерные осесимметричные модели считаются промежуточными между кинематическими моделями и полными МГД-моделями геодинамо. Существенное значение в осесимметричных моделях приобретает рассмотрение динамического баланса системы. Первичный баланс увязывается с геострофическим приближением, когда приравниваются сила Кориолиса и сила градиента давления жидкости. Однако величина магнитного поля оценивается из предположения о вторичном балансе, когда принимаются равными сила Лоренца и сила вязкости системы.

В балансовых осесимметричных моделях магнитная сила и сила Кориолиса предполагаются доминирующими в такой степени, что инерционными силами пренебрегают. Возникает два предельных случая рассмотрения соответствующих явлений. В первом из них [23] ориентируются на объединенную систему «ядро – мантия», когда преобладают геострофические движения в ядре. Во втором из них [24] предполагается, наоборот, несущественным такое совместное функционирование этих двух систем, но налагаются специальные интегральные требования на состояние объединенной системы. Соответственно, рассматривают два разных механизма сильного поля и очень сильного поля. При выборе любого из этих приближений объединяющую роль в функционировании данной системы играет вязкость, влияние которой моделируется в обоих типах рассматриваемых приближений.

В наиболее совершенных трехмерных моделях последних лет были подтверждены отмеченные здесь основные положения предшествующего моделирования магнитных полей. Это самые первые примеры реализации на суперкомпьютере моделей численного решения МГД-уравнений, которые описывают тепловую конвекцию и процессы генерации магнитного поля на быстро вращающейся сфере небольшой вязкости с твердым проводящим внутренним ядром. Несмотря на то, что ошибки конечно-разностной аппроксимации исходных уравнений все еще достаточно велики вследствие необходимости использования достаточно грубой сетки для всего земного шара, указанные примеры дают достаточно реалистичную картину геомагнитного поля.

Если же исходить из отмеченных выше представлений относительно условий формирования индуцированного поля жидкого ядра за счет постоянного магнитного поля твердого ядра вместе с диамагнитным моментом возникающего диполя, эквивалентного соответствующему круговому току и вихревым структурам в жидком ядре, то появляются новые возможности моделирования ослабления поля в

мантии и астеносфере Земли. Существование коллективного направленного потока электронов, перпендикулярного электрическому полю и полю магнитной индукции на границе твердого и жидкого ядра, обеспечивает возможность изменения знака магнитных полюсов такой глобальной системы. В результате проведенных исследований показано наличие механизмов усиления первоначально полоидального магнитного поля в плазме жидкого ядра вследствие гиромангнитного эффекта вращения Земли. Возникающее сильное тороидальное поле за счет исходного полоидального вместе с отсутствием аксиальной симметрии динамо при учете отклоняющей силы вращения Земли в разных полушариях определяют условия генерации крупномасштабного магнитного поля.

Для упомянутого выше режима гиротропной турбулентности жидкого ядра оказывается возможным, чтобы усиленное указанным образом тороидальное магнитное поле генерировало полоидальное поле, осуществляя тем самым обратную связь, которая отсутствует в теории ламинарного динамо. Тем самым доказывается, что эти известные из астрофизики положения справедливы для воспроизведения основных особенностей магнитного поля Земли [25].

Специфические условия распространения поперечных волн в слое астеносферы под плитой Наска определяют исследуемые механизмы взаимодействия между геофизическими процессами в литосфере, гидросфере и атмосфере. Если предположить, что значения магнитной индукции в астеносфере (частично расплавленной среде) под плитой Наска достигают $B \sim 15 \div 25 \text{ Гс}$, то при $\rho \sim 3.5 \text{ г/см}^3$ для характерного размера этой плиты L около 5000 км (по диагонали) получим: период проявления указанных поперечных волн, связанных с натяжением магнитных силовых линий, оказывается равным $T \sim L/c_A \approx (1.3 \div 2.0) \cdot 10^8$ сек. Нетрудно убедиться, что эти оценки соответствуют минимальной и максимальной повторяемости периодов возникновения Эль-Ниньо (50-80 месяцев). Таким образом удается объединить модели описания погодно-климатических аномалий по данным спутниковых наблюдений, модели колебаний литосферных плит и модели формирования самоподдерживающегося магнитного поля Земли.

Заключение

В проблеме использования систематизированных спутниковых данных для построения новых геоинформационных моделей геофизических процессов в твердой оболочке Земли и гидросфере/атмосфере основное внимание было уделено рассмотрению характерных временных масштабов этих процессов в применении к океанической плите Наска. Проведенный обзор существующих подходов к описанию условий формирования магнитного поля Земли и новых подходов к рассмотрению волновых процессов в астеносфере показал, что характерные времена колебаний данной плиты в 50-80 месяцев могут быть достигнуты на основе магнитно-гидродинамического приближения.

Литература

1. Садовничий В.А., Козодеров В.В., Ушакова Л.А., Ушаков С.А. Порядок, хаос, предсказуемость: современные представления. Сб. «Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов» // М.: Янус-К, 2002. С.55-66.
2. Трухин В.И., Козодеров В.В., Кузьмин Р.Н. Модели геофизических процессов в твердой оболочке Земли и гидросфере. Сб. «Физические проблемы экологии (экологическая физика)» // М.: МАКС Пресс, 2004. С.106-128.
3. Козодеров В.В., Кузьмин Р.Н., Трухин В.И., Ушаков С.А. Модели колебаний литосферных плит с позиций теории упругости и магнитной гидродинамики. Сб. «Модели механики сплошных сред» // Казань, Труды Математического центра им. Н.И. Лобачевского. Т.17. Казанское Математическое Общество, 2004. С.205-216.
4. Geissman J.W. Geomagnetic flip // Physics World, April 2004. P.31-35.
5. Jacobs J. Reversals of the geomagnetic field // Cambridge University Press, 1994. 346 p.
6. Ушаков С.А. Экология, охрана природы и экологическая безопасность // М.: изд. МНЭПУ, 1997, С.22-74.
7. Bullard E.C., Freeman C., Gellman H., Nixon J. The westward drift of the Earth's magnetic field // Phil. Trans. Roy. Soc. A., 1950, 243. P.67-82.
8. Каула У. Введение в физику планет земной группы // М.: Мир, 1971. 536 с.
9. Blackett P.M. The geomagnetic field // Nature, 1947, 159. P.658-661.
10. Каулинг Т. Магнитная гидродинамика // М.: Мир, 1964. 482 с.
11. Bullard E.C., Gellman H. Homogeneous dynamics and terrestrial magnetism // Phil. Trans. Roy. Soc. A., 1954, 247. P.213-278.
12. Verhoogen J. Heat balance of the Earth's core // Geophys. J., 1961, 4. P.276-281.
13. Брагинский С.И. Структура слоя F и причины конвекции ядра Земли // Доклады АН СССР, 1963, 149. С.1311-1314.
14. Платцман Ф., Вольф П. Волны и взаимодействия в плазме твердого тела // М.: Мир, 1975, 436 с.
15. Моффат Г. Возбуждение магнитного поля в проводящей среде // М.: Мир, 1980, 330 с.
16. Braginsky S.I., Meytlis V.P. Local turbulence in the Earth's core // Geophys. Astrophys. Fluid Dynam., 1990, 55. P.71-87.

17. *Lan S., Kuang W., Roberts P.H.* Ideal instabilities in rapidly rotating MHD systems that have critical layers // *Geophys. Astrophys. Fluid Dynam.*, 1993, 69. P.131-160.
18. *Fearn D.E., Kuang W.* Resistive instabilities in a rapidly rotating fluid without critical layers // *Geophys. Astrophys. Fluid Dynam.*, 1994, 94. P.181-206.
19. *Stewartson K.* On almost rigid rotations // *J. Fluid Mech.*, 1966, 26. P.131-144.
20. *Ruzmaikin A.* On the role of rotation of the inner core relative to the mantle. In "Solar and Planetary Dynamos", edited by M.R.E. Proctor, P.C. Matthews and A.M. Rucklidge // Cambridge U.K., 1993, University Press. P.265-270.
21. *Hollerbach R., Proctor M.R.E.* Non-axisymmetric shear layers in a rotating spherical shell. In "Solar and Planetary Dynamos", edited by M.R.E. Proctor, P.C. Matthews and A.M. Rucklidge // Cambridge U.K., 1993, University Press. P.145-152.
22. *Дьяченко А.И.* Магнитные полюса Земли // М.: изд. Московского центра непрерывного математического образования, 2003. 48 с.
23. *Брагинский С.И.* Близкая к осесимметричной модель гидромагнитного динамо Земли // *Геомагнетизм и аэрономия*, 1975, 15. С.122-128.
24. *Taylor J.B.* The magneto-hydrodynamics of a rotating fluid and the Earth's dynamo problem // *Proc. Roy. Soc. Lond.*, 1963, A274, P.274-283.
25. *Trukhin V.I., Kozoderov V.V., Kuzmin R.N., Ushakov S.A.* Geophysical processes modeling in the solid Earth and hydrosphere as applied to El-Nino/Southern Oscillation (ENSO) and related events. In "Remote Sensing of Oceans, Coasts and the Atmosphere: Development and Applications" // Pan Ocean Remote Sensing Conference (PORSEC-2004), Chile, Universidad de Concepción, 2004. P.112.