

Глобальные проблемы геофизики в контексте наблюдений Земли из космоса

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 возможности объединения исследований временных рядов спутниковых наблюдений температуры поверхности океана, облачности и радиационного баланса Земли с известными данными ре-анализа, которые касаются построения тематических карт геологических структур по материалам спутниковых, наземных, корабельных и других измерений. Сформулированы исходные положения, на которых основываются исследования энергетики земной геофизической системы, включая энергетику атмосферы, гидросферы и твердой оболочки Земли. Получены новые оценки формирования самоподдерживающегося магнитного поля Земли. Показано, что магнитно-гидродинамическое приближение описания волновых процессов в плазме астеносферы (частично расплавленной среде между земной корой и мантией) может объяснить условия возникновения атмосферно-океанического явления Эль-Ниньо/Южное Колебание за счет колебаний литосферной плиты Наска, расположенной к западу от материка Южная Америка.

Введение

Проблема изучения глобального отклика атмосферы на изменения конвективной активности в тропических широтах Тихого океана за счет аномалий температуры поверхности океана (ТПО) обычно увязывается с изменениями уровня поверхности океана на этих широтах. Данные спутникового мониторинга позволяют наблюдать текущие изменения облачного покрова и аномалии циркуляции атмосферы и океана. Регулярно наблюдаемое каждые 3-7 лет известное явление Эль-Ниньо нагона аномально перегретых вод на западное побережье Южной Америки через характерные конфигурации волн атмосферного давления определяет эффекты возникновения сильных наводнений в одних частях земного шара и засух в других его частях как следствие этих аномалий ТПО [1].

Обычно говорят о дипольном механизме возникновения указанных аномалий ТПО. В физике диполь – это система из двух взаимодействующих единичных зарядов разного знака. В применении к Эль-Ниньо речь идет о том, что основным является такое состояние атмосферно-океанической системы, когда конвективная активность атмосферы превалирует над океаном у западных берегов рассматриваемой акватории южного полушария и поддерживается переносом теплых вод системой западных пассатных ветров в приземных слоях атмосферы. Такая активность условно соответствует знаку «плюс» указанного диполя, тогда как знак «минус» характеризует ослабленную конвекцию над материковой частью Индонезии к западу от этой акватории. Сбой пассатных ветров (в летние месяцы северного полушария) соответствует началу перемещения перегретых водных масс в восточном направлении, которое приводит к возмущению основного состояния системы и длится около полугода, завершаясь в течение последующего полугода появлением аномально холодных вод на значительной части экваториальных широт Тихого океана (явление Ла-Нина). В течение периода возмущений, длящегося около года, область повышенной конвективной активности устанавливается над материковой частью (дипольная аномалия как бы меняет знак), после чего система постепенно переходит в основное состояние.

В работах [2-4] показано, что возникновение Эль-Ниньо и появление нагона водных масс связано с колебаниями океанической литосферной плиты Наска (расположена приблизительно от экватора до 40⁰ ю.ш. и от 75⁰ з.д. до 110⁰ з.д.). Доказывается, что приближение теории упругости для рассматриваемой зоны субдукции (поддвигания) данной плиты под Южно-Американский континент не может объяснить

возникновение рассматриваемых аномальных атмосферно-океанических явлений. Объяснение возможно при использовании магнитно-гидродинамического приближения для слоя астеносферы (частично расплавленной среды между мантией и земной корой) под плитой Наска; это приближение позволило установить физический механизм прохождения поперечных волн, связанных с натяжением силовых линий магнитного поля Земли. Возникновение условий для нарушения равновесия в океанической системе южного полушария соответствует прохождению впадин этих упругих волн, распространяющихся в меридиональном направлении, при условии превышения определенного уровня океана у западных берегов рассматриваемой акватории за счет повышенных значений температуры верхнего слоя океана, нагнетаемой западными пассатными ветрами. Именно поэтому «срабатывание» механизма нагона водных масс, т.е. нарушение равновесия океанической системы, происходит не каждый год, а через отмеченный период в 3-7 лет.

Аналогия с силовыми линиями магнитного поля как «жесткими обручами», которые достаточно равномерно пронизывают слои мантии Земли, но трансформируются в слое астеносферы, объясняет существование указанного механизма колебания плиты Наска. Оказалось, что полученные оценки периодов проявления этих волн в астеносфере соответствуют отмеченной повторяемости возникновения Эль-Ниньо. Тем самым, основываясь на данных спутниковых наблюдений, удастся обосновать построение взаимосвязанных моделей геофизических процессов в атмосфере, гидросфере, литосфере на временных масштабах от текущих погодных флуктуаций до миллионов лет геологических эпох.

В данной публикации развиваются соответствующие направления рассматриваемых исследований.

Исходные положения

Спутниковые системы за более чем 30-летие инструментальных наблюдений (ТПО), облачности и радиационного баланса Земли, позволили установить существование дипольного механизма конвективной активности в тропических широтах Тихого океана и отклик глобальной системы на аномалии ТПО в виде характерных конфигураций волн атмосферного давления. Появились основания говорить о существовании «дистанционных связей» (teleconnections) аномалий атмосферно-океанических процессов в различных частях земного шара. Соответствующие исследования межгодовой изменчивости наблюдаемых величин заложили основы теории предсказуемости глобальных/региональных изменений природной среды [5]. При этом используются временные ряды наблюдаемых значений ТПО и других характеристик глобальной системы.

Спутниковые системы наблюдений дают возможность наблюдения условий возникновения и развития коллективного атмосферно-океанического явления «Эль-Ниньо/Южное Колебание/ЭНЮК» (El-Nino/Southern Oscillation - ENSO). Это явление, как сказано выше, проявляется в виде нагона теплых вод на побережье Перу и Эквадора (южное полушарие) каждые 3-7 лет и последующем выносе линзы холодных вод в тропических широтах Тихого океана (явление Ла-Нина). При этом Южное Колебание – это общее название известного еще в доспутниковую эру различия атмосферного давления на о. Пасхи в Тихом Океане и п. Дарвин (северная часть Австралии). Возникающие аномалии ТПО за счет ЭНЮК имеют глобальный отклик. Данные так называемого ре-анализа (совместного использования спутниковых данных и данных наземных, корабельных и других измерений) способствуют построению цифровых карт глобальных геологических структур, литосферных плит, трещин, разломов и других особенностей строения земной коры. Такие данные содержатся в достаточно большом количестве на специализированных сайтах сети Интернет. Задача состоит в том, чтобы объединить эти разрозненные факты, известные из геофизических исследований (геологические структуры и процессы в атмосфере и гидросфере).

Основные положения формирования энергетики океана и атмосферы сводятся к следующим известным фактам [6]. Энергия солнечного излучения поглощается большей частью в тропических широтах океанов, а уходит в космос преимущественно в средних и высоких широтах обоих полушарий, определяя баланс

энергии глобальной системы. В тропических широтах Тихого океана в планетарном пограничном слое атмосферы преобладают западные пассатные ветры, которые переносят к западу тепло от нагревания океана Солнцем, где это тепло в значительной степени идет на поддержание конвективной активности над океаном, а часть его уходит вглубь в линзу субтропических теплых вод и проявляется в виде течений (Курисио) в северном полушарии и накопления тепла у западных берегов до возникновения Эль-Ниньо. При образовании мощных кучевых облаков в области конвективной активности водяной пар конденсируется в атмосфере, а скрытое тепло (испарение) преобразуется в потенциальную энергию атмосферы и явное тепло (турбулентный теплообмен). Конвективная активность достигает верхних слоев тропосферы, где приходящие воздушные массы переносятся струйными течениями в субтропические и высокие широты, а там в результате медленного оседания и адиабатического сжатия воздуха потенциальная энергия преобразуется в явное тепло, которое удаляется из атмосферы посредством излучения в космос.

Отметим основные черты возникновения явления Эль-Ниньо. Оно происходит только в тропических широтах южного полушария через каждые 3-7 лет при наличии сильной конвективной активности атмосферы в западной части акватории Тихого океана (основное состояние системы); для конвективной активности характерны суточные и (30-60)-суточные внутрисезонные колебания (Madden-Julian intraseasonal oscillation) [7]. Начинается спонтанно (без видимого накопления энергетике в атмосфере и океане) в летние месяцы северного полушария и длится до конца текущего года, завершаясь в начале следующего года явлением Ла-Нина (переходное состояние системы, когда конвективная активность начинает превалировать над материковой частью Индонезии). Для явления Ла-Нина характерно появление «языка холодных вод», т.е. обширной области выноса глубинных вод. Возникающие при указанных обоих типах возмущения атмосферы аномалии ТПО приводят к характерным колебаниям волновых процессов (волн давления) в глобальной атмосфере.

Чисто океанологическое объяснение условий возникновения Эль-Ниньо [<http://iri.columbia.edu/index.html>] сводится к следующему. Если рассмотреть невозмущенное состояние океанического бассейна экваториальных широт Тихого океана, то за счет ветрового натяжения в океане в восточном направлении по экватору должна уходить гравитационная волна Кельвина (скорость около 2.9 м/сек), обусловленная колебаниями столба жидкости. Одновременно в западном направлении к северу и югу от экватора должны перемещаться две волны Россби (скорость около 0.93 м/сек), обусловленные изменением параметра Кориолиса (отклоняющей силы вращения Земли) от экватора к полюсам. Появление таких волн в атмосфере в виде пары циклонов к северу и югу от экватора наблюдалось по данным геостационарных спутников [8]. При таком объяснении общая модель возникновения данного явления основывается на различиях в скоростях перемещения обоих типов волн, их отражении от континентальных окраин и последующем волновом взаимодействии. Взаимодействие приводит к тому, что в северном полушарии эти волны «гасят» друг друга, а в южном их взаимодействие дает всплеск подъему уровневой поверхности.

Понятно, что такое упрощенное объяснение не может быть удовлетворительным: слишком уж простым кажется механизм «подстройки» указанных волновых процессов. Требуется изучение тонких моментов энергетике исследуемой системы (атмосферы, гидросферы, литосферы). Рассмотрение соответствующих проблем в более широком контексте охватывает основные положения, касающиеся современных представлений о циркуляции атмосферы в терминах законов сохранения массы, момента количества движения и энергии [6].

Энергетика земной геофизической системы

Изучение источников перемещения нагреваемых вблизи земной поверхности воздушных масс в экваториальных широтах и их стоков в более высоких широтах и на высотах вблизи тропопаузы вместе с осреднением соответствующих характеристик, дающих начало линиям тока, составляет содержание исследований энергетике глобальной геофизической системы. При этом рассматривается потенциальная энергия столба атмосферы в поле силы тяжести, кинетическая энергия поступательного перемещения и

вращения воздушных масс, внутренняя энергия системы, зависящая от ее термодинамического состояния, энергия диссипации системы и т.п. Потенциальная энергия характеризует условия возникновения циркуляции атмосферы, когда часть этой энергии (так называемая «доступная потенциальная энергия») может трансформироваться в кинетическую энергию движения атмосферных потоков. Различия в нагревании разных слоев атмосферы определяют изменения внутренней энергии отдельных слоев атмосферы. Энергия диссипации связана, в частности, с тем, что механическая энергия системы с течением времени уменьшается за счет ее преобразования в другие виды энергии (например, во внутреннюю энергию хаотического движения). Аналогичные преобразования энергии характерны для изучения динамических процессов в океане.

Следует иметь в виду необходимость знания энергетике Солнца и его воздействия на природную среду (атмосферу, гидросферу, биосферу) при соответствующих взаимодействиях, дающих начало нагреванию атмосферно-океанической системы, трансформации возникающих образований от низких широт к высоким, фотосинтезу – образованию углеродных соединений как следствие взаимодействия энергии Солнца с живыми системами на суше и в океане. Общее количество энергии, излучаемое звездой в единицу времени, называется светимостью. Для Солнца основной характеристикой является «солнечная постоянная» - энергия, падающая на Землю во всем спектральном интервале частот от ультрафиолетовых длин волн до тепловых.

Естественно, данные измерений и моделирования составляют основу описания соответствующих явлений в атмосфере и гидросфере, а также взаимодействия излучения (солнечного и собственного теплового) с этими средами. Получаемые данные «мгновенных» измерений или расчетов осредняются по времени, по отдельным географическим районам, по кругам широты (зональное осреднение) и др.

Например, для среднегодовых и зонально-усредненных условий при приравнивании нулю среднего потока массы [$\langle \rho v \rangle$] (ρ - плотность среды, v - меридиональная компонента скорости ветра, $\langle \dots \rangle$ - символ осреднения по времени, [...] – осреднения по кругам широты) закон сохранения массы при таком усреднении приводит к тому, что в тропических широтах атмосферы возникает известная ячейка Гадлея (Hadley). При этом теплый (легкий и влажный) воздух в экваториальном регионе поднимается вверх и опускается в субтропиках в виде холодного и тяжелого воздуха (прямая тепловая циркуляция – производство кинетической энергии). При таком осреднении линии тока характеризуют так называемые «средние меридиональные циркуляции». В высоких широтах вверх для выполнения «законов сохранения» должен подниматься сравнительно холодный воздух и опускаться в средних широтах относительно теплый воздух, приводя к непрямой циркуляции, при которой холодный воздух должен принудительно подниматься вверх за счет поглощения кинетической энергии.

При рассмотрении зонально осредненных сечений потока абсолютного углового момента единицы массы атмосферы $M = \omega R^2 \cos^2 \varphi + u R \cos \varphi$, где ω - скорость вращения Земли, R - радиус Земли, u - зональная компонента скорости ветра, φ - географическая широта, поскольку ($\omega R = 464$ м/сек) много больше u , то казалось бы, что в требуемом транспорте к северу и югу должен доминировать абсолютный угловой момент над меридиональным транспортом [$\langle v M \rangle$] = [$\langle v \rangle$] $\omega R^2 \cos^2 \varphi$ + [$\langle v u \rangle$] $R \cos \varphi$. Однако сохранение массы требует при долгопериодном осреднении, чтобы при осреднении по вертикали первое из записанных слагаемых обращалось в нуль, так что основную роль при таком осреднении играет именно второе слагаемое.

Важное значение имеет нахождение кинетической энергии вращательного движения атмосферных образований, определяемой специфическими условиями завихренности, которые возникают вследствие обмена энергией между воздушными массами в форме характерных вихрей. Вихревые образования синоптического масштаба (характерные масштабы сотни и тысячи километров) определяют основные механизмы обмена воздушными массами между высокими и низкими широтами.

Завихрения атмосферы происходят также за счет обмена импульсом между вращающейся Землей и приземными слоями атмосферы. Среднезональные профили общей завихренности атмосферы вблизи земной поверхности за счет воздействия твердой Земли (океаны и поверхность суши) на атмосферу

характеризуются тем, что атмосфера получает импульс в восточном направлении от подстилающей поверхности в тропических широтах (положительные значения) и должна отдавать угловой момент количества движения в средних широтах (отрицательные значения). Отдача возможна спорадически, например, через высвобождение горизонтальных напряжений в зонах разломов земной коры типа Сан-Андреас в Калифорнии [9], поскольку океан как специфическая сплошная среда (консервативная) в реальности не может воспринять эти возмущения. В этой ситуации именно указанные законы сохранения способствуют объединенному описанию энергетических характеристик Земли как планеты, включая ее твердую оболочку.

Для твердой оболочки Земли основной является энергия деформаций, дающих начало землетрясениям. В сплошной среде при относительном смещении ее слоев возникают силы, препятствующие этому смещению. Внутренняя сила, приходящаяся на единицу площади, называется напряжением (тензорная величина, т.е. неодинаково действующая в различных направлениях). Из экспериментальных данных известно, что величина напряжения пропорциональна градиенту движения. Существенной оказывается вязкость среды, которая обусловлена переносом количества движения от слоя, движущегося с большей скоростью, к слоям с меньшей скоростью.

Остановимся подробнее на существующих возможностях исследований твердой оболочки Земли, основываясь на сейсмологических и других данных [10].

Некоторые известные сведения из сейсмологии и других наук

Твердая Земля представляет собой систему «вложенных сфер» (типа «матрешки»): твердое ядро; жидкое ядро; мантия; астеносфера; континентальная (толщина до 100 км) и океаническая (толщина до 10 км) кора с резкой границей Мохо в обоих случаях (толщина до 1 км). Континентальная кора сложена преимущественно гранитовыми структурами (образуются при сравнительно медленном остывании соответствующих пород), океаническая кора – преимущественно базальтовыми структурами (образуются при сравнительно быстром остывании пород). Различия между континентальной и океанической корой прослеживаются до глубин порядка 200 км. Содержание радиоактивных элементов в гранитах почти на порядок больше, чем в базальтах. Температура (T) растет с глубиной и равна порядка 1000-1500 градусов на глубинах до 200 км. Плотность (ρ) также возрастает, достигая на этих глубинах порядка 3 г/см^3 . Растет и давление с глубиной h ($p = \rho gh$, g - ускорение силы тяжести), достигая огромных значений $10^{10} \text{ г/(см сек}^2\text{)}$, т.е. 10 тысяч бар ($1 \text{ бар} = 10^6 \text{ г/(см сек}^2\text{)})$ в среднем под континентальными плитами (средняя толщина h около 40 км) и приблизительно в 3 раза меньших значений под океаническими плитами (порядка 3 килобар), а для внутреннего ядра берут 3 Мегабара при плотности порядка 14 г/см^3 .

Только при упругой реакции твердого тела на изменение достаточно малой и краткосрочной силы это тело испытывает деформации, которые в этом случае пропорциональны действующей силе; когда сила устраняется, тело возвращается в первоначальное состояние, а мерой деформации служит напряжение, т.е. сила на единицу площади. Внутри Земли напряженно-деформированное состояние системы проявляется при землетрясениях, в которых может заключаться энергия вплоть до значений $10^{25}-10^{26} \text{ эрг} = [2 \text{ см}^2/\text{сек}^2]$. Вязкость среды является мерой неупругости и обусловлена ползучестью вещества в поликристаллических материалах горных пород (в частности, в астеносфере при приближении к точке плавления). Оказалось, что вязкость имеет минимум на глубинах 200-300 км, для которых часто коэффициент динамической вязкости берут равным $10^{24} \text{ пуаз} = [2 \text{ г/(см сек)}]$. В вязкой среде происходит диссипация энергии, т.е. среда нагревается при смещениях за счет вязкого трения. Для изучения затухания колебаний кристаллической решетки при рассеянии энергии на соответствующих структурах рассматривают дислокации, их возможный отрыв от точечных дефектов структуры и движение по кристаллической решетке, а также вязкое скольжение по границам зерен.

Скорость распространения продольных (упругих) волн в мантии растет с глубиной более, чем в 1.5 раза (от 8 км/сек до 13.5 км/сек); затем скачком убывает до значений около 8 км/сек на границе «мантия – жидкое

ядро»; затем снова возрастает, но слабее, чем в мантии, и снова скачком убывает на границе «жидкое – твердое ядро». Скорость распространения поперечных волн в мантии также возрастает с глубиной от приблизительно 4 км/сек до 7 км/сек, а далее эти волны полностью затухают.

Характеризуемое отклонениями стрелки компаса осредненное по поверхности Земли магнитное поле равно около $0.5 \text{ Гс} = [e^{1/2}/(cm^{1/2} \text{ сек})]$. Из экспериментальных данных известно, что южный магнитный полюс достаточно быстро смещается относительно географического полюса. Сейчас южный магнитный полюс находится в Индийском океане и переместился на расстояние более 1000 км за последние около 150 лет [11].

Отметим также факты, требующие дополнительных объяснений.

Нет четких доказательств существования конвективных ячеек в мантии (типа известной конвекции Бенара [12], когда в замкнутой системе по мере ее нагревания снизу образуются конвективные ячейки). Отсутствие реальных доказательств конвекции в мантии связано с тем, что: а) полные уравнения гидродинамики неприменимы к верхней мантии вследствие зависимости вязкости от напряжений из-за эффектов переползания дислокаций и скольжения по границам зерен среды, составляющей силикатную оболочку мантии; б) изменения вязкости с глубиной вследствие ее зависимости от температуры и давления; в) верхняя граница циркуляционной системы (земная кора) не является гладкой, имеются поднятия и смещения пластов при горообразовании и других аналогичных процессах. С физической точки зрения существование внутренней меридиональной циркуляции во вращающейся мантии и обмен соответствующими массами среды необходимы, но проблематичным выглядит объяснение того, что происходит именно вертикальный подъем этих масс.

Приближенное равенство теплового потока из внутренних слоев Земли на континентах и океанах наводит на мысль, что существуют приблизительно одинаковые источники тепла в соответствующих вертикальных разрезах, горизонтальное перемещение этих источников очень мало. Не ясен механизм образования и дрейфа континентов (трудно представить себе глыбу толщиной до 200 км, которая перемещается в более плотной среде). Все эти нестыковки требуют рассмотрения новых возможностей объяснения физических механизмов взаимного перемещения континентальных и океанических плит.

Новые предположения и оценки

Если для объяснения кинематики литосферных плит использовать традиционное гидродинамическое приближение, то вязкость среды астеносферы служит сдерживающим фактором для отсутствия погружения этих плит в мантию Земли, а движущей силой их перемещения якобы является конвекция в мантии. Если же астеносфера – это плазменное состояние вещества, то магнитно-гидродинамическое (МГД) приближение выходит на первый план. Главным фактором смещения плит становится искривление силовых линий магнитного поля, берущего свое начало из гиромagnetизма (вращения Земли) и схемы «самоподдерживающего динамо»; искривление силовых линий («жестких обручей») создает «противодействие» плазмы, которое удерживает плиты в равновесии с более глубокими слоями Земли. Возмущения распространяются вдоль силовых линий со скоростью $c_A = [B^2/(4\pi\mu\rho)]^{1/2}$, где B - магнитная индукция, μ - магнитная проницаемость среды, ρ - плотность среды. Это известные в магнитной гидродинамике альвеновские волны, существование которых доказано не только для идеальной системы магнитных линий, вмороженных в среду, но и для среды с конечной электрической проводимостью [13].

В применении к колебаниям плиты Наска МГД-приближение дает:

1. За счет натяжения магнитных силовых линий в проводящей среде астеносферы под плитой Наска возникают длиннопериодные поперечные волны (в меридиональном направлении).

2. При прохождении очередной впадины такой волны плита Наска опускается, что при подъеме уровня океана летом в западной части тропических широт Тихого океана дает начало явлению Эль-Ниньо. Это явление начинается в западной части океана южных широт, где повышен теплозапас водных масс в соответствии с изложенным выше механизмом «накачки» тепла в линзу верхнего слоя океана.

Следует иметь в виду, что при значительной конвективной активности атмосферы в западной части акватории Тихого океана основные массы перегретых вод из его восточной части аккумулируются в термоклине океана (верхний слой сезонного нагревания). Такой аккумуляции тепла способствуют типичные западные ветры в нижних слоях атмосферы, перемещающие перегретые водные массы в западном направлении. В результате такой аккумуляции тепла повышается уровень океана в западной части акватории, что вместе с эффектом опускания плиты Наска создает условия для нарушения равновесия водных масс и появлению при определенных условиях нагона теплых вод в восточном направлении. Как сказано выше, эти характерные условия создаются при прохождении впадины указанной поперечной волны, что создает эффект «срабатывания» нагонных явлений лишь в эти периоды колебаний плиты Наска. В остальные годы условий для нарушения указанного равновесия не создается, несмотря на возможности образования аномалий ТПО в самых разных частях рассматриваемой акватории.

Возникает задача оценки величины индукции магнитного поля под плитой Наска, при которой возможны соответствующие эффекты. Если придерживаться того, что намагничивание твердого ядра Земли происходит за счет эффекта гиромангнетизма, связанного с вращением Земли [14], то источником геомагнитного поля, наблюдаемого на поверхности Земли, служит индуцированное магнитное поле этого «стержня» (твердого ядра). Можно построить картину индуцированного магнитного поля для плазменного состояния жидкого ядра как типичного диамагнетика [15]. Эта картина представляет собой два неизотропных вихревых образования, обеспечивающих появление магнитного поля за счет турбулентного движения жидкости. Топология магнитного поля этих вихрей переносится через мантию и создает две известные неоднородности магнитного поля Земли относительно так называемого «тангенциального цилиндра», соединяющего магнитные полюса Земли. Одна из этих неоднородностей определяет усиление магнитного поля почти в полтора раза относительно среднего поля по всей планете (эта область расположена в районе Восточной Сибири), а вторая – приблизительно такое же ослабление этого поля в районе западного побережья Южной Америки.

Отметим две известные особенности изменения магнитного поля, формируемого таким образом в жидком ядре Земли: вековой западный дрейф, что можно увязать с превышением скорости вращения прецессирующего тангенциального цилиндра (его основания характеризуют области максимальной крутизны силовых линий магнитного поля); инструментальные наблюдения показывают, что южный магнитный полюс стремительно удаляется от южного географического полюса и сейчас находится, как сказано выше, в Индийском океане. В астрофизике и физике плазмы доказывается возможность такой прецессии «внутреннего стержня» планетарной системы, при которой его скорость вращения больше, чем скорость вращения планеты (шарообразного твердого тела в виде «матрешки» - взаимосвязанных вложенных сфер). Такой характер прецессии обуславливает указанный западный вековой дрейф магнитного поля на поверхности Земли. Вместе с тем, в геомагнетизме и аэрономии говорят об «экскурсиях» магнитного поля в предшествующие геологические эпохи, т.е. о различиях в угле отклонения вращающегося таким образом «стержня» от географической оси вращения планеты.

Обсуждение результатов

К настоящему времени общепринятой является гипотеза формирования магнитного поля Земли за счет динамо-эффекта в жидком проводящем ядре [16]. Считается, что самоподдерживающееся геодинамо обусловлены отмеченными выше конвективными движениями в жидком ядре за счет различий скоростей вращения твердого и жидкого ядра. Остается неясной проблема инверсий магнитного поля, которые наблюдались по данным палеомагнитных исследований в предшествующие исторические эпохи. Если же подходить к проблеме возникновения магнитного поля в жидком ядре планеты с позиций физики плазмы, то движение плазмы при неизбежных сдвиговых течениях между твердым и жидким ядром являются естественной причиной появления магнитного поля дипольного типа. В условиях вращающейся Земли,

когда сила Кориолиса создает спиральную составляющую в плазменных потоках и нарушение осесимметричности течений, в жидком ядре возникает структура, подобная солениду, который состоит из отдельных витков плазмы. В системе устанавливается электрический ток, который дает начало внешнему дипольному полю. При этом внутреннее магнитное поле не является дипольным, а характеризуется отмеченной выше структурой неизотропных вихрей.

Известно, что 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.

За счет отмеченного выше гиромангнитного эффекта, вызванного вращением Земли вокруг своей оси, начальное («затравочное») магнитное поле направлено вдоль меридианов (такое поле называется полоидальным). При этом земная кора вращается быстрее, чем расплавленное ядро Земли. Оказывается, что при больших магнитных числах Рейнольдса для соответствующих вихревых образований жидкого ядра напряженность возникшего магнитного поля, направленного вдоль кругов широты (тороидальное поле) может значительно превосходить напряженность затравочного поля [17]. Большие значения магнитных чисел Рейнольдса соответствуют тому, что произведение скорости вращения Земли и характерного размера системы (средняя длина полуокружности на уровне жидкого ядра) должно быть много больше магнитной вязкости среды. Магнитная вязкость – величина обратно пропорциональная проводимости среды, т.е. при больших значениях электропроводности плазмы жидкого ядра действительно возможно значительное усиление затравочного магнитного поля.

Наряду с возможностью возникновения сильного тороидального поля из слабого полоидального, с точки зрения генерирования самоподдерживающегося поля необходима обратная связь, при которой из тороидального поля в свою очередь образуется сильное полоидальное поле. Если следовать классическим представлениям о эффектах гиротропной турбулентности, при которой создается магнитное поле, параллельное ротору поля, то этот коэффициент пропорциональности обычно обозначается через α , что дает начало так называемому α -эффекту. Для режима гиротропной турбулентности жидкого ядра оказывается возможным, чтобы благодаря α -эффекту усиленное указанным образом тороидальное магнитное поле генерировало полоидальное поле.

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.

Считается, что по современным представлениям наиболее правдоподобные оценки магнитного поля на границе «жидкое ядро – мантия» - 500 Гс [Glatzmaier G.A., Roberts P.H. 3D modeling of the Earth's dynamo. <http://ScientificAmerican.com>. 29 April 2004]. Если придерживаться этих современных значений исходного поля, то можно оценить характер волновых процессов в плазме астеносферы под океаническими литосферными плитами. Расчеты показали, что период проявления поперечных волн, связанных с натяжением магнитных силовых линий под плитой Наска, при $B \sim 15 \div 25 \text{ Гс}$, $\rho \sim 3.5 \text{ г/см}^3$, $L \sim 5000 \text{ км}$ (по диагонали) равен $T \sim L/c_A \approx (1.3 \div 2.0) \cdot 10^8 \text{ сек}$. Эти оценки соответствует минимальной и максимальной повторяемости периодов возникновения Эль-Ниньо (50-80 месяцев).

Выводы

1. Анализ временных рядов спутниковых наблюдений открывает новые возможности построения информационно-динамических моделей описания процессов в атмосфере, гидросфере, литосфере.

2. Показаны примеры использования спутниковых наблюдений для изучения влияния аномалий геофизических процессов в тропических широтах Тихого океана на погодно-климатические аномалии в других частях земного шара.

3. Перспективы развития геофизических приложений видятся в совместном использовании данных космического мониторинга и моделирования процессов в отдельных оболочках Земли.

Исследования проводятся в рамках проектов РФФИ №05-05-64199, 05-07-90176, 06-01-00666.

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. Козодеров В.В., Кузьмин Р.Н. Информационно-динамические модели геофизических процессов в литосфере, гидросфере, атмосфере по данным спутникового зондирования. Сб. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» // М.: ИКИ РАН, 2004. С.196-203.
5. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Козодеров В.В. Радиационный баланс Земли: ключевые аспекты // М.: Наука, 1988. 224 с.
6. Peixoto H., Oort D. Physics of climate // J. Geophys. Res., 1984, 89. P.820-946.
7. Madden R.A., Julian P.R. Observation of the 40-59 day tropical oscillation: a review // Mon. Wea. Rev., 1994, 122. P.813-837.
8. <http://iri.columbia.edu/index.html>
9. Philander S. G. H., Yamagata T., Pacanowski R. C. 1984: Unstable air-sea interactions in the tropics // J. Atmos. Sci., 1984, 41. P.603-612.
10. Ihmle P.F., Jordan T.H. Teleseismic search for slow precursors to large earthquakes // Science, 1994, 266. P.1547-1551.
11. Каула У. Введение в физику планет земной группы // М.: Мир, 1971. 536 с.
12. Дьяченко А.И., гидросфере, атмосфере. Сб. Международной конференции «Наука и будущее: идеи, которые изменят мир» // М.: Музей им. В.И.Вернадского, 2005. С.35-40.
13. Braginsky S.I., Meytlis V.P. Local turbulence in the Earth's core // Geophys. Astrophys. Fluid Dynam., 1990, 55. P.71-87.
14. Половин Р.В., Демуцкий В.П. Основы магнитной гидродинамики // М.: Энергоатомиздат, 1987. 206 с.