

Кинематико-гравитационная модель геодинамо

© В. А. Кочнев, 2013

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

Поступила 4 апреля 2013 г.

Представлено членом редколлегии В. Н. Страховым

*Посвящается светлой памяти
Владимира Николаевича Страхова*

На основе результатов разв'язання оберненої задачі магнітометрії та аналізу деяких відомих моделей генерації магнітного поля Землі запропоновано модель, в якій струмом, що створює магнітне поле, є вихровий рух позитивно зарядженої плазми зовнішнього ядра планети. Основні генератори руху рідини — осьове обертання планети і горизонтальні складові гравітаційного поля Місяця і Сонця, що створюють на поверхні планети короткострокові періодичні припливи і стійкі пасатні течії в екваторіальних зонах океанів, а в ядрі — глибинні течії іонізованої рідини. Для перевірки припущень побудовано математичну кинематико-гравітаційну модель розрахунку відносних параметрів для оцінки магнітного моменту планети і магнітного поля на екваторі. Основні аргументи для розрахунку такі: період обертання планет, маса і радіус орбіти супутників, що створюють припливні сили. Для усіх планет Сонячної системи наведено таблицю початкових і розрахункових параметрів і параметрів, отриманих у результаті супутникових спостережень магнітного поля. Коефіцієнт кореляції розрахункових і супутникових даних 0,997. Зроблено висновок щодо тісного зв'язку кинематико-гравітаційних параметрів і параметрів магнітного поля планет.

Based on the results of solving the inverse problem of magnetometry and analysis of some known models of the Earth magnetic field generation a model is proposed in which the current producing magnetic field is the vortex motion of positively charged plasma of the planet external core. The main generators of the liquid motion are axial rotation of the planet and horizontal components of gravity field of the Moon and the Sun producing on the surface of the planet short-term periodic tides and stabile trade-wind sea currents in the equatorial ocean areas, and the deep currents of ionized liquid in the core. For checking the assumptions mathematical kinematic-gravity model of calculating relative parameters for evaluation of magnetic moment of the planet and magnetic field on the equator has been plotted. The main arguments for calculations are the period of planets rotations, mass and radius of satellites orbits producing the tide forces. For all the planets of the solar system the table of initial and calculated parameters and parameters –results of satellite observations of magnetic field has been given. The coefficient of correlation of calculated and satellite data is 0.997. The conclusion has been made on the close relation of kinematic gravity parameters with parameters of the planets magnetic field.

Введение. Исходя из предположения, что основные источники глобального магнитного поля Земли (МПЗ) находятся в ее ядре, может быть поставлена задача оценки эффективной намагниченности (ЭН) вертикальных прямоугольных призм по глобальному магнитному полю планеты. Такая постановка обоснованна в силу эквивалентности моделей тока и моделей твердых намагниченных тел [Альпин и др., 1985]. Пример тому — эквивалентность, т. е. равенство (тождество) магнитных полей соленоида и намагниченного цилиндра того же размера при равенстве плотности тока, текущего

по поверхности соленоида, и намагниченности цилиндра. Другими словами, при этих условиях намагниченный цилиндр создает такое же магнитное поле, как и соленоид. Это, очевидно, также справедливо для намагниченного тела любой формы [Альпин и др., 1985, с. 236]. Учитывая, что пространство призм токовой модели создает то же магнитное поле, что и магниты с однородной намагниченностью, для характеристики логично использовать термин «эффективная намагниченность».

Для решения прямых и обратных задач построена модель, аппроксимирующая ядро

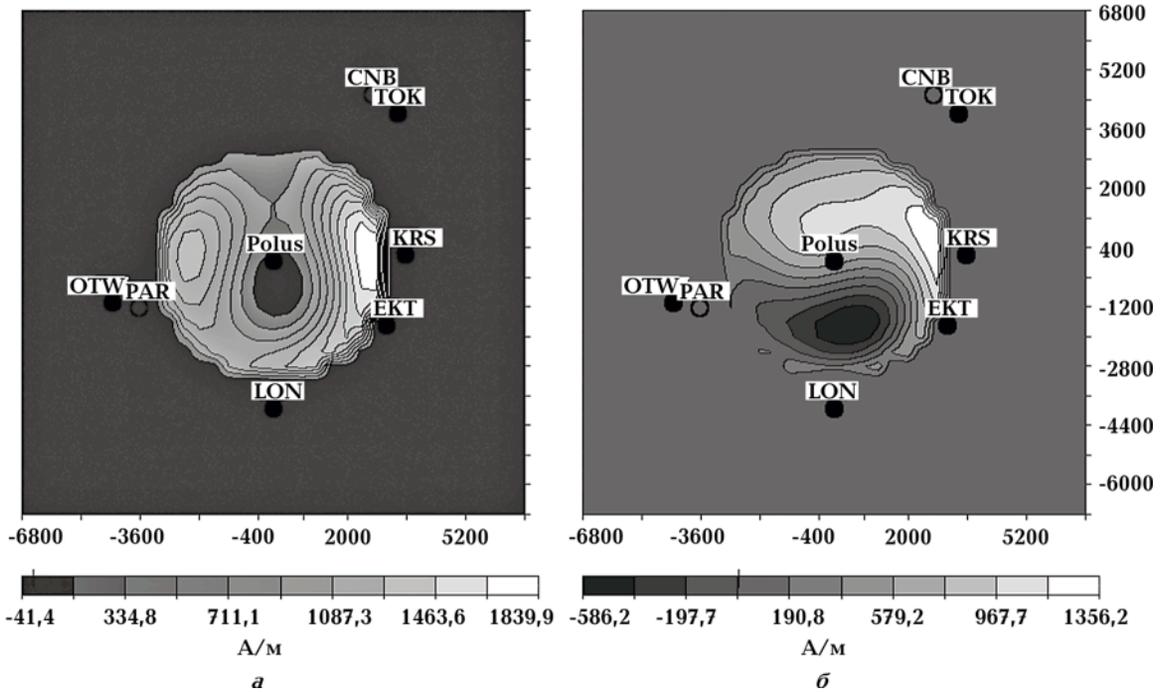


Рис. 1. Эффективная намагниченность северного (а) и южного (б) полушарий ядра (вид со стороны северного полюса). Символами указан полюс и проекции различных городов на экваториальную плоскость.

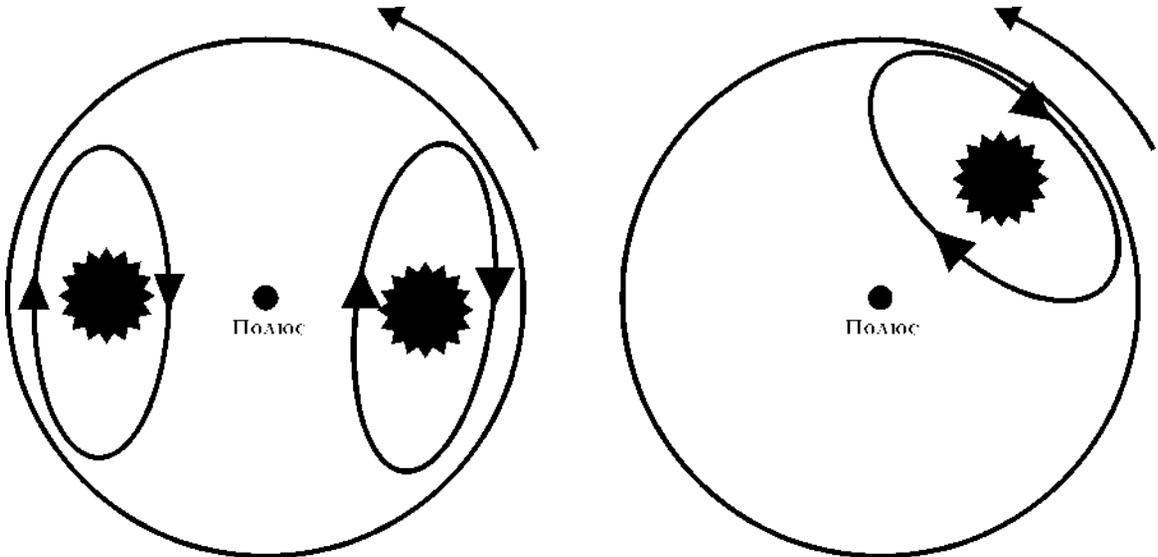


Рис. 2. Направление вращения планеты и движения токов в северном и южном полушариях ядра.

включающая в себя по 225 призм в северном и южном полушариях. Обратная задача решается с использованием пакета ADM-3D-Earth, позволяющего решать задачи с большим количеством неизвестных параметров [Кочнев, Гоз, 2006].

При разных постановках нами решены сотни вариантов обратных задач магнитометрии с использованием глобального поля IGRF-2005. В последних работах [Кочнев, 2011; Кочнев, Гоз,

2011] показано, что обратная задача устойчиво решается по геоцентрической Z-компоненте главного магнитного поля. При разных вариантах были получены близкие модели ЭН ядра. Наибольшие значения ЭН получены в краевых частях ядра, приближенных к экваториальной части, они достигают 1840 А/м (рис. 1), а пониженные — в приполярных частях ядра, составляют -41 А/м в северном и -596 А/м в южном полушариях.

Модель включает три главные аномалии: две в северном (Канадская и Сибирская) и одна (Австралийская) в южном полушариях (рис. 1), так как на поверхности они создают глобальные аномалии с такими же названиями. С учетом того, что ЭН в ядре может быть создана только токами, каждой аномалии соответствует аномалия замкнутых токов. Поскольку силовые линии внутри ядра, соответствующие положительным значениям геоцентрической (но не сферической) Z -компоненты магнитного поля, идут со стороны северного полюса к южному, то токи, в соответствии с правилом буравчика, будут течь по часовой стрелке (рис. 2). При этом во внешней экваториальной области ядра направление токов оказывается противоположным вращению планеты, которая вращается (если смотреть со стороны северного полюса) против часовой стрелки. Отсюда можно предположить, что электрический ток связан с вращением Земли. Перед тем как перейти к обоснованию кинематико-гравитационной модели, напомним о некоторых моделях генерации магнитного поля Земли.

Краткий анализ моделей геодинамо, близких к предлагаемой модели. Обзор исследований по геодинамо приведен во многих работах [Яновский, 1978; Моффат, 1980; Roberts, Glatzmaier, 2000]. О некоторых исследованиях в области моделирования геодинамо планет и звезд указано в работах М. Ю. Решетняка [Решетняк, 2010]. Из этих обзоров нами выбраны исследования, которые близки по теме к данной работе. В число первых поставлена работа Лармора [Larmor, 1919], которая положила начало исследованиям и моделям генерации магнитного поля в небесном теле (на Солнце). Для Земли первая модель, связанная с жидким ядром, была предложена В. Эльзассером 20 лет спустя. [Elsasser, 1939]. Он предположил, что при температурных градиентах возникает вихревое движение жидкости, первоначально перпендикулярное к поверхности ядра, а затем под влиянием силы Кориолиса отклоняющееся ближе к плоскости, параллельной экватору. При адиабатическом расширении верхние слои охлаждаются и возникает разность температур, что приводит к появлению ЭДС, а следовательно, и тока. Однако для возникновения термотока необходимо еще, чтобы состав жидкой массы был неоднородным. По мнению В. Эльзассера, такая неоднородность может возникнуть вследствие разности давлений в верхней и нижней частях ядра [Яновский, 1978, с. 304].

Модель В. Эльзассера для нас важна, так как в ней обосновывается вариант направления движения тока, совпадающего с направлением движения жидкости.

Уже в следующей работе, приведенной Б. М. Яновским, движение жидкости и токов является ортогональным или квазиортогональным. Речь идет о гипотезе Я. Френкеля: образование токов в ядре должно происходить при вихревом движении металлических масс ядра в магнитном поле [Френкель, 1947]. В модели постулируется начальное поле B_0 , которое первоначально могло быть малым, но за длительное время существования ядра Земли могло достичь современного уровня. Регенерация прекращается в тот момент, когда энергия радиоактивного распада становится равной энергии рассеяния вследствие вязкости ядра и электросопротивления. Б. М. Яновский в обзоре моделей ядра как источника МПЗ отмечает: «Основным вопросом в теории динамо-эффекта является вопрос о регенерации магнитного поля: каким образом может осуществляться такая регенерация [Яновский, 1978, с. 305]». Для ответа на этот вопрос предложено сотни математических моделей геодинамо, основанных на движении токов (электронов) в проводящем слое. Многие из них сложны, как, например, модель Э. Булларда [Яновский, 1978], в которой требуется сделать восемь преобразований (ток — магнитное поле — ток), чтобы принципиально получить что-то близкое к токовой модели, порождающей магнитное поле нужного направления (но не конфигурации его на поверхности ядра или Земли). Для объяснения модели геодинамо используется простая модель с вращающимся диском [Яновский, 1978; Моффат, 1980]. Причем если в ней направление движения диска совпадает с направлением тока в проводнике, то такая механическая модель усиливает магнитное поле и возникает самоподдерживающееся динамо.

Попытка связать эту модель с земной реальностью успехом не увенчалась [Моффат, 1980]. Однако можно получить близкую к ней модель самоподдерживающегося динамо, если предположить, что движущаяся в вихрях жидкая масса ядра является носителем положительных зарядов, т. е. заряжена. По оценкам ученых [Болт, 1984], ядро имеет температуру около 5000 градусов. При таких высоких температурах химические элементы, слагающие ядро, неизбежно ионизируются, т. е. теряют электроны внешних оболочек.

Степень ионизации оценивается плотностью тока эмиссии электронов, возникающей в нагретых металлах [Кухлинг, 1982]:

$$J \approx AT^2,$$

где J — плотность эмиссионного тока, А/м²; T — термодинамическая температура, К; A — некоторая константа, зависящая от металла и условий эмиссии.

Первые исследования эмиссии выполнялись в условиях, близких к вакууму. Масштабные исследования ионизации газов и жидкостей проводились и проводятся в настоящее время в связи с созданием МГД-генераторов, в которых ионизированная среда, называемая плазмой, является основой для генерации электрического тока. При этих исследованиях установлено, что некоторые металлы (в том числе щелочные) ионизируются при температуре около 3000 К.

Пример естественной ионизации и распределения по слоям заряженных атомов кислорода и азота наблюдается в верхних слоях атмосферы от 100 км и выше. Основной максимум ионизации фиксируется на высотах около 300 км. Вызывает ионизацию энергия солнечных лучей. В дневное время суток она достигает максимума [Яновский, 1978].

Б. М. Яновский отмечает: «В 1915 г. С. Барнетом была высказана гипотеза блуждающих токов, возникающих из-за движения заряженных частиц, возникших из-за высокой температуры внутри Земли. Принимая участие в суточном вращении, эти заряды и дают то начальное магнитное поле, которое необходимо для возникновения дрейфа» [Яновский, 1978, с. 293]. В дальнейшем при образовании дрейфующих токов магнитное поле начинает усиливаться и тем самым регенеративно усиливать токи и магнитное поле. Б. М. Яновский указывает на следующий недостаток гипотезы: «Основным недостатком этой гипотезы является то, что она не предусматривает механизмов, ограничивающих регенеративное поле, которое, как показывают вычисления, должно продолжаться непрерывно, до бесконечности» (там же).

В модели, которая рассматривается в данной работе, током является движение положительно заряженной жидкости. Степень заряженности определяется температурой, а плотность тока зависит от степени заряженности жидкости и скорости движения этой жидкости, которые имеют естественные ограничения. Следовательно, токи не могут быть бесконечными.

Из последних отечественных работ следует отметить публикации и докторскую диссертацию М. Ю. Решетняка. Во введении к диссертации автор указал на очень важное, на наш взгляд, обстоятельство о том, что в астрофизике широко используются аналитические модели. Однако при изучении планетарного геодинamo перспективны численные методы, которые и применил М. Ю. Решетняк для моделирования тепловых конвекций в геодинamo при быстром вращении. Важное значение имеют результаты, полученные при исследовании турбулентности в жидком ядре [Решетняк, 2008]. В частности, потенциально важны для представляемой модели: 1) малое влияние магнитного поля на формирование течения; 2) формирование крупномасштабных турбулентностей из мелких.

В работах В. В. Аксенова [Аксенов, 2009] представлена модель сферических токов, обтекающих внутреннее ядро. Для нас она интересна тем, что сделана попытка создать модель генерации магнитного поля с учетом влияния внешних объектов — спутников планет. В этой модели токи направлены против часовой стрелки, что должно порождать магнитное поле противоположного направления. Фактически модель осесимметрична (соосна с осью вращения Земли, как отмечает автор) и вступает в противоречие с теоремой Каулинга, хотя В. В. Аксенов делает оговорку, что теорема Каулинга не распространяется на сферические области. Однако сферические токи можно представить как совокупность токовых колец, на каждое из которых распространяется теорема «антидинamo».

В книге [Аксенов, 2009] упоминается работа Д. П. Зидарова, Т. Д. Петровой [Zidarov, Petrova, 1978], в которой источники магнитного поля представлены токовыми контурами. «Однако она не позволила решить проблему восстановления ГПП. Более того, эта попытка привела ее автора к модели асимметричного «двудынного» ядра Земли, что само по себе крайне невероятно с точки зрения имеющего место современного равновесного состояния Земли» [Аксенов, 2009, с. 6].

На наш взгляд, модель Д. П. Зидарова — правильная. Она отражает сильную асимметрию магнитного поля, которая известна и подчеркивалась многими учеными. Полученную нами модель тоже можно назвать «двудынной» (см. рис. 1). И неправильными, противоречащими результатам решения обратных задач, являются модели, в которых основной вклад в магнитное поле вносит центральный диполь.

Более детально рассмотрим модель прецессионного динамо. В работе Г. Моффата ей посвящен целый раздел и сделан вывод, что модели не существует. В работе [Wicht, Tilgner, 2010] приведена формула для расчета параметра, влияющего на прецессию, а следовательно, и на формирование магнитного поля. В таблицу включены планеты Земля, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун, но расчеты их полей не приведены. В заключительной части работы отмечается, что неисследованным остается взаимовлияние двух потоков, по-видимому, прецессионного и приливного.

Упомянутые выше технологии математического моделирования течений в приближенных к реальным условиям необходимы и важны, если в них будут учтены приливные силы Луны и Солнца.

В работе [Tyler et al., 2003] по результатам детального мониторинга спутниковых и наземных данных установлено периодическое изменение магнитного поля (до 1,5 нТл), совпадающее с периодом приливов. Сделано допущение, что оно вызвано движениям заряженных вод океана.

В работах [Кочнев, 2011; Кочнев, Гоз, 2011] высказано предположение, что жидкие массы ядра Земли приводятся в движение гравитационными силами Луны и Солнца. Для косвенного подтверждения приведена аналогия — пассатные течения воды в экваториальных областях океанов. Знакомство с некоторыми литературными источниками показывает, что ученые давно исследуют роль Луны в горообразовательных и тектонических процессах, происходящих на Земле. Приведем лишь одну цитату из работы [Авсюк, 1996, с. 129]: «Приливы и отливы в океанах и их связь с положением Луны на небе были известны людям гораздо раньше, чем Ньютон дал им механическое объяснение. Поэтому в научный обиход вошел термин "приливная сила", хотя она действует не только на воду, создавая течение и колебание уровня, но также и на блоки земной коры, на внутренние структуры Земли, такие как ядро».

В наших работах [Kochnev, 2012; Кочнев, 2012] построена математическая модель связи параметров магнитного поля с гравитационными и кинематическими параметрами Солнца, планет и их спутников.

В завершение обзора отметим работы, непосредственно предшествовавшие формированию кинематико-гравитационной модели: 1) адаптивный метод решения обратных задач геофизики [Кочнев, 1988; 1993]; 2) технологии

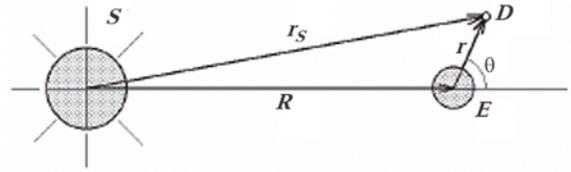


Рис. 3. Схема внешнего источника S (Солнце или спутник), планеты E (Земля), произвольной точки D ; r и θ — переменные, используемые для указания положения произвольной точки D вблизи Земли.

решения обратных задач гравиметрии и магнитометрии ADGM-3D [Кочнев, Гоз, 2006]; 3) решение обратной задачи магнитометрии для ядра Земли по глобальному магнитному полю Земли IGRF-2005 [Кочнев, 2011].

Построение кинематико-гравитационной модели. Для создания модели необходимо сделать несколько шагов.

Шаг 1. Ввести объекты S — Солнце или спутник планеты и точку D — внутри планеты на ней или над ней (рис. 3). Координаты точки определяются параметрами R , r и θ . Кроме того, точка имеет единичную массу m_1 , а спутник — массу m_s . Указанное иллюстрируется рис. 3 из работы [Бутиков, 2007].

Гравитационная сила, действующая на объект с единичной массой m_1 , в центре планеты будет равна

$$\Delta g_{sp} = G \frac{m_s m_1}{R^2}. \quad (1)$$

Шаг 2. Для объекта с единичной массой с координатами r , R рассчитывается горизонтальная составляющая силы тяжести. Согласно [Бутиков, 2007] и другим работам, горизонтальная составляющая равна

$$\Delta g_{hor} = -\frac{3}{2} \Delta g_{sp} \frac{r}{R} \sin 2\theta. \quad (2)$$

Приняв, что $\theta = -45^\circ$, получим оценку максимального значения горизонтальной составляющей силы тяжести.

Примечание: интересно, что Δg_{sp} от Солнца на Земле в 180 раз больше, чем от Луны, а Δg_{hor} наоборот — от Луны в 2,2 раза больше, чем от Солнца. Именно по этой причине Луна наиболее влияет на амплитуду приливных течений.

Шаг 3. Приливная сила не будет приводить в движение жидкость, если период вращения планеты T_{pl} и период обращения спутника T_{sp} равны. Это случай стационарного спутника, если направления вращения планеты и обращения спутника совпадают. При противопо-

ложных направлениях вращения и обращения движение жидкости будет более сильным. Для учета введем разность угловых перемещений планеты φ_{pl} и спутника φ_{sp} . Разность угловых перемещений за некоторый отрезок времени Δt будет равна $\Delta\varphi = \varphi_{pl} - \varphi_{sp}$. Перейдя от угловых соотношений к временным, получим

$$\frac{1}{T_{rpl}} = \frac{1}{T_{pl}} - \frac{1}{T_{sp}}$$

и окончательно

$$T_{rpl} = T_{pl} \left(\frac{T_{sp}}{T_{sp} - T_{pl}} \right), \quad (3)$$

где T_{rpl} — относительный период, за который спутник полностью облетит планету или планета совершит полное вращение относительно спутника.

Примечание. Нетрудно видеть, что при равенстве периодов планеты T_{pl} и спутника T_{sp} величина $T_{rpl} \rightarrow \infty$, т. е. спутник является стационарным и не создает на поверхности планеты и внутри ее горизонтальных движущих сил.

Шаг 4. Рассчитаем суммарную оценку Δg_{hor} для Земли. Ее создают Луна и Солнце:

$$\Delta g_{hor}(e) = \Delta g_{hor}^{Lun}(e) + \Delta g_{hor}^{Sol}(e) = \sum_{i=1}^2 \Delta g_{hor}(e). \quad (4)$$

Шаг 5. Зная все указанные выше парамет-

Т а б л и ц а 1. Параметры планет и спутников, относительных магнитных полей на экваторе B_{pl}/B_E и коэффициента K_0

Планета, относительный радиус, r_{pl}/r_E	Источник гравитационного поля	Масса источника, кг	Радиус орбиты источника, м	Периоды вращения планеты и обращения спутника и относительный период, сут			$-\sum \Delta g_{hor}(pl) \frac{T_E}{T_{pl}}$	B_{pl}/B_E	K_0		
				T_{pl}	T_{sp}	T_{rpl}					
Меркурий 0,38	Солнце	1,99E+30	5,80E+10	58	87,9	170,5	1,46E-08	0,005 ÷ 0,01	0,012		
Венера, 0,95	Солнце	1,99E+30	1,08E+11	-244	224,7	-117	-8,2E-09	<9·10⁻⁵	-0,007		
Земля 1	Солнце	1,99E+30	1,50E+11	1	365	1	3,76E-07	1	1		
	Луна	7,40E+22	3,84E+08	1	28	1,04	8,33E-07				
Марс 0,53	Солнце	1,99E+30	2,28E+11	1	687	1	5,70E-08	0,0013 ÷ 0,0019	0,039		
	Фобос	1,07E+16	9,40E+06	1	0,32	-0,47	-9,65E-09				
Юпитер 11,22	Солнце	1,99E+30	7,80E+11	0,4	4332	0,4	7,61E-08	14	0,06		
	Ио	8,93E+22	4,22E+08	0,4	1,8	0,52	1,68E-05			13,8	
	Европа	4,8E+22	6,71E+08	0,4	3,6	0,45	2,56E-06			2,11	
	Ганимед	14,8E+22	10,7E+08	0,4	7,2	0,42	2,1E-06			1,71	
	Каллисто	10,8E+22	18,8E+08	0,4	16,7	0,41	2,87E-07			0,24	
	Итого						2,16E-05				17,88
	Сатурн 9,47	Титан	1350E+20	1,222E+09	0,4	15,9	0,41			1,31E-06	1,08
	Мимас	0,4E+20	1,85 E+09	0,4	0,9	0,72	0,064E-06	0,053			
	Энцелад	1,1E+20	2,38 E+09	0,4	1,4	0,56	0,106E-06	0,088			
	Тетис	6,2E+20	2,95 E+09	0,4	1,9	0,51	0,346E-06	0,29			
	Диона	11E+20	3,77 E+09	0,4	2,7	0,47	0,318E-06	0,26			
	Рея	23E+20	5,27 E+09	0,4	4,5	0,44	0,260E-06	0,215			
	Итого						2,403E-06	0,7	1,98		
Уран 4,01	Миранда	0,066E+21	1,29E+08	0,7	1,41	1,39	0,56E-07	0,047			
	Ариэль	1,35E+21	1,91E+08	0,7	2,52	0,97	5,2E-07	0,43			
	Умбриэль	1,17E+21	2,66E+08	0,7	4,14	0,84	1,9E-07	0,158			
	Титания	3,50E+21	4,22E+08	0,7	8,7	0,76	1,59E-07	0,13			
	Оберон	3,01E+21	5,83E+08	0,7	13,5	0,73	0,53E07	0,044			
	Итого						9,78E-07	0,7	0,81		
Нептун 3,89	Тритон	2,14E+22	3,54E+08	0,8	-5,8	0,7	1,74E-06	0,45	1,44		

тры, можно рассчитать суммарную горизонтальную составляющую силы для единичной массы каждой из планет Солнечной системы. Приняв Землю за эталон, рассчитаем параметр K_N по формуле

$$K_N = \frac{\sum \Delta g_{\text{hor}}(\text{pl}) \frac{T_E}{T_{\text{Rpl}}} \left(\frac{r_{\text{pl}}}{r_E} \right)^N}{\sum \Delta g_{\text{hor}}(e)} \quad (5)$$

Здесь K_N — комплексная оценка параметров планеты относительно Земли. При $N=0$ коэффициент K_0 характеризует относительную величину приливных сил и кинематических составляющих, действующих на единицу массы на экваторе. При $N=3$ предыдущий параметр умножается на относительный объем планеты. В моделях геодинамо об энергии магнитного поля E_M судят по кинематической энергии движущейся жидкости E_K . В нашем случае относительную величину магнитного поля на экваторе будем оценивать по параметру K_0 , а магнитный момент — по параметру K_3 . Если исследуемая модель правильна, то параметры K_0 должны коррелироваться с относительными оценками индукции B_{pl}/B_E , а параметры K_3 — с относительными оценками магнитного момента M_{pl}/M_E .

Предварительный анализ результатов показал, что указанные параметры не только коррелируются, но и близки по величине. Поэтому будем считать параметры K_0 и K_3 оценками параметров B_{pl}/B_E и M_{pl}/M_E . И это вполне допустимо, так как названные параметры безразмерны.

Результаты и их анализ. Исходные данные и промежуточные результаты расчета коэффициентов при $N=0$ приведены в табл. 1. При $N=0$ получаем оценку магнитного поля на экваторе (K_0) относительно Земли (табл. 1, последняя колонка). Для сравнения полученных оценок в предпоследней колонке указан параметр B_{pl}/B_E по данным спутниковых наблюдений [Гордин, 2004].

В табл. 1 приведены данные только для тех спутников планет, которые вносят значимый

вклад (более 1 %) в оценку параметров K . Результаты расчета и спутниковых данных относительных параметров магнитного поля сопоставлены в табл. 2 и на рис. 4.

Ниже представлен анализ результатов, приведенных в табл. 1, сравниваются в первую очередь параметры в последней и предпоследней колонках.

Меркурий. Магнитное поле и магнитный момент (ММ) более чем на два порядка меньше соответствующих параметров Земли. Наличие магнитного поля свидетельствует о том, что планета имеет жидкое ядро. Слабое относительное вращение планеты ($T_{\text{pl}}=58$, $T_{\text{rpl}}=170$ сут) компенсируется сильной горизонтальной составляющей гравитационного поля, создаваемого Солнцем. Гравитационно-кинематическая оценка относительного поля на экваторе близка к наибольшей оценке, полученной по спутниковым наблюдениям: $K_0=0,012$, $B_{\text{pl}}/B_E=0,01$. Таким образом, нет необходимости предполагать, что магнитное поле на Меркурии является остаточным, как это утверждается в некоторых публикациях, упоминаемых в работе В. М. Гордина [Гордин, 2004].

Венера по размерам, массе и положению на орбите близка к Земле, но имеет магнитное поле и ММ на 4—5 порядков меньше, чем Земля. Кинематико-гравитационная оценка $K_0=-0,007$ по абсолютной величине самая низкая, но самое главное, противоположна по знаку. Обратный знак возникает как следствие оценки $T_{\text{rpl}}=-117$, поскольку обращение Венеры вокруг оси, в отличие от всех остальных планет, считается обратным ($T_{\text{pl}}=-244$). Вследствие этого приливные гравитационные силы должны создавать движение жидких масс в обратном направлении против часовой стрелки. Следует заметить, что заключение о ретроградном вращении Венеры было принято на одной из конференций [Галкин, 1988]. Однако убедительных физических обоснований нет [Butrica, 1996; Carpenter, 1970]. Нет и объяснения неравномерности вращения плане-

Т а б л и ц а 2. Относительные магнитные моменты и индукции по спутниковым наблюдениям [Гордин, 2004] и кинематико-гравитационные параметры планет K

Параметры	Меркурий $r_{\text{pl}}=0,37$	Венера $r_{\text{pl}}=0,96$	Земля $r_{\text{pl}}=1$	Марс $r_{\text{pl}}=0,53$	Юпитер $r_{\text{pl}}=11,2$	Сатурн $r_{\text{pl}}=9,4$	Уран $r_{\text{pl}}=3,8$	Нептун $r_{\text{pl}}=3,6$
M_{pl}/M_E	<0,006	<0,00001	1	<0,0003	20000	600	50	25
K_3	0,0007	-0,006	1	0,006	23137	1409	49	80,7
B_{pl}/B_E	0,007	<0,00009	1	0,0016	14	0,71	0,74	0,45
K_0	0,012	-0,007	1	0,039	17,43	1,69	0,81	1,44

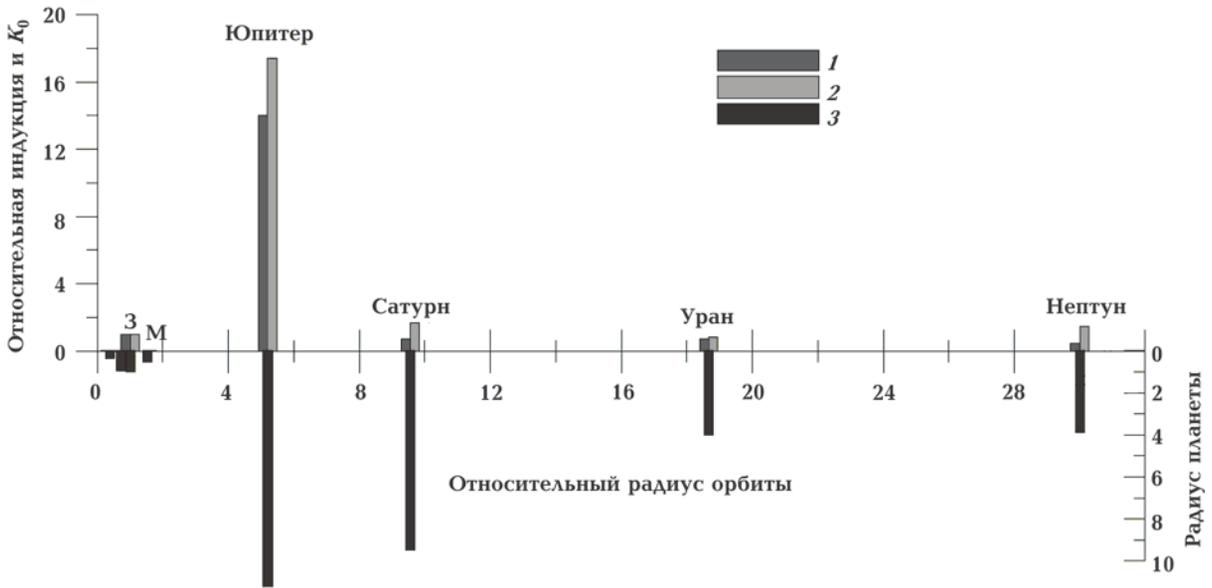


Рис. 4. Относительная индукция магнитного поля на экваторе (1), параметры K_0 (2) и радиусы планет (3).

ты, которую вводят авторы ретроградности, необходимую для того, чтобы при сближении с Землей (через каждые 585 сут) Венера была обращена к ней одной и той же стороной, что фактически и наблюдается. До этого [Галкин, 1988] по оптическим наблюдениям астрономов считалось, что Венера, подобно Луне (обращенной одной стороной к Земле), обращена одной стороной к Солнцу. В этом случае генерации магнитного поля не должно происходить, так как $T_{pl}=T_{sp}$ и $T_{rpl} \rightarrow \infty$, что полностью согласуется с оценками поля по спутниковым наблюдениям. В нормальном варианте вращения планеты, когда $T_{pl}=T_{sp}$, нет необходимости вводить неравномерность вращения, как это есть в модели [Carpenter, 1970]. В период сближения с Землей Венера всегда будет обращена к ней одной и той же стороной.

Земля — наиболее изученная магнитными наблюдениями планета. Каждые 5 лет обновляются данные для расчета глобального МПЗ [International..., 2010]. Вместе с тем достоверная модель генерации магнитного поля до сих пор однозначно не построена. По предлагаемой в данной работе модели магнитное поле генерируется движением заряженной жидкости под действием горизонтальных (приливных) гравитационных сил, вызываемых Луной и Солнцем. Если вертикальные гравитационные силы Солнца почти в 180 раз больше лунных, то горизонтальные (приливные) гравитацион-

ные силы Луны в 2,2 раза больше, чем такие же от Солнца [Бутиков, 2007]. В нашем расчете включено суммарное влияние обоих объектов. Суммарное значение горизонтальной составляющей гравитационного поля (табл. 1, колонка б) для Земли более чем на два порядка выше по сравнению с таковым для планет Меркурий, Венера и Марс. Таким образом, большое магнитное поле Земли создано быстрым вращением, чего нет у Меркурия и Венеры, наличием близкого объекта — Луны, и, конечно, высокотемпературного жидкого ядра. Так как параметры Земли приняты за эталон, то оба коэффициента равны единице, т. е. $K_0=K_3=1$.

Марс по радиусу в 2 раза меньше Земли и вращается вокруг собственной оси со скоростью 1 об/сут. По спутниковым наблюдениям магнитное поле Марса более сильное, чем Венеры, но значительно слабее, чем Меркурия. Марс имеет два спутника, Фобос и Деймос, но оба малы по размерам и массе. При расчете взят ближний спутник Фобос. Период его обращения вокруг Марса $T_s=0,32$. По формуле (3) получим $T_{rpl}=-0,47$. Следовательно, Фобос уменьшает тормозящий (приливной) эффект, создаваемый Солнцем, который в 6 раз больше. В итоге оценки K_0 и K_3 оказались в 20 раз больше, чем относительный магнитный момент и (ОММ) и относительное магнитное поле (ОМП) по наблюдаемым данным. Существование магнитного поля свидетельствует

о наличии жидкого ядра на Марсе. Расчетное магнитное поле Марса (см. табл. 1, колонка 8) должно быть в 3 раза больше, чем Меркурия. То, что оно значительно меньше такой же по размерам планеты, как Меркурий (в 20 раз по ММ и в 5 раз по магнитному полю), может быть объяснено более низкой температурой жидкого ядра. Так, по модели [Toksöz, 1979], температура в ядре Марса в 2,5 раза меньше, чем в ядре Земли (около 2000 °С).

Прежде чем перейти к анализу наблюдаемых и расчетных параметров магнитных полей больших планет, обратим внимание на рис. 4, показывающий их удаление от Солнца, радиусы и расчетные и наблюдаемые относительные индукции и параметры K_0 .

Юпитер — его большие ОММ (20000) и ОМП (14) вызваны тремя основными факторами: большим радиусом планеты (в 11 раз больше радиуса Земли), большой скоростью вращения $T_{\text{пр}}=0,4$ сут и наличием спутника Ио, орбита и масса которого близки к орбите и массе Луны. Уникальна и скорость обращения Ио вокруг Юпитера — 1,8 сут. По этой причине относительный период вращения Юпитера скор-

ректирован по формуле (4) с 0,4 до 0,51 сут. Слагаемое от спутника Ио является основным при расчете суммы (см. табл. 1, колонка 6). В этом случае расчетные оценки $K_0=13,94$ и $K_3=18495$ хорошо согласуются с данными спутниковых наблюдений ОМП=14, ОММ=20000. Но если включить в расчет другие спутники, то общая оценка K_0 увеличится на 25 %. На рис. 5 показаны основные спутники Юпитера, расположенные по удалению от планеты. Как видно, вклад больших спутников Ганимеда и Каллисто составляет соответственно 10,3 и 1,4 %. Слагаемое от Солнца — не более 0,3 %. Меньшая по размерам Европа вносит большой вклад — 13,4 %. Уместно подчеркнуть, что приливная сила пропорциональна радиусу планеты, массе спутника и обратно пропорциональна относительному периоду $T_{\text{пр}}$ и кубу расстояния до планеты, т. е. радиусу орбиты спутника.

Сатурн имеет такой же период вращения и всего на 10 % меньший радиус по сравнению с радиусом Юпитера и в то же время самый большой спутник Титан, который в 1,44 раза по массе больше Ио и в 1,75 раза — Луны. Но магнитное поле Сатурна в 20 раз меньше, чем

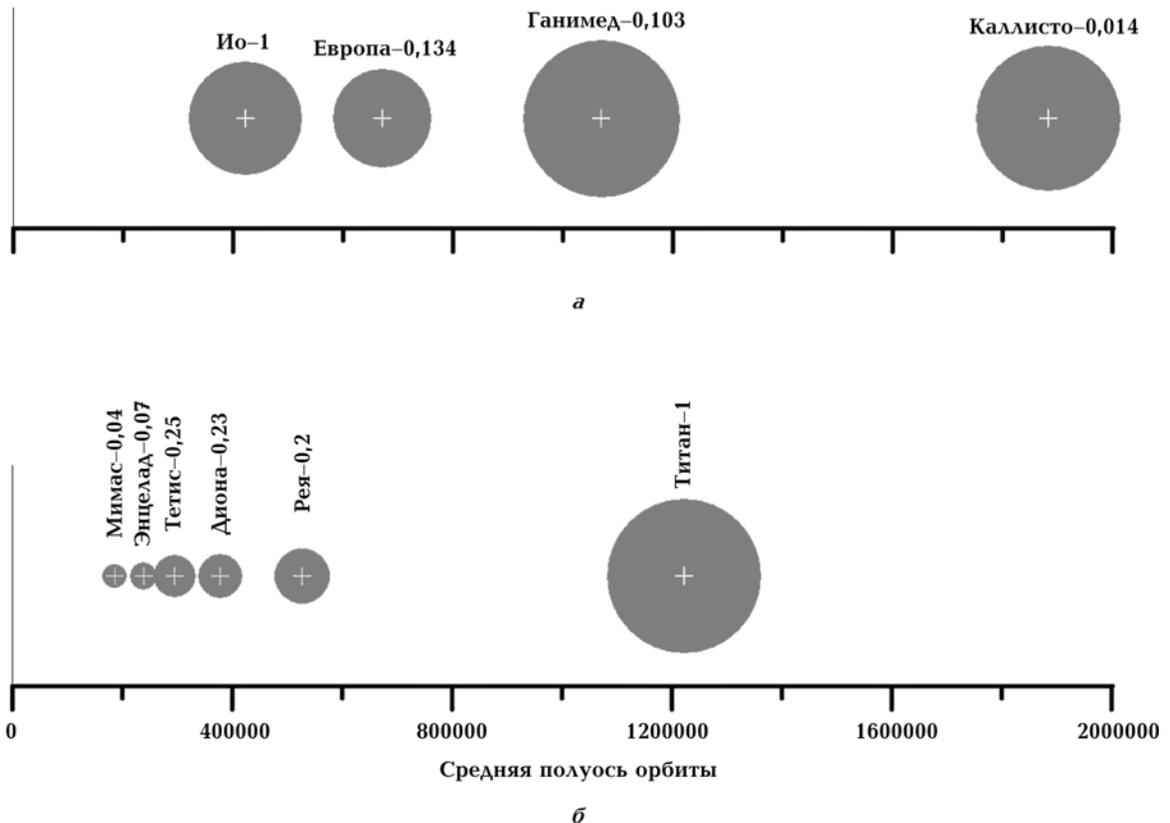


Рис. 5. Крупные спутники Юпитера (а) и Сатурна (б). Цифрами указана их доля в генерации магнитного поля планет относительно наибольшего спутника.

поле Юпитера. Объяснить это трудно, если исключить влияние приливных сил спутников и их параметров (рис. 5). Дело в том, что радиус орбиты Титана более чем в 3 раза больше радиуса орбиты Луны, $K_0=0,95$, а $K_3=792$. Оценка параметров по спутниковым данным: соответственно $ОМП=0,7$, $ОММ=600$. Однако вблизи Сатурна располагается 5 небольших спутников (см. табл. 1), увеличивающих оценку параметров почти в 2 раза. В итоге получаем магнитное поле, примерно в 10 раз меньшее рассчитанного по модели на Юпитере. В некоторых научных работах для объяснения большой разности магнитных полей привлекаются особые модели газового состава планеты, при котором поле экранируется. В исследуемой модели ввести особое строение планеты нет необходимости.

Уран имеет большое количество спутников, главные из них создают значимые приливные силы — Ариэль, Умбриэль и Титания (см. табл. 1, колонка 6). Суммарные расчетные значения равны: $K_0=0,81$; $K_3=49$; соответствующие им наблюдаемые параметры $B_{pl}/B_E=0,7$; $M_{pl}/M_E=50$. Важной особенностью наблюдаемого магнитного поля планеты является его неоднородность, что выражается в большом угле наклона расчетной дипольной оси — 59° . По астрономическим и спутниковым данным ось вращения Урана практически совпадает с плоскостью эклиптики, а плоскость орбит вращения его спутников ортогональна плоскости эклиптики.

Нептун по размерам близок к Урану, но имеет всего один значимый спутник — Тритон. Особенность спутника заключается в том, что он движется в противоположном направлении к осевому вращению планеты, а его орбитальная плоскость наклонена к плоскости экватора планеты на 23° . Это дало основание астрономам предполагать, что спутник является «пришлым», а не сформировавшимся вместе с планетой. По расчетам, относительное поле на экваторе должно быть равно $K_0=1,44$, а наблюдаемые параметры $B_{pl}/B_E=0,45$, т. е. расчетное и наблюдаемое поля различаются в 3 раза. То же касается и магнитного момента. Это наибольшее отклонение расчетных и наблюдаемых данных. Каковы возможные причины такой разницы? Сформулируем следующие из них.

1. Неучет наклона орбиты спутника. В первом приближении это должно уменьшить расчетные величины на 10 %. Погрешность неучета может быть больше, так как в реаль-

ности будут вызываться не экваториальные, а наклонные к экватору течения, что должно привести к наклону дипольной оси. На самом деле наклон существует и равен 47° .

2. Неточная оценка параметров магнитного поля планеты вследствие всего одного облета планеты. Не исключено, что маршрут мог пройти по седловине ее магнитного поля. Тогда оценка может быть существенно занижена. На картах магнитного поля, построенных по данным Voyager-2 [Holme, Vloxxham, 1996], наиболее интенсивные аномалии выделены в южном полушарии вблизи экватора. Наибольшие значения амплитуд аномалий составляют на Уране около 1,2 мкТл, на Нептуне — 1,3 мкТл.

Интересно, что у Урана и Нептуна разное распределение спутников. У Урана 5 основных спутников, их массы и размеры плавно увеличиваются по мере удаления от планеты. Почти половину приливных сил создает сравнительно небольшой, но близко расположенный к планете Ариэль. Наибольший спутник Оберон образует лишь десятую часть приливной силы. У Нептуна из 5 спутников только Тритон формирует значимую гравитационную силу, которая по расчетам в 2 раза больше, чем у Урана. У обеих планет выявлены по одному вихрю, создающему основное магнитное поле [Holme, Vloxxham, 1996]. Наличие только одного вихря и обуславливает сильную асимметрию магнитного поля, которая выражается в значительном наклоне расчетных диполей.

Сопоставив результаты в целом по семи планетам, кроме Земли, получим среднее отклонение наблюдаемого и расчетного значений $ОМП$, равное 0,899, среднее квадратическое — 1,59. Расчетные оценки смещены в сторону увеличения.

Коэффициент корреляции $ОММ$ на экваторе с расчетными коэффициентами K_0 равен 0,997, а $ОММ$ с K_3 стремится к единице. Это свидетельствует о достаточно тесной связи между параметрами главного магнитного поля планет и кинематико-гравитационных параметров K_0 и K_3 . Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что механизм генерации магнитного поля для всех планет близок — как для малых, так и для больших планет. Такой вывод оказался лишь частично новым. В. М. Гордин [2004] отмечает, что после спутниковых съемок на Юпитере и Сатурне (1974—1975) был сделан вывод о том, что механизм генерации на Земле и планетах-гигантах один и тот же. Планеты Меркурий, Венера и Марс исключены из этой закономерности, как не

имеющие жидкого ядра (ввиду своей малости или его несохранности), а Венера — в силу существенно другой эволюции. У В. М. Гордина по этому поводу читаем, что альтернативную гипотезу прецессионной динамо-генерации магнитных полей в течение многих лет развивал Ш. Ш. Долгинов [Долгинов, 1980]. С использованием нашей модели малые поля объясняются малой скоростью вращения планет Меркурия и Венеры и низкой температурой ядра у Марса.

Выводы. Таким образом, по кинематико-гравитационной модели для генерации магнитного поля необходимы следующие условия.

1. Наличие жидкого ядра, атомы которого ионизированы под действием высокой температуры. Чем выше температура, тем больше ионизация и, соответственно, заряженность жидкости (плазмы).

2. Вращение планеты вокруг своей оси.

Условия 1 и 2 являются необходимыми практически во всех моделях геодинамо.

3. Наличие одного или нескольких внешних объектов (Солнце или спутники), создающих горизонтальные гравитационные силы, которые вызывают движение жидкости как на поверхности планеты (пассатные течения), так и в жидком ядре. Горизонтальная гравитационная (приливная) сила пропорциональна массе внешнего объекта, радиусу планеты и обратно пропорциональна кубу удаления объекта от планеты. Сила, приводящая в движение жидкость ядра, пропорциональна приливной силе и обратно пропорциональна периоду вращения планеты $T_{\text{рп}}$ относительно объекта, вызывающего приливные силы.

Следует различать два эффекта, создаваемых горизонтальной составляющей поля: приливные и пассатные течения. Приливные эффекты — периодические (по два прилива и отлива в сутки). Периодичность вызвана тем, что течение жидкости океана, вызванное приливной силой, наталкивается на прибрежную часть, где уровень океана поднимается, и после того, как приливные силы ослабевают, течение идет в обратную сторону. Пассатные течения — результат долговременного действия приливных (тормозящих) сил Луны и Солнца. В результате взаимодействия с силами сопротивления (береговых линий, островов, отмелей, ветров) с участием сил Кориолиса формируются устойчивые течения, основные из них пассатные, идущие на запад или по часовой стрелке на экваторе и возвратные на широтах от 10 до 40°. Сформировавшиеся течения подобны громадному ма-

ховику, которому достаточно небольшой силы, чтобы вращение не затухало. Точно такой же механизм раскрутки можно представить и в ядре. Но это тема будущих исследований для специалистов по моделированию полоидальных и тороидальных течений в жидком ядре с учетом внутренних и внешних сил.

Следствия и некоторые темы дальнейших исследований.

1. Если рассматривать в качестве объектов, генерирующих собственное магнитное поле, крупные спутники планет, то они не могут генерировать собственных полей за счет своих планет, даже если имеют жидкое ядро, так как по имеющейся информации периоды обращения вокруг оси и планеты совпадают. Например, для Луны $T_{\text{рп}} = T_s = 28$ сут. Здесь в качестве планеты становится Луна, а в качестве спутника — Земля. По формуле (4) получаем $T_{\text{рп}} = \infty$, следовательно, $K_0 = K_3 = 0$. Вместе с тем внешним объектом для Луны и других спутников является Солнце. Оно порождает приливные силы, которые за счет меньшей скорости вращения (28 сут), меньшего радиуса (в 4 раза) могли бы порождать магнитное поле около 100 нТл. То, что глобальное поле на Луне отсутствует, может свидетельствовать об отсутствии жидкого ядра. О наличии приливных сил на Луне свидетельствуют значительные лунотрясения, с магнитудой до 4 баллов [Галкин, 1988]. В прошлом, если жидкое ядро существовало, то могло порождаться магнитное поле. А если в то время Луна и вращалась со скоростью 1 об/сут, то поле могло быть значительным вследствие сильного воздействия Земли. Более детальный анализ магнитных полей спутников — особая интересная тема исследования.

2. По результатам моделирования и решения обратных задач сделан вывод, что магнитное поле генерируется во внешних частях ядра, прилегающих к экваториальной плоскости. Математическому диполю, помещенному в центр ядра, нет физически эквивалентного диполя. Согласно данной модели, магнитное поле может быть обратным, если планета вращается в обратном направлении (гипотетический случай Венеры) или имеет большой объект, создающий приливные силы и обращающийся по согласованному с планетой направлению вращения, но период обращения его меньше, чем период вращения планеты, т. е. $T_{\text{сп}} < T_{\text{рп}}$. Тогда $T_{\text{рп}} < 0$. Это случай, подобный Фобосу, у которого период обращения 0,32 сут, а период вращения планеты Марс 1 сут. У больших планет обратное магнитное поле математического

диполя может быть в том случае, если максимально генерирующие вихри сильно удалены от центра планеты. Признаки подобной ситуации наблюдаются в модельном магнитном поле ядра Земли (см. рис. 1). Над поверхностью ядра Земли имеет место минимум магнитного поля, а максимумы находятся вблизи экваториальной области ядра.

3. Для планеты Земля полная инверсия магнитного поля маловероятна, но отмечается сильное изменение его отдельных вихрей и усиление других. Так, за период 1980—2005 гг. магнитное поле Канадской аномалии убывает ежегодно на 100 нТл, в то время как аномалий Сибирской и Австралийской увеличивается, что вполне логично. За короткий период на поверхности планеты изменяются течения (Гольфстрим), вероятно, подобные изменения могут происходить и внутри ядра. Такому явлению, видимо, способствует прецессия оси вращения Земли. Геологами установлено [Добрецов, 2010], что в эпохи планетарных катаклизмов магнитное поле (по палеомагнитным данным) сильно ослабевало и были кратковременные экскурсы и инверсии магнитного поля Земли. Ослабление МПЗ вполне логично, так как происходила эмиссия избыточной энергии (тепла) на поверхность планеты и нарушалось сформировавшееся за

длительный период времени течение жидкости ядра. Что касается кратковременных инверсий, то, на наш взгляд, речь может идти о локальных инверсиях, и поэтому требуются проверка и анализ фактов, на основе которых было выдвинуто данное утверждение.

4. Представляет интерес следующий вопрос (а это тема или проблема для исследования): как физически объяснить то, что при определенных условиях возникает заряженность движущейся плазмы, которая и является током, создающим магнитное поле? На этот вопрос был дан ответ с позиции термоэффекта [Elsasser, 1939; Тимофеев, 2011]. В одной из известных работ, посвященных этой проблеме [Arteha, 1996], рассматриваются центробежные, гравитационные силы и силы давления, сепарирующие частицы по-разному, разделяя заряды.

Есть и другие вопросы, требующие дальнейшего исследования.

Благодарность. Безмерно благодарен Владимиру Николаевичу Страхову, который за 10 дней до кончины пригласил меня к себе и с огромным интересом обсуждал презентацию представленной работы, дал ей высокую оценку и предложил помощь в ее публикации. Признателен всем, кто принимал участие в обсуждении данной работы.

Список литературы

- Авсюк Ю. Н. Связь приливной эволюции системы Земля—Луна с проблемами геодинамики // Вестн. РАН. — 1996. — № 66. — С. 129—134.
- Аксенов В. В. Электромагнитное поле Земли. — 3-е изд., перераб. и доп. — Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2009. — 270 с.
- Альпин Л. М., Даев Д. С., Каринский А. Д. Теория полей, применяемых в разведочной геофизике. Учебник для вузов. — Москва: Недра, 1985. — 407 с.
- Болт Б. В глубинах Земли. — Москва: Мир, 1984. — 192 с.
- Бутиков Е. И. Физика океанских приливов в компьютерных моделях. — Санкт-Петербург: СПбГУ, 2007. — 16 с.
- Галкин И. Н. Внеземная сейсмология. — Москва: Наука, 1988. — 191 с.
- Гордун В. М. Очерки по истории геомагнитных измерений. — Москва: ИФЗ СО РАН, 2004. — 161 с.
- Добрецов Н. Л. Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели // Геология и геофизика. — 2010. — № 6. — С. 761—779.
- Долгинов Ш. Ш. Магнетизм планет // Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. Итоги науки и техники. — 1980. — № 5. — С. 131—166.
- Кочнев В. А. Адаптивные методы интерпретации сейсмических данных. — Новосибирск: Наука, 1988. — 152 с.
- Кочнев В. А. Адаптивные методы решения обратных задач геофизики. — Красноярск: ВЦ СО РАН, 1993. — 130 с.
- Кочнев В. А. Косвенные факты и явления, подтверждающие модель генерации магнитного поля при движении заряженного расплава ядра // Материалы 39-й сес. Междунар. семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». — Воронеж, 2012. — С. 149—152.
- Кочнев В. А. Эффективная намагниченность ядра — результат решения обратной задачи по геоцентрической Z-компоненте магнитного поля IGRF-2005 // Шестые науч. чтения Ю. П. Булашевича «Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей». — Екатеринбург, 2011. — С. 146—149.

- Кочнев В. А., Гоз И. В. Модель источников магнитного поля ядра Земли, полученная в результате решения обратной задачи магнитометрии // *Материалы 38-й сес. Междунар. семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей»*. — Пермь, 2011. — С. 146—149.
- Кочнев В. А., Гоз И. В. Нераскрытые возможности магнитометрии // *Геофизика*. — 2006. — № 6. — С. 51—55.
- Кухлинг Х. Справочник по физике. — Москва: Мир, 1982. — 520 с.
- Моффат Г. Возбуждение магнитного поля в проводящей среде. — Москва: Мир, 1980. — 335 с.
- Решетняк М. Ю. Некоторые свойства циклонической турбулентности в жидком ядре Земли // *Геомагнетизм и аэрномия*. — 2008. — № 48. — С. 416—423.
- Решетняк М. Ю. Нелинейности в динамо // *Физика Земли*. — 2010. — № 7. — С. 52—63.
- Тимофеев Д. Н. Природа генерации магнитного поля Земли в свете сепарационной теории космических тел // Шестые науч. чтения Ю. П. Булашевича «Геодинамика, глубинное строение, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей». — Екатеринбург, 2011. — С. 336—338.
- Френкель Я. И. Земной магнетизм // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* — 1947. — № 11. — С. 607—616.
- Яновский Б. М. Земной магнетизм. — Ленинград: 1978. — 592 с.
- Arteha S. N. On the magnetism of stars and planets // *Astrophys. Space Sci.* — 1996. — № 246. — P. 51—64.
- Butrica A. J. To See the Unseen // *A History of Planetary Radar Astronomy*. — Washington, D.C.: NASA History Office, 1996. — 301 с.
- Carpenter R. L. A Radar Determination of the Rotation of Venus // *The Astron. J.* — 1970. — № 75. — 61 p.
- Elsasser W. M. On the Origin of the Earth's Magnetic Field // *Phys. Rev.* — 1939. — № 55. — P. 489—498.
- Holme R., Bloxham J. The magnetic fields of Uranus and Neptune: method and models // *J. Geophys. Res.* — 1996. — № 101. — P. 2177—2200.
- International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Working Group V-MOD. et al. International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation // *Geophys. J. Int.* — 2010. — № 183. — P. 1216—1230.
- Kochnev V. Empirical kinematic-gravitational model of generation of magnetic fields of planets // VIth Int. conf. «Solitons, collapses and turbulence: Achievements, Developments and Perspectives». — Новосибирск, 2012. — С. 90.
- Larmor J. How could a rotating body such as the Sun become a Magnet? // *Report of the British Association for the Advancement of Science 87th Meeting*. — Bournemouth, 1919. — P. 159.
- Roberts P. H., Glatzmaier G. A. Geodynamo theory and simulations // *Rev. Mod. Phys.* — 2000. — № 72. — P. 1081.
- Toksöz M. N. Planetary seismology and interiors // *Rev. Geophysics*. — 1979. — № 17. — P. 1641—1655.
- Tyler R. H., Maus S., Lühr H. Satellite Observations of Magnetic Fields Due to Ocean Tidal Flow // *Science*. — 2003. — № 10. — P. 239—241.
- Wicht J., Tilgner A. Theory and Modeling of Planetary Dynamos // *Space Sci. Rev.* — 2010. — № 152. — P. 501—542.
- Zidarov D. P., Petrova T. D. Representation of the Earth's magnetic field as a field of a circular current loop // *Gerlands Beitrage zur Geophysik*. — 1978. — № 87. — P. 469—475.