

Лекция 2. ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ

Во 2-ой лекции обсуждаются: вращение Земли (ВЗ), параметры и неравномерность вращения, средства и результаты измерения скорости вращения Земли, скорость ВЗ в прошлом, движение северного географического полюса, супервращение атмосферы и внутреннего ядра. Рассмотрен вопрос, имеющий познавательное значение, - появление в диссипативных системах отрицательной вязкости и теория супервращения.

Вращение Земли.

О вращении Земли (ВЗ) известно с тех пор, как Коперник предложил гелиоцентрическую систему, принципиально отличающуюся от системы мира Птолемея. Однако ещё в 123 г. до н.э. Гиппарх нашел, что земная ось перемещается вокруг оси эклиптики, обеспечивая прецессию. Сомнения в постоянстве скорости суточного вращения Земли возникли после открытия Э.Галлеем в 1695 г. векового ускорения движения Луны, а мысль о вековом замедлении вращения Земли под действием приливного трения впервые была высказана И.Кантом в 1755 г. В 1737 г. Дж. Брайль открыл явление нутации - колебания оси ВЗ, которые накладываются на прецессионное движение. В 1758 г. Л. Эйлер разработал теорию вращения абсолютно твердой Земли вокруг оси главного, полярного момента инерции C , при условии отсутствия моментов внешних сил. Частота эйлеровой прецессии $\omega_E = (C - A) \times r_o / A$, где A - экваториальный момент инерции, r_o - имеет размерность (сутки)⁻¹. Период прецессии Эйлера составляет 305 суток. В действительности, Земля не абсолютно твердое, а упругое, деформируемое тело и поэтому в спектре вращения Земли эйлеровой прецессии не наблюдается. В 1892 г. С. Чандлер обнаружил в спектре движения полюса вращения Земли вокруг оси инерции период, равный примерно 428 суток (≈ 14 месяцев). Это 14-месячное колебание названо в его честь чандлеровским периодом, а сами колебания чандлеровскими. Американский астроном С. Ньюком показал, что чандлеровский период, это тот же период Эйлера для упругой Земли.

В настоящее время хорошо известно, что чандлеровский период не остается постоянным во времени - он флуктуирует, отклоняясь от среднего не более $\pm 4\%$. По-видимому, это вызвано вариацией параметров Земли: жесткости, степени сжатия и т.п. Известно также, что период чандлеровского движения и его амплитуда пропорциональны друг другу (коэффициент корреляции 0.88), причем увеличение периода чандлеровских колебаний коррелирует с уменьшением амплитуды этих колебаний (Мельхиор, 1968).

Несмотря на почти вековую историю исследований чандлеровских колебаний, природа их остается загадкой. Так, например, до сих пор по этому поводу высказываются различные, подчас противоположные друг другу, мнения. Л. Мансина и Д.Е. Смайли в 1967 г. выдвинули предположение о том, что чандлеровские колебания возбуждаются при землетрясениях (Стейси, 1972). Ранее, обсуждая эту проблему, У. Манк и Г. Макдональд (1964) такой механизм не считали возможным. Оценки порядков величин изменения моментов инерции, подтверждают неприемлемость этого предложения. По мнению Ф. Стейси (1972), корреляция между землетрясениями и малыми движениями оси вращения представляется парадоксальной. Попытки объяснить природу чандлеровских колебаний атмосферными флуктуациями и магнитосферными вариациями, вызванными изменениями интенсивности потока солнечного ветра, показали, что эти явления на много порядков, меньше момента, необходимого для поддержания чандлеровских колебаний. Стейси предполагает, что существует какой-то механизм возбуждения колебаний, о котором мы совершенно не подозреваем.

Из астрономических наблюдений известно, что в настоящее время ВЗ замедляется за счет приливного трения, увеличивая длину суток примерно на 1.5 мс за 100 лет. Известно, что примерно две тысячи лет тому назад скорость замедления $1/\omega \times d\omega/dt$ была примерно в два раза выше - около 3 мс за 100 лет, или $= 4 \times 10^{-22}$ рад/с². Однако такое

замедление ВЗ представляет собой тренд, на фоне которого происходят как сезонные колебания скорости ВЗ порядка $\Delta\omega/\omega \leq 10^{-8}$, так и долгопериодные изменения того же порядка. Скорость вращения Земли наименьшая в апреле и ноябре, а наибольшая - в конце января и июле. Принято считать, что главная причина сезонной неравномерности ВЗ, это атмосферная циркуляция. Атмосфера движется относительно земной поверхности в низких широтах с востока на запад - дуют западные ветры, а в умеренных и высоких широтах - с запада на восток. Момент импульса восточных ветров отрицателен, а западных - положителен. Сезонная неравномерность состоит в перераспределении моментов импульса, причем, момент импульса восточных ветров в несколько раз меньше момента импульса западных.

Можно обсуждать другие причины сезонной неравномерности вращения, например, астрономическую, когда учитывается перекачка импульса из вращательного движения в поступательное и наоборот. Или изменение скорости вращения за счет сезонной зависимости величины океанических приливов, возмущающих форму Земли наиболее сильно и т.п. (Кузнецов, 1990). Хорошо известна взаимосвязь скорости ВЗ с явлениями Эль-Ниньо. Это явление связано с переменной направления течений в Тихом океане. Наиболее сильное возмущение величины ω за счет этого явления наблюдалось на рубеже 1982-83 г.г.

Изменения $\Delta\omega/\omega$ должны коррелировать с вариацией силы тяжести $\Delta g/g$, однако, до внедрения в практику гравиметрического мониторинга криогенных сверхчувствительных гравиметров, этого обнаружить не удавалось. После постановки таких приборов в некоторые обсерватории, синхронные вариации $\Delta g/g$, в частности, чандлеровский период в гравитационном поле Земли, были зафиксированы.

Поиски корреляции долгопериодных вариаций скорости ВЗ с различными геофизическими явлениями постоянно занимали особое место в работах по физике Земли. В частности, речь шла, например, о связи $\Delta\omega/\omega$ с сейсмичностью Земли. Считалось, что такая связь распространяется на глубокофокусные землетрясения, а неглубокие землетрясения со скоростью вращения не связаны. Многие пытались найти взаимосвязи $\Delta\omega/\omega$ с вариацией магнитного поля Земли, с амплитудой и длительностью чандлеровского периода, с вулканизмом и т.д. Несколько лет тому назад считалось, что такие корреляции вполне достоверны. Однако жизнь показала (в том числе и наши исследования), что значимых корреляций в действительности нет. Все геофизические параметры не имеют простой прямой связи с вариацией величины скорости вращения, хотя утверждать обратное, что на них не оказывает никакого влияния вращение Земли, тоже нельзя.

Вращение Земли – это смена дня и ночи, видимое суточное движение небесных тел, а также некоторые явления, происходящие на поверхности Земли: поворот плоскости качаний груза, подвешенного на нити (маятник Фуко), отклонение падающих тел к востоку и др. Вследствие ВЗ на тела, движущиеся по её поверхности, действует Кориолиса сила; её влияние проявляется в подмывании правых берегов рек в Северном полушарии Земли и левых — в Южном (закон Бэра) и в некоторых особенностях циркуляции атмосферы. Центробежной силой, порождаемой ВЗ, частично объясняются и различия в ускорении силы тяжести на экваторе и полюсах Земли.

Для исследования закономерностей ВЗ вводят (см. рис. 1) две системы осей координат с общим началом в центре масс Земли O : одну - движущуюся вместе с Землёй ($X_1Y_1Z_1$), а другую - неподвижную (XYZ). Плоскость XOY неподвижной системы - совмещают с плоскостью эклиптики в начальную эпоху (некоторый момент, принятый за нулевой), а ось OX - направляют в точку весеннего равноденствия этой эпохи. В качестве осей $X_1Y_1Z_1$ движущейся системы удобно брать главные оси инерции Земли, хотя, в зависимости от конкретной задачи исследования, возможен и другой выбор осей. Положение системы $X_1Y_1Z_1$ относительно системы XYZ принято определять тремя эйлеровыми углами: ψ, ν, φ .

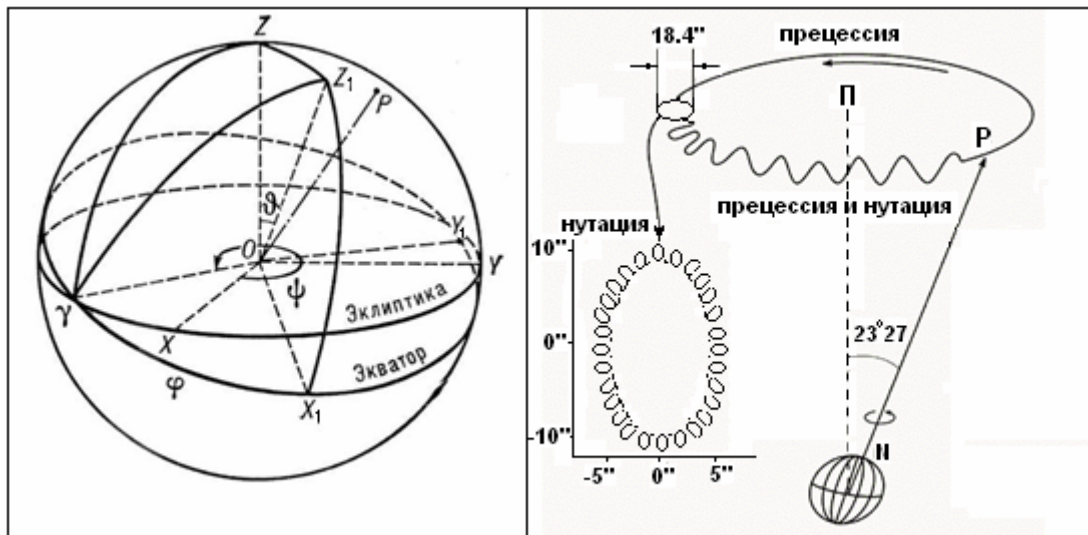


Рис. 1. Вращение Земли. Слева: системы координат. Справа: схема движения оси вращения Земли в пространстве с точки зрения земного наблюдателя. Полюс мира P движется (прецессирует) вокруг полюса эклиптики Π с периодом 25 700 лет и кроме того совершает небольшие нутационные движения с периодами от 18.6 года до 4 суток.

Основные сведения о ВЗ получены путем наблюдения суточного движения небесных тел. Из наблюдений установлено, что Земля, по отношению к точке весеннего равноденствия, - совершает один оборот за 1 звёздные сутки (около 23 ч 56 мин 4 сек) среднего солнечного времени. Вращение Земли происходит с запада на восток, т. е. против часовой стрелки, если смотреть с Северного полюса Земли. Ось ВЗ не сохраняет неизменным своего направления в пространстве, она перемещается так, что средний наклон (ν) экватора к эклиптике начальной эпохи почти постоянен (в 1900 он был равен $23^{\circ} 27' 8, 26''$ и в течение 20 в. увеличится менее чем на $0,1''$). Линия же пересечения экватора Земли и эклиптики начальной эпохи (линия узлов) медленно движется по эклиптике с востока на запад, перемещаясь на $1^{\circ} 13' 57,08''$ в столетие, вследствие чего угол ψ изменяется на 360° за 25 700 лет. Таким образом, ось OP описывает коническую поверхность вокруг перпендикуляра к плоскости эклиптики (прецессия). Кроме этого, ось OP совершает в пространстве ряд колебаний с периодами от нескольких суток до 18,6 года (нута́ция). Относительно оси ВЗ само тело Земли совершает небольшие колебания (движение полюсов). Мгновенная ось вращения OP всегда почти совпадает с наименьшей осью эллипсоида инерции Земли OL_1 : угол между этими осями по наблюдениям, выполненным с конца 19 в., не превосходит $0,4''$.

До начала 20 в. считалось, что Земля вращается равномерно, и период её вращения использовался как естественная единица времени. Промежуток времени между двумя последовательными совпадениями оси OX_1 с линией узлов $O\gamma$, в течение которого угол φ возрастает на 360° , был назван звёздными сутками. Вследствие вращения самой линии $O\gamma$ звёздные сутки на $0,0084$ сек короче периода ВЗ. Однако из точного анализа позиционных наблюдений Солнца, Луны и планет выяснилось, что ВЗ происходит неравномерно и продолжительность звёздных суток меняется. Приливное трение замедляет ВЗ, вследствие чего продолжительность суток постепенно возрастает: за последние 2,5 тыс. лет она увеличивалась в среднем на $0,0024$ сек в столетие. Происходят также периодические колебания скорости ВЗ: годовые и полугодовые, связанные с сезонными метеорологическими явлениями; месячные и полумесячные, возникающие из-за приливных деформаций Земли под влиянием притяжения Луны. Вследствие годовых изменений скорости ВЗ продолжительность суток в январе приблизительно на $0,001$ сек больше, чем в июле. Обнаружены также «скачкообразные» изменения скорости Вращения

Земли, когда продолжительность суток за 1—3 года уменьшается или возрастает на несколько тысячных долей секунды. Наиболее значительные из них произошли в 1864, 1876, 1898 и 1920. Их причина окончательно не установлена.

Параметры вращения Земли.

В астрономии, как и в других науках, единицей времени является секунда международной системы единиц СИ - атомная секунда. Приведём определение секунды, как оно дано 13-й Генеральной конференцией мер и весов в 1967 г.: «секунда - это продолжительность 9 192 631 770 периодов излучения атома цезия 133, испускаемого им при переходе между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния. Если слово "сутки" используется для обозначения единицы времени, оно должно пониматься как 86400 атомных секунд. В астрономии употребляются и более крупные единицы времени: юлианский год - 365.25 суток, юлианское столетие - 36525 суток. Международный астрономический союз (общественная организация астрономов) в 1976 г. рекомендовал астрономам использовать именно такие единицы времени. Основная шкала времени, Международное атомное время (Time Atomic International, TAI), строится на основе показаний множества атомных часов в разных странах. Следовательно, с формальной точки зрения, основа измерения времени ушла из астрономии. Старые единицы "средняя солнечная секунда", "звёздная секунда" не должны использоваться.

Дать определение такому употреблению слова "сутки" несколько сложнее. Причин тому много. Во-первых, ось вращения Земли, или, выражаясь научно, вектор её угловой скорости, не сохраняет постоянного направления в пространстве. Это явление носит название прецессии и нутации. Во-вторых, сама Земля не сохраняет постоянной ориентировки относительно вектора её угловой скорости. Это явление называется движением полюсов. Поэтому радиус-вектор (отрезок от центра Земли до точки на поверхности) наблюдателя на поверхности Земли не вернётся через один оборот (и вообще никогда) к прежнему направлению. В-третьих, скорость вращения Земли, т.е. абсолютная величина вектора угловой скорости, тоже не остаётся постоянной. Так что, строго говоря, определённого периода вращения Земли не существует. Но с определённой степенью точности, несколько миллисекунд, можно говорить о периоде вращения Земли вокруг оси.

Кроме того, надо указать направление, относительно которого мы будем отсчитывать обороты Земли. Таких направлений в астрономии сейчас используется три. Это направление на точку весеннего равноденствия, на Солнце и небесное эфемеридное начало. Период вращения Земли относительно точки весеннего равноденствия называется звёздными сутками. Он равен $23^{\text{h}} 56^{\text{m}} 04.0905308^{\text{s}}$. Звёздные сутки - это период относительно точки весны, а не звёзд. Точка весеннего равноденствия сама совершает сложное движение на небесной сфере, поэтому это число следует понимать как среднее значение. Вместо этой точки Международный астрономический союз предложил использовать "небесное эфемеридное начало". Оно выбрано так, чтобы период вращения Земли относительно него был близок к периоду относительно инерциальной системы отсчёта, т.е. относительно звёзд или точнее, внегалактических объектов. Угол поворота Земли относительно этого направления называется звёздным углом. Он равен $23^{\text{h}} 56^{\text{m}} 04.0989036^{\text{s}}$, чуть больше звёздных суток на величину, на которую точка весны смещается на небе из-за прецессии за сутки.

Рассмотрим вращение Земли относительно Солнца. Это самый сложный случай, поскольку Солнце движется на небе не по экватору, а по эклипике и притом неравномерно. Но эти солнечные сутки, очевидно, и самые важные для людей. Исторически сложилось так, что атомная секунда была подогнана под период вращения Земли относительно Солнца, причём осреднение было сделано приблизительно за 19 век. Этот период равен 86400 единиц времени, которые назывались средними солнечными секундами. Подгонка произошла в два приёма: сначала было введено "эфемеридное

время" и "эфемеридная секунда", а затем атомная секунда была положена равной эфемеридной секунде. Таким образом, атомная секунда всё-таки "происходит от Солнца", но атомные часы в миллион раз точнее, чем "земные часы".

Неравномерность вращения Земли.

Период вращения Земли не остаётся постоянным. Причин для этого много. Это и сезонные изменения в распределении температуры и давления воздуха по земному шару, и внутренние процессы, и внешние воздействия. Различают вековое замедление, декадные (в течение десятилетий) неравномерности, сезонные и внезапные. На рисунках приведены графики, показывающие изменение продолжительности суток в 1700-2000 гг. и в 2000-2006 гг. На первом рис. прослеживается тенденция к увеличению суток, а на втором - сезонная неравномерность. Графики основаны на материалах Международной службы вращения Земли и опорных систем (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS, <http://www.iers.org/>).

Изучение неравномерности вращения Земли очень важно для практики и интересно с научной точки зрения. Например, спутниковая навигация невозможна без знания вращения Земли. А его особенности несут информацию о внутреннем строении Земли. Эта сложная проблема ждёт своих исследователей.

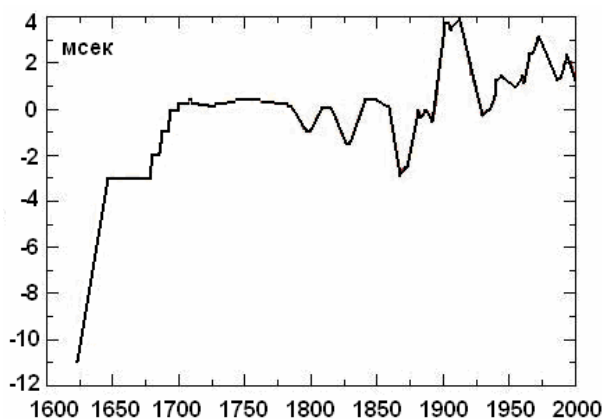


Рис. 2. Отличие периода вращения Земли от 86400 с СИ, в миллисекундах. Данные до начала 20 в. не очень надёжны, но тенденция к увеличению продолжительности суток видна отчётливо.

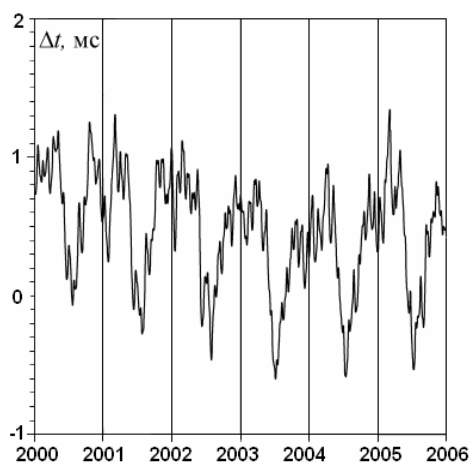


Рис. 3. Изменение длительности суток в 2000-2006 гг. График показывает отличие периода вращения Земли от 86400 с (секунд СИ), в миллисекундах. Хорошо видна сезонная неравномерность.

Средства и результаты измерения скорости вращения Земли.

Измерение скорости вращения Земли основывается на определении длительности промежутка времени между моментами прямых восхождений звезд. Если бы продолжительность суток была бы неизменной, то в одно и тоже время по кварцевым часам можно было бы фиксировать истинное звездное время. На самом деле прохождения звезд отмечались на 30 мс позже весной и примерно на 20 мс раньше в конце лета. Этот факт свидетельствовал о сезонной вариации длительности суток. Для измерения таких долгопериодных вариаций подходящим стандартом является т.н. эфемеридное время – время, определяемое по движению Луны.

Как следует из (Манк, Макдональд, 1964) к 1930 году точность измерения временных интервалов достигла $0''{,}02$. Начиная с 1950, уточненные годовые двойные амплитуды вариации суток уже составляли 2.6, 1.8 и 2.8 мс. В настоящее время есть основания считать, что эти числа завышены в 2 – 3 раза.

Таким образом, определенная до 1950 г. амплитуда годовой вариации составляла ≈ 1 мс. После 1950 гринвичские наблюдения дали лишь 0.53 мс и эта величина была уменьшена до 0.38 мс после учета поправок каталога FK3.

С точки зрения (Манк, Макдональд, 1964) Земля является геофизической лабораторией, а не хранителем времени. «Ошибок» в её переменной скорости вращения не существует, есть лишь ошибки «отсчетов» по астрономическим наблюдениям. Продолжительность суток определяется путем сравнения с независимым стандартом времени. Точность этого определения зависит как от точности астрономических наблюдений, так и от точности стандарта времени.

Оценим ошибки измерений. Средняя квадратичная ошибка для N ночей равна ε^2/N в предположении о независимости ошибок. Значения звездного времени задаются на интервалах в M суток и каждое значение есть среднее наблюдение за N ночей. Спектр в области частот от 0 до частоты Найквиста $2M\Gamma^{-1}$, где Γ – продолжительность суток. Средняя квадратичная ошибка на единичный интервал частот, т.е. спектральная плотность, равна $2M\Gamma\varepsilon^2/N$. Для случая $N = M$ спектральная плотность: $2\Gamma\varepsilon^2 = 2 \cdot 86400 \cdot (0.005)^2 \approx 5 \text{ с}^3$.

Это спектральная плотность ошибки времени $\tau(t)$. Спектральная плотность ошибки продолжительности суток равна произведению Γ на спектр $d\tau/dt$, спектр ошибки: $(2\pi f)^2 \cdot 2\Gamma\varepsilon^2$. В случае годовой частоты $f = 0.32 \cdot 10^{-7}$ Гц спектр помех равен $2 \cdot 10^{-13}$ с. Эти величины характерны для всех новейших методов.

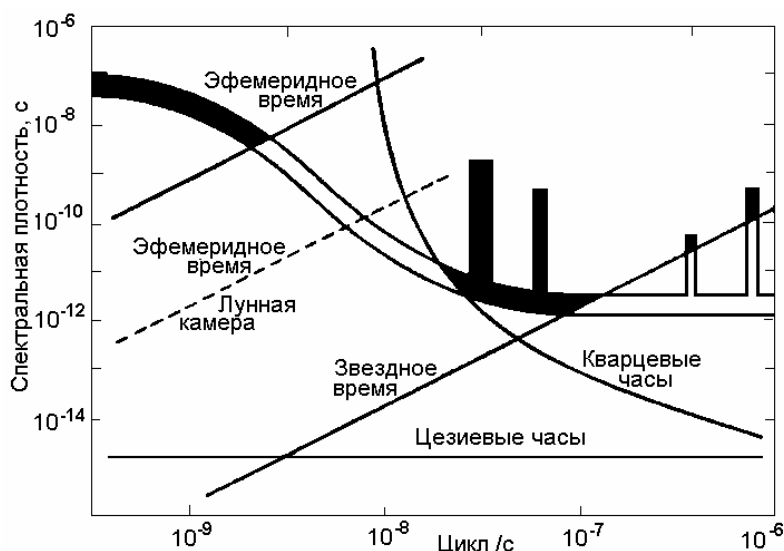


Рис. 4. Распределение дисперсии на ед. частоты в зависимости от частоты (цикл/с) для четырех основных типов наблюдений. Наблюдаемый спектр изображен широкой лентой с выступами, зачерненной там, где он расположен выше уровня помех.

Первый стандарт, с которым можно было сравнить звездное время, появился с введением эфемеридного времени. Оно базируется на орбитальном движении планет, включая Землю, вокруг Солнца или спутников вокруг своих планет. Луна, это наиболее быстро движущееся по небосводу светило, её небесная долгота меняется на 0.55" в секунду и, следовательно, является наиболее подходящим объектом для определения эфемеридного времени. Для измерения скорости вращения Земли была разработана специальная лунная камера, в которой Луна и окружающие её звезды экспонируются одновременно в течение 20 с. Луна удерживается неподвижной на пластинке среди окружающих её звезд. Если эфемеридное время (положение Луны) может быть отсчитано с невероятной точностью, точность будет ограничиваться ошибкой часов.

В последние годы в измерении скорости вращения Земли был достигнут огромный прогресс. Это связано с внедрением новых технологий, таких систем как: VLBI (Very Long Baseline Interferometry), DORIS (Doppler Orbit determination and Radiopositioning Integrated on Satellite) и IGS (International GPS Service). В таблице 1 приведена информация об этих системах.

Таблица 1.

Technique	Software	Institution	Resolution	Period
SLR	DOGS	DGFI	1 week	11/1992 – 12/2006
SLR	EPOS	GFZ	1 week	10/1992 – 12/2006
VLBI	OCCAM	DGFI	1 day	01/1984 – 12/2006
VLBI	Calc/SOLVE	IGG-B / BKG	1 day	01/1984 – 12/2006
GPS	EPOS	GFZ	1 week	Several months
GPS	Bernese	GFZ	1 day	01/1994 – 12/2006
LEOs	EPOS	GFZ	3 days	01/2004 – 12/2004
Altimetry	DGFI software	DGFI		01/1993 – 12/2005
Combination	DOGS-CS	DGFI	1 day / 1 week	01/1984 – 12/2006
Combination	Bernese	GFZ	1 day / 1 week	01/1984 – 12/2006

SLR – спутниковые лазерные измерения, VLBI – длиннобазовая интерферометрия, LEOs – низкоорбитальные спутниковые измерения.

В качестве примера, на рис. приведены данные, полученные за 25 лет наблюдений на системе VLBI. Хорошо выделяются годовые вариации скорости вращения.

SLR – спутниковые лазерные измерения, VLBI – длиннобазовая интерферометрия, LEOs – низкоорбитальные спутниковые измерения.

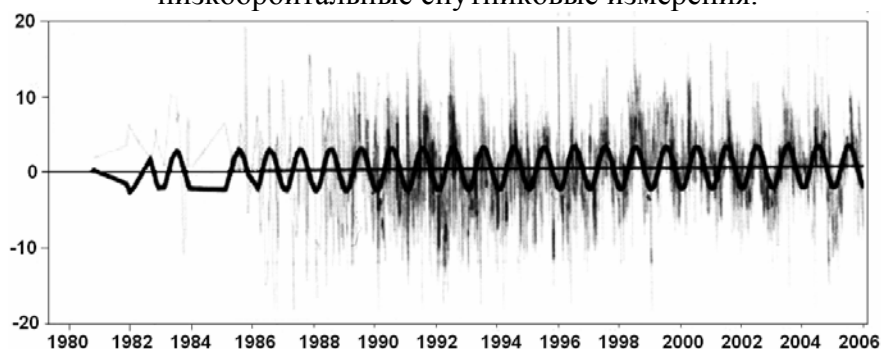


Рис. 5. Результаты наблюдений за отклонениями скорости вращения Земли при измерении на системе длиннобазовой радиоинтерферометрии (VLBI).

Скорость вращения Земли в прошлом.

Принято считать, что Земля раньше вращалась значительно быстрее, чем сейчас. В доказательство этому, в физике Земли обычно ссылаются на данные по продолжительности года, суток, периода лунных приливов и т.п., по анализу кольцевых наростов и подсчету темно- и светлоокрашенных серий слоев известковых скелетов на

срезах ископаемых кораллов, моллюсков и раковин. Чередование различно окрашенных слоев связывается с развитием скелета моллюска и изменением физико-географических условий его обитания и сопоставляется с годовыми кольцами деревьев. По поводу этой методики у специалистов нет ясного и однозначного мнения, насколько достоверны подсчеты колец на срезах древних моллюсков. Литература по этим вопросам очень обширна. Сошлемся на работу В.Н.Сакса с сотрудниками (Козлова и др., 1973), которые считают, что наблюдаемые слои в какой-то мере все же отражают суточные колебания жизнедеятельности животных в течение года, но не все суточные слои или пары слоев видны в разрезе достаточно четко и поддаются подсчету. В качестве аргумента авторы приводят результаты исследования современных коралловых полипов, у которых даже годовые слои не всегда четко выражены и легко могут быть пропущены. В ещё большей степени это может проявляться в крайне тонких суточных слоях нарастания. Таким образом, к данным, полученным по анализу древних кораллов, моллюсков и пр., следует относиться весьма осторожно. Вероятно, это можно отнести и ко всем другим методам, основанным на расшифровке “каменной летописи” Природы. Грамотно прочесть их - пока проблема.

На рисунке приведены данные измерений длительности суток, полученные по кораллам (Wells, 1963; Berry and Barker, 1975; Pannela, 1972; Longer., 1996; Sonett et al., 1996; Zahnle, Walker; 1987). На рисунке изображена зависимость изменения длительности периода T обращения Земли вокруг оси от времени эволюции. Кривая построена по нашей модели. Точки – эксперимент. Последняя точка для 900 млн. лет опубликована в журнале *Astronomy* (Longer., 1996). Из рисунка следует, что оценка величины T полученная при подсчете слоев кораллов не противоречит модели. Заметим, что в данном случае мы использовали закон сохранения вращательного момента Земли. Учет влияния Луны должен привести к ещё большему расхождению модели и данных, полученных по кораллам. Дело в том, что обычно полагают, что момент вращательного импульса сохраняется: $0.33MR^2\omega = const$, однако, учет перераспределения вращательного момента Земли с Луной дает:

$$0.33 MR^2 \omega + [M \times m / (M + m)] \times L^2 \omega_l = const,$$

где m - масса Луны, L - расстояние до Луны, а ω_l - скорость её вращения. Учет второго члена уравнения приводит к уменьшению длительности периода вращения Земли. Можно ли считать, что выявленное несоответствие модели и данных по кораллам показывает несостоятельность модели горячей Земли? Полагаю, что отвергать модель на этом основании нельзя.

Обратимся к формуле:

$$\varphi = GM/R + G/R^3 \times [(A + B)/2 - C] (3/2 \cos 2\theta - S) + \Omega^2 R^2 / 2 \sin \theta,$$

из которой следует, что если в результате эволюции Земли её радиус будет увеличиваться, то скорость вращения должна уменьшаться ($\varphi \approx GM/R + \Omega^2 R^2 / 2$). Соответственно, должна наблюдаться зависимость: $T \sim 1/\Omega \sim R(t)$.

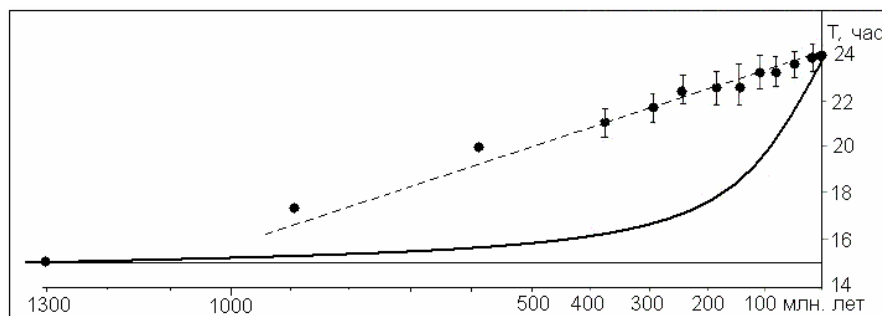


Рис. 6. Изменение скорости вращения Земли по модели горячей Земли и данным по кораллам и строматолитам (ссылки в тексте).

Более того, в 2003 г. в средствах массовой информации, в частности, в сети Интернет (Земля замедляет, 2003) и агентства Синьхуа (Xinhuanet, 2003), появилась новая информация о палеовращении Земли. Согласно этой информации (не получившей пока подтверждения в научных публикациях) китайские ученые из Тяньцзиньского института геологии и минеральных ресурсов Zhu Shixing и др., на основе анализа напластований строматолитов, обнаруженных в древних пластах горы Яньшань, показали, что 1.3 млрд. лет тому назад Земля вращалась значительно быстрее, чем сейчас. В сутках ранней Земли было всего 15 часов. Если этот результат подтвердится, будет признан научной общественностью и опубликован в научном журнале, то его можно считать прямым доказательством правомерности модели горячей Земли. Согласно нашей модели длительность суток в этот период эволюции должна действительно составлять примерно 15 часов. Это соответствует радиусу Земли равному ≈ 4 тыс. км.

Вращение Земли монотонно замедляется. Этот факт никто не подвергает сомнению. Можно ли считать, что скорость замедления всегда была такой, как сейчас? Можно ли предложить какой-либо тест, с помощью которого внести определенность в эту проблему? Оказывается, что такой тест имеется, он состоит в выяснении характера поведения во времени системы Земля - Луна. Известно, что в настоящее время Луна, за счет диссипации энергии вращения океаническими приливами, удаляется от Земли со скоростью 3.3 см/год. Если проследить эволюцию системы Земля - Луна во времени назад, то оказывается, что в прошлом Луна была гораздо ближе к Земле, чем сейчас. При этом, очевидно, предполагается, что и скорость замедления Земли, и скорость удаления Луны, были такими же, как в настоящее время. Линейная экстраполяция полученных оценок в прошлое дает изменение радиуса орбиты Луны L за время 4.5×10^9 лет, равное 1.5×10^5 км, что составляет почти половину современного значения величины L . Тот факт, что амплитуда прилива, а, следовательно, и скорость замедления вращения и скорость удаления Луны пропорциональны $1/L^3$, значительно увеличивает скорость замедления. Так, например, согласно модели Гестенкорна (Стейси, 1972), когда Земля и Луна располагались очень близко друг от друга, на расстояниях, несколько больших предела Роша, орбита Луны была почти полярной. Это происходило примерно 1.78×10^9 лет тому назад. До этого времени Луна должна была двигаться по орбите в направлении противоположном нынешнему. Надо сказать, что перенос в прошлое современной скорости удаления Луны приводит к парадоксальной ситуации (Кузнецов, 1990). Выходом из неё многие считали отказ от такого переноса. В оправдание приводились аргументы относительно того, что современные океаны возникли сравнительно недавно и таких приливов, тормозящих Луну, раньше не было. По-видимому, в этом есть некий здравый смысл. По крайней мере, этот тезис не противоречит нашей модели горячей Земли. Скорее всего, Луна всегда находилась на расстояниях от Земли, если и меньших, чем современное, то не настолько, чтобы "заставлять" её вращаться в противоположную сторону и приближаться к Земле на опасное расстояние порядка предела Роша. Проблема практически снимается, если учесть, что на Земле в более ранние эпохи не было современных океанов, а, следовательно, не было и такого приливного торможения Луны, как сейчас.

Дрейф полюса.

Вращение Земли вокруг своей оси испокон веков используется человеком для измерения времени; в астрономии и геодезии это незаменимая основа для введения различных систем координат. Однако вращение Земли недостаточно стабильно: меняется его скорость, движутся географические полюса, происходят нутации (колебания) земной оси. Причинами таких нестабильностей служат как гравитационные воздействия окружающих небесных тел, так и процессы, протекающие на Земле. Будучи отражением этих процессов, нестабильности вращения нашей планеты несут ценную информацию об особенностях строения и физических свойствах земных недр.

Таким образом, изучение неравномерности вращения Земли, движения полюсов и нутаций земной оси имеет большое практическое и научное значение. Оно позволяет исправлять искаженные координаты небесных и земных объектов, способствует расширению и углублению наших знаний в различных областях наук о Земле.

Астрономические наблюдения. В 80-е годы наблюдения в оптические телескопы стали дополняться новыми методами измерений: с помощью радиоинтерферометров со сверхдлинными базами, лазерной локации спутников и Луны, системы глобального позиционирования (GPS) и т.д. Точность определения Всемирного времени увеличилась на два порядка. В итоге стало возможным изучать колебания скорости вращения Земли с периодами до суток, а в настоящее время - до нескольких часов. На рис.3 воспроизведен ход отклонений длительности суток в 2000-2003 гг. с дискретностью в одни сутки (по данным Международной службы вращения Земли).

Спектральный анализ. Эффективным инструментом исследования периодических процессов оказался спектральный анализ. Он заключается в том, чтобы, во-первых, представить изучаемые колебания в виде суммы элементарных гармоник, а во-вторых, выявить зависимость средних квадратов амплитуд этих гармоник от их частоты или периода, т.е. найти спектральную функцию или просто спектр. В спектре приливных колебаний скорости вращения Земли выделяются компоненты с периодами: год, полгода, 13.7, 27.3, 9.1 суток, 24, 12, 8, 6 ч. Спектральный анализ всего 350-летнего ряда среднегодовых значений δP дает максимум спектральной плотности на периоде около 70 лет. Колебание с этим периодом особенно заметно проявлялось в последние 150 лет. В начале XX в. амплитуда 70-летнего колебания достигала 2 мс.

Изменяется не только угловая скорость Земли - наша планета качается относительно оси вращения. Поэтому точки, в которых ось пересекает земную поверхность, - мгновенные географические полюса Земли - движутся. Они перемещаются по земной поверхности вокруг среднего многолетнего (за 6 лет) полюса в направлении вращения Земли, т.е. с запада на восток. Траектория движения мгновенного полюса имеет вид спирали, которая периодически то закручивается, то раскручивается. Для примера на рисунке показана траектория движения Северного полюса за 1996-2007 гг.

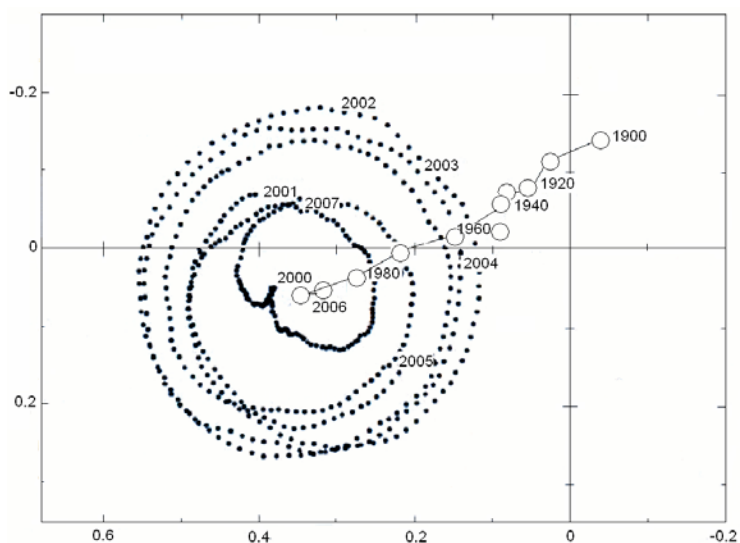


Рис. 7. Траектория движения Северного географического полюса в 1996-2007 гг. (цифры в угловых секундах). Кривая - траектория среднего полюса с 1900 по 2006 гг. (по данным Международной службы вращения Земли, 2007).

Самое большое удаление мгновенного полюса от среднего не превышает 15 м. Закручивание и раскручивание траектории мгновенного полюса объясняется тем, что он совершает два периодических движения: свободное, или чандлеровское (названо в честь открывшего его в 1891 г. С. Чандлера), с периодом около 14 месяцев, и вынужденное с годовым периодом. Чандлеровское движение возникает, когда ось вращения Земли отклоняется от оси ее наибольшего момента инерции. Вынужденное движение вызывается действием на Землю периодических сил со стороны атмосферы и гидросферы, имеющих годовую цикличность. Период свободного движения зависит от динамического сжатия и упругих свойств Земли, а не от периода возбуждающей силы, как это характерно для вынужденного движения. Сложение этих двух периодических движений и дает наблюдаемую картину биений (Сидоренков, 2002).

Анализ координат мгновенного полюса за последние 110 лет показывает, что вынужденное движение происходит вдоль эллипса, - с запада на восток. Величины больших полуосей эллипса колебались в пределах от 3.4 до 2.7 м, малых полуосей - от 2.5 до 1.8 м, эксцентриситетов - от 0.15 до 0.46, а восточные долготы большой полуоси изменялись от 205° до 145° в.д. Чандлеровское движение полюса, по тем же данным, происходит почти по круговой траектории. Оно характеризуется еще большей изменчивостью параметров. Радиус свободного движения имеет амплитудную модуляцию с периодом около 40 лет. Максимальные значения радиуса (9 м) наблюдались около 1915 и 1955 г., а глубокий минимум (2 м) - около 1930 г. Из-за этого в спектрах координат мгновенного полюса возле основного пика на чандлеровской частоте $1/(1.18 \text{ г.})$ имеется боковой пик на частоте $1/(1.24 \text{ г.})$.

На рисунке видно, что центр спирали находится в стороне от исходной точки - международного условного начала координат. Причина тому - так называемое вековое движение географического полюса. Если из спектра координат мгновенного полюса отфильтровать годовую и чандлеровскую составляющие, можно получить координаты среднего полюса. Оказывается, он тоже смещается. В течение всего периода наблюдений средний полюс двигался по сложной зигзагообразной кривой со скоростью около 10 см в год с преобладающим направлением в сторону Северной Америки (меридиан 290° в.д.).

Чем вызваны периодические колебания.

Фигура Земли близка к эллипсоиду вращения. Когда Луна и Солнце не лежат в плоскости земного экватора, их силы притяжения стремятся развернуть Землю так, чтобы экваториальные вздутия фигуры располагались по линии, соединяющей центры масс Земли, Луны и Солнца. Но Земля не поворачивается в этом направлении, а под действием момента пары сил прецессирует (Сидоренков, 1999).

Ось вращения Земли медленно описывает конус вокруг перпендикуляра к плоскости эклиптики. Вершина конуса совпадает с центром Земли. Точки равноденствий и солнцестояний движутся по эклиптике навстречу Солнцу, совершая один оборот за 25 700 лет (скорость движения 1° за 72 года).

Моменты сил притяжения, которые действуют на экваториальные вздутия, меняются в зависимости от положений Луны и Солнца по отношению к Земле. Когда Луна и Солнце находятся в плоскости земного экватора, моменты сил исчезают, а когда склонения Луны и Солнца максимальны, то и величина момента наибольшая. Вследствие колебаний моментов сил тяготения наблюдаются нутации оси вращения Земли, которые складываются из ряда небольших периодических колебаний. В теории нутации учитываются в настоящее время свыше 1000 членов. Главнейший из них имеет период 18.6 года - время обращения узлов орбиты Луны. Движение с этим периодом происходит по эллипсу. Большая ось эллипса перпендикулярна направлению прецессионного движения и равна 18.4"; малая параллельна ему и равна 13.7". Далее по величине амплитуды идут члены с периодом 0.5 г., 13.7 суток, 9.3 г., 1 г., 27.6 суток и т.д. Из-за них

траектория имеет вид “тонких кружев” (показано на увеличенном фрагменте в левой части рис. 2-4). Таким образом, ось вращения Земли описывает на небесной сфере сложную волнообразную траекторию, точки которой находятся на угловом расстоянии в среднем около $23^{\circ}27'$ от полюса эклиптики.

Приливные выступы постоянно перемещаются по земной поверхности вслед за Луной и Солнцем - с востока на запад, т.е. в направлении, обратном суточному вращению Земли. Естественно, что при этом в океанах и в теле планеты возникают силы трения, которые тормозят вращение Земли, благодаря чему и происходит ее вековое замедление. По оценкам, сутки должны удлиниться из-за этого на 0.003 с за 100 лет. Таким образом, неравномерности вращения Земли почти не связаны с влиянием приливного трения, а вызываются другими причинами.

Земные приливы играют заметную роль и в колебаниях скорости вращения Земли с периодом менее одного месяца. Приливообразующая сила растягивает Землю вдоль прямой, соединяющей ее центр с центром возмущающего тела - Луны или Солнца. При этом сжатие Земли увеличивается, когда ось растяжения совпадает с плоскостью экватора, и уменьшается, когда ось растяжения отклоняется к тропикам. Момент инерции сжатой Земли больше, чем недеформированной шарообразной планеты. А поскольку момент импульса Земли (т.е. произведение ее момента инерции на угловую скорость) должен оставаться постоянным, то скорость вращения сжатой Земли меньше, чем недеформированной. При движении Луны и системы Земля-Луна постоянно меняются склонения Луны и Солнца и расстояния от Земли до Луны и Солнца. Поэтому приливообразующая сила колеблется во времени. Соответствующим образом меняется сжатие Земли, что в конечном итоге и вызывает приливную неравномерность ее вращения. Наиболее значительны колебания скорости вращения с полумесячным и месячным периодами.

Чем же обусловлены неприливная неравномерность вращения Земли и движение полюсов? В принципе на вращение Земли могут влиять очень многие процессы: изменения в распределении воздушных масс в атмосфере, снежного и ледяного покровов, осадков и растительности на земной поверхности, вариации уровня Мирового океана, взаимодействие ядра и мантии Земли, извержения вулканов, землетрясения, воздействия внешних сил и т.д. Тщательные оценки вклада этих процессов позволили выявить наиболее существенные из них.

В течение года массы воздуха и влаги (воды, снега и льда) перераспределяются между материками и океанами, а также между Северным и Южным полушариями. Так, над Евразией масса воздуха в январе на $6 \cdot 10^{15}$ кг больше, чем в июле. С января по июль из Северного полушария в Южное переносится $4 \cdot 10^{15}$ кг воздуха. В течение всей зимы происходит накопление снега в северных районах Евразии и Северной Америки, весной же снег тает, и влага возвращается в Мировой океан. Все это меняет момент инерции Земли и в какой-то степени сказывается на ее вращении. Оценки показывают, что сезонное перераспределение воздушных и водных масс мало влияет на сезонную неравномерность вращения Земли, но почти полностью обуславливает вынужденное движение географических полюсов с годовым периодом.

Чандлеровское движение полюсов возникает, как мы уже отмечали, когда ось вращения Земли отклоняется от оси наибольшего момента инерции планеты. Однако оно должно со временем затухать, так как энергия свободного движения полюсов преобразуется в тепло. Отсутствие затухания свободного движения полюсов указывает на то, что существуют некие процессы, непрерывно его поддерживающие. К таким процессам относят землетрясения, электромагнитное взаимодействие ядра и мантии Земли, лунно-солнечную прецессию и т.д. Наиболее вероятно, что свободное движение полюсов поддерживается межгодовыми колебаниями системы Земля-океан-атмосфера. Как удалось показать (Сидоренков, 1999), атмосфера, океан и Земля совершают согласованные колебания. Так, квазидвухлетняя цикличность и южная осцилляция

атмосферы, явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья в океане, чандлеровское колебание и главная нутация Земли имеют соизмеримые частоты, кратные частоте Чандлера $1/(1.2 \text{ г.})$. Поэтому свободное движение географических полюсов может поддерживаться за счет комбинационных резонансов в системе Земля-океан-атмосфера.

Главная причина сезонной неравномерности вращения Земли - это атмосферная циркуляция. Известно, что в среднем атмосфера движется относительно земной поверхности в низких широтах с востока на запад (дуют восточные ветры), а в умеренных и высоких - с запада на восток (преобладают западные ветры). Момент импульса восточных ветров отрицателен, а западных - положителен. Можно было бы думать, что эти моменты компенсируют друг друга и момент импульса ветров всей атмосферы всегда равен нулю. Однако расчеты показывают, что у восточных ветров данная величина в несколько раз меньше, - чем у западных. Поэтому момент импульса ветров всей атмосферы не равен нулю, а составляет в среднем за год $+14 \cdot 10^{25} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Его величина меняется в течение года от $+16.1 \cdot 10^{25} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ в апреле и ноябре до $+10.9 \cdot 10^{25} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ в августе.

Момент импульса - это физическая величина, которая не может возникнуть или уничтожиться. Она способна лишь перераспределяться. В рассматриваемом случае перераспределение происходит между атмосферой и твердой Землей. Когда момент импульса атмосферы увеличивается, т.е. усиливаются западные ветры или ослабевают восточные, момент импульса тела Земли снижается, т.е. замедляется ее вращение. Когда же момент импульса атмосферы уменьшается (ослабевают западные или усиливаются восточные ветры), вращение Земли ускоряется. Суммарный момент импульсов Земли и атмосферы всегда остается неизменным, может служить хорошей иллюстрацией справедливости закона сохранения момента импульса не только в лабораторных экспериментах, но и в глобальных масштабах. Явление ускорения вращения атмосферы относительно твердой Земли получило название сверхвращения. Как будет показано ниже, это явление обнаружено на других планетах, особенно сильно оно проявляется на Венере (Taylor, 2002). Сверхвращение обнаружено и при вращении ядра Земли. Некоторые авторы полагают, что основная причина супервращения – действие приливов (Добролюбов, 2005).

Супервращение.

Супервращение на Венере. Венера полностью охвачена толстым слоем облаков, причем верхняя их часть состоит из капелек серной кислоты и некоторого пока неизвестного аэрозоля. Верхний слой облаков испытывает сильное ретроградное вращение (супервращение), но причины ответственные за такие проявления природы Венеры пока неизвестны. Эти данные были получены при наблюдениях за Венерой с помощью Venus Monitoring Camera с борта Venus Express. Ученые, исследуя глобальные и менее масштабные облачные структуры, их временные и широтные изменения, получают скорость ветра. Южная полярная область является очень переменной и может претерпевать масштабные драматические изменения, причинами которых возможно являются выбросы SO_2 в мезосферу. Конвективные ячейки, ограниченные верхним слоем облаков, в близких к Солнцу уровнях оказались намного меньшими по размеру, чем это предполагалось ранее.

Орбитальный аппарат Venus Express обеспечил возможность просмотра геометрии нижних уровней Южного полюса и получил обзоры крупного плана с высоким разрешением Северного полушария. Рисунок показывает глобальные виды Южного полушария, полученные в ультрафиолетовом диапазоне с помощью Venus Monitoring Camera (VMC) на расстоянии в 40 000 — 60 000 км. Яркая средняя область отделяет более темные нижние широты от полярных областей, в которых глобальные облачные образования спирально закручиваются к полюсу. Полярный вихрь, первоначально обнаруженный в тепловом инфракрасном диапазоне, теперь замечен VMC в виде темной

овальной особенности в ультрафиолетовом диапазоне. Облачная высокоширотная структура очень напоминает структуру земных ураганов, но на Венере полярный вихрь превосходит его земные аналоги в 3 — 4 раза. В более низких широтах облачная морфология «пятнистая», что указывает на энергетическую конвекцию (передача энергии путем перемешивания в больших объемах).

11 апреля 2006, космический корабль Venus Express был выведен на малую полярную орбиту вокруг Венеры с 24 часовым периодом. Миссия предназначалась для глобального исследования атмосферы Венеры большим набором инструментов, включая VMC, которая является широкоугольной цифровой камерой, предназначенной для исследования морфологии облаков и динамики видимых слоев. VMC может получать изображение в четырех спектрах излучения, Уф диапазон (365 нм), видимый диапазон (513 нм), почти инфракрасный диапазон (965 и 1010 нм) с пространственным разрешением от 50 до 200 км на пиксель. Ультрафиолетовый диапазон сосредоточен на изучении неизвестного УФ поглотителя, для которого предназначены максимальные наблюдения. Это изображение показывает Венеру в ультрафиолетовом диапазоне. Южный полюс расположился на линии терминатора в нижней части обзора. Супервращение происходит против часовой стрелки.

Супервращение внутреннего ядра Земли. Идея, согласно которой твердое внутреннее ядро вращается немного быстрее чем мантия и вся Земля в целом (эффект т.н. супервращения внутреннего ядра), не нова. Приливное торможение, наиболее эффективное в верхних оболочках Земли, и наличие жидкого внешнего ядра, определяют принципиальную возможность этого явления. Гипотеза дифференциального вращения вещества внешнего, железного ядра, находящегося в расплавленном состоянии, использовалась ранее при построении модели генерации геомагнитного поля на механизме динамо и попытке объяснения такого явления в геомагнетизме, как западный дрейф. Совсем недавно к идее супервращения внутреннего ядра обратились сейсмологи, обнаружившие при использовании метода *travel time*, что анизотропия свойств поверхностного слоя внутреннего ядра изменяется со временем, что можно объяснить прокручиванием ядра относительно мантии. Применение для этой цели данных по расщеплению (*splitting*) спектров собственных колебаний Земли во внешнем ядре и их возможному изменению во времени, факта супервращения внутреннего ядра не подтвердило.

Лабораторное моделирование супервращения внутреннего ядра. Влияние приливов на супервращение внутреннего ядра изучалось в серии лабораторных экспериментов, проведенных в институте горного дела СО РАН, в Новосибирске. Авторы этих работ (Бобряков и др., 1991; Ревуженко, 1991) изучили механизмы приливного деформирования сыпучих и жидких вязких сред на установке, моделирующей приливные эффекты. Как известно, приливные силы стремятся растянуть космическое тело в направлении силы тяготения и сжать его в ортогональных направлениях. При этом космическое тело вращается вокруг собственной оси. Приливные силы моделировались на лабораторной установке путем создания системы сложного нагружения пластических тел (рис. 8). Такие эффекты достигались путем растяжения тела с постоянной скоростью в одном направлении и одновременного сжатия с такой же скоростью в ортогональном направлении. Исследуемое тело проворачивается относительно направления растяжения-сжатия с частотой Ω .

Для вязкой, однородной и несжимаемой среды, в пренебрежении инерционными силами, в плоском случае течение (скорость смещения частиц среды) описывается уравнениями:

$$dx/dt = -y + \lambda(-x^3 - 3xy^2 + 3x) - \Omega y; \quad dy/dt = x + \lambda(y^3 - 3x^2y - 3y) + \Omega x.$$

Здесь: $\lambda = \rho GR^2/8\mu\Omega$, параметр $\Gamma = G/MD^3$, где G - гравитационная постоянная, M – масса тела, вызывающего прилив, D – расстояние до её центра, μ - вязкость среды, R – масштаб

длины. Приливные силы невелики ($\lambda \ll 1$) и поэтому решение можно разложить по этому малому параметру. Показано, что две частицы среды, из выбранных соседних, обращаются вокруг центра системы по замкнутым траекториям. В пределах одного оборота различие в их полярных углах возрастает на величину порядка λ и затем уменьшается до величины $\approx \lambda^2$. Это говорит о том, что в системе с приливным переносом массы осуществляется дифференциальное вращение. Если в формуле для λ принять высоту прилива λR порядка 0.5 м, то для тела с параметрами Земли и Луны, вызывающей прилив, величина вязкости оказывается порядка 10^{16} Пз.

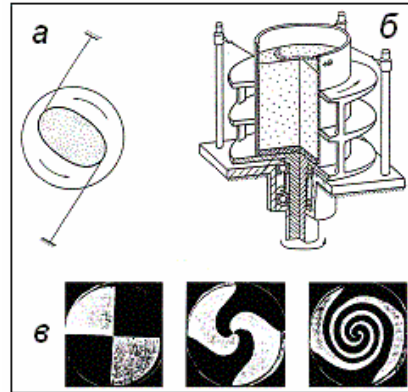


Рис. 8. Кинематическая схема (а), общий вид стенда для моделирования приливной волны (б) (Бобряков и др). Результаты лабораторных опытов по приливному переносу масс с сухим песком: – раскраска песка до начала вращения, – последовательные фигуры поверхности песка, показывающие характер нарастания деформаций (в) (Ревуженко).

Эффект дифференциального вращения демонстрирует экспериментальный результат, полученный на лабораторной установке (Ревуженко, 1991) с сухим песком (см. рис.). Песок предварительно, до начала вращения, окрашен в два цвета. На двух следующих фигурах показан характер нарастания деформаций. Автор утверждает, что аналогичная картина дифференциального вращения наблюдается и в экспериментах с вязкими жидкостями. Общим выводом из лабораторного моделирования приливного переноса масс следует, что, по мере приближения к оси вращения системы от её деформированной «приливом» стенки, круговая скорость вращения частиц среды, - только увеличивается. Трудно представить себе, как в такой системе могут возникнуть предпосылки для западного дрейфа, когда часть ядра должна вращаться медленнее, чем мантия? Однако, как будет показано ниже, такие идеи так же высказывались.

Супервращение по данным travel time экспериментов. В некоторых моделях Земли принято считать, что внутреннее ядро окружено жидким внешним ядром очень низкой вязкости (Gans, 1972; Poirier, 1988) и поэтому оно может легко вращаться относительно мантии. Идея, согласно которой твердое внутреннее ядро может вращаться со скоростью, отличной от суточного вращения мантии и коры, была предложена более десяти лет назад (Steenbeck, Helmig, 1975; Gubbins, 1981; Szeto, Smylie, 1984). Эта возможность подтверждена недавним численным моделированием динамо Земли (Glatzmaier, Roberts, 1995-a, -b), которое предполагает, что вращение внутреннего ядра происходит на несколько градусов в год быстрее, чем вращается кора и мантия. Такое быстрое вращение должно отразиться на прохождении РКР (DF) волн, пока ось вращения отличается от оси анизотропии. Кроме того, должна наблюдаться взаимосвязь анизотропии внутреннего ядра с систематическими изменениями, связанными с вращением внутреннего ядра (Song, 1997).

Song и Richard (1996) первыми сообщили о факте дифференциального вращения внутреннего ядра. Они изучали сейсмические волны от землетрясений, которые распространяются через внутреннее ядро и регистрируются на стационарных сейсмостанциях в течение нескольких лет. Ими были исследованы две полярных траектории (от землетрясений, произошедших на Южных Сандвичевых островах и зарегистрированных на Аляске, и землетрясений, произошедших на острове Кермадек и фиксируемых на островах Норвегии) и одна экваториальная траектория (землетрясения в желобе Тонга и их запись на островах Германии). Наблюдались систематические изменения времени прихода сигнала для двух полярных траекторий, но таких изменений не было обнаружено на экваториальной траектории. Различие во временах распространения между полярной трассой и экваториальной трассой зависит от угла ориентации сейсмического луча и показывает, как изменяется направление анизотропии от вращения внутреннего ядра. Сейсмограммы, зарегистрированные на сейсмостанции College (Аляска) от землетрясений, которые произошли в Южных Сандвичевых островах с 1967 по 1995, являются первыми свидетельствами эффекта супервращения ядра (Song, Richards, 1996). Эта трасса изучалась в предыдущих работах (Creager, 1992; Song, Helmberger, 1993) в связи с анизотропией внутреннего ядра. Разность времен распространения волн по трассам РКР (DF) во внутреннем ядре, и трассам РКР (BC) - во внешнем ядре (рис. 2-10-а) прогрессивно увеличивается со средней годовой скоростью приблизительно 0.3 секунды в течение последних 28 лет. При этом предполагается, что ось анизотропии внутреннего ядра перемещалась все ближе и ближе к трассе "Сандвичевы острова – Аляска". Изменение превышает в 2-5 раз среднеквадратичные отклонения времени распространения, оцененные по 5-летним усреднениям, и представляет сдвиг фазы более 90° для короткопериодных волн с доминирующими периодами меньше одной секунды. Принимая, что внутреннее ядро вращается относительно оси вращения Земли, авторы (Song, Richards, 1996) получили, что скорость его вращения в восточном направлении составляет примерно 1° в год.

Наиболее важные источники ошибок, как показано в работе (Song, Richards, 1996), представляют собой случаи изменения местоположения источника. Например, изменение положения очага землетрясения на 50 км на трассе источник - станция может изменить DC - DF время на 0.3 секунды. Таким образом, наблюдаемые временные изменения могли потенциально быть артефактом при использовании различных глобальных сетей, т.к. землетрясения в различные годы происходили в различных местах. Однако, строгая настройка местоположений землетрясений показывает, что действительно наблюдается систематическое изменение travel time для траекторий от Южных Сандвичевых Островов до Аляски (Song, Richards, 1996).

Дифференциальное вращение внутреннего ядра рядом авторов динамо моделей генерации геомагнитного поля связывается с электромагнитным сцеплением границы внутреннего ядра (Gubbins, 1981; Glatzmaier, Roberts, 1995-a; Glatzmaier, Roberts (GR), 1996; Aurnou et al., 1996; Bloxham, Kuang (BK), 1996). Вращение внутреннего ядра приводит к появлению зонального потока в жидком внешнем ядре, который через силовые линии магнитного поля связан с хорошо проводящим внутренним ядром. По GR-модели динамо, из-за супервращения внутреннего ядра со скоростью на 2° - 3° в год быстрее, чем мантия, в жидком ядре возникает сильный зональный поток в восточном направлении (образуется тороидальное магнитное поле). По BK-динамо модели генерация поля происходит аналогично GB-модели во внешней части ядра, но очень различается для его внутренней части. Получается, что сильное тороидальное поле отсутствует около границы внутреннего ядра и внутреннее ядро может вращаться или в восточном направлении или в западном, но более медленно, чем мантия. Надо сказать, что в настоящее время очень трудно (даже невозможно) отдать предпочтение какой-либо из моделей динамо и выбрать, какая из них обеспечивает лучшее приближение к реальной Земле. Ясно, что

дифференциальное вращение внутреннего ядра обеспечивает возможность появления важной и уникальной причины для моделирования динамо.

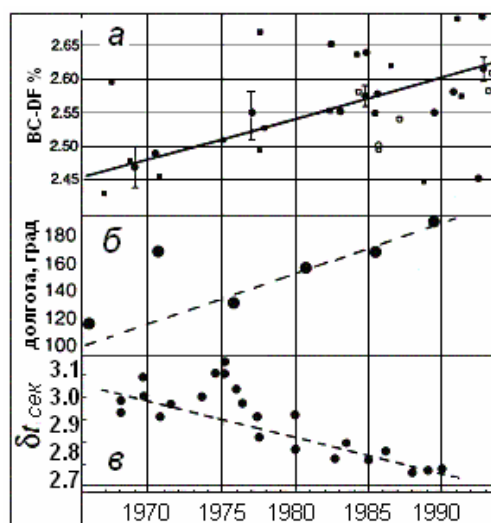


Рис. 9. Изменение относительно времени (BC-DF) в % (Creager, 1997) - а; вариация долготы цилиндрической анизотропии внутреннего ядра в град. (Su, et al., 1996) - б; изменение времени прихода волны от ядерных взрывов (Овчинников и др. 1998) – в.

Попыткам подтвердить факт вращения внутреннего ядра, используя сейсмические данные, были посвящены работы (Glatzmaier, Roberts, 1995-a; Glatzmaier, Roberts, 1996; Aurnou et al., 1996; Bloxham, Kuang, 1996). Вскоре после Song и Richards (1996), авторы (Su, Dziewonski, Jeanloz, 1996) сообщили, что данные по времени распространения волн по трассе РКР (DF), полученные из Международного Сейсмологического Центра (ISC), могут использоваться для локации местоположения оси анизотропии. Для этого 30-летний набор данных по регистрации супервращения внутреннего ядра делился на шесть 5-летних циклов. Оценки положения оптимальной оси показали сложный характер временных изменений в промежутки времени около 1970 года, когда магнитное поле подвергалось «джерку» (внезапному изменению его интенсивности) (Courtilot, et al., 1978). Средняя скорость вращения внутреннего ядра в восточном направлении за период 1964 - 1992 в (Su, Dziewonski, Jeanloz, 1996) была оценена в 3° в год. Скорость супервращения ядра полученная в (Su, et al., 1996) оказалась значительно выше, чем скорость, оцененная в (Song, Richards, 1996) и скорость, которую принимали в своих моделях динамо Glatzmaier и Roberts (1995-a, 1995-b) и Aurnou и др. (1996). Все эти авторы утверждают, что внутреннее ядро вращается быстрее в восточном направлении. Song и Richards (1996) наблюдали изменение разности времен прохождения в 0.3 секунды, что значительно ниже величины разброса (среднеквадратичные отклонения равны примерно 1-3 секунды) времени распространения сейсмических волн, оцененных по данным ISC-бюллетеней, а также ниже оценок ошибок усреднения. Song (1997) полагает, что к подобным оценкам следует относиться весьма осторожно и, более того, он вообще ставит под сомнение результаты наблюдений супервращения ядра. В подтверждение он приводит такие аргументы. Неравномерное распределение сеймостанций образуется из-за роста глобальной сети в течение времени наблюдений за изменением анизотропии внутреннего ядра (25 – 30 лет). Неравномерное распределение землетрясений связано с изменением глобальной сейсмичности, которое используется для того, чтобы оценить анизотропию внутреннего ядра в разное время. Всё это может приводить к тому, что при сравнении фактически используются различные участки мантии и внутреннего ядра. Следовательно, изменения оси симметрии анизотропии могли оказаться результатом

различного осуществления выборки и вовсе не связаны с дифференциальным вращением внутреннего ядра.

Подобную точку зрения разделяют авторы (Souriau et al., 1997), которые показывают, что на основании ставших теперь доступными данных, наклон оси анизотропии не может быть надежно обнаружен. Они утверждают, что имеется очевидная корреляция между данными по travel-time, полученными на основе модели супервращения внутреннего ядра, и величинами сейсмических событий. Эта корреляция, которая могла быть следствием метода анализа данных и зависеть от их полосы частот изменения, может частично смещать данные наблюдений. Эти результаты не исключают возможности внутреннего основного дифференциального вращения, но они подвергают сомнению, было ли оно фактически обнаружено. Souriau (1998) полагает, что в настоящее время дифференциальное вращение внутреннего ядра еще твердо не установлено. Однако даже если завтра окажется, что эти результаты не совсем верны, они представляют важный шаг для науки о внутреннем строении Земли только потому, что они уже вызвали захватывающие дискуссии в геомагнетизме, сейсмологии и геодинамике.

Исследование временной зависимости анизотропии проводилось не только с использованием землетрясений в качестве источников сейсмических волн, о которых шла речь выше, но и с применением ядерных взрывов (Овчинников и др. 1998).

Оценка соответствия величины вязкости η и $\Delta\omega = (\omega_2 - \omega_1)$. Воспользуемся результатом работы (Денисов, Новиков, 1998). Обозначим I_1 и I_2 моменты инерции мантии и внутреннего ядра, а ω_1 и ω_2 - их угловые скорости. Запишем уравнения вращательного движения мантии и твердого внутреннего ядра:

$$\begin{aligned} I_1 d\omega_1/dt &= h(\omega_2 - \omega_1) - M, \\ I_2 d\omega_2/dt &= -h(\omega_2 - \omega_1). \end{aligned}$$

Здесь M – момент сил, обусловленный приливным взаимодействием в системе Земля-Луна и приводящим к увеличению продолжительности суток на 1.7 мс за 100 лет, а: $h(\omega_2 - \omega_1)$ – момент сил трения, обусловленный наличием жидкого внешнего ядра. Вывод об опережающем вращении твердого внутреннего ядра является очевидным следствием, вытекающим из этих уравнений.

Комбинируя эти уравнения, авторы получают:

$$d(\omega_2 - \omega_1)/dt = -h(1/I_1 + 1/I_2)(\omega_2 - \omega_1) + M/I_1.$$

Учитывая, что M мало меняется с изменением угловой скорости вращения, можно принять движение ядра относительно мантии установившимся, т.е. $d\omega_2/dt = d\omega_1/dt$, и в результате:

$$h(\omega_2 - \omega_1) = MI_2/(I_1 + I_2) \approx I_2M/C,$$

где C – осевой момент инерции Земли. Для вращающейся жидкости, обладающей коэффициентом вязкости η и заполняющей зазор между двумя вращающимися сферами, имеем:

$$h = 8\pi R_1^3 R_2^3 \eta / (R_1^3 - R_2^3),$$

где R_1 – радиус внутреннего ядра, а R_2 – радиус внешнего.

Полученные соотношения позволяют выразить разность $(\omega_2 - \omega_1)$ через вязкость вещества внешнего ядра, т.к. остальные параметры – константы:

$$(\omega_2 - \omega_1) \approx M/8\pi C \times 2m_2/5R_2 \times 1/\eta.$$

Подставляя известные значения величин: $M/C = 2\pi/T^2 \times 1.7 \cdot 10^{-3}$ с/100 лет (T – период вращения Земли); m_2 – масса внутреннего ядра, получаем относительную скорость вращения внутреннего ядра $(\omega_2 - \omega_1)$ в единицах °/год, если вязкость η выразить в Па·с:

$$(\omega_2 - \omega_1) \approx 10^3 / \eta.$$

Отсюда следует, что для оценок вязкости вещества внешнего ядра «по минимуму», $\eta \approx 10^5$ Па·с (реально, по-видимому, больше), величина $(\omega_2 - \omega_1)$ оказывается на два-три порядка меньше, чем та, которая могла бы следовать из оценок по вековым вариациям

геомагнитного поля и результатам наблюдений по вариации времени распространения Р-волн на границе внутреннего ядра.

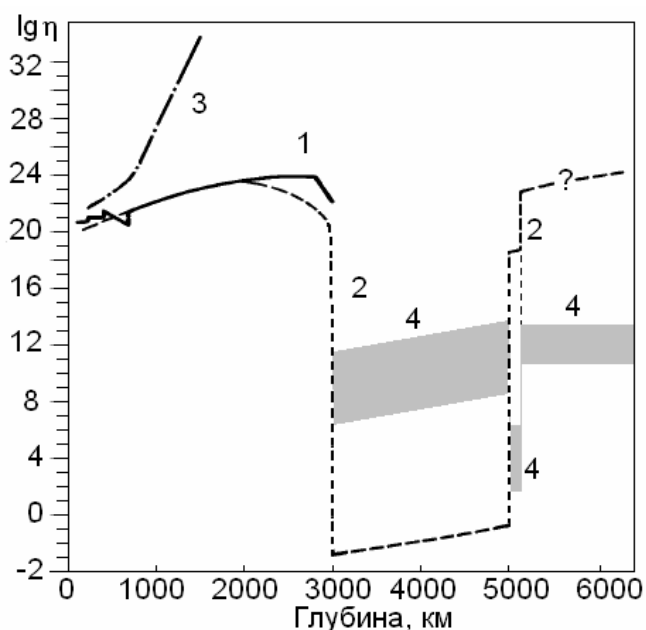


Рис. 10. Распределение вязкости в Земле: 1 - по модели Ранелли-Фишера при адиабатическом распределении температуры в мантии; 2 - принятое распределение; 3 - распределение в молодой Земле (до начала ее дифференциации); 4 – по данным сейсмологии (Денисов, Новиков, 1998; Бурмин, 2008).

Аналогичный результат был получен в работе (Bills, 1999), где так же оценивалась величина вязкости вещества внешнего ядра. В работе (Bills, 1999) автор учитывает эти эффекты и оценивает величину вязкости вещества внешнего ядра. Вращающие моменты взаимодействуют непосредственно с мантией Земли, и стремятся к тому, чтобы прекратить вращение. Вязкость внешнего ядра является эффективным средством передачи вращения внутреннему ядру. Автор полагает, что экмановский масштаб времени для диссипации переходных движений жидкости, связанных с неустойчивыми вращающимися моментами - намного короче, чем масштаб времени для регулирования скорости вращения внутреннего ядра и мантии в устойчивом режиме потока Куэтта. Поэтому наличие в системе устойчивого приливно-отливного вращающего момента, приложенного к мантии, способствует вращению внутреннего ядра чуть быстрее относительно мантии. Увеличение скорости вращения пропорционально эффективной вязкости внешнего ядра и величины её вращающего момента. Проведенная автором оценка скорости супервращения внутреннего ядра относительно мантии определяет её величину примерно в 1 градус в год, что соответствует эффективной вязкости внешнего ядра 10^3 Па·с. Автор показывает, что возможное влияние ледниковых циклов в приливно-отливных вращающих моментах несколько усложняют эту картину, но не изменяет порядка величин оценок вязкости. Дифференциальная скорость вращения изменяет величину вязкости примерно в 2 раза на каждом 100 тысячеклетнем ледниковом цикле. Приливно-отливное напряжение сдвига может также вносить вклад в развитие анизотропии во внутреннем ядре.

Супервращение по анализу *splitting* функций. Несмотря на весьма строгие оценки связи величины вязкости и скорости дифференциального вращения внутреннего ядра Земли, принято считать, что оно было реально обнаружено при изучении особенностей распространения объёмных сейсмических волн. Полученные результаты указывают, что внутреннее ядро вращается со скоростью $0.2^\circ - 3^\circ$ в год быстрее, чем земная кора и мантия. Широкий разброс в полученных значениях скорости вращения, по всей видимости, был вызван чувствительностью изучаемых волн к локальным (временным и

пространственным) неоднородностям структуры внутреннего ядра. С другой стороны, собственные колебания, splitting-функции, являются нечувствительными к локальной структуре, и поэтому имеется возможность оценить величину дифференциального вращения ядра более точно. Результаты предыдущих исследований собственных колебаний можно считать сомнительными из-за относительно низкого качества длиннопериодических цифровых данных, доступных 20 лет назад. Для того чтобы получить наиболее точную информацию о дифференциальном вращении ядра, авторы (Laske, Masters, 1999) использовали метод анализа свободных колебаний, который является нечувствительным к источнику, т.е. местоположению и механизму землетрясения. Авторы пришли к выводу, что дифференциального вращения внутреннего ядра, с величиной скорости $\sim \pm 0.2$ °/год, не наблюдается вовсе. Авторы полагают, что внутреннее ядро, по всей видимости, гравитационно «заперто» мантией Земли. Этот результат иллюстрирует рис. 2-12, на котором приведены скорости вращения внутреннего ядра, полученные для девяти мод, чувствительных к особенностям строения во внутреннем ядре. На рисунке так же показана средняя скорость вращения в диапазоне 0.01 ± 0.21 ° в год, полученная путем усреднения данных по всем модам. Пунктирные линии отмечают полосы ошибок среднего числа, две вертикальные линии показывают скорости супервращения, найденных при недавнем изучении объемных волн. Данные Laske и Masters показывают, что есть некоторые основания утверждать, что супервращение ядра со скоростью 0.3° в год в принципе, - возможно, однако супервращение 1° в год - противоречит всем полученным данным.

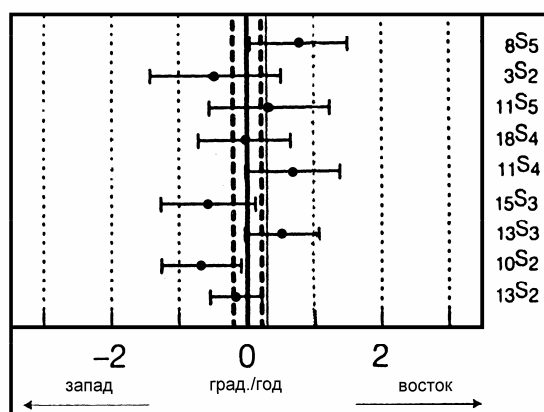


Рис. 11. Скорость супервращения ядра (\pm °/год) по данным splitting функций (Laske, Masters, 1999).

Авторы полагают, что используемый ими анализ, это лучший способ определить существование супервращения внутреннего ядра. Во-первых, потому, что они имеют дело с крупномасштабными вариациями, которые нечувствительны к ошибкам в выборе положения источника и к локальной структуре внутреннего ядра. Во-вторых, метод независим от механизма землетрясения. В-третьих, авторов не беспокоит причина, вызывающая расщепление собственных колебаний (т.е. причина, вызывающая splitting функции), т.е. неважно вызваны они гетерогенностью или анизотропией. Важно только, изменяются ли они со временем. Полученные авторами результаты допускают весьма незначительные скорости дифференциального вращения, однако они же показывают, что внутреннее ядро не вращается с заметной скоростью относительно мантии. Это соответствует предположению, что внутреннее ядро гравитационно заперто мантией.

Эта работа вызвала резонанс. Так, например, Dahlen (1999) считает выводы авторов относительно отсутствия супервращения внутреннего ядра, вполне обоснованными. С другой стороны, категоричным выводам Laske и Masters (1999) предшествовали ряд работ.

Например, за три года до этого момента авторы (Romanowich et al., 1996) полагали, что данные по расщеплению собственных колебаний Земли и различиям во временах распространения объемных волн, дают ограничения на величину анизотропии внутреннего ядра Земли. Применение формализма, который позволяет отличить отклонения от радиальной симметрии и результатов по цилиндрической анизотропии в моделях с распределением скоростей распространения Р-волн, несовместимо с "замороженной" анизотропией, а скорее предполагает режим крупномасштабной конвекции во внутреннем ядре.

Анализируя результаты сейсмологических данных относительно супервращения внутреннего ядра и дифференциального вращения ядра внешнего, можно заключить, что это явление, при величинах относительных скоростей порядка единиц градусов в год, - весьма сомнительно. Однако временная зависимость анизотропии внутреннего ядра, возможно, существует, и, учитывая то обстоятельство, что она "привязанна" к поверхности внутреннего ядра, нельзя считать невозможным здесь, - наличие гидродинамического переноса. Он, вероятнее всего, происходит в пограничной области фазового перехода, т. е. в F слое.