

УДК 523.31

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖГОДОВЫХ ВАРИАЦИЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

© 2010 г. В. Л. Горшков

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 12.10.2009 г.

В работе исследованы вариации в неравномерности вращения Земли в интервале периодов от 2 до 8 лет по наиболее продолжительным рядам наблюдений, полученным как классическими астрометрическими средствами, так и средствами космической геодезии. Обнаружено резкое изменение структуры этих вариаций в середине 1980-х годов, когда происходила замена классических астрометрических средств определения параметров вращения Земли (ПВЗ) на космические. Вариации с периодичностью около 6 лет и амплитудой ~0.2 мс практически перестали детектироваться (космические средства таких осцилляций продолжительности суток не обнаруживают с начала функционирования), а вариации с периодичностью от 2 до 4 лет возросли по амплитуде и стали доминирующими в этом частотном диапазоне. В работе исследованы некоторые факторы возбуждения и возможные причины структурных изменений этих осцилляций.

PACS: 91.10.Nj, 95.10.Jk

ВВЕДЕНИЕ

Спектр вариаций скорости вращения Земли простирается от доступных с помощью современных средств мониторинга параметров вращения Земли (ПВЗ) внутрисуточных вариаций до десятилетних (декадных), ограниченных в этой низкочастотной части астрометрической историей наблюдений. Низкочастотные составляющие имеют сложный нерегулярный характер, существенно усложняющий идентификацию и исследование возбуждающих их факторов. В этой связи особенно актуальны исследования отклика структурных особенностей этих рядов на вариации внешних факторов, что помогает понять природу их взаимодействия.

К самым низкочастотным вариациям в скорости вращения Земли относят так называемые декадные вариации продолжительности суток с периодами от десятков лет и больше и амплитудами, достигающими единиц миллисекунд времени (мс). Фактически, это аперiodические колебания, в которых сосредоточена основная энергия неравномерного вращения Земли. Причины этих вариаций продолжительности суток (ПС) обычно приписывают различным механизмам взаимодействия мантии и ядра. Под продолжительностью суток (ПС) в дальнейшем будем понимать разность между реальной и номинальной (86400 с) продолжительностью суток, обычно не превышающую нескольких миллисекунд времени.

Сезонные взаимодействия атмосферы и гидросферы Земли с ее твердыми оболочками вызывают годовые и полугодовые вариации продолжи-

тельности суток с суммарной амплитудой чуть меньше 1 мс.

Помимо этого обнаружены занимающие промежуточное положение квазипериодические 6–7-летние вариации ПС в скорости вращения Земли с амплитудой около 0.2 мс. Впервые эти вариации скорости вращения Земли были замечены А. и Н. Стойко в данных Всемирного времени, полученных еще с маятниковыми часами. После создания атомной шкалы времени (1956 г.) эти вариации в спектре скорости вращения Земли были выделены в работе (Корсунь, Сидоренков, 1974) и более детально исследованы в работе Vondrak (1977).

После публикации нового однородного астрометрического ряда всемирного времени *еорАО* (Vondrak и др., 1998), охватывающего интервал наблюдений с 1956 г. до 1992 г. и включающего наблюдения на 30 инструментах в 24 обсерваториях мира (рис. 1), причины этих квазিশестилетних вариаций продолжительности суток исследовались во многих работах. В некоторых из них эти вариации объясняются обменом угловыми моментами между твердой Землей и ее внешними флюидными оболочками — атмосферой и океаном (Gross и др., 1996; Сидоренков, 2002; Dickey и др., 2003). В других, в основном теоретических, работах в качестве причин этих вариаций ПС рассматриваются электромагнитные и гравитационные взаимодействия между внутренним ядром и мантией, а также влияние топографии границы ядро—мантия (Pais, Hulot, 2000; Mound, Buffett, 2003; 2006). И наконец, в ряде работ исследуется статистическая обусловленность 5–6-летних вариаций скорости вращения Земли



Рис. 1. Карта расположения астрометрических обсерваторий (АО ПВЗ, звездочки), наблюдения которых использованы при создании ряда *еорАО*, и близких к ним уровневных станций (кружки), материалы которых использованы в данном исследовании.

солнечной активностью (Djurović, Pâquet, 1996; Abarca del Rio и др., 2003).

В работах (Djurović, Pâquet, 1996; Liao, Greiner-Mai, 1999; Abarca del Rio и др., 2000) было показано, что в атмосферном угловом моменте нет соответствующих этим вариациям составляющих. Также нет приемлемой модели для объяснения солнечного воздействия на скорость вращения Земли помимо того же взаимодействия с атмосферой и океаном. Поэтому объяснение этих вариаций взаимодействиями между мантией и внутренним ядром наиболее обсуждаемо в научной периодике. Моделирование этого взаимодействия основано на существовании вращательных гравитационных мод в системе внутреннее ядро—мантия, меняющихся в зависимости от ряда параметров этой системы. Однако оценки этих параметров (проводимость нижней мантии, распределение плотности в ней, вязкость ядра и др.) в развиваемой модели (Mound, Buffett, 2006; Dumberry, 2007; Dumberry, Mound, 2008) достаточно широки, чтобы уверенно обеспечивать возбуждение вариаций ПС именно на этих квазишестилетних частотах.

Существует достаточно много геофизических процессов, имеющих близкую по частоте цикличность. Во-первых, это сейсмическая активность (Кондорская и др., 2005), порождающая, в частности, цунами (Левин, Сасорова, 2002; Гамбурцев и др., 2004). Причем эту периодичность сейсмической активности объясняют приблизительно шестилетними биениями в колебаниях полюса Земли. Во-вторых, это отмеченные в некоторых регионах метеорологические и гидрологические процессы с 5–6-летними вариациями. В частности, в работе (Сидоренков, 2002) обнаружены вариации амплитуды годовых колебаний момента импульса атмосфе-

ры, а также метеорологические и гидрологические процессы с квазишестилетней периодичностью.

Помимо этого, региональной сетью гравиметров в Китае обнаружены шестилетние гравитационные вариации неприливного характера (Li и др., 2001; 2005), находящие отражение в колебаниях отвесной линии с амплитудой около $0.02''$. Подобные гравитационные вариации на других гравиметрах и соответствующие им вариации в астрономических наблюдениях всемирного времени и широты исследованы в работе (Шапанов и др., 2005). В работе (Горшков, Щербакова, 2002) было показано, что не все станции классической подсистемы определения ПВЗ на территории бывшего СССР регистрировали подобные вариации в наблюдениях всемирного времени. В то время как на станциях прибрежного расположения эти вариации часто превосходили соответствующие вариации сводного решения Международной службы вращения Земли (МСВЗ), континентальные станции их, как правило, не обнаруживали.

В данной работе квазишестилетние вариации продолжительности суток исследуются по всем имеющимся рядам ПВЗ вплоть до 2009 года, в отличие от вышеупомянутых работ, материалы которых заканчиваются 1995 годом. Обнаружено значительное уменьшение этих вариаций в течение 1980-х годов после смены техники определения ПВЗ с классической астрометрической (в АО ПВЗ входили пассажные инструменты, ФЗТ, астролябии и циркумзениталы) на космические средства (РСДБ, ЛЛС, ГНСС). Фактически, современные средства определения ПВЗ их не регистрируют. При этом ранее почти не выделяемые 2–4-летние вариации продолжительности суток стали доминирующими в этом частотном диапазоне. В работе анализируются возможные причины произошедших изменений.

ДАННЫЕ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Межгодовые вариации продолжительности суток в диапазоне от 2 до 8 лет оценивались по данным, хранящимся на сайте МСВЗ (<http://hpiers.obspm.fr/eor-pc/product/>). Использовались как астрометрические ряды классической астрометрической службы АО ПВЗ (ряд *eorAO* с 1956 до 1992 года), так и наиболее продолжительные ряды данных космической геодезии (РСДБ — ряд *IVS_r* с 1981 года, ЛЛС — ряд *CSR_r* с 1981 года, ГНСС — ряд *CODE_p* с 1993 года и сводный ряд данных космической геодезии *Finals2000A.all* с 1981 года). Ряд *eorC04* является синтетическим по средствам определения ПВЗ: до начала 1980-х годов он основан на наблюдениях исключительно средств АО ПВЗ с последующим все увеличивающимся весом данных космической геодезии, которая с конца 1980-х годов полностью вытеснила классические средства АО ПВЗ.

Однородный астрометрический ряд определенный РС *eorAO* был продолжен нами после 1992 года по данным сводной обработки оставшихся 5 станций классических определений РС (Иркутск, Новосибирск, Москва, Пулково, Харьков), любезно предоставленных нам коллегами из Главного метрологического центра ГСВЧ. Для объединения рядов использовался общий интервал 1991 года. Сформированный таким образом ряд был назван *combAO*. Для всех рядов из вариаций РС предварительно были удалены приливные вариации от 5 дней до 18.6 года (в принятом международном обозначении *LODS*) и ряды были приведены к равноотстоящим интервалам в 0.02 года.

Кроме того, использовался однородный ряд данных продолжительности суток до эпохи атомного времени (до 1956 года), полученный на основе наблюдений покрываний звезд Луной (*LUNAR-97*, <http://hpiers.obspm.fr/eor-pc/>). Точность и плотность (одно значение в год) этого ряда существенно ниже других, особенно до 1920-х годов, но долгопериодические вариации продолжительности суток можно выделить. На рис. 2 представлены ошибки исследуемых рядов, приведенные для однородности к интервалу в 5 дней.

Для сопоставления с возможными геофизическими факторами возбуждения этих вариаций РС использовались вариации среднего уровня моря на равномерных постах по данным постоянной службы среднего уровня моря (PSMSL, <http://www.nbi.ac.uk/psmsl/>), близких к расположению астрометрических станций, использованных при формировании ряда *eorAO* (рис. 1). Использовались также данные о компонентах χ_3 (сумма “массовых” χ^{pib} и “ветровых” χ^w членов) функций эффективных угловых моментов: атмосферного (AAMf) на интервале 1948–2008 гг. (Zhou и др., 2006, <ftp://ftp.cdc.noaa.gov/dataset/ncsr.reanalysis/>) и океанического (OAMf) на интервале 1949–2002 гг. (Gross и др., 2005, [ftp://euler.](ftp://euler.jpl.nasa.gov/sbo/oam_global/ECCO_50yr.chi)

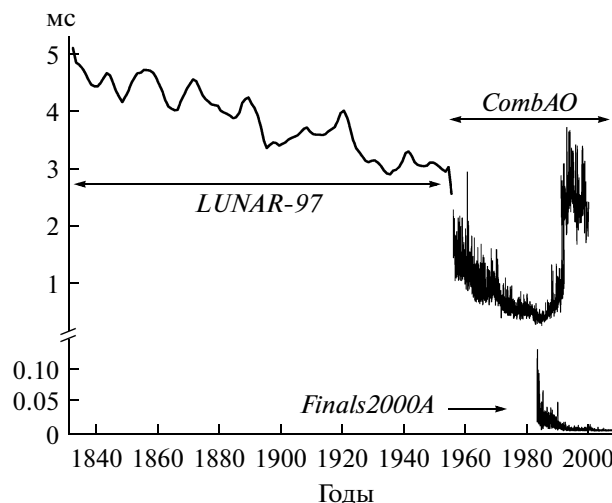


Рис. 2. Поведение среднеквадратических ошибок исследуемых рядов, формально приведенных к одинаковому пятидневному интервалу оценки.

jpl.nasa.gov/sbo/oam_global/ECCO_50yr.chi). Для ряда *LUNAR-97* для этих целей использовался индекс Южного колебания Эль-Ниньо (Stahle и др., 1998).

В исследовании в основном использовался сингулярный спектральный анализ (ССА) и его многомерная версия (МССА) в программной реализации СПбГУ “Гусеница” (<http://www.gistatgroup.com/gus/>; Golyandina и др., 2001). Метод наиболее адекватен для выделения информативных, необязательно гармонических, компонент в рядах нестационарной природы с сохранением информации об амплитудных и фазовых вариациях ряда и с оценкой вклада данной компоненты в энергетику ряда.

Процедура исследования одномерного временного ряда длины N начинается с преобразования его в многомерный. Задав число $M < N/2$ (окно или длина “гусеницы”), значениями исходного ряда последовательно заполняют строки матрицы X . При этом первая строка содержит первые M элементов ряда, вторая — со второго элемента по $M+1$ и так далее до исчерпания ряда. После центрировки по столбцам и соответствующей нормировки вычисляется корреляционная матрица $R = XX^T$, сингулярное разложение которой $R = PLP^T$ дает диагональную матрицу собственных чисел L и ортогональную матрицу собственных векторов P матрицы R . В программной реализации этого метода главные компоненты исходной матрицы $Y = XP$ могут быть исследованы и, что особенно важно при дальнейшем восстановлении по ним исходного ряда, визуализированы и упорядочены по возрастанию их вклада в исходный ряд. Это позволяет интерактивно проводить непосредственный поиск гармонических компонентов, фильтрацию или сглаживание ряда, выбирая соответствующие значимые компоненты Y_i . Ввиду ортогональности матрицы P можно восстано-

вить матрицу $X = YP^T$, используя при этом выбранные главные компоненты Y_i .

Собственные векторы корреляционной матрицы выступают в роли передаточных функций соответствующих фильтров. Ширина полосы пропускания зависит от формы передаточной функции фильтра и определяется как видом собственного вектора, так и длиной интервала усреднения M . Чем больше M , тем уже полоса фильтра. Выбор нескольких главных компонент эквивалентен параллельному соединению соответствующих фильтров, что позволяет управлять формой спектральной характеристики. При выборе M , которое значительно меньше характерной ритмичности ряда (в пределе при $M = 2$), фактически происходит его сглаживание. Периодические, но не обязательно гармонические, составляющие исследуемого ряда образуют графически хорошо различимую пару соседних компонент Y_i .

Наиболее важные преимущества метода и его реализации для данного исследования состоят в следующем:

1. Базисные функции метода порождаются самим исследуемым рядом, формируя оптимальный базис разложения, так как являются собственными векторами корреляционной матрицы R . В Фурье-анализе разложение происходит на гармонические компоненты, а в вэйвлет-анализе — на выбранные локально симметричные базисные функции, наиболее подходящие к исследуемому процессу.

2. Любые гармонические или квазигармонические колебания исходного ряда обуславливаются парой близких собственных значений, парой собственных векторов и парой главных компонент, что дает возможность восстановить ряд по информативным, необязательно гармоническим, компонентам, исследовать структуру исходного ряда и изолировать отдельные, интересующие исследователя, трендовые, периодические или квазипериодические компоненты и шум.

3. Возможно выделение даже слабых, но значимых трендов, в том числе нелинейных.

Исследование временных рядов с помощью ССА, тем не менее, не является “автоматической” процедурой. Имеется ряд обстоятельств, которые обязательно должны быть приняты во внимание. Выбор M зависит от решаемой задачи, от характера исследуемого ряда и соотношения длины ряда N и искомого периода T . Для анализа структуры ряда и выявления скрытых периодичностей рекомендуется выбирать максимальное $M = N/2$. Для выделения периодических компонент необходимо соотносить продолжительность всего ряда и характерный период исследуемой составляющей T . В случае, если собственные значения соседних компонент разложения хорошо разделяются, соизмеримость не так важна, но чем короче ряд и ближе уровень исследуемого процесса к уровню шумов, тем все более зна-

чимым для оптимальности разложения становится целочисленность отношения N/T . Из этого следует, что параметр M для коротких рядов следует выбирать по возможности близким к T , при этом приходится жертвовать (укорачивать) длиной исходной реализации. Практика работы с рядами разной природы с помощью ССА показывает, что для каждого ряда существует свое оптимальное отношение соизмеримости M , N и периода исследуемого процесса T .

АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СУТОК

С помощью ССА из рядов *combAO* и *eopC04* были выделены составляющие в интервалах от 2 до 4 и от 4 до 8 лет (рис. 3). Вслед за (Abarca del Rio и др., 2003) будем обозначать их соответственно TYO и SYO (*two-three* и *six-seven years oscillation*, соответственно). После удаления трендовой и сезонных компонент, составляющих почти 99% вклада в общий процесс, на долю SYO приходится около 0.3%, на долю TYO — 0.2%. Отметим, что в составляющей TYO присутствует более четкая компонента с периодом ~2.4 года, систематически возрастающая по амплитуде в течение 1970–1980 гг. и менее уверенная 3–4-летняя компонента. В свою очередь, составляющая SYO имеет более выраженную компоненту с периодом около 6.3 года, практически выросшую с конца 1980-х годов, и нестабильную 4–5-летнюю компоненту.

Очевидно произошедшее изменение в структуре этих вариаций. После 1986 г. амплитуда SYO резко уменьшилась, в то время как амплитуда TYO возросла. Аналогично выглядит разложение ряда *eopC04*, хотя после 1990 г. он формируется исключительно по данным космических средств определения ПВЗ. Как уже упоминалось, именно в 1986 году произошли систематические, структурные изменения наблюдательной базы подсистемы АО ПВЗ, когда вместо глобального распределения этих станций к началу 1990-х годов осталось только пять в основном континентальных станций.

В наиболее продолжительном ряде *LUNAR-97* присутствуют вариации продолжительности суток в широком диапазоне периодов (рис. 4). Периодика процесса после снятия трендовой и декадной составляющих имеет два достаточно широких максимума 4.5–7 лет и значительно менее мощный около 2.5 года. Видно, что основной характер исследуемых вариаций (SYO) сохранился и в прошлом, но имели место значительные колебания амплитуды этих вариаций и небольшие изменения периода. При этом надо иметь в виду, что ошибки этого ряда до 1925 г. достаточно велики (рис. 2) и, кроме того, при наличии одного значения за год ошибка фазы вариаций продолжительности суток также может достигать года и более.

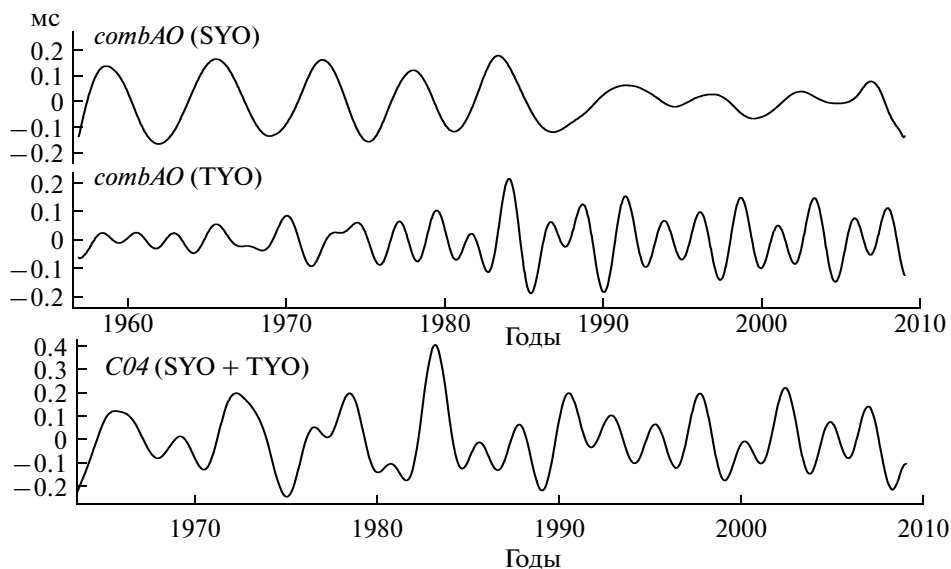


Рис. 3. Вариации ПС в интервале периодов от 2 до 8 лет по ССА-разложению рядов *combAO* и *eorC04*.

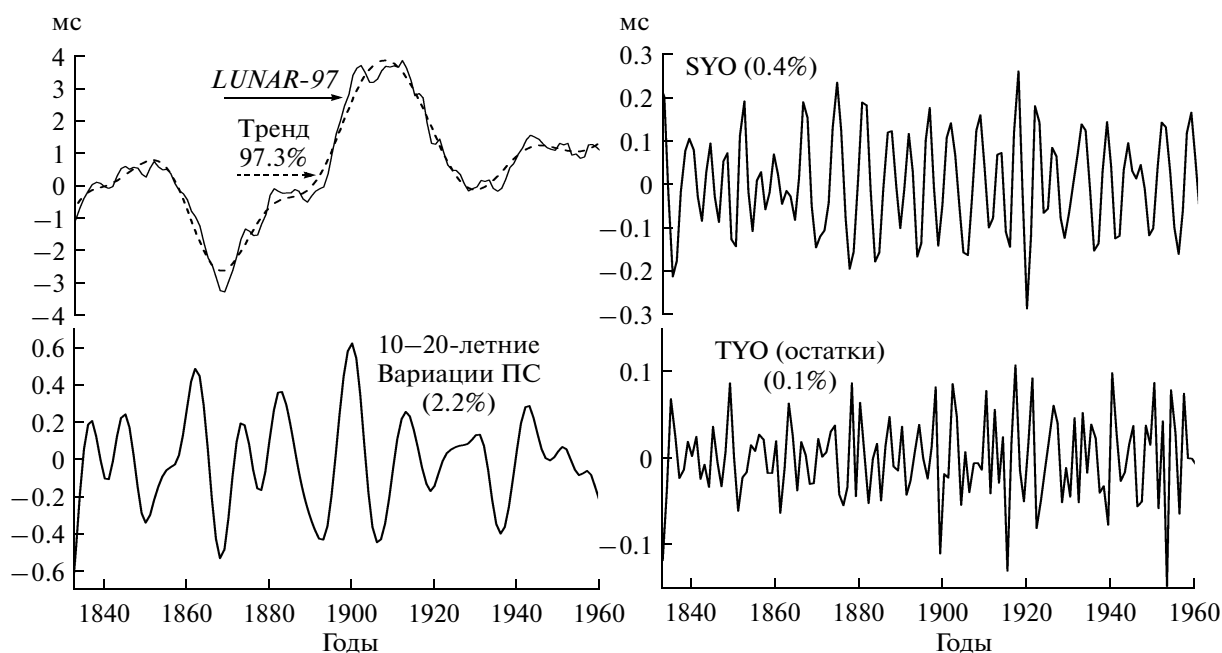


Рис. 4. Полное ССА-разложение ряда *LUNAR-97*.

С сожалением отметим, что, несмотря на имеющиеся вплоть до последних лет ряды наблюдений покрытий звезд Луной, из этих данных не извлечена информация о вариациях продолжительности суток. Эти наблюдения могли бы дать независимый ряд продолжительности суток, относящийся, как и соответствующие ряды средств космической геодезии, к центру масс Земли, а не к вертикалу места, как в классических средствах определения АО ПВЗ. Отсутствие этих данных и прекращение функционирования глобальной структуры АО ПВЗ затруд-

няют исследования вариаций продолжительности суток в данной полосе частот, не позволяя уверенно отделить артефакт (смена средств наблюдений) от реального изменения структуры их вариаций.

И наконец, на рис. 5 (верхний график) приведено разложение ряда *IVS_r*. В нем также как и в других, но более коротких рядах современных данных определения ПВЗ космическими средствами (нижний график), полностью отсутствуют вариации SYO.

Таким образом, вариации продолжительности суток в диапазоне TYO присутствуют во всех рядах

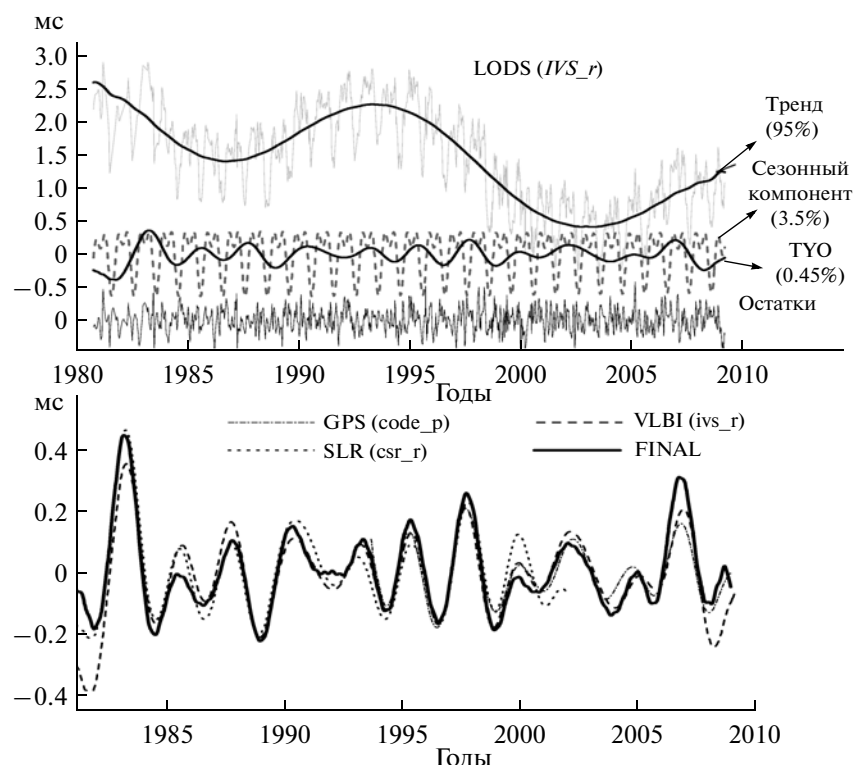


Рис. 5. Вверху — полное ССА-разложение ряда IVS_r , внизу — ССА-разложение в интервале периодов от 2 до 8 лет наиболее продолжительных рядов данных космической геодезии.

классических и космических средств их определения. При этом их амплитуда по данным классических определений на протяжении 1980-х годов возросла от 0.1 мс до 0.2 мс. В то же время вариации продолжительности суток в диапазоне SYO практически перестали регистрироваться классическими средствами определения ПВЗ после резкого (в десятки раз) сокращения их численности и распространенности до локального уровня. Это, однако, не исключает того, что произошло реальное изменение структуры вариаций продолжительности суток в диапазоне 2–7 лет. Сменившие их космические средства определения ПВЗ изначально не обнаруживают вариации продолжительности суток в диапазоне SYO . Поэтому при исследовании возможных механизмов возбуждения этих вариаций необходимо учитывать данное обстоятельство.

АНАЛИЗ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИЧИН ИССЛЕДУЕМЫХ ВАРИАЦИЙ ПС

Что может быть причиной этих вариаций продолжительности суток и изменений их структуры в середине 1980-х годов? Из трех ранее перечисленных причин (взаимодействие между мантией и ядром, обмен угловых моментов между твердотельной Землей и ее внешними флюидными оболочками и солнечной обусловленностью) по **реальным** геофизическим данным, для которых имеется модель вза-

имодействия, можно проверить только атмосферное и океаническое возбуждение этих вариаций продолжительности суток. Их солнечную обусловленность можно проверить только статистическими методами, сопоставляя фазы индексов солнечной активности и соответствующих вариаций продолжительности суток. В данной работе не предполагается исследование этого фактора, так как основная мода солнечной активности (СА) не соотносится с изучаемыми вариациями продолжительности суток, а приблизительно 5-летние вариации в СА достаточно дискуссионны (Djurović, Pâquet, 1996; Kocharov и др., 1999).

Данные о функциях соответствующих эффективных угловых моментов (AAMf и OAMf) имеются только с середины прошлого века и поэтому не могут быть применены для исследования ряда *LUNAR-97*. Однако известно (Chao, 1989; Левицкий и др., 1995), что значительная часть геофизического возбуждения вариаций продолжительности суток обусловлена Южным колебанием Эль-Ниньо (ЮКЭН). Поэтому для сопоставления с вариациями продолжительности суток ряда *LUNAR-97* использовалась одна из многочисленных реконструкций индекса ЮКЭН (Stahle и др., 1998). Ясно, что это сопоставление носит качественный характер и может определить лишь фазовые соотношения этих осцилляций.

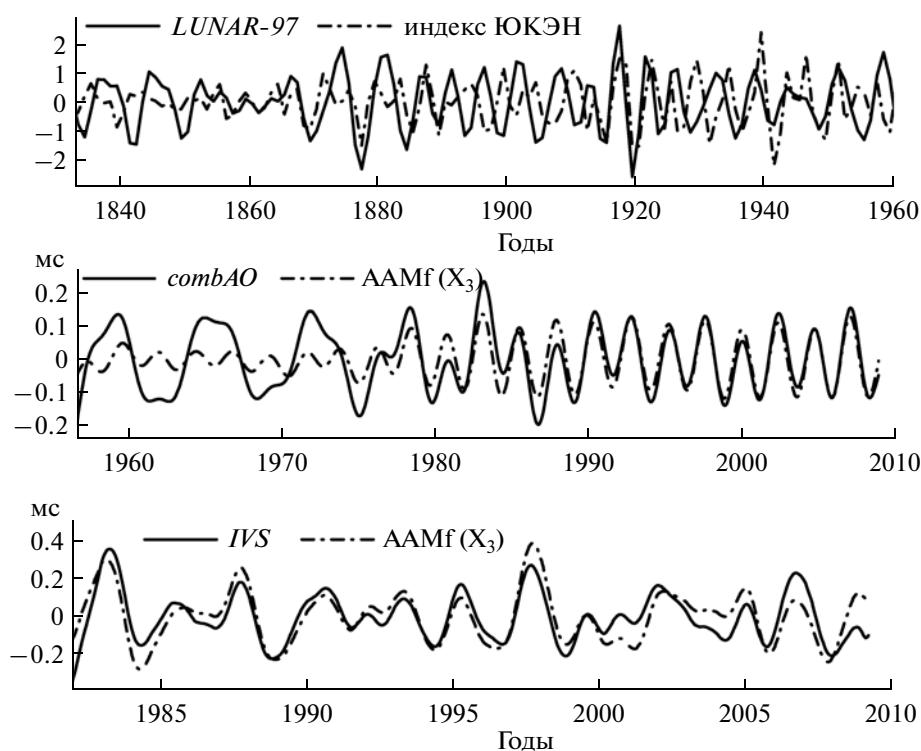


Рис. 6. Вверху — совместное (МССА)-разложение ряда продолжительности суток *LUNAR-97* и индекса Южного колебания Эль-Ниньо в интервале периодов от 2 до 8 лет. Совместное разложение ряда *AAMf* и рядов продолжительности суток *combAO* (средний график) и *IVS_r* (нижний график) в том же интервале периодов.

После предварительной стандартизации обоих рядов (вычтено среднее и поделено на дисперсию) проведена совместная их реконструкция в области периодов 4–8 лет (рис. 6, верхний график) с помощью многомерной реализации ССА. Видно, что ЮКЭН не может быть строго ответственным за вариации продолжительности суток в диапазоне SYO в ряде *LUNAR-97*, хотя в моменты значимых событий Эль-Ниньо, как, например, в 1920-х годах, заметна синхронизация рядов. Раздельная реконструкция обоих рядов дает еще большие фазовые различия, так же, как использование другого аналогичного ряда продолжительности суток (Jordi и др., 1994). Как уже отмечалось, ошибки редких в прошлом наблюдений покрытий звезд Луной, так же, как ошибки реконструкции индекса ЮКЭН по косвенным (дендрохронологическим) параметрам, весьма велики, что отражается и на полученных оценках совместного разложения рядов.

Для сопоставления с остальными рядами продолжительности суток использовались компоненты χ_3 атмосферных (AAMf) и океанических (OAMf) функций углового момента. Как это ранее было обнаружено в работах (Djurović, Râquet, 1996; Liao, Greiner-Mai, 1999; Abarca del Rio и др., 2000) и подтверждено нами, в разложении осевой составляющей AAMf (χ_3) отсутствует составляющая на частоте SYO. Однако по нашим исследованиям в разложе-

нии χ_3 присутствует компонента с периодом около 5 лет (на рисунках не приведена), амплитуда которой возрастала с конца 1970-х годов от ~ 0.03 мс почти до ~ 0.1 мс с намечающимся после 2004 г. уменьшением амплитуды. Также с конца 1970-х годов происходило постепенное увеличение амплитуды 2–3-летних вариаций в χ_3 от ~ 0.08 мс до ~ 0.15 мс, четко коррелирующих с квазидвухлетними вариациями ветров в тропической зоне стратосферы (Сидоренков, 2002).

На среднем графике рис. 6 приведены результаты совместного (МССА)-разложения осевой составляющей AAMf и ряда *combAO* после снятия сезонных и декадных (периоды более 10 лет) компонент. Видно, что до 1983 г. вариации продолжительности суток в ряде *combAO* (и в ряде *eorC04*) имеют исключительно моду SYO и не имеют для нее возбуждающих оснований в атмосферном угловом моменте. С конца 1980-х годов вариации продолжительности суток в ряде *combAO* почти полностью определяются обменом моментами с атмосферой, но при этом только в диапазоне TYO. В ряде *IVS_r* вариации TYO также почти полностью определяются атмосферной динамикой (нижний график рис. 6).

В разложении χ_3 составляющей OAMf также обнаруживается слабая компонента с периодом около 5 лет, вероятно, являющаяся отражением

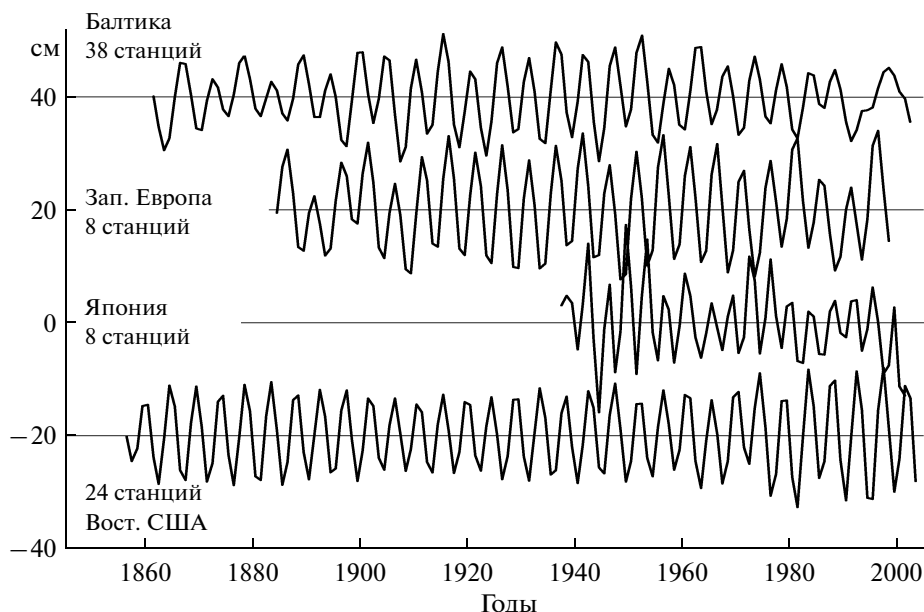


Рис. 7. МССА-реконструкция вариаций уровня моря по среднегодовым данным PSMSL для разных прибрежных регионов в диапазоне периодов от 2 до 8 лет.

атмосферной динамики, которая ни по амплитуде (менее 0.01 мс), ни по частоте не может быть ответственна за вариации продолжительности суток в диапазоне SYO.

Этот геофизический фактор возбуждения носит глобальный характер. Поскольку многие станции, имеющие наибольший вес в подсистеме АО ПВЗ, распределены в основном вблизи побережий (рис. 1), нами была проверена возможность возбуждения вариаций продолжительности суток в диапазоне SYO вариациями отвесных линий на этих станциях за счет соответствующих колебаний уровня моря в прибрежных зонах. Это исследование было проведено в региональном масштабе по среднемесячным данным уровнемерных станций с историей регистрации не менее 50 лет. Линейные тренды и сезонные вариации уровня моря на каждой станции были предварительно удалены.

На рис. 7 приведены вариации уровня моря в исследуемом частотном диапазоне для регионов, наиболее близких к станциям АО ПВЗ. Периоды этих вариаций сосредоточены в интервале от 3.9 лет (Япония) до 5.3 года (Балтика), а амплитуды не превышают 15 см. Периодичность этих вариаций близка к обнаруженной в осевых составляющих ААМf и ОАМf, однако не совпадает с вариациями SYO. Но более важно то, что выделенные в этом частотном диапазоне амплитуды вариаций уровня моря недостаточны для возбуждения соответствующих вариаций вертикала.

Согласно разложению формулы Венинг-Мейнеса для практического применения (Грушинский, 1963) для круговых зон от точки наблюдения

до 2000 км периферии имеем уклонения отвеса в первом вертикале:

$$\xi'' \approx -0.0263'' dg_5 - 0.0050'' dg_{100} - 0.0020'' dg_{300} - 0.0015'' dg_{1000} - 0.00087'' dg_{2000},$$

где $dg_i = \sum \Delta g_i \cos A$, Δg_i — гравиметрические аномалии в мГал, A — азимут от точки наблюдения на элемент площадки равного действия в круговой зоне, i — индекс круговой зоны (в км) от точки наблюдения.

Полученные нами (рис. 7) усредненные по многим уровнемерным станциям оценки вариаций уровня моря (± 10 см) в исследуемом диапазоне частот соответствуют $\Delta g \approx 4$ мГал (Levine и др., 1986). Это в десятки раз меньше того, что необходимо для возбуждения исследуемых вариаций уклонения отвеса (0.2 мс) даже в центральной зоне, т.е. непосредственно на побережье.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, за неимением достаточных альтернативных космическим средствам определения ПВЗ данных, остается предположение, что в середине 1980-х годов произошло реальное изменение структуры низкочастотных вариаций продолжительности суток, в которых 2–3-летние вариации практически вытеснили 6–7-летние вариации. При этом 2–3-летние вариации почти полностью определяются геофизическим возбуждением за счет атмосферного углового момента. Как упоминалось, одним из теоретически возможных источников квазишестилетних вариаций продолжительности суток

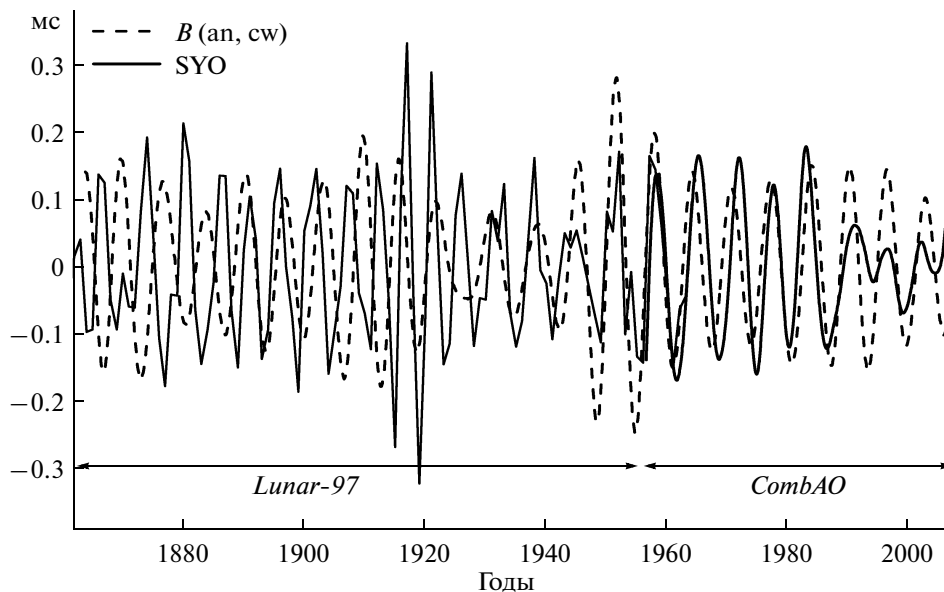


Рис. 8. Вариации продолжительности суток (SYO) и биения координат полюса (B).

предполагаются гравитационные и электромагнитные взаимодействия в системе мантия—ядро. В этом случае следует найти объяснение серьезных изменений в значениях параметров, определяющих это взаимодействие, приведших к прекращению работы механизма этого взаимодействия. Либо признать этот источник возбуждения несостоятельным.

Альтернативным объяснением может быть развигиваемая Сидоренковым (2002) точка зрения, основанная на наблюдаемой с конца 1970-х годов сменой климатической эпохи (исчезли засухи в России и Индии, изменился индийский муссон, начался рост уровня Каспия, произошли изменения во многих других климатических явлениях).

Однако имеется еще один параметр во вращении Земли, значимо коррелирующий с квазишестилетними вариациями продолжительности суток. В работе (Корсунь, Сидоренков, 1974) было отмечено, что на близкой к SYO частоте происходят биения (B) координат полюса $P = X_p - iY_p$ из-за взаимодействия основных компонент в движении полюса — годичной (an) и чандлеровской (cw):

$$T_B = T_{cw} T_{an} / (T_{cw} - T_{an}) \cong 6.3 \text{ года.}$$

После учета движения среднего полюса (X_m, Y_m) координаты полюдии почти полностью (93%) определяются суммой годичной и чандлеровской компонент:

$$\{X, Y\} = \{X_p - X_m, Y_p - Y_m\} \approx \{X_{cw} + X_{an}, Y_{cw} + Y_{an}\}.$$

Все эти компоненты легко выделяются с помощью ССА (Воротков и др., 2002; Горшков, 2007) из наиболее продолжительного ряда координат полюса *еорC01* МСВЗ.

Для вычисления кривой биений координат полюса воспользуемся комплексно сопряженной функцией от P . Тогда

$$PP^* = E_{cw}^2 + E_{an}^2 + 2B(an, cw),$$

где E — огибающая для годичной и чандлеровской составляющих движения полюса, а $B = (X_{cw} X_{an} + Y_{cw} Y_{an})$ — искомая кривая биений координат полюса, отражающая фазовые соотношения основных компонент P . Эта кривая качественно повторяет изменения радиуса полюдии $R_{pol} = (X^2 + Y^2)^{1/2}$, но более удобна для сопоставления с вариациями продолжительности суток.

На рис. 8 сопоставлены вариации в диапазоне SYO по вышеприведенным данным из рядов *LUNAR-97* и *CombAO* с масштабированной кривой биений координат полюса. Видно, что вплоть до 1925 г. вариации продолжительности суток в диапазоне SYO слабо коррелируют с кривой биений, что, скорее всего, отражает недостаточную точность данных ПВЗ в ту эпоху. Действительно, ширина спектральной полосы вариаций продолжительности суток в диапазоне SYO ряда *LUNAR-97* (рис. 4) простирается от 4.5 до 7.1 года, в то время как для ряда *CombAO* наблюдается острый пик с периодом 6.3 года. После известного затухания и сбоя фазы чандлеровского движения полюса в конце 1920-х годов произошла синхронизация этих процессов. На интервале 1890–1987 гг. корреляция этих кривых $r = 0.37$, на интервале 1929–1987 гг. $r = 0.78$, а на интервале глобального функционирования подсистемы АО ПВЗ в 1956–1986 гг. $r = 0.86$.

Фактически, эта почти точная зависимость означает, что в период синфазного движения годич-

ной и чандлеровской компонент движения полюса, т.е. когда размах колебаний положения полюса максимален, скорость вращения Земли замедляется, а с уменьшением размаха колебаний положения полюса вращение Земли ускоряется.

Чем может быть обеспечена такая перекачка энергии между компонентами вектора вращения Земли? Известным прямым следствием колебаний положения полюса является возбуждение полюсного прилива. Однако его вклад в колебание долгот станций ничтожен (менее 7 мм). Максимальные вариации высот станций (на широтах около 45°) за счет полюсного прилива колеблются в пределах 1.5 см, что также много меньше необходимого для возбуждения искомым вариаций. Но главное, нет приемлемого механизма демодуляции сигнала полюсного прилива для выделения его приблизительно шестилетней огибающей. Таким образом, не учитывавшийся эффект полюсного прилива в данных классической подсистемы АО ПВЗ (в отличие от средств космической геодезии) не мог привести к наблюдавшимся вариациям продолжительности суток.

Другим возможным механизмом, с необходимым для объяснения демодуляции биений положений полюса элементом нелинейности, может быть взаимодействие внешних слоев Земли (кора—верхняя мантия) с нелинейным трением между ними (Горшков, Воротков, 2002). Существующий постоянный западный дрейф литосферы по астеносфере со скоростью, достигающей на экваторе до ~ 20 см/год (Smith, Lewis, 1998), может испытывать колебания на частоте биения координат полюса за счет взаимного движения годовой и чандлеровской составляющих. При этом предполагается, что из-за обмена моментами сил с атмосферой и океаном именно в коре возбуждается годовая составляющая движения полюса, упруго распространяясь в глубь мантии, а чандлеровская составляющая определяется в основном динамическим сжатием мантии, в ней возбуждается и упруго распространяется в направлении коры.

В этом случае противофазное движение чандлеровской и годичной составляющих будет соответствовать встречному движению слоев в разогретой вязкой среде, что приведет к возрастанию трения. Большая вязкость этого слоя под континентами, чем под океанами (в 6–8 раз), создает неоднородное поле скоростей, концентрирующееся к границам континентальных плит, где в основном и располагались станции АО ПВЗ. В целом же более жесткое сцепление коры с мантией будет увлекать кору в более быстрое вращение и, наоборот, ослабление трения восстанавливает постоянный западный дрейф литосферы относительно мантии. Предполагаемые вариации дрейфа литосферы за счет этого процесса составят менее 5 см/год. Предлагаемая модель но-

сит качественный характер и требует отдельного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным наиболее продолжительных и точных рядов определения всемирного времени обнаружено, что 2–3-летние вариации продолжительности суток присутствуют во всех рядах классических и космических средств их определения. Их амплитуда по данным классических определений продолжительности суток на протяжении 1980-х годов возросла от 0.1 мс до 0.2 мс. В то же время (в середине 1980-х годов) квазишестилетние вариации практически перестали регистрироваться классическими средствами определения ПВЗ после сокращения их численности и распространенности до локального уровня. Сменившие их космические средства определения ПВЗ изначально не обнаруживают квазишестилетних вариаций.

2–3-летние вариации продолжительности суток почти полностью определяются обменом угловыми моментами твердотельной Земли и атмосферы. Уверенно наблюдавшиеся до 1990-х годов 6–7-летние вариации продолжительности суток не обусловлены атмосферным и океаническим возбуждением. Не обусловлены они также вариациями вертикала на станциях подсистемы АО ПВЗ за счет колебаний уровня моря.

За неимением достаточных альтернативных космическим средствам определения ПВЗ данных, следует полагать, что в середине 1980-х годов произошло реальное изменение структуры низкочастотных вариаций продолжительности суток, в которых 2–3-летние вариации практически вытеснили 6–7-летние вариации. В этой связи наиболее обсуждаемый механизм возбуждения этих вариаций (взаимодействие мантия—ядро) либо не состоятелен, либо должен объяснить произошедшие изменения в параметрах этого взаимодействия. Альтернативным объяснением может быть развиваемая Сидоренковым (2002) точка зрения, основанная на наблюдаемой с конца 1970-х годов сменой климатической эпохи, проявляющейся в изменении многих гидрологических, атмосферных и океанических процессов.

Обнаружена усиливающаяся с возрастанием точности определения ПВЗ зависимость биений координат полюса и квазишестилетних вариаций продолжительности суток. В период функционирования АО ПВЗ в 1956–1986 гг. корреляция этих рядов $r = 0.86$. Эта почти точная зависимость означает, что во время синфазного движения годичной и чандлеровской компонент движения полюса, т.е. когда размах колебаний положений полюса максимален, скорость вращения Земли замедляется, а с уменьшением размаха колебаний положений полюса вращение Земли ускоряется. Показано, что

полюсной прилив не может быть ответственным за квазишестилетние вариации продолжительности суток. Предложено качественное объяснение явления синхронизма биений координат полюса и квазишестилетних вариации продолжительности суток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воротков М.В., Горшков В.Л., Миллер Н.О., Прудникова Е.Я. Исследование основных составляющих в движении полюса Земли // Изв. ГАО РАН. 2002. № 216. С. 406–414.
- Гамбурцев А.Г., Кондорская Н.В., Олейник О.В. и др. Ритмы в сейсмичности Земли // Физика Земли. 2004. № 5. С. 95–107.
- Горшков В.Л., Щербакова Н.В. Изменение долготы Пулково и долгопериодические вариации скорости вращения Земли // Изв. ГАО РАН. 2002. № 216. С. 430–437.
- Горшков В.Л., Воротков М.В. Динамика движения полюса и долгопериодические вариации скорости вращения Земли // Изв. ГАО РАН. 2002. № 216. С. 415–425.
- Горшков В.Л. Связь низкочастотных вариаций полюса Земли с Северо-Атлантическим колебанием // Астрон. вестн. 2007. Т. 41. № 1. С. 70–76.
- Грушинский Н.П. Теория фигуры Земли. М.: ФМ, 1963. 446 с.
- Кондорская Н.В., Олейник О.В., Гамбурцев Ф.Г., Хромецкая Е.А. Ритмы по сейсмологическим данным // Вулканология и сейсмология. 2005. № 6. С. 68–80.
- Корсунь А.А., Сидоренков Н.С. К анализу неравномерности вращения Земли в 1956–1973 гг. // Астрометрия и астрофизика. 1974. Вып. 24. С. 46–52.
- Левин Б.В., Сасорова Е.В. О шестилетней периодичности возникновения цунами в Тихом океане // Физика Земли. 2002. № 12. С. 40–49.
- Левицкий Л.С., Рыхлова Л.В., Сидоренков Н.С. Южное колебание Эль-Ниньо и неравномерность вращения Земли // Астрон. журн. 1995. Т. 72. Вып. 2. С. 272–276.
- Сидоренков Н.С. Физика нестабильностей вращения Земли. М.: Физматлит, 2002. С. 385.
- Abarca del Rio R., Gambis D., Salstein D. Interannual signals in length of day and atmospheric angular momentum // Ann. Geophys. 2000. № 18. P. 347–364.
- Abarca del Rio R., Gambis D., Salstein D. et al. Solar activity and Earth rotation variability // J. Geodynamics. 2003. V. 36. P. 423–443.
- Chao B. Length-of-day variations caused by El Nino – Southern Oscillation // Science. 1989. V. 243. P. 923–925.
- Chapanov Ya., Vondrak J., Gorshkov V., Ron C. Six-year cycles of the Earth rotation and gravity // Rep. Geodesy. Warsaw UT. № 2(73). 2005. Proc. EGU G9 Symp. “Geodetic and Geodynamic programmes of the CEI”. Vienna, Austria, April 2005. P. 221–230.
- Dickey J., Marcus S., de Viron O. Coherent interannual and decadal variations in the atmosphere-ocean system // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. P. 27–31.
- Djurović D., Pâquet P. The common oscillations of solar activity, the geomagnetic field and the Earth’s rotation // Sol. Phys. 1996. V. 167. P. 427–439.
- Dumberry M. Geodynamic constraints on the steady and time-dependent inner core axial rotation // Geophys. J. Int. 2007. V. 170. P. 886–895.
- Dumberry M., Mound J.E. Constraints on core-mantle electromagnetic coupling from torsional oscillation normal modes // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. B03102. doi:10.1029/2007JB005135.
- Jordi C., Morrison L.V., Rosen R.D., et al. Fluctuations in the Earth’s rotation since 1830 from high-resolution astronomical data // Geophys. J. Int. 1994. V. 117. P. 811–818.
- Golyandina N., Nekrutkin V., Zhigljavsky A. Analysis of Time Series Structure: SSA and Related Techniques. Boca Raton: Chapman & Hall, CRC, 2001. 305 p.
- Gross R., Marcus S., Eubanks T., et al. Detection of an ENSO signal in seasonal length-of-day variation // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. P. 3373–3376.
- Gross R.S., Fukumori I., Menemenlis D. Atmospheric and oceanic excitation of decadal-scale Earth orientation variations // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. B09405. doi: 10.1029/2004JB003565.
- Kocharov G.T., Ogurtsov M.G., Dreschhoff G.A.M. On the quasi-five-year variation of nitrate abundance in polar ice and solar flare activity in the past // Sol. Phys. 1999. V. 188. P. 187–190.
- Lambeck K. The Earth’s variable rotation: Geophysical causes and consequences. NY: Cambridge Univ. Press, 1980. 450 p.
- Levine J., Harrison J.C., Dewhurst W. Gravity tide measurements with a feedback gravity meter // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. P. 12.835–12.841.
- Li Hui, Fu Guang-yu, Li Zheng-xin. Plumb line deflection varied with time obtained by repeated gravimetry // Acta Seismol. Sinica. 2001. V. 14. № 1. P. 67–71.
- Li Z.X., Li H., Li Y.F., Han Y.B. Non-tidal variation in the deflection of vertical at Beijing Observatory // J. Geod. 2005. V. 78. P. 588–593.
- Liao D.C., Greiner-Mai H.. A new Δ LOD series in monthly intervals (1892.0–1997.0) and its comparison with other geophysical results // J. Geod. 1999. V. 73. P. 466–477.
- Mound J.E., Buffett B. A. Interannual oscillations in length of day: Implications for the structure of the mantle and core // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № B7. P. 2334. doi: 10.1029/2002JB002054.
- Mound J.E., Buffett B.A. Detection of a gravitational oscillation in length-of-day // Earth and Planet. Sci. Lett. 2006. V. 243. P. 383–389.
- Pais A., Hulot G. Length of day decade variations, torsional oscillations and inner core superrotation: Evidence from recovered core surface zonal flows // Phys. and Earth planet. Inter. 2000. V. 118. P. 291–316.
- Smith A., Lewis C. Differential rotation of lithosphere and mantle and the driving forces of plate tectonics // J. Geodynamics. 1998. V. 28. P. 97–116.
- Stahle D.W., D’Arrigo R.D., Krusic P.J., et al. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1998. V. 79. P. 2137–2152.
- Vondrak J. The rotation of the Earth between 1955.5–1976.5 // Studia geophys. et geod. 1977. V. 21. P. 107–117.
- Vondrak J., Pesek I., Ron C., Cepec A. Earth orientation parameters 1899–1992 in the ICRS based on the HIPPARCOS reference frame // Publ. Astron. Inst. Acad. Sci. Czech Rep. 1998. № 87. 56 p.
- Zhou Y.H., Salstein D.A., Chen J.L. Revised atmospheric excitation function series related to Earth variable rotation under consideration of surface topography // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. D12108. doi: 10.1029/2005JD006608.