

*Астрономические исследования в Пулковке сегодня / под редакцией А.В.Степанова. – СПб: ВВМ, 2009, стр. 267-277.*

## ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОМПОНЕНТ В ДВИЖЕНИИ ПОЛЮСА И НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

Горшков В.Л., Миллер Н.О.

Исследования вектора вращения Земли, из-за специфики поведения его компонент, традиционно распадаются на независимые исследования неравномерностей во вращении Земли и движения мгновенного полюса вращения Земли относительно оси фигуры. Спектр вариаций как скорости вращения Земли, так и колебаний полюса 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. Возросшие точности и плотности рядов ПВЗ активизировали исследования высокочастотных вариаций вектора вращения Земли, в частности, исследования свободной нутации ядра. Однако в области его низкочастотных вариаций остались вопросы, дискуссии по которым продолжаются до сих пор. В основном они касаются проблем возбуждения и амплитудно-частотной модуляции чандлеровского движения полюса (ЧДП) и декадных вариаций продолжительности суток (ПС). Наши исследования касаются именно низкочастотных составляющих в вариациях вектора вращения Земли и анализа воздействия на них астрономических и геофизических факторов. Эти 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 и предсказать поведение вектора вращения Земли.

В настоящее время появилось много новых методов анализа нестационарных временных рядов. С конца прошлого столетия широкое распространение получили методы исследования пространственно-временных рядов на основе естественных (эмпирических) ортогональных функций (ЕОФ). Базисные функции в этих методах строятся на основе самих исходных данных, в отличие от часто используемых в астрономии Фурье или вейвлет преобразований. К классу этих методов относится метод сингулярного спектрального анализа (ССА) (Данилов, Жиглявский, 1997), который был впервые

применен к исследованию рядов параметров вращения Земли (ПВЗ) в лаборатории вращения Земли Пулковской обсерватории.

Современные средства определения ПВЗ дают результаты, характеризующиеся высокой точностью и плотностью, с которыми не могут соперничать классические астрооптические средства определения ПВЗ (АО ПВЗ). Однако для исследования низкочастотных вариаций в скорости вращения Земли и в колебаниях полюса необходимы длительные ряды наблюдений. Наиболее длинным рядом координат полюса является ряд IERS C01 (<http://hpiers.obspm.fr/iers/eop>). Для его формирования использовались ряды наблюдений, полученные в различных обсерваториях мира, при этом применялись как различные методы наблюдений, так и различные методы их обработки. В ряд C01 вошли наблюдения, выполненные с помощью как современных, так и классических средств определения ПВЗ. Поэтому этот ряд не является однородным ни в систематическом, ни в случайном отношениях.

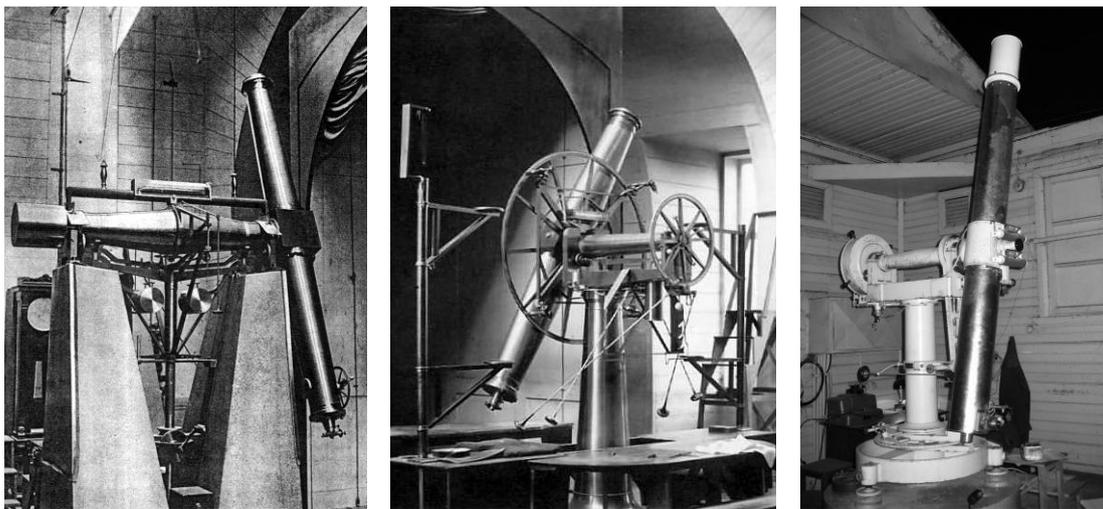


Рис.1. Слева направо - пассажный инструмент Репсольда в первом вертикале (ПИПВ), большой вертикальный круг Эртеля (БВК), зенит-телескоп Фрейберга-Кондратьева (ЗТФ-135).

В Пулковской обсерватории имеются ряды наблюдения широты на разных инструментах, начиная с 1840 года. Ранние наблюдения в Пулково выполнялись на пассажном инструменте Репсольда в первом вертикале (1840-1941) и на большом вертикальном круге Эртеля (1840-1880) (рис.1). Оба инструмента были изготовлены специально для Пулково и установлены в год открытия обсерватории (1839). Они предназначались для абсолютных определений координат звёзд. При определении рядов абсолютных склонений звезд образуются и ряды определения широты, которые могут использоваться для изучения движения полюсов.

Для продления ряда изменений широты Пулкова в прошлое до 1840 г. были использованы широты, вычисленные Б.Ванахом по наблюдениям В.Я.Струве с 1840.3-1843.0 гг. на пассажном инструменте в первом вертикале (Wanach, 1892), и широты, вычисленные А.А.Ивановым по наблюдениям Х.Петерса с 1842-1849 гг. на большом вертикальном круге (Иванов, 1895). Наблюдения на вертикальном круге, обработанные А.Я.Орловым, были использованы Рыхловой (Рыхлова, 1970) для вычисления координат полюса, и вошли в ряд С01.

19 сентября 1904 года начались регулярные наблюдения широты на зенит-телескопе ЗТФ-135 (**рис.1**). Этот телескоп был сделан в мастерской Пулковской обсерватории механиком Г.А. Фрейбергом-Кондратьевым и стал образцом инструмента данного типа. В 1941 г. в связи с военными действиями телескоп был демонтирован. После окончания войны к сентябрю 1948 г. инструмент был вновь установлен в Пулкове в новом павильоне, и на нем возобновились систематические наблюдения, которые были завершены в конце 2006 года. Особенность конструкции инструмента ЗТФ-135 позволила наблюдать на нём в течение 104 лет без капитального ремонта (Наумов, 2004). Усилиями 36 наблюдателей в течение этого времени был получен длительный ряд наблюдений, который включает в себя около 170 тысяч значений широты. Этот ряд отличается высокой устойчивостью и однородностью, особенно в период с 1948 по 1994 годы. Наблюдения на ЗТФ-135 в 1904-1962 года были использованы В.П. Федоровым для вычисления координат полюса (Федоров и др., 1972). В статье (Зыков и др., 1996) содержится обширная библиография работ, основанных на материале наблюдений на ЗТФ-135.

Таким образом, Пулковская обсерватория располагает рядами наблюдения широты Пулкова за 167 лет. Нижеследующие результаты получены с использованием описанных рядов наблюдений и с помощью различных методов анализа временных рядов, в том числе ССА.

### **Исследование чандлеровского движения полюса**

В движении полюса Земли присутствует множество компонент, наиболее значимым из которых является чандлеровское движение полюса с периодом около 430 суток. В результате исследования ЧДП с помощью разных методов (Фурье анализ, вейвлет анализ, ССА, различные методы фильтрации, преобразование Гильберта) были обнаружены три области резкого изменения амплитуды, сопровождаемые изменением фазы почти на  $180^{\circ}$  (**рис.2**) (Миллер, 2008). Такая особенность поведения ЧДП в середине интервала наблю-

дений хорошо известна (Манк, Макдональд, 1964; Lambeck, 1980, Мориц, Мюллер, 1992).

Относительно первого интервала наблюдений с 1840-1860 гг. был выполнен обзор работ различных авторов, начиная с середины XIX века до настоящих дней. В этот обзор вошли работы С.Чандлера, А.А.Иванова, Б.Ванаха, Х.Кимуры, С.К.Костинского, А.С.Васильева, А.Я.Орлова, Н.Секигучи. Из анализа результатов исследований, приведенных в этих работах, следует, что на этом интервале наблюдается уменьшение амплитуды до  $\sim 0''.08$  и отмечается изменение фазы ЧДП. А.Я.Орлов делает вывод, что «между 1847- 1868 гг. движение полюса как бы замедлилось, а потом вновь приобрело свою скорость» (Орлов, 1961). Н.Секигучи указывает на то, что особенность поведения ЧДП на этом интервале очень похожа на ту, что имеет место в 1920-х годах (Sekiguchi, 1975). Для более тщательного исследования поведения ЧДП на этом интервале возникает потребность продления ряда в прошлое насколько это возможно.

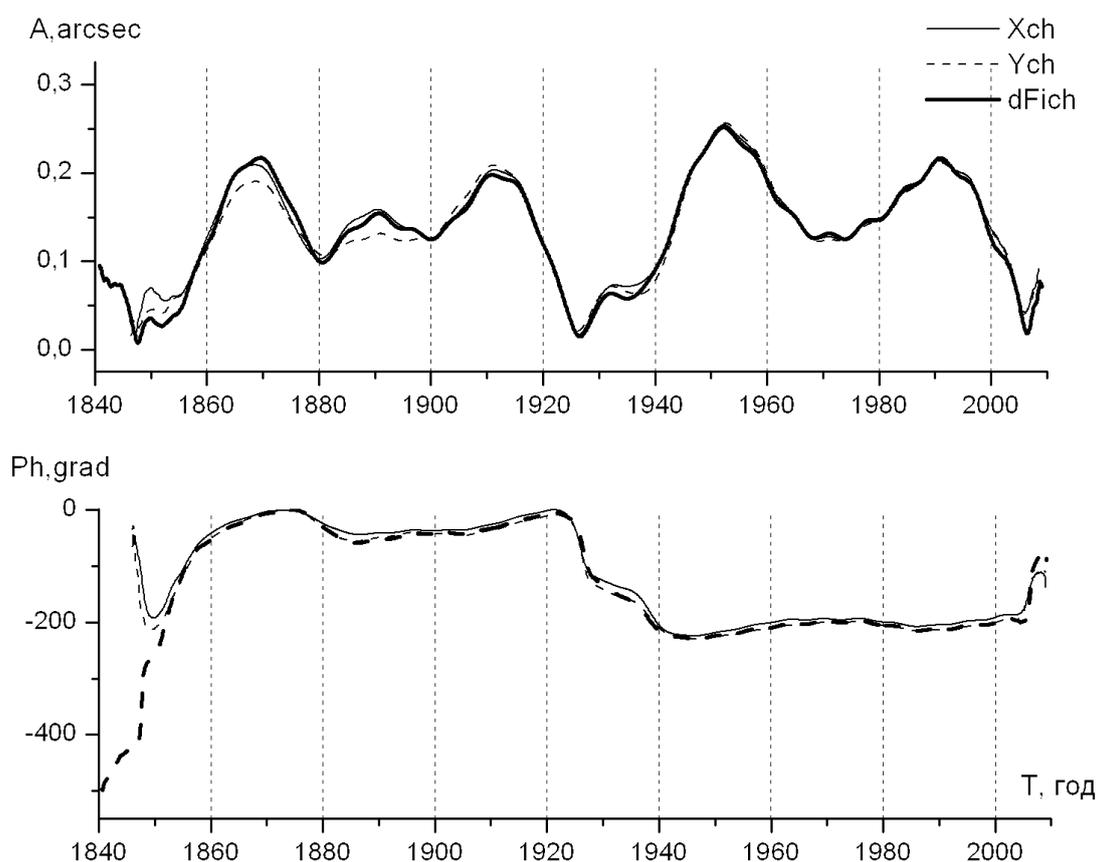


Рис.2. Вариации амплитуды ЧДП с одновременной сменой фазы. ЧДП вычислено по координатам полюса ( $X_{ch}$ ,  $Y_{ch}$ ) и изменениям широты Пулкова ( $dF_{ich}$ ).

Были сопоставлены изменения широты Пулкова, вычисленные из наблюдений на ЗТФ-135 и из международных данных. Это сопоставление выполнялось с помощью Фу-

рье анализа, вейвлет анализа и ССА. В результате было показано, что годовой и чандлеровский компоненты движения полюса можно выделить из наблюдений широты одной обсерватории, даже если в наблюдениях имеются разрывы (Миллер, Прудникова, 2009).

На основе анализа разными методами ранних Пулковских наблюдений (1840-1855) и ряда IERS C01 (1846-1858) ряд изменений широты был продлен в прошлое вплоть до 1840 гг. (рис.3).

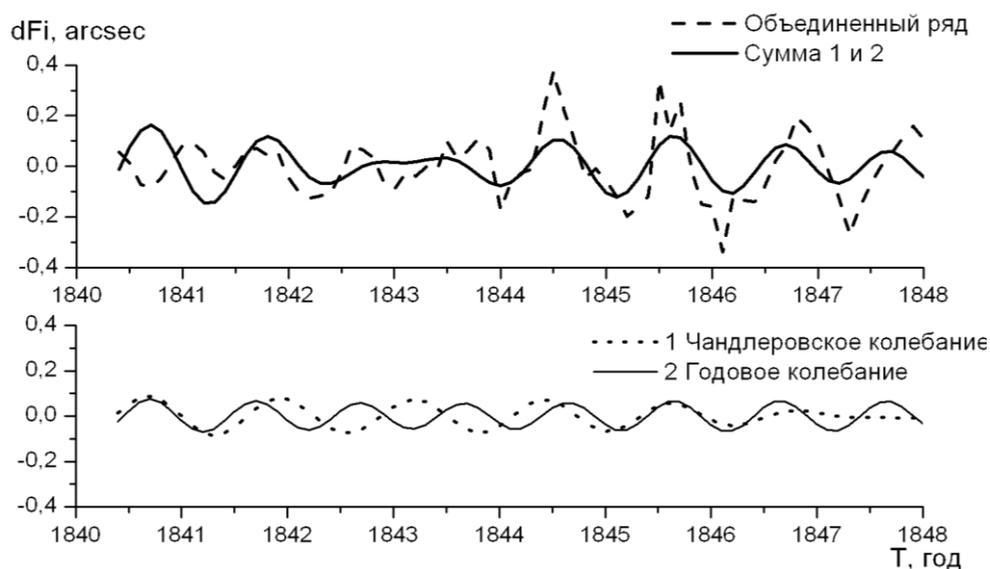


Рис.3. Вверху - объединенный ряд, сумма чандлеровского и годового компонент; внизу – чандлеровский и годовой компоненты, полученные с помощью метода ССА.

Результаты были сопоставлены между собой, и после вычисления изменений широты из ранних Пулковских наблюдений и из ряда IERS C01, был получен объединенный ряд изменений широты Пулково за 170 лет (1840-2009). Из этого ряда с помощью ССА были выделены тренд и долгопериодические колебания, годовой и чандлеровский компоненты. А затем, используя преобразование Гильберта, было исследовано поведение амплитуды и фазы ЧДП (рис.2), которое подтвердило выводы относительно наличия области изменения амплитуды с одновременной сменой фазы в районе 1840-1850 годов. К сожалению, обнаружить момент восстановления фазы не удалось. Возможно, результат будет более определенным, если переработать все пулковские наблюдения с 1840 по 1890 гг., построив однородный ряд изменений широты Пулково. Методом наложения эпох была выполнена оценка периода изменения амплитуды ЧДП с одновременной сменой фазы, в результате которой было получено значение периода около 80 лет.

## Волны Марковица в колебаниях полюса и Северо-Атлантическое колебание

Наиболее мощными в спектре колебаний полюса являются почти гармонические компоненты чандлеровских и годовичных колебаний полюса, вызывающие отклонения мгновенной оси вращения Земли до 10 метров от её среднего положения. В более низкочастотной области спектра колебаний полюса характерным является линейный тренд полюса в сторону американского континента со скоростью примерно 10 см/год и вариации относительно этого направления, имеющие размах меньше 1 метра (0.02" – 0.03") и характерный период около 30 лет (рис. 4, слева).

Впервые эти колебания были выделены как самостоятельное движение полюса Земли Марковицем (Markowitz, 1960) и поэтому часто называются волнами Марковица (Markowitz wobble - MW). Природа этих квазигармонических колебаний среднего полюса Земли пока не выяснена. Дискутируется их генерация гравитационными возмущениями от внутреннего ядра Земли (Dumberry et al., 2002). В работе Н.С. Сидоренкова (2002) показано, что одновременное таяние ледников в Антарктиде и Гренландии с вполне приемлемой скоростью в несколько грамм с  $\text{см}^2$  поверхности ледника в год может объяснить наблюдаемое среднее движение полюса. В этом случае различный темп таяния разных ледников, при определенной регулярности этого процесса, может обеспечить наблюдаемые MW. В работе (Chao et al., 1999) рассматривается возможность геофизического возбуждения межгодовых колебаний полюса Северо-Атлантическим колебанием (NAO). Однако в своей работе авторы использовали данные только с 1962 года, при этом предварительно вычли полиномиальный и сезонный компоненты из движения полюса, поэтому долгопериодические проявления NAO остались не исследованными.

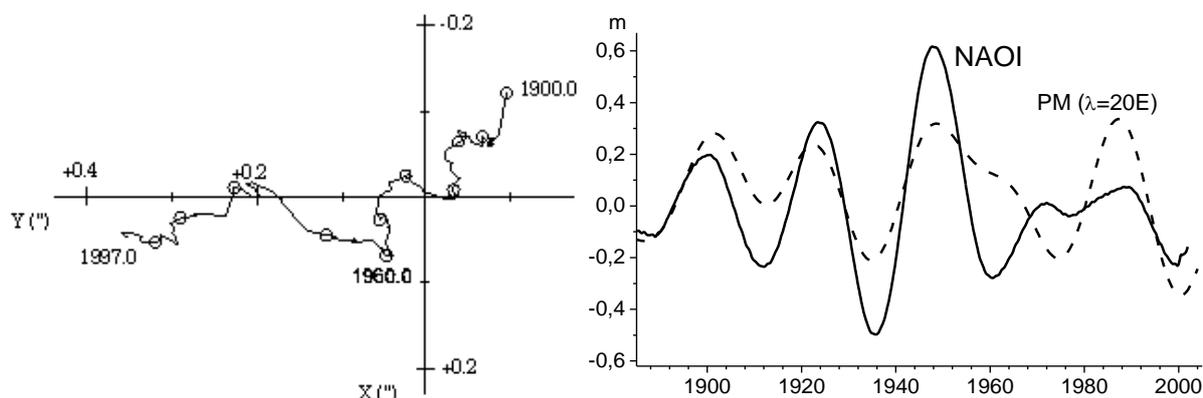


Рис. 4. Слева - движение среднего полюса за 1900-1998 гг. Справа – низкочастотные вариации ( $T > 20$  лет) координат полюса в проекции на меридиан центральной Европы и индекса NAO.

Северо-Атлантическое колебание (NAO) является крупномасштабным климатическим явлением, определяющим погоду не только северной Атлантики, но и прилегаю-

щих частей континентов. NAO характеризуется синхронными изменениями многих метеорологических параметров, из которых для данного исследования наиболее значимым является почти меридиональное периодическое изменение атмосферного давления. Среди причин, определяющих пространственно-временные вариации NAO, рассматриваются, в основном, динамика крупномасштабных взаимодействий атмосферно-океанических циркуляций (Kushnir, 1994) и солнечная обусловленность (Boberg, Lundstedt, 2003).

Нами на основе обнаруженного синхронизма в поведении низкочастотных составляющих индекса NAO (Jones et al., 1997) и координат полюса выдвинуто предположение о частичном возбуждении MW процессом NAO (Горшков, 2007). На **рис.4** (справа) видно, что увеличение нагрузки в средиземноморском районе Атлантики ( $NAOI > 0$ , на рисунке масштабировано) смещает средний полюс в положительном направлении оси X (в сторону западной Европы) в полном соответствии с изменением тензора инерции  $I$  (в основном  $I_{13}$  компонент).

В координатах полюса по данным международной службы вращения Земли (IERS) C01 были выделены с помощью многомерного варианта сингулярного спектрального анализа все составляющие с периодами свыше 20 лет. Общий вклад MW компонент в колебания полюса не превышает 1%, т.к. основная мощность процесса сосредоточена в почти линейном тренде (38%), сезонных (15%) и чандлеровских (39%) составляющих. Как видно из **рис.4** в 1950-х годах изменился характер векового движения полюса. Поэтому были проведены оценки низкочастотных компонент отдельно для двух периодов (1896-1956 гг. и 1956-2004 гг.) и по всем полученным аппроксимациям после вычитания трендовых составляющих оценены методом наименьших квадратов эллипсы движения полюса, соответствующие волнам Марковица (**рис.5**).

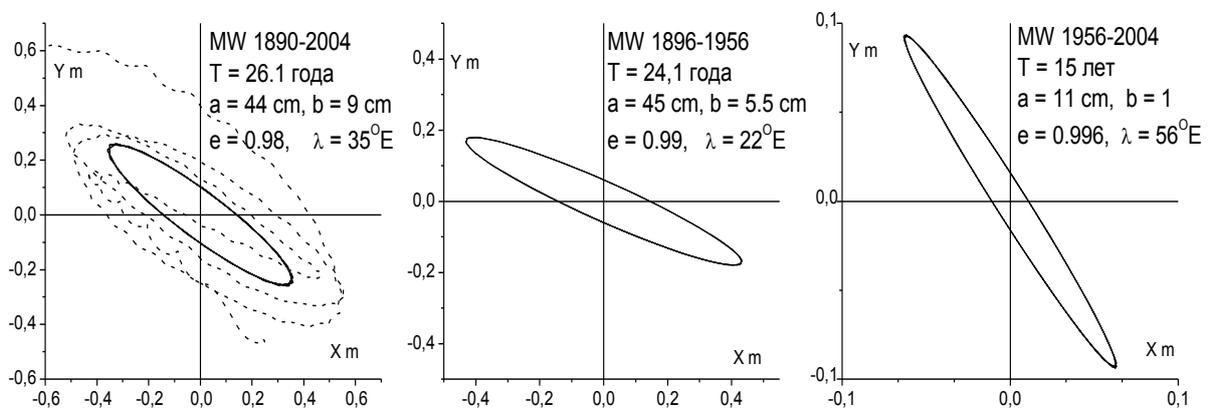


Рис. 5. Эллипсы MW, оцененные по данным IERS C01: слева - для 1890-2004 (пунктиром – по данным из работы (Vondrak et al., 2007)), в центре - для 1896-1956 и справа - для 1956-2004 гг.

Для вычисления функции атмосферного углового момента  $\chi_{xy}$  необходимы реальные поля атмосферного давления. Имеющиеся с 1948 года глобальные ряды атмосферных параметров национального центра предсказаний окружающей среды США (программа NCEP reanalysis), недостаточны по продолжительности для долгопериодических оценок. Поэтому эллипс возбуждения оценивался нами по среднемесячным данным о разности давлений  $dP = P_A - P_I$  на станциях в Исландии ( $\varphi=65^\circ$  N,  $\lambda=22^\circ$  W) и на Азорских островах ( $\varphi=37^\circ$  N,  $\lambda=26^\circ$  W), расположенных почти в центрах действия NAO. Эти данные с 1865 года взяты на сайте (<ftp://ftp.cru.uea.ac.uk>).

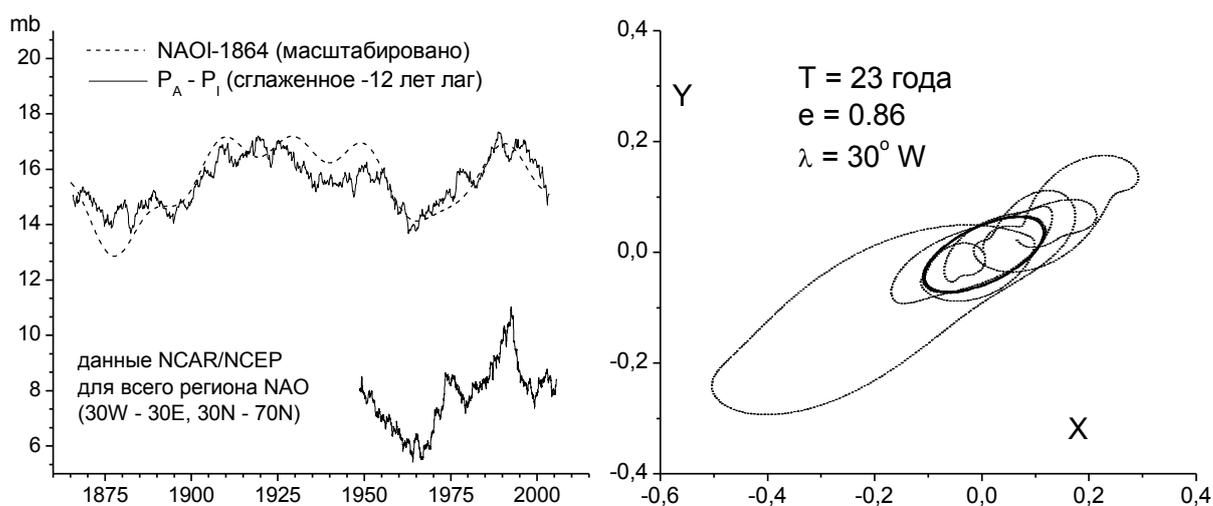


Рис.6. Слева - сглаженная разность давлений  $dP=P_A - P_I$  ( в мбар), пунктир – индекс NAO, внизу – разность давлений по данным NCEP для всего региона NAO с разделительной параллелью по  $\varphi = 55^\circ$  N. Справа – вычисленный по  $dP$  эллипс возбуждения.

На **рис. 6** (слева) видно, что в характере вариаций барического поля в северной Атлантике в 1960 годах имеются заметные изменения вполне сопоставимые с соответствующими изменениями в характере вариаций волн Марковица. Предполагая, что эти колебания относятся ко всему региону NAO ( $S \approx 35$  млн. кв. км.), изменение момента инерции между пиками этого колебания должно составить  $dI_{I3} \approx dP S R^2 \cos \varphi \approx 10^{28}$  кг м<sup>2</sup>, где  $R$  - средний радиус Земли, что почти достаточно для возбуждения колебаний полюса в нужных пределах ( $\sim 0.02''$ ).

На **рис. 6** (справа) приведен эллипс движения полюса, возбуждённый низкочастотными вариациями  $dP$ . Естественно, что он ориентирован по линии, соединяющей координаты использованных станций. Из сравнения с **рис. 5** видно, что ориентация оси колебания MW почти на  $60^\circ$  восточнее оси возбуждения. Помимо того, что эта оценка получена только по двум, соответствующим образом ориентированным, станциям, объяснение этому расхождению может быть следующим. Поскольку воздействие NAO ох-

ватывает северо-западный регион вплоть до долгот  $30^{\circ}$  E -  $40^{\circ}$  E, а на океанских площадях происходит почти полная компенсация нагрузочного эффекта за счёт явления обратного барометра (Сидоренков, 2002), то неизбежно существенное смещение возбуждения в сторону восточных, континентальных долгот, где атмосферные нагрузки практически не компенсируются.

Таким образом, по результатам исследования можно сделать следующие выводы:

Характер низкочастотных колебаний полюса (волн Марковица) изменился в 1960 годах - колебания изменили ориентацию на более восточную (с  $20^{\circ}$  E на  $55^{\circ}$  E), уменьшился их период (с 25 лет до 15 лет) и сильно уменьшилась амплитуда колебаний (с  $0.025''$  до  $0.008''$ ). Фактически доминирующим низкочастотным движением стал почти линейный тренд.

Северо-Атлантическое колебание имеет достаточную мощность вариаций барических полей в области низких частот для возбуждения волн Марковица в движении полюса. Оценки ориентации эллипса возбуждения лежат в меридиане основного направления действия NAO (около  $20^{\circ}$  W –  $30^{\circ}$  W).

Реакция океана на вариации атмосферного барического поля (как обратный барометр) должна приводить к смещению ориентации эллипса возбуждения в сторону совмещения с астрономическими оценками ориентации эллипса вращения для волн Марковица ( $20^{\circ}$  E -  $35^{\circ}$  E).

### **Исследования шестилетних вариаций в неравномерности вращения Земли**

К самым низкочастотным вариациям в скорости вращения Земли относят так называемые декадные вариации с периодами от десятков лет и больше и амплитудами, достигающими единиц миллисекунд времени (*мс*). Фактически это апериодические колебания, в которых сосредоточена основная энергия неравномерного вращения Земли. Причины этих вариаций продолжительности суток (ПС) обычно приписывают различным механизмам взаимодействия мантии и ядра. Сезонные взаимодействия атмосферы и гидросферы Земли с её твёрдыми оболочками вызывают следующие по величине годичные и полугодовые вариации ПС с суммарной амплитудами чуть меньше 1 *мс*. Помимо этого обнаружены промежуточные квазипериодические 6-7 летние вариации ПС (Vondrak, 1976) с амплитудой около 0.2 *мс*, происхождение которых дискутируется от солнечной их обусловленности до возможности их модуляции внутренним ядром Земли (Mound et al., 2003; Abarca del Rio et al., 2003; Dickey, et al., 2003). Именно эти

вариации ПС (ПС-6 в дальнейшем) исследовались нами. Вариации ПС от зональных приливов не превышают долей *мс* и в нашем исследовании полностью исключались.

Наиболее курьёзным обстоятельством в исследовании вариаций ПС-6 является их практическое исчезновение в современных наблюдательных данных. В то время, когда стали появляться работы по исследованию причин их генерации, средства космической геодезии, пришедшие на смену классическим астрооптическим средствам определения ПВЗ (АО ПВЗ), не обнаруживают этих вариаций во вращении Земли, как показано нами в работе (Горшков, Воротков, 2002).

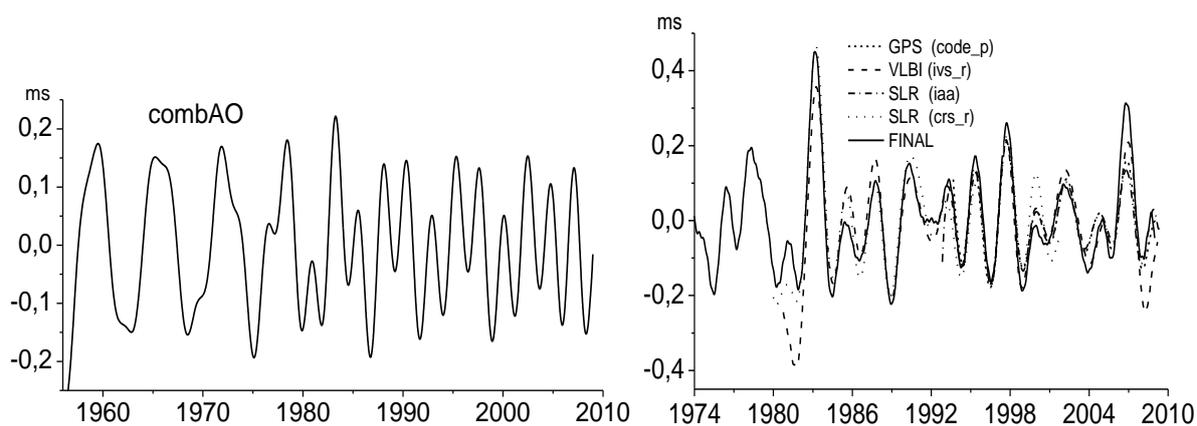


Рис. 7. Вариации ПС с периодами от 2 до 8 лет по данным (слева) классических средств определения ПВЗ и (справа) по данным космических средств.

**Рис.7** демонстрирует эту ситуацию. Нами использованы данные 24 лучших служб АО ПВЗ (Vondrak et al., 2007), наблюдавших до 1992 года, и данные работающих до сих пор 5 служб (в России). Эти данные приведены на левом рисунке (ряд combAO). На правом рисунке приведены данные наиболее продолжительных рядов всех средств космической геодезии и их сводный ряд (Finals). В обоих случаях методом сингулярного спектрального анализа выделены все компоненты с периодами от 2 до 8 лет. Видно, что современные средства вообще не обнаруживают вариаций ПС-6, в то время как классическими средствами они определялись вплоть до прекращения функционирования глобальной структуры этих средств определения ПВЗ.

В эпоху до атомных стандартов времени (до 1956 года) по наблюдениям покрытий звёзд Луной также определялись вариации ПС, хотя и с несоизмеримо худшей точностью (ошибки среднегодовых значений ПС от  $\pm 0,6$  мс в 1830 до  $\pm 0,3$  мс в 1955 годах). Существует два ряда среднегодовых значений ПС: ряд LUNAR-97 (Gross, 1999) с 1832 года и ряд из работы (Stephenson, Morrison, 1984) с 1623 года. Однако из-за больших ошибок только со середины 19 столетия можно говорить о каких-то вариациях ПС помимо декад-

ных. С этого времени указанные ряды сопоставимы, и вариации ПС-6 извлекаются из них просто как остатки после выделения декадных вариаций любым методом (рис.8).

С сожалением отметим, что, несмотря на имеющиеся вплоть до последних лет ряды наблюдений покрытий звёзд Луной, из этих данных не извлечена информация о вариациях продолжительности суток. Эти наблюдения могли бы дать независимый ряд ПС, относящийся, как и соответствующие ряды средств космической геодезии, к центру масс Земли, а не к вертикалу места, как в АО ПВЗ. Отсутствие этих данных и прекращение функционирования глобальной структуры АО ПВЗ затрудняют исследования ПС в данной полосе частот, не позволяя уверенно отделить артефакт от реального изменения структуры вариаций ПС.

Анализируя геофизические причины вариаций ПС-6, мы, вслед за (Abarca del Rio et al., 2003), определили, что в функциях углового момента атмосферы  $\chi_3$  присутствуют составляющие почти полностью ответственные за 2-3 летние вариации ПС, но совсем нет возбуждения на частотах ПС-6. В аналогичных функциях углового момента океана присутствует лишь очень слабое возбуждение с периодами около 5 лет.

Ввиду того, что исчезновение вариаций ПС-6 практически совпало с прекращением функционирования АО ПВЗ, чувствительной к вариациям вертикала в отличие от средств космической геодезии, нами проверена возможность генерации этих вариаций в классических службах вариациями вертикала. Одной из причин таких вариаций отвеса могли бы быть соответствующие вариации уровня моря, т.к. многие бывшие и наиболее «весомые» станции классической подсистемы располагались вблизи побережий морей и океанов. Заметим к тому же, что в гравиметрических исследованиях обнаруживаются близкие 5-6 летние вариации (Charanov et al., 2005). В частности, в исследовании (Li et al., 2001) по данным гравиметрической съёмки в течение 12 лет на двух полигона в Китае были обнаружены приблизительно 6 летние вариации отвесной линии.

По данным службы уровня моря (PSMSL) для регионов, близких по расположению к службам АО ПВЗ в северной Америке, Японии и западной Европе нами были обнаружены вариаций уровня моря с периодами около 5 лет и с амплитудами приблизительно 10-15 см во всех регионах расположения этих станций (Горшков, 2007а). Однако таких вариаций уровня моря, порождающих гравиметрические вариации  $\sim 4$  мкГал, недостаточно для возбуждения вариаций вертикала с частотой ПС-6 даже для станций в непосредственной близости от побережий.

Таким образом, за неимением достаточных альтернативных современным средствам определения ПВЗ данных наблюдений, остаётся предположение, что произошло реальное изменение структуры низкочастотных вариаций ПС, в которых 2-4 летние вариации практически вытеснили 5-7 летние вариации. При этом 2-4 летние вариации почти полностью определяются геофизическим возбуждением за счёт атмосферного углового момента. Одним из теоретически возможных источников вариаций ПС-6 остаются взаимодействия мантия-ядро. В этом случае следует предположить, что в параметрах этого взаимодействия в середине 1980-х годов произошли изменения, приведшие к прекращению работы механизма этого взаимодействия.

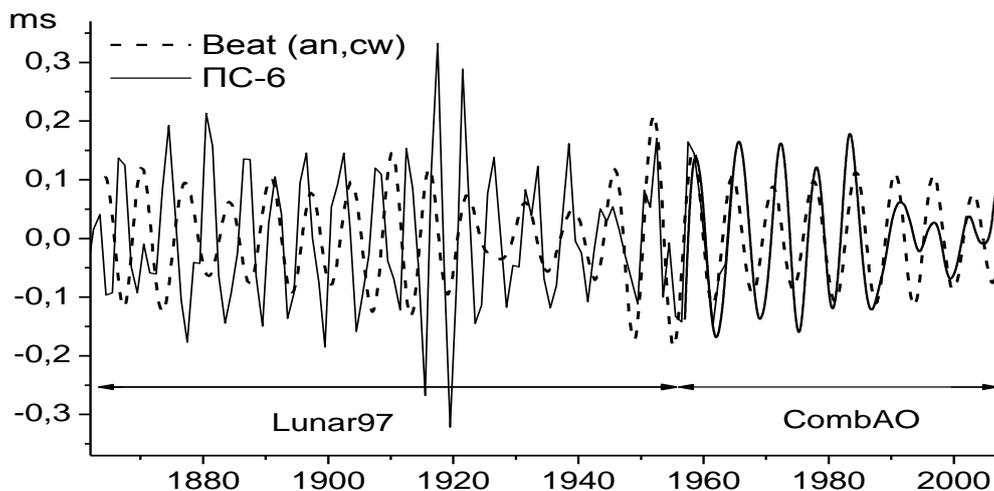


Рис. 8. Вариации ПС-6 (сплошная линия) и биения координат полюса (прерывистая линия).

Однако имеется ещё один параметр во вращении Земли значимо коррелирующий с вариациями ПС-6 (Горшков, Щербакова, 2002). На близкой к вариациям ПС-6 частоте происходят биения координат полюса ( $T_{beat} = T_{cw}T_{an}/(T_{cw}-T_{an}) \cong 6.3$  года), обусловленные взаимодействием их основных мод – годичной ( $an$ ) и чандлеровской ( $cw$ ). На **рис. 8** видно, что после известного затухания чандлеровской моды в 1920-х годах биение координат полюса (фактически радиус полудия после снятия движения среднего полюса) и вариации ПС-6 находятся в замечательном согласии (корреляция  $> 0.8$ ). При этом в период синфазного движения координат полюса, т.е. когда размах колебаний полюса максимален, скорость вращения Земли замедляется. Такая перекачка энергии между компонентами вектора вращения Земли интуитивно понятна. Причина этого может быть в глобальной нескомпенсированности центробежного потенциала, генерирующего полюсной прилив. Однако это предположение требует дальнейших исследований.

В качестве итога представленных исследований можно отметить, что долгопериодические вариации вектора вращения Земли характеризуются переменной квазиритмич-

ностью. Это относится к вариациям амплитуды и фазы ЧДП, волнам Марковица и вариациям в скорости вращения Земли – декадным и ПС-6. Иногда эти вариации синхронизируются, как например, вариации амплитуды ЧДП и декадные вариации скорости вращения Земли (Горшков, 2006), что в целом характерно для многих геофизических процессов. Геофизическая среда очень сложная система, в ней имеются широкие возможности для параметрического резонанса, поэтому поиск и изучение динамики структурных особенностей рядов ПВЗ представляется одной из актуальных задач геодинамики.

### **Литература:**

- Воротков М.В., Горшков В.Л., 2002.** Динамика движения полюса и долгопериодические вариации скорости вращения земли, Изв. ГАО, №216, с. 415-425.
- Горшков В.Л., Н.В.Щербакова, 2002.** Изменение долготы Пулково и долгопериодические вариации скорости вращения земли, Изв. ГАО РАН, №216, с.430-437.
- Горшков В.Л., 2006.** Об амплитудной модуляции чандлеровского движения полюса Земли, Изв. ГАО РАН, №218, с.209-215.
- Горшков В.Л., 2007.** Связь низкочастотных вариаций полюса Земли с Северо-Атлантическим колебанием, *Астрономический Вестник*, №1, с. 70-76.
- Горшков В.Л., 2007а.** О возможной причине 5-7 летних вариаций продолжительности суток, Труды ВАК-2007, Казань, изд. КГУ, стр. 32-34.
- Данилов Д.Л., Жиглявский А.А., 1997.** Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница». СПбГУ. 1997. С. 308.
- Зыков И.А., Костина Л.Д., 1996.** Персиянинова Н.Р., Прудникова Е.Я., Зыков И.А., Хохлов В.В., 90 лет зенит-телескопу Фрейберга-Кондратьева. Основные научные результаты. Изв. ГАО № 210. С.121-130.
- Иванов А.А., 1895.** Вращательное движение Земли. С-Петербург. С.95.
- Рыхлова Л.В., 1970.** Координаты полюса Земли за 1846.0-1891.5 годы. Сообщ. ГАИШ. №163, с.3-10.
- Манк У., Макдональд Г., 1964,** Вращение Земли, Мир, М., 385 с.
- Миллер Н.О., 2008.** «Об изменении амплитуды и фазы Чандлеровского движения полюса», «Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка». №5, с.48-49.
- Миллер Н.О., Прудникова Е.Я., 2009.** «Сопоставление изменений широты Пулково с международными наблюдениями за 1904-2006 годы», Изв. ГАО РАН, №219.
- Мориц Г., Мюллер А., 1992,** Вращение Земли: теория и наблюдения, Киев, Наукова думка, 512 с.
- Наумов В.А., 2004.** Особенность конструкции зенит-телескопа ЗТФ-135. Изв. ГАО. № 217. С. 543-545.
- Орлов А.Я., 1961.** Свободная нутация по наблюдениям в Пулкове с 1842 по 1912 г. Избранные труды. Т.1. АН Украинской ССР. Киев. с.95-113.
- Сидоренков Н.С., 2002.** Физика нестабильностей вращения Земли, М., Физматлит, с. 385.

- Федоров Е.П., А.А.Корсунь, С.П.Майор, Н.И.Панченко, В.К.Тарадий, Я.С.Яцкив, 1972.** Движение полюса Земли с 1890 по 1969. Киев. С. 264.
- Abarca del Rio, R., Gambis, D., Salstein, D., Nelson P., Dai, A., 2003.** Solar activity and Earth rotation variability, *Journal of Geodynamics*, 36, 423-443.
- Boberg, F., Lundstedt, H., 2003.** Solar wind electric field modulation of NAO: A correlation analysis in the lower atmosphere, *Geoph. Res. Lett.*, 30(15), 1825, doi: 10.1029/2003GRL017360.
- Chao B., Zhou Y., 1999.** Meteorological excitation of interannual polar motion by the North Atlantic Oscillation, *J. of Geodynamics*, 27, 61-73.
- Chapanov, Ya., Vondrak J., Gorshkov V., Ron C., 2005,** Six-year cycles of the Earth rotation and gravity, in *Proc. EGU G9 Symp. «Geodetic and Geodynamic programmes of the CEI»*, Vienna, Austria, April 2005, pp. 221 – 230.
- Dickey, J., Marcus, S., de Viron, O., 2003.** Coherent interannual and decadal variations in the atmosphere-ocean system, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 27-31.
- Dumberry M., Bloxham J., 2002.** Inner core tilt and polar motion, *Geophys. J. Int.*, V. 151, 377-392.
- Jones, P.D., Jónsson, T. and Wheeler, D., 1997.** Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland, *Int. J. Climatol*, V. 17, P. 1433-1450.
- Kushnir, Y., 1994.** Interdecadal Variations in North Atlantic Sea Surface Temperature and Associated Atmospheric Conditions, *J. Climate*, Vol. 7, No. 1, pp. 141–157.
- Lambeck, K., 1980.** The Earth's variable rotation: geophysical causes and consequences. Cambridge University Press, pp.449.
- LI Hui, FU Guang-yu, LI Zheng-xin, 2001.** Plumb line deflection varied with time obtained by repeated gravimetry, *Acta Seismologica Sinica*, V.14, No.1, p. 67-71.
- Markowitz, W., 1960.** Latitude and longitude and the secular motion of the pole, *Methods and Techniques in Geophysics*. (ed. Runcorn S.K.), Interscience Publ., London, p. 325–361.
- Mound J. E., Buffett B. A., 2003.** Interannual oscillations in length of day: Implications for the structure of the mantle and core, *J. Geophys. Res.*, 108, no B7, 2334, doi:10.1029/2002JB002054.
- Sekiguchi N., 1975.** On the Latitude Variations of the Interval Between 1830-1860. *Journal of the Geodetic Society of Japan*. Vol. 21. No. 3. P. 131-141.
- Vondrak J., 1977.** The rotation of the Earth between 1955.5 – 1976.5, *Studia geophys. et geod.*, 21, 107-117.
- Vondrak J., Ron C. and Stefka V., 2007.** Solution of Earth orientation parameters in 20th century based on optical astrometry and new catalog EOC-3, in «A Giant Step: from Milli- to Micro-arcsecond Astrometry», *Proceedings IAU Symposium No. 248*, eds. W. Jin, I. Platais & M. Perryman.
- Wanach B., 1892.** Ableitung der Polhohenschwankungen aus altern Pulkowacher Beobachtungen in ersten Vertical. *Astron. Nachr.* 130. P.246.