

УДК 521.937

ЧАНДЛЕРОВСКОЕ КОЛЕБАНИЕ В ИЗМЕНЕНИЯХ ШИРОТЫ ПУЛКОВА ЗА 170 ЛЕТ

© 2011 г. Н. О. Миллер

Главная астрономическая обсерватория РАН, С.-Петербург

Поступила в редакцию 01.04.2010 г.

В работе выполнено исследование чандлеровского компонента движения полюса, полученного из изменений широты Пулкова за 170 лет (1840–2009 гг.). Для продления ряда изменений широты Пулкова назад в прошлое до 1840 г. использовались первые пулковские наблюдения на пассажном инструменте Репсольда в первом вертикале и на большом вертикальном круге Эртеля. В работе использовались разные методы анализа нестационарных временных рядов, таких как вейвлет-анализ, методы полосовой фильтрации, сингулярный спектральный анализ, преобразования Фурье и Гильберта. Было выполнено сопоставление изменений широты Пулкова за 1904–2006 гг., полученных из наблюдений на ЗТФ-135 и вычисленных из международных данных. В результате было показано, что закономерности изменения амплитуды и фазы чандлеровского движения полюса со временем можно исследовать, основываясь на длительных рядах наблюдений широты одной обсерватории, даже если в таких наблюдениях имеются пропуски. Впервые исследование изменения чандлеровского колебания проведено на столь длинном ряде изменений широты Пулкова с использованием разных методов. Длинный ряд наблюдений и методы анализа нестационарных временных рядов позволили выявить две похожие структуры, повторяющиеся в 1845–1925 гг. и 1925–2005 гг., которые хорошо прослеживаются в изменениях амплитуды и фазы со временем. Наличие данной структуры может говорить о низкочастотных закономерностях поведения чандлеровского движения полюса, одним из проявления которых является хорошо известная особенность в районе 1925 г. Методом наложения эпох была выполнена оценка периода изменения амплитуды с одновременным изменением фазы этого колебания, в результате которой было получено значение периода 80 лет. Кроме того, показаны преимущества использования сингулярного спектрального анализа для исследования долгопериодических рядов со сложной структурой.

ВВЕДЕНИЕ

В движении полюса Земли присутствует множество компонентов, наиболее значимыми из которых являются годовое и чандлеровское движение полюса (ЧДП) с периодом 428–435 сут. Эти два периодических движения легко различаются в наблюдениях широты и многократно исследовались разными авторами (Федоров, Яцкив, 1964; Сидоренков, 2002; Vondrak, Ron, 2005). Наличие годовой гармоник объясняется сезонными перемещениями воздушных и водных масс по земной поверхности. Чандлеровское колебание представляет собой квазигармоническое колебание сложной структуры и чаще всего связывается с периодом свободной нутации, наличие которого было теоретически предсказано Л. Эйлером в конце XVIII в. Предполагая Землю твердым однородным телом и допуская, что на нее не действуют внешние силы, Эйлер показал, что полюс должен описывать конус вокруг главной оси инерции земного сфероиды с периодом около 305 сут. Первые исследователи занимались подтверждением изменчивости широты и оценивали период ее изменения, исходя из априорного предположения наличия периода Эйлера. В Пулковской обсерватории первым наблюдателем, который вычислил

из своих наблюдений на большом вертикальном круге Эртеля широту и обнаружил ее изменение, был Х.И. Петерс. Следующие исследования изменений широты были выполнены М.О. Нюренем. Петерс и Нюрен в своих исследованиях не заметили изменения широты с периодом больше одного года, так как в своих вычислениях использовали значение периода, предсказанное Эйлером. Нюрен получил период, близкий к 430 сут, только при анализе всех наблюдений на вертикальном круге, выполненном для создания каталога 1885 г. (Иванов, 1895). Эти исследования предшествовали работам S. Chandler, который в 1891 г. начал публикацию своих статей, посвященных изменчивости широты, и впервые объявил о существовании периода около 428 сут (Chandler, 1891). За три года (1891–1893) им было опубликовано восемь статей в *Astronomical Journal* под общим названием “On the variation of latitude”. Он выполнил анализ 45-ти коротких рядов наблюдений, содержащих более тридцати тысяч отдельных наблюдений, полученных в различных обсерваториях мира с 1841 по 1890 гг. В результате был сделан вывод о том, что в изменениях широты имеются два колебания: с периодами около 428 и 365 сут. Кроме того, позднее, исключив годовое колебание, Chandler обнаружил, что оставшееся коле-

бание состоит из двух гармоник: первая с периодом 428.5 сут (1.17 г.) и амплитудой $0''.14$ а вторая с периодом 436 сут (1.19 г.) и амплитудой $0''.09$ (Chandler, 1901a). Исходя из предположения наличия двух гармоник и учитывая значения их периодов, он предложил модель (Chandler, 1901b), в которой новое уменьшение амплитуды этого колебания должно было произойти около 1910 г. В действительности уменьшение амплитуды ЧДП с одновременной сменой фазы произошло почти на 20 лет позднее: около 1930 г. Первым, кто обнаружил эту особенность, был А.Я. Орлов (Орлов, 1944). Более подробные исследования ЧДП приведены в монографиях (Манк, Макдональд, 1964; Lambeck, 1980), а также в более поздних работах (Guinot, 1982; Курбасова и др., 2002; Guo и др., 2005; Vondrak, Ron, 2005; Brzezinski, 2005).

В работах (Миллер, 2008; Malkin, Miller, 2009) при анализе чандлеровского компонента, полученного из наиболее длинного ряда координат полюса IERS C01 (<http://hpiers.obspm.fr/iers/eop>) за 1846–2008.5 гг., было обнаружено наличие трех областей (около 1846, 1925, 2005 гг.) резкого изменения амплитуды ЧДП, сопровождаемого изменением фазы. Указанием на наличие интервала падения амплитуды в начале ряда могут служить работы S. Chandler, А.А. Иванова, В. Wanach, Н. Kimura, А.С. Васильева, А.Я. Орлова, N. Sekiguchi, в которых проведено исследование изменений широты различных обсерваторий мира в период 1836–1860 гг. В работе (Миллер, Прудникова, 2010) был выполнен анализ статей этих авторов, из которого следует общий вывод, что амплитуда чандлеровского колебания на интервале 1840–1850 гг. равна $\sim 0''.08$ и это значение существенно меньше, чем на более позднем интервале, вплоть до 1920 г. В работах (Орлов, 1961) и (Sekiguchi, 1975) показано наличие изменения фазы чандлеровского колебания на этом интервале. В своей работе Sekiguchi делает вывод, что особенность поведения ЧДП на этом интервале аналогична той, что имеет место в 1920-х годах.

Для исследования низкочастотных вариаций в колебаниях полюса необходимы длительные однородные ряды наблюдений. В Пулковской обсерватории имеются многолетние астрометрические ряды наблюдений на разных инструментах, выполненные, начиная с 1840 г. В данной работе исследуется чандлеровская составляющая движения полюса, полученная из изменений широты Пулково за 170 лет (1840–2009 гг.). Для анализа используются наблюдения на пассажном инструменте в первом вертикале (ПИПВ), на большом вертикальном круге (БВК) и на зенит-телескопе Фрейберга–Кондратьева (ЗТФ-135). Исследование рядов координат полюса и изменений широты Пулково на максимально доступном интервале и использование методов, предназначенных для исследования сложных нестационарных сигналов, позволили выявить новые долгопериодические закономерности пове-

дения ЧДП. Были обнаружены три области уменьшения амплитуды с одновременным изменением фазы этого колебания, что может означать наличие повторения с периодом около 80 лет хорошо известной особенности в середине интервала.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ

Максимальный интерес к исследованию структуры чандлеровского колебания можно отнести к концу XX в., когда теория анализа сложных нестационарных сигналов еще не была так тщательно проработана, как в настоящее время. Для разделения движения полюса на компоненты разными авторами использовались различные методы. Многие методы, используемые для этой цели, не позволяли отделить полезный сигнал от шума на всем интервале наблюдений, особенно в том случае, когда уровень шума разный на разных участках ряда, что является характерным для рядов координат полюса. В настоящее время наиболее часто используемыми методами для исследования нестационарных временных рядов являются динамический спектральный анализ и вейвлет-анализ.

Для выделения чандлеровской составляющей движения полюса в данной работе были использованы следующие методы.

– Сингулярный спектральный анализ (ССА) (Golyandina, 2001). Этот метод относится к классу методов естественных ортогональных функций, для которых базисные функции определяются из самих данных. В случае вейвлет-анализа разложение ряда выполняется по выбранному базису. Метод ССА имеет хорошее разрешение как по времени, так и по частоте, позволяет исследовать ряды со сложной структурой, а также проследить динамику поведения амплитуды, фазы и частоты во времени. Кроме того, полезный сигнал хорошо отделяется от шума, даже если уровень шума меняется на разных участках ряда. Многомерная реализация метода дает возможность анализировать совокупности данных как единое целое, выделяя общие закономерности или выявляя особенности. В работах (Vityazev, 2000; Воротков и др., 2002) были показаны преимущества использования данного метода для анализа рядов параметров вращения Земли.

– Вейвлет-анализ (Витязев, 2001). В случае вейвлет-анализа для каждой конкретной задачи необходимо выбрать базис или тип вейвлета. Для анализа координат полюса был использован вейвлет Морле. Подробное обоснование такого выбора приводится в (Кудряшова, 2000), а сравнение этого метода с ССА – в (Vityazev, 2000).

– Метод полосовой фильтрации. В данной работе была выполнена фильтрация с использованием эллиптического частотного полосового фильтра пятого порядка Золотарева–Кауэра (Ellip, Matlab Signal Processing Toolbox). Пример использования

Таблица

Наблюдения	Состав ряда				
	$\Delta\varphi_{\text{Пипв}}$	$\Delta\varphi_{\text{БВК1}}$	$\Delta\varphi_{\text{БВК2}}$	$\Delta\varphi_{\text{ЗТФ-135}}$	$\Delta\varphi_{\text{C01}}$
Ряд 1	1840–1843	1842–1848	–	–	1846–2010
Ряд 2	1840–1843	1842–1848	–	1904–1941, 1948–2007	1846–1904, 1941–1948, 2006–2010
Ряд 3	1840–1843	1842–1848	1863–1875	–	1846–2010
Ряд 4	1840–1843	1842–1848	1863–1875	1904–1941, 1948–2007	1846–1904, 1941–1948, 2006–2010

других фильтров и анализ получаемых результатов можно посмотреть в работе (Malkin, Miller, 2009).

Изменения амплитуды и фазы вычислялись при помощи комплексного преобразования Гильберта (Hilbert, Matlab Signal Processing Toolbox).

ИССЛЕДУЕМЫЕ РЯДЫ

В данной работе используются наиболее длинные ряды координат полюса IERS C01, 1846–2010 гг. (<http://hpiers.obspm.fr/iers/eop>) с интервалом 0.1 год. Это комбинированные ряды, состоящие из отдельных частей, построенных на основе наблюдений различной точности и плотности. Для формирования ряда C01 использовались наблюдения, полученные в различных обсерваториях мира, при этом применялись как различные методы наблюдений, так и различные методы обработки. В этот ряд вошли наблюдения, выполненные с помощью как современных, так и классических средств определения параметров вращения Земли (ПВЗ). Данные на интервале 1846–1891.5 гг. были получены Рыхловой (1970) из наблюдений в Пулкове, Гринвиче и Вашингтоне.

Изменения широты Пулкова вычислялись из рядов координат полюса IERS C01 X_p, Y_p по формуле

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \varphi - \varphi_0 = X_p \cos \lambda - Y_p \sin \lambda = \\ &= 0.8631 X_p - 0.5049 Y_p, \end{aligned} \quad (1)$$

где X_p, Y_p – координаты полюса, λ – долгота ЗТФ-135.

Кроме того, использовались однородный ряд наблюдений широты Пулкова, полученный на ЗТФ-135 ($\Delta\varphi_{\text{ЗТФ-135}}$) за 1904.8–2007.0 гг., и четыре объединенных ряда изменений широты Пулкова (1840.4–2010.0) с шагом 0.1 год. В связи с военными действиями ЗТФ-135 был демонтирован в 1941 г., и только в 1948 г. на нем возобновились систематические наблюдения. Поэтому ряд наблюдений на ЗТФ-135 имеет пропуск в интервале 1941–1848 гг.

Этот ряд отличается высокой устойчивостью и однородностью, особенно в период 1948–1994 гг.

Из анализа всех имеющихся рядов наблюдений широты за 1840–1855 гг. (Миллер, Прудникова, 2010) для формирования объединенного ряда изменений широты Пулкова были выбраны два ряда: ряд наблюдений В.Я. Струве на пассажном инструменте Репсольда в первом вертикале ($\Delta\varphi_{\text{Пипв}}$) за 1840–1843 гг. и ряд наблюдений Х.И. Петерса на большом вертикальном круге Эртеля ($\Delta\varphi_{\text{БВК1}}$) за 1842–1848 гг. Также были использованы наблюдения Gylden (1863–1871 гг.) и Нюрена (1871–1875 гг.) на большом вертикальном круге (Иванов, 1895) ($\Delta\varphi_{\text{БВК2}}$). Эти наблюдения выполнялись с целью абсолютных определений координат звезд. При определении рядов абсолютных склонений звезд образуются и ряды определения широты, которые могут использоваться для изучения движения полюсов. Состав четырех объединенных рядов изменений широты Пулкова приведен в таблице.

Ряд 1 состоит из:

1) Ряд изменений широты Пулкова, полученного из наблюдений на пассажном инструменте в первом вертикале за 1840–1843 гг. ($\Delta\varphi_{\text{Пипв}}$).

2) Ряд изменений широты Пулкова, полученного из наблюдений на большом вертикальном круге за 1842–1846 гг. ($\Delta\varphi_{\text{БВК1}}$).

3) Ряд изменений широты Пулкова, вычисленного из координат полюса IERS C01 (1846–2010.0) по формуле (1) ($\Delta\varphi_{\text{C01}}$).

В ряд 2 вместо изменений широты Пулкова, вычисленных из координат полюса, включены наблюдения на ЗТФ-135 за 1904.8–1941.5 гг. и 1948.7–2007.0 гг. ($\Delta\varphi_{\text{ЗТФ-135}}$).

Ряд 3 аналогичен ряду 1, а ряд 4 аналогичен ряду 2, но на интервале 1863.5–1875.5 гг. вместо изменений широты Пулкова, вычисленных из координат полюса, включены наблюдения Gylden

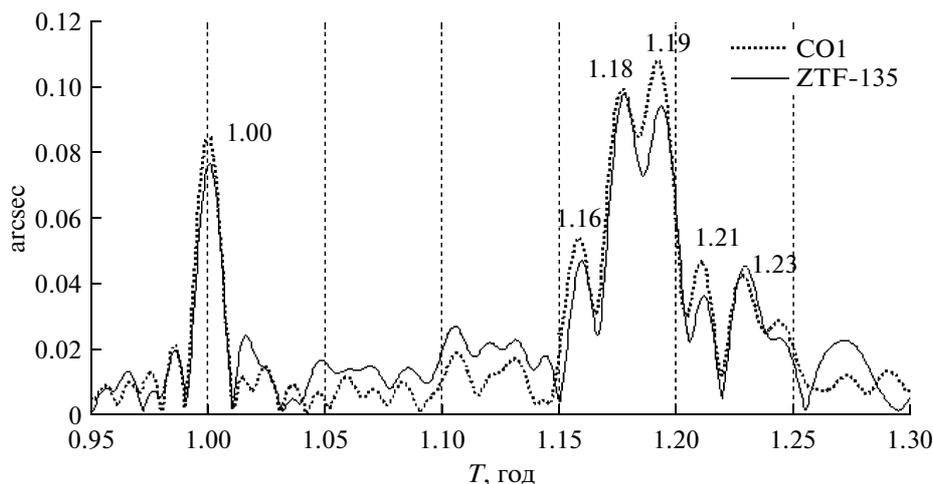


Рис. 1. Результаты Фурье-рядов $\Delta\varphi_{ZTF}$ (сплошная линия) и $\Delta\varphi_{CO1}$ (пунктирная линия) на всем интервале наблюдений 1904–2006 гг. для диапазона периодов с 0.8 года до 1.3 года.

(1863–1871 гг.) и Нюрена (1871–1875 гг.) на большом вертикальном круге (Иванов, 1895) ($\Delta\varphi_{БВК1}$).

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЯДОВ ИЗМЕНЕНИЙ ШИРОТЫ ПУЛКОВА, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ И ИЗ МЕЖДУНАРОДНОГО РЯДА

В данном разделе сопоставляются результаты исследований уникального ряда наблюдений широты на ЗТФ-135 Пулковской обсерватории, полученных в течение 102 лет, и изменений широты Пулкова, вычисленных по формуле (1) из рядов координат полюса X_p , Y_p IERS C01 за 1904–2006 гг. В работе (Миллер, Прудникова, 2009) приводится более детальный анализ этих рядов.

На рис. 1 представлен результат анализа Фурье рядов изменений широты Пулкова, полученной из наблюдений на ЗТФ-135 ($\Delta\varphi_{ZTF}$) (сплошная линия), и изменений широты Пулкова, вычисленной по формуле (1) из рядов координат полюса ($\Delta\varphi_{CO1}$) (пунктирная линия) для диапазона периодов 0.95–1.3 года. Спектральный анализ обоих рядов выделяет две области с максимальными частотами: два основных пика в районе чандлеровской частоты и годовой. Значения периодов для обоих рядов одинаковые, отличия имеются только в значениях амплитуды. Причем амплитуды как годового, так и чандлеровского колебания (максимальный пик) больше для $\Delta\varphi_{CO1}$ на 50 угл. мс.

На рис. 2 и 3 представлены ряды изменения широты (рис. 2 – $\Delta\varphi_{CO1}$, рис. 3 – $\Delta\varphi_{ZTF}$) с шагом 0.1 года и разложение их на главные компоненты методом ССА при длине окна ($M = 515$), равной половине длины ряда за 1904.8–2007.0 гг.

В основе метода ССА лежит преобразование временного ряда в матрицу и ее сингулярное разложение, приводящее к разложению исходного ряда на аддитивные компоненты. При использовании этого метода проводится вычисление выборочной корреляционной матрицы, собственные числа (λ_i) которой являются выборочными дисперсиями соответствующих главных компонент. Эти компоненты определяются таким образом, чтобы первый из них давал максимально возможный вклад в суммарную дисперсию. Выполняемое преобразование не меняет сумму дисперсий, а только перераспределяет ее так, чтобы наибольшая дисперсия приходилась на первые компоненты. Таким образом, появляется возможность исключить из анализа компоненты, имеющие малые дисперсии. Процент вклада вычисляется по формуле:

$$V_i = \frac{\lambda_i}{M} \times 100\%, \quad (2)$$

где M – длина окна, λ_i – i -е собственное число.

С помощью ССА были получены основные компоненты движения полюса: трендовая (рис. 2а, 3а), чандлеровская (рис. 2б, 3б) и годовая (рис. 2в, 3в). Вклад суммы основных компонентов в исходный процесс составляет для ряда $\Delta\varphi_{CO1}$ ~93%, а для ряда $\Delta\varphi_{ZTF}$ – ~71%. Одним из объяснений такого различия может быть наличие более высокого шума на всем интервале для наблюдений на ЗТФ-135. Из всех рисунков видно хорошее согласие поведения амплитуды ЧДП, полученной из наблюдений на ЗТФ-135 и вычисленной из международных данных. Надо отметить, что, несмотря на продолжительный пропуск в наблюдениях на интервале с 1941.5 по 1948.2 гг., методом ССА удалось выделить чандлеровский и годовой компоненты почти без

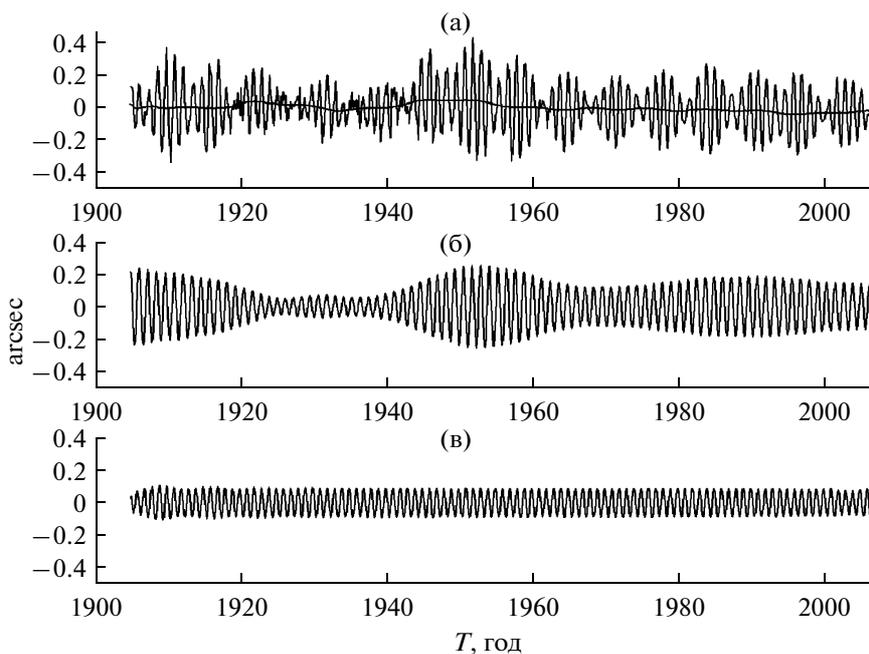


Рис. 2. Ряд изменений широты ($\Delta\varphi_{C01}$), полученный из международных данных за 1904–2006 гг., и его тренд (а), чандлеровский компонент (б) и годовой компонент (в).

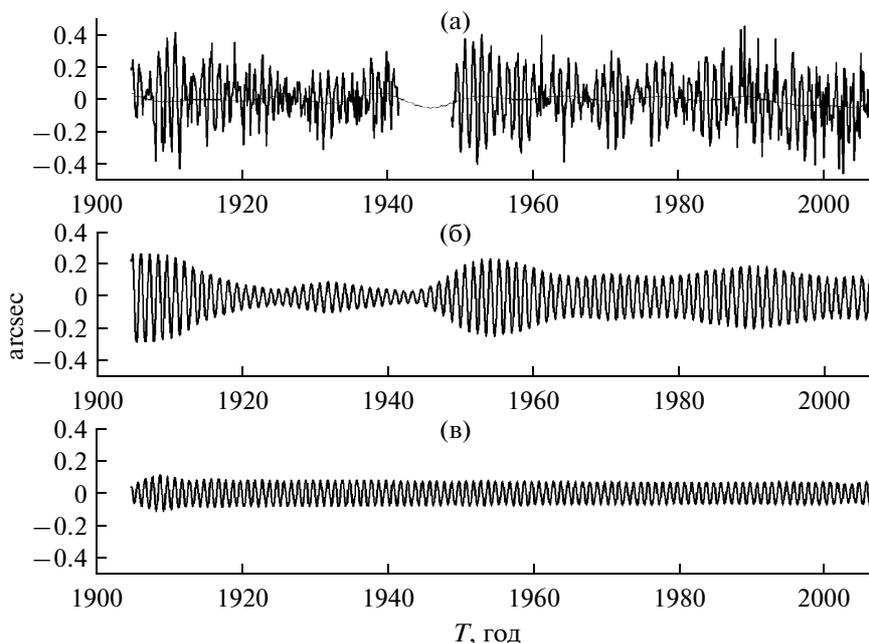


Рис. 3. Ряд изменений широты Пулкова ($\Delta\varphi_{ZTF}$), выведенный из наблюдений на ЗТФ-135, и его тренд (а), чандлеровский компонент (б) и годовой компонент (в).

искажения информации (рис. 3). В случае использования вейвлет-анализа (рис. 4) четко прослеживается искажение поведения чандлеровской составляющей на интервале 1941–1948 гг., который соот-

ветствует пропуску в наблюдениях на ЗТФ-135. Таким образом, имеется возможность с помощью ССА исследовать долгопериодические закономерности поведения амплитуды и фазы ЧДП, основыва-

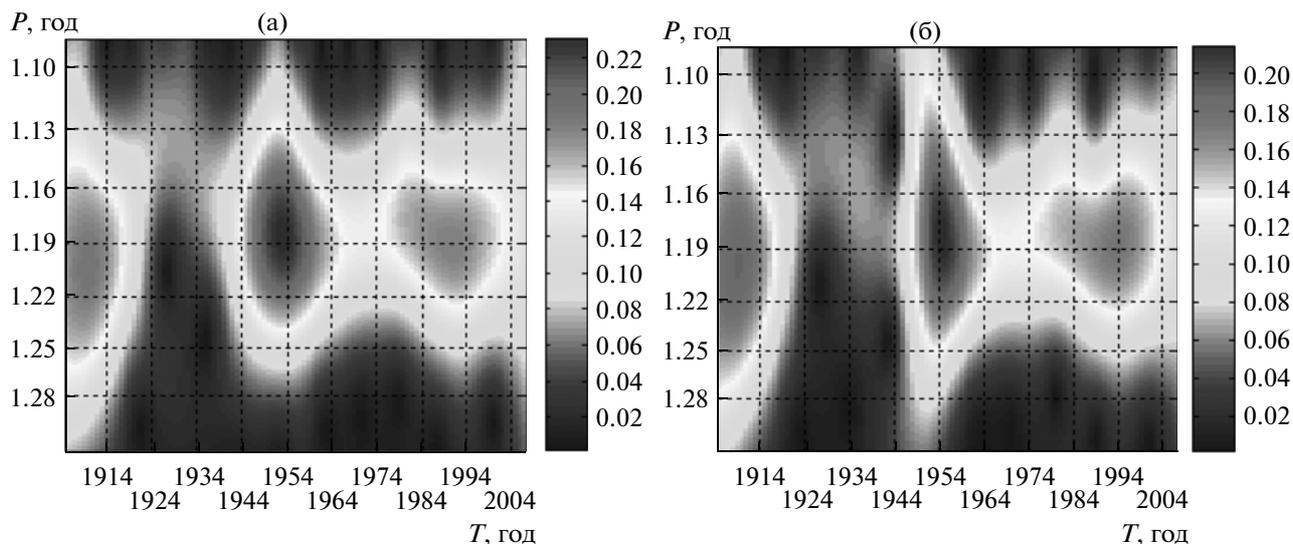


Рис. 4. Результат вейвлет-анализа ряда изменений широты Пулкова, полученного из международных данных ($\Delta\varphi_{C01}$) (слева) и из наблюдений на ЗТФ-135 ($\Delta\varphi_{ZTF}$) (справа).

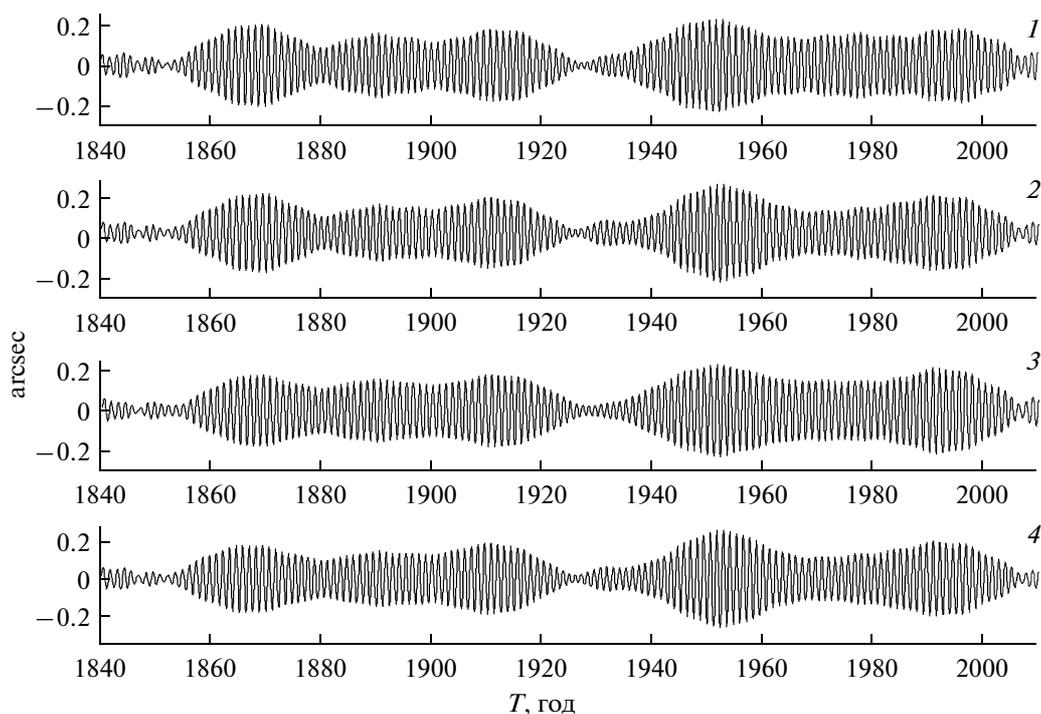


Рис. 5. Чандлеровские компоненты, полученные из объединенных рядов изменений широты Пулкова. Цифрами обозначены номера объединенного ряда.

ваясь на длительных рядах наблюдений одной обсерватории, даже если в них имеются длительные пропуски.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧДП

В данной работе ЧДП было исследовано с помощью трех методов анализа: ССА, метода полосовой

фильтрации с использованием эллиптического фильтра пятого порядка Золотарева–Кауэра с полосой пропускания 1.19 ± 0.8 года (Ellip, Matlab Signal Processing Toolbox) и вейвлет-анализа (базис Морле). Для всех четырех объединенных рядов изменений широты Пулкова, описанных в разделе 3, при использовании ССА длина окна равнялась половине длины ряда ($M = 848$). По формуле (2) была

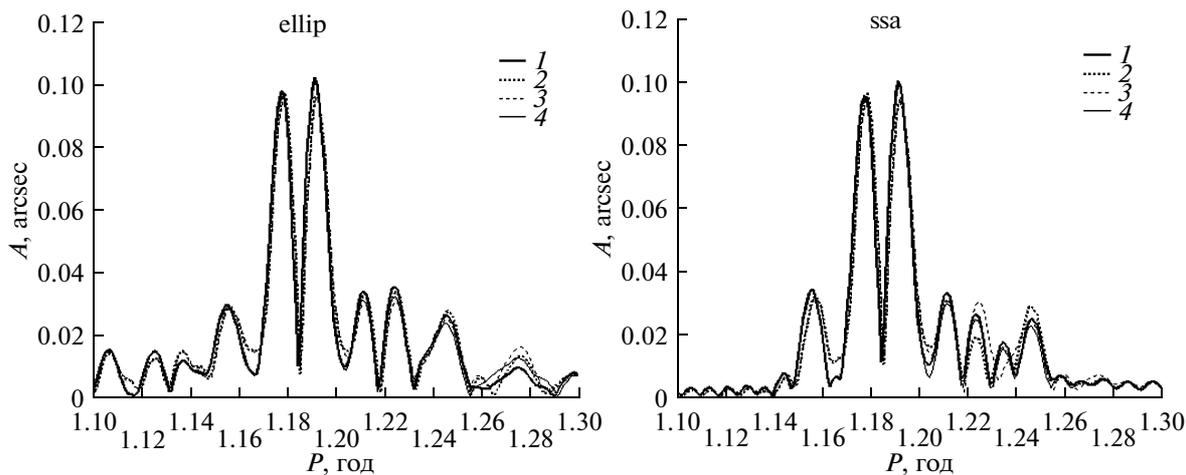


Рис. 6. Спектры чандлеровского компонента, полученного из объединенных рядов изменений широты Пулкова двумя методами: полосовой фильтрации (слева) и ССА (справа). Цифрами обозначены номера рядов.

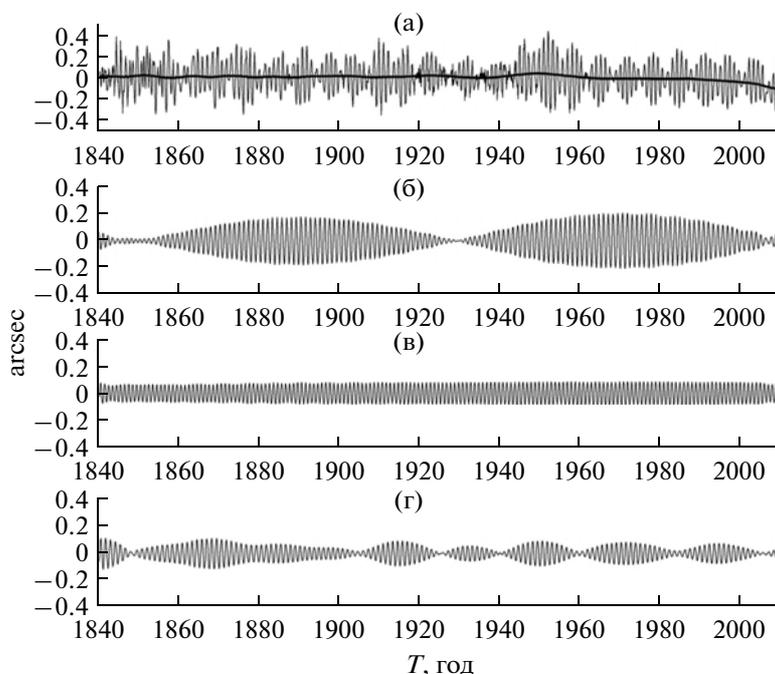


Рис. 7. Объединенный ряд изменений широты Пулкова (ряд 1) с нелинейным трендом (а), первый чандлеровский (б), годовой (в) и второй чандлеровский компонент (г), полученные ССА.

выполнена оценка процента вклада в исходный процесс для каждого ряда. Сумма основных компонентов (чандлеровского, годового и трендового) для объединенных рядов 1 и 3 изменений широты Пулкова составила ~86% (~65, ~19 и ~2% соответственно), а для рядов 2 и 4 – ~73% (~63, ~9, ~1%). На рис. 5 приведено чандлеровское колебание для всех четырех объединенных рядов Пулкова (цифрами обозначен номер объединенного ряда). Частотные пики Фурье-спектра всех этих рядов практически совпадают, хотя имеется некоторое отличие в значении

амплитуды (рис. 6). Два максимальных центральных пика одинаковы для двух использованных методов фильтрации, некоторое различие имеется только для частот с малой амплитудой ($A < 40$ угл. мс).

Использование ССА дает возможность не только выполнить разделение на компоненты, но и провести анализ структуры исследуемого ряда, особенно тогда, когда в распоряжении исследователя имеется длинный ряд наблюдений. В нашем случае впервые удалось получить детальное представление о структуре исследуемого ряда. На рис. 7 приведены

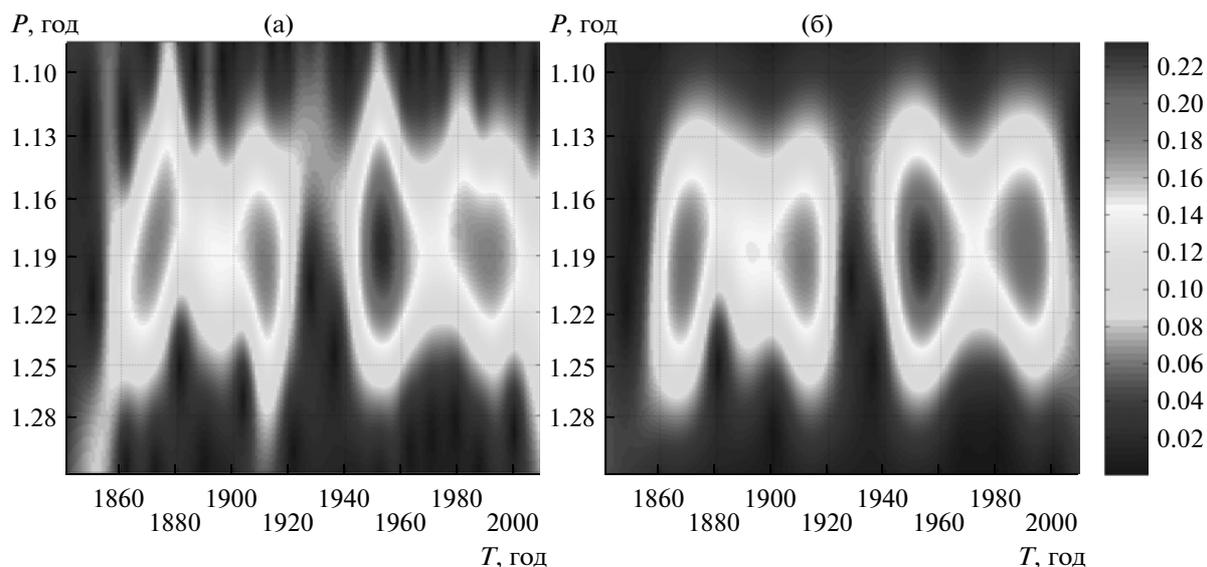


Рис. 8. Результат вейвлет-анализа объединенного ряда 1 изменений широты Пулкова (слева) и чандлеровского компонента (справа), полученного из этого ряда.

объединенный ряд 1 изменений широты Пулкова и его структура. На рис. 7а приведены исходный ряд и нелинейный тренд, полученный ССА (вклад 1–2%). Максимальным (вклад ~55%) является компонент (рис. 7б), соответствующий двум главным пикам спектра ЧДП. Поведение этого компонента на двух интервалах: 1845–1925 гг. и 1925–2005 гг., очень схоже, причем периоды на первом интервале и втором интервалах близки и соответственно равны 1.183 года (432 дня) и 1.185 года (433 дня), максимальная амплитуда на первом интервале составила 184 угл. мс, а на втором – 211 угл. мс. Чандлеровский компонент имеет три области резкого уменьшения амплитуды вблизи 1845, 1925, 2005 гг. Следующий по вкладу (~20%) компонент представляет собой годовое колебание (рис. 7в). Последний из рассматриваемых компонентов (рис. 7г), соответствующий малым пикам спектра ЧДП, не имеет регулярного характера и составляет ~10% от исходного ряда. Такое распределение компонентов может указывать на наличие двух структурных составляющих в ЧДП, что может быть полезно для построения модели движения полюса. В работе (Воротков и др., 2002) также было показано, что чандлеровская составляющая колебания полюса уверенно распадается на два компонента, при этом усредненная амплитуда слабого компонента в несколько раз меньше основного. Слабый компонент имеет нестационарный период в пределах 1.1–1.3 года, в то время как период основного компонента устойчив. Орлов (1961) отмечал, что кажущуюся изменчивость периода Чандлера можно объяснить наличием в движении полюса, кроме годового и чандлеровского, других колебаний с близкими частотами, амплитуда которых должна быть очень мала.

Исследуемое далее чандлеровское колебание (рис. 5) представляет собой сумму первого максимального (рис. 7б) и второго слабого (рис. 7г) компонентов ЧДП. Был выполнен вейвлет-анализ (базис Морле) как исходного ряда (ряд 1) изменений широты Пулкова (рис. 8, слева), так и его чандлеровской составляющей (рис. 8, справа). В обоих случаях прослеживается схожесть поведения ЧДП на двух интервалах, равных примерно 80 годам, причем для чандлеровского колебания, полученного с помощью ССА, эти интервалы выделяются более четко. Кроме того, моменты начала и конца интервалов уменьшения амплитуды ЧДП легко определяются.

Изменения амплитуды (рис. 9) и фазы (рис. 10) ЧДП со временем были получены из всех четырех исследуемых рядов изменений широты Пулкова (рис. 5) с помощью преобразования Гильберта. На всех рисунках (рис. 5, 7б, 8–10) хорошо прослеживается наличие двух идентичных интервалов поведения ЧДП и выделяются три области сильного падения амплитуды и одновременной смены фазы. Наличие первой области в самом начале ряда: между 1846 и 1856 гг., хорошо согласуется с исследованиями, анализ, которых выполнен в работе (Миллер, Прудникова, 2010). Второй, хорошо известный минимум находится около 1929 г. В самом конце ряда, около 2005–2006 гг., также наблюдается резкое падение амплитуды ЧДП, а кривая изменения фазы может указывать на начало очередного интервала ее смены. Особенности поведения полюса вблизи 2005 г. отмечаются в работе (Lambert, 2006).

Методом наложения эпох по исходному ряду по чандлеровскому компоненту (ССА) и по изменениям спектра была выполнена оценка корреляции r . Максимальное значение r (0.56 – для исходного ря-

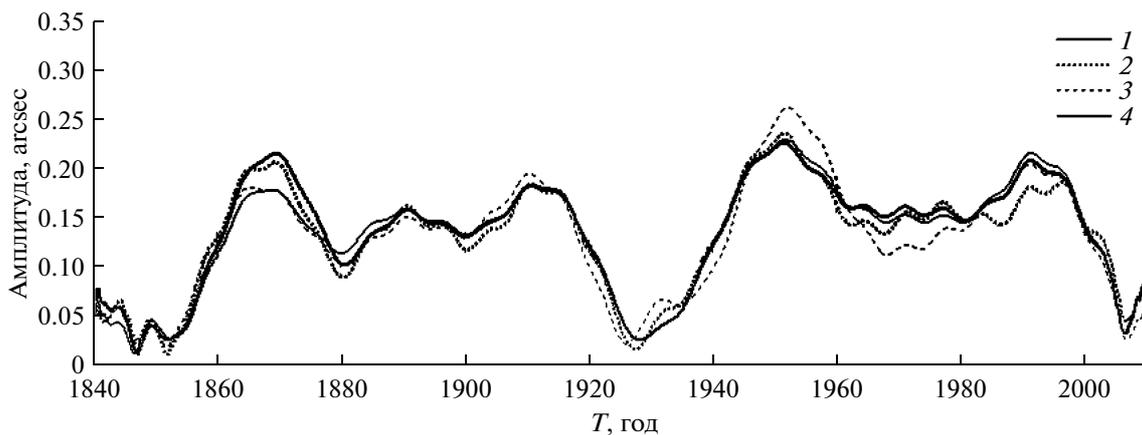


Рис. 9. Вариации амплитуды чандлеровского колебания, полученные из объединенных рядов изменений широты Пулкова. Цифрами обозначены номера рядов.

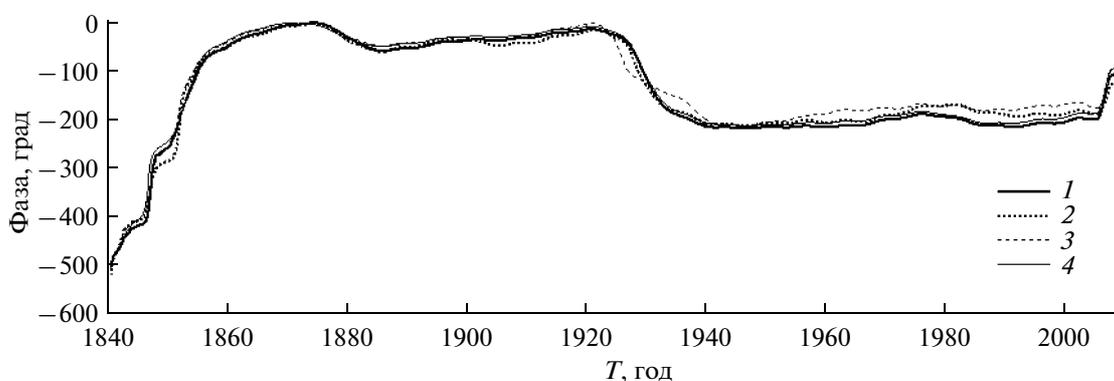


Рис. 10. Вариации фазы чандлеровского колебания, полученные из объединенных рядов изменений широты Пулкова. Цифрами обозначены номера рядов.

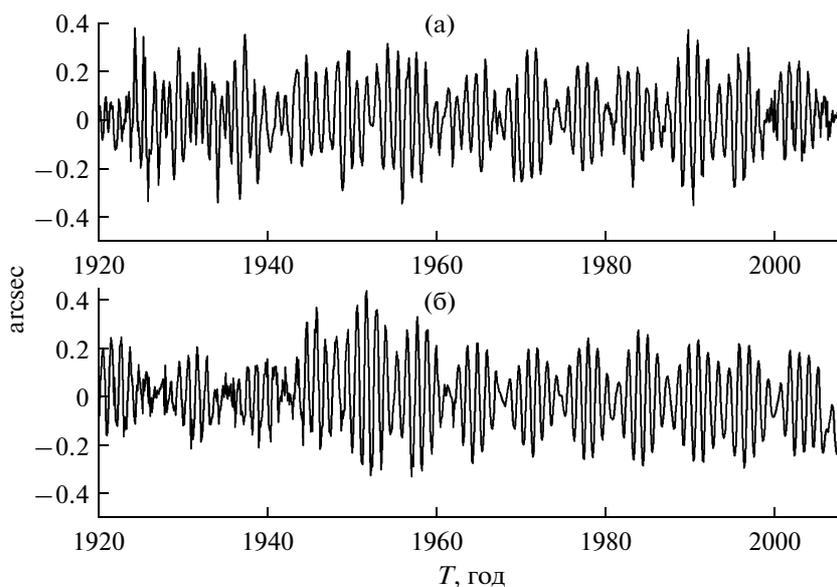


Рис. 11. Сопоставление интервалов падения амплитуды ЧДП на концах и в середине объединенного ряда изменений широты Пулкова (ряд 1).

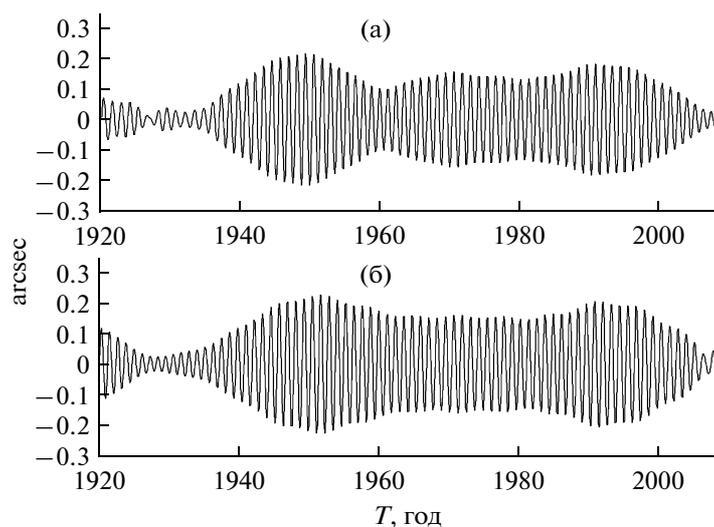


Рис. 12. Сопоставление интервалов падения амплитуды чандлеровского компонента на концах и в середине объединенного ряда изменений широты Пулкова (ряд 1).

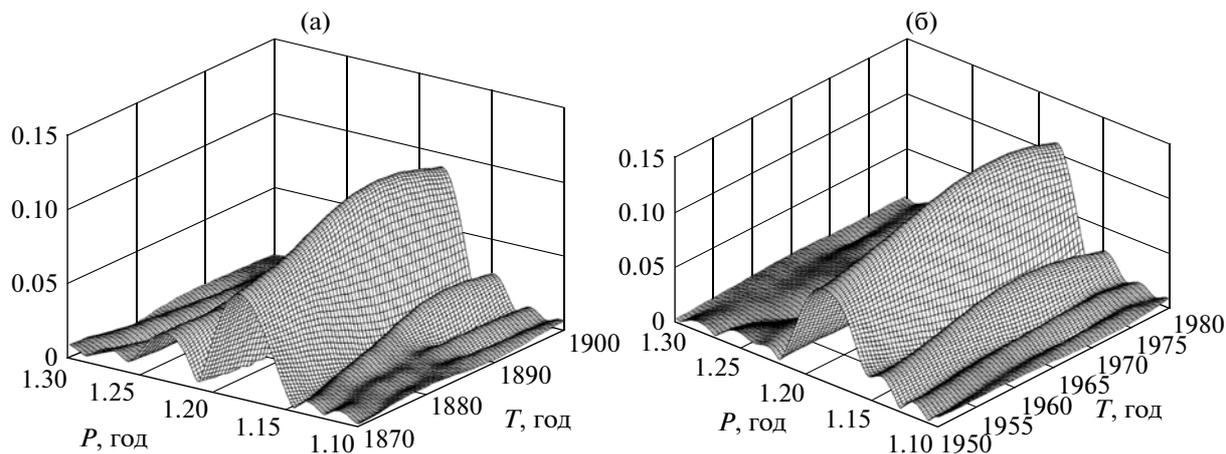


Рис. 13. Динамический Фурье-спектр чандлеровского компонента объединенного ряда (ряд 1) изменений широты Пулкова для первого и второго 80-годичного интервала.

да, 0.86 — для ЧДП, 0.89 — для спектра) соответствует периоду, равному 80 годам. Приведенные значения корреляции являются средними для всех четырех рассматриваемых рядов.

Используя полученное значение периода, равное 80 годам, разобьем исходный ряд (ряд 1) (рис. 11) и чандлеровский компонент (рис. 12), полученный из этого ряда с помощью ССА, так, чтобы можно было сопоставить начало ряда и конец с аналогичными интервалами в середине. Из рисунков видно, что имеется сходное поведение чандлеровского компонента в начале и конце выбранных интервалов 1840–1928 гг. и 1920–2008 гг. В работе (Федоров, Яцкив, 1964) было показано, что раздвоение пика ЧДП связано с изменением фазы на интервале 1924–1930 гг. Интересно отметить, что на первом

интервале из-за наличия изменения фазы этого колебания Chandler (1901a; 1901b), исследуя ряды изменений широты различных обсерваторий мира на интервале 1820–1898 гг., также получил раздвоение частоты.

Для исследования динамики изменения спектральных линий в зависимости от выбранного интервала вычислений был построен динамический спектр (рис. 13 и 14). Спектр вычислялся для выборки длиной 60 лет со сдвигом, равным 5 годам. Рис. 13 показывает, что поведение спектральных пиков на первом и втором 80-летних интервалах синхронизовано, а на рис. 14 хорошо видно, что раздвоение чандлеровского компонента происходит тогда, когда выбираемый для анализа интервал захватывает область изменения фазы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было выполнено исследование чандлеровской составляющей движения полюса по данным изменения широты Пулкова за 170 лет, в которые вошли наблюдения на пассажном инструменте в первом вертикале, наблюдения на вертикальном круге Эртеля и наблюдения на ЗТФ-135. С помощью Фурье-анализа, вейвлет-анализа и сингулярного спектрального анализа были сопоставлены изменения широты Пулкова, вычисленные из наблюдений на ЗТФ-135 и из международных данных. В результате было показано, что низкочастотные изменения ЧДП можно исследовать, используя длительные ряды наблюдений широты одной обсерватории. При этом метод ССА позволяет выделить главные компоненты движения полюса и исследовать структуру ряда, даже если в наблюдениях имеются многолетние разрывы.

В результате обработки всех данных были получены объединенные ряды изменений широты Пулкова за 1840–2009 гг., из которых были выделены нелинейный тренд, годовой и чандлеровский компоненты. Чандлеровский компонент разделяется на две составляющие, первая из которых соответствует двум максимальным пикам Фурье-спектра, а вторая – малым пикам спектра. Первая составляющая имеет повторяющуюся структуру (рис. 7). Выявление этой структуры стало возможным благодаря использованию метода ССА и анализу уникального наиболее длинного ряда наблюдений изменений широты Пулкова за 170 лет. В результате Фурье-анализа каждой из двух частей этой структуры на интервалах 1845–1925 гг. и 1925–2005 гг., были оценены период и амплитуда ЧДП. Значение периода оказалось практически постоянным и соответственно равно 1.183 года (432 дня) и 1.185 года (433 дня), а максимальная амплитуда на первом интервале составила 184 угл. мс, а на втором – 211 угл. мс. Кроме того, с помощью преобразования Гильберта были выполнены вычисления изменения амплитуды и фазы ЧДП со временем. Эти вычисления показали, что резкое изменение фазы ЧДП в середине интервала не уникально, а имеет периодический характер. Аналогичные предположения высказывались в различных статьях, но оценки изменения амплитуды и фазы со временем на 170-летнем интервале наблюдений приводятся впервые.

Анализ этой структуры и сопоставление ее с различными геофизическими процессами может привести к получению новых оценок возбуждающих факторов ЧДП. Поискам наличия или отсутствия физической интерпретации структурных особенностей ЧДП должна быть посвящена отдельная работа, так как перечень возможных геофизических воздействий весьма обширен (Lambeck, 1980).

Таким образом, в результате данной работы впервые была выявлена повторяющаяся структура

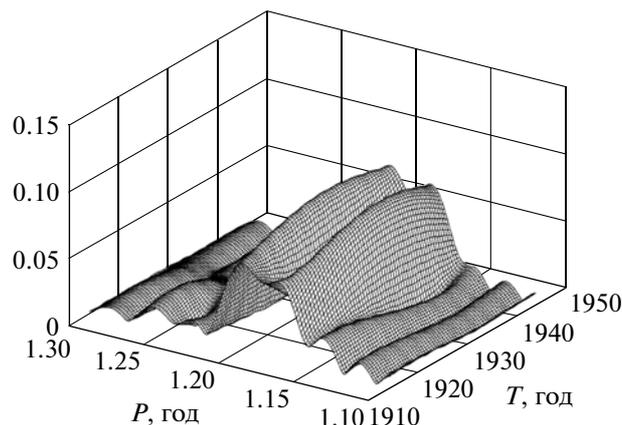


Рис. 14. Динамический Фурье-спектр чандлеровского компонента объединенного ряда (ряд 1) изменений широты Пулкова для интервала, захватывающего область изменения фазы.

ЧДП, которая указывает на существование трех областей падения амплитуды с одновременной сменой фазы (около 1846, 1925, 2005 гг.). Методом наложения эпох и из динамического сопоставления спектров была выполнена оценка периода изменения амплитуды ЧДП с одновременной сменой фазы, в результате чего получено значение периода, равное 80 годам. При этом значении периода получаются наилучшие корреляции (~0.9) как спектров, так и самих компонентов. Кроме того, показаны преимущества использования сингулярного спектрального анализа для исследования долгопериодических рядов со сложной структурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Витязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов. Учеб. пособие. Изд. СПбГУ, 2001. С. 58.
 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.
 Иванов А.А. Вращательное движение Земли. С.-Петербург, 1895. С. 95.
 Кудряшова М.В. Вейвлет-анализ Чандлерова движения полюса с 1846 по 1996 год // Вестн. СПбГУ. 2000. Сер. 1. Вып. 4 (25). С. 92–100.
 Курбасова Г.С., Рыхлова Л.В., Рыбалова М.Н. Особенности изменения амплитуды чандлеровского колебания Земли // Астрон. журн. 2002. № 6. С. 570–576.
 Манк У., Макдональд Г. Вращение Земли. М.: Мир, 1964. С. 385.
 Миллер Н.О. Об изменении амплитуды и фазы Чандлеровского движения полюса // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 5. С. 48–49.
 Миллер Н.О., Прудникова Е.Я. Сопоставление изменений широты Пулкова с международными наблюдениями за 1904–2006 годы // Изв. ГАО РАН. 2009. № 219. С. 223–232.

- Миллер Н.О., Прудникова Е.А.* Ранние пулковские наблюдения широты // Кинемат. и физ. небес. тел. 2010. Т. 27. № 1. С. 40–52.
- Орлов А.Я.* О трехосности Земли // Докл. АН СССР. 1944. Т. 43. № 8. С. 188–190.
- Орлов А.Я.* Избранные труды. Т. 1. Киев: АН Украинской ССР, 1961. С. 356.
- Рыхлова Л.В.* Координаты полюса Земли за 1846.0–1891.5 годы // Сообщ. ГАИШ. 1970. № 163. С. 3–10.
- Сидоренков Н.С.* Атмосферные процессы и вращение Земли. СПб.: Гидрометеоздат, 2002. С. 200.
- Федоров Е.П., Яцкив Я.С.* О причинах кажущегося “раздвоения” периода свободной нутации Земли // Астрон. журн. 1964. № 4. С. 764–768.
- Brzezinski A.* Review of the Chandler Wobble and its excitation // Proc. workshop: Forcing of polar motion in the Chandler frequency band: A contribution to understanding interannual climate variations. 2005. V. 24. P. 109–120.
- Chandler S.C.* On the variation of latitude // Astron. J. 1891. № 248. P. 59–61.
- Chandler S.C.* On a new component of the polar motion // Astron. J. 1901a. № 490. P. 79–80.
- Chandler S.C.* On a new component of the polar motion // Astron. J. 1901b. № 494. P. 109–112.
- Golyandina N., Nekrutkin V., Zhigljavsky A.* Analysis of Time Series Structure: SSA and Related Techniques. London: Chapman & Hall/CRC, 2001. 305 p.
- Guinot B.* The Chandlerian nutation from 1900 to 1980 // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1982. № 71. P. 295–301.
- Guo J.Y., Greiner-Mai H., Ballani L., et al.* On the double-peak spectrum of the Chandler wobble // J. Geodesy. 2005. № 11–12. P. 654–659.
- Lambeck K.* The Earth’s variable rotation: Geophysical causes and consequences. Cambridge Univ. Press, 1980. P. 449.
- Lambert S.B., Bizouard C., Dehant V.* // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33, L13303, doi: 10.1029/2006GL026422.
- Malkin Z., Miller N.* Chandler wobble: Two large phase jumps revealed // Earth Planet. Space. 2010. V. 62. № 12. P. 943–947, doi:10.5047/eps.2010.11.002.
- Sekiguchi N.* On the latitude variations of the interval between 1830–1860 // J. Geodetic Soc. Japan. 1975. V. 21. № 3. P. 131–141.
- Vityazev V.V.* Irregular variations in Earth rotation: The singular spectrum analysis and wavelets // Motion of Celestial bodies. Astrometry and Astronomical Reference Frames. Proc. of the JOURNEES 2000. Paris, 2000. P. 287–291.
- Vondrak J., Ron C.* The great Chandler Wobble change in 1923–1940 re-visited // Proc. workshop: Forcing of polar motion in the Chandler frequency band: A contribution to understanding interannual climate variations. 2005. V. 24. P. 39–47.