



ЧАНДЛЕРОВСКИЕ БИЕНИЯ И ПОЛЮСНЫЙ ПРИЛИВ В СЕВЕРНОМ И БАЛТИЙСКОМ МОРЯХ

И. П. Медведев¹, Е. А. Куликов², А. Б. Рабинович³, В. Б. Лапшин⁴

В настоящем исследовании на основе анализа длительных (120–180 лет) рядов наблюдений за колебаниями мгновенной оси вращения Земли и вариациями уровня Северного и Балтийского морей было показано, что 14-месячные осцилляции уровня моря в этих бассейнах, известные как «полюсный прилив», слабо связаны с чандлеровскими биениями оси вращения Земли, имеющими тот же период. При помощи спектрально-временного анализа было показано, что амплитуда и период полюсного прилива в морях претерпевает более сильные изменения, чем соответствующие характеристики чандлеровских биений оси вращения Земли, и периоды их усиления и ослабления не совпадают по времени. Возможно, чандлеровские биения полюса Земли возбуждают полюсный прилив в Балтийском и Северном морях не напрямую, а опосредованно, как отклик уровня на изменения характера атмосферной циркуляции в Северной Атлантике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЧАНДЛЕРОВСКИЕ БИЕНИЯ, ПОЛЮСНЫЙ ПРИЛИВ, КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ МОРЯ, СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ, СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗ

1. ВВЕДЕНИЕ

Еще с античных времен известно явление прецессии Земли. Оно выражается движением оси вращения Земли в пространстве и является следствием влияния притяжения Земли и Луны на экваториальный избыток массы вращающейся Земли, который в свою очередь является следствием полюсного сжатия нашей планеты. В результате прецессии мгновенная ось вращения Земли описывает в пространстве конус, а на небесной сфере — окружность с центром в северном полюсе эклиптики для северного полушария и с угловым радиусом $\sim 23.5^\circ$ (рис. 1). Полный оборот по этой окружности происходит с периодом около 25765 лет. Кроме прецессии ось вращения Земли также совершает относительно быстрые колебания — нутации. Выделяют два типа этого явления — вынужденную и свободную нутацию оси вращения Земли. Вынужденная нутация оси вращения Земли возникает из-за изменения сил, действующих на экваториальное утолщение Земли, вследствие изменения расстояния между Землей и Солнцем, Землей и Луной, наклона орбиты Луны к эклиптике. Периоды вынужденной нутации оси вращения Земли составляют 18.6 лет, 9.3 года, 1 год и 0.5 года, 13.7 суток.

Кроме прецессии и вынужденной нутации Земля, вращаясь вокруг своей оси, испытывает свободную нутацию с периодом около 14 месяцев. Леонард Эйлер еще в 1765 г. предположил, что Земля, вращаясь вокруг своей оси, должна испытывать слабые «покачивания» (свободные нутации), период которых, по расчетам Эйлера, должен быть около 10 месяцев [1]. В конце XIX в. американский ученый Сет Карло Чандлер обнаружил эйлеровые нутации оси вращения Земли на основе астрономических широтных наблюдений и показал, что их фактический период больше, чем это было предсказано Эйлером, и составляет около 14 месяцев [2]. Эти нутации получили название чандлеровских колебаний или чандлеровских биений (Chandler Wobble).

¹ Медведев Игорь Павлович, с.н.с., Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, телефон +7(499)124-87-13, н.с., ФГБУ «ИПГ», e-mail: patamates@gmail.com

² Куликов Евгений Аркадьевич, гл.н.с., Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, телефон +7(499)124-87-13, e-mail: kulikove@gmail.com

³ Рабинович Александр Борисович, гл.н.с., Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, телефон +7(499)124-87-13, e-mail: a.b.rabinovich@gmail.com

⁴ Лапшин Владимир Борисович, гл.н.с., ФГБУ «ИПГ», e-mail: lapshin-vb1@mail.ru

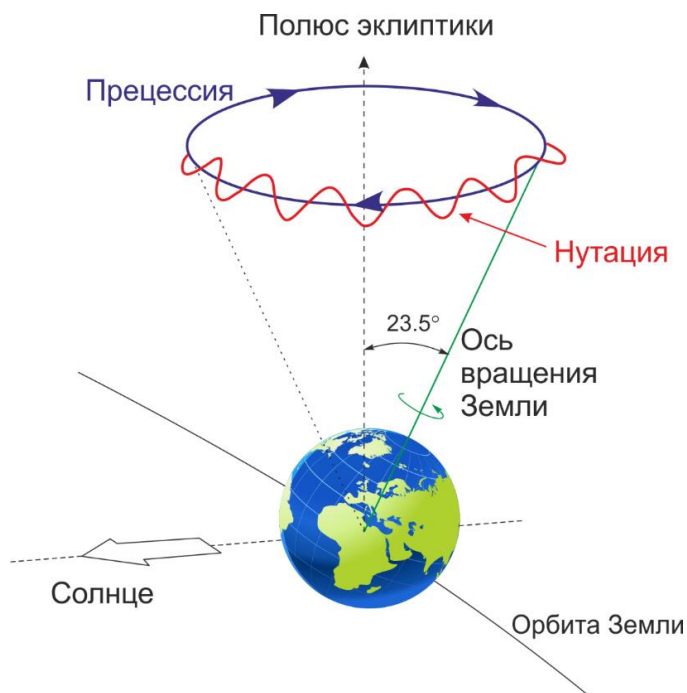


Рис. 1. Схема вращения Земли.

Эйлер также предположил, что под влиянием свободных нутаций должен колебаться и уровень океана. Соответствующую волну, которая во многом аналогична долгопериодным приливным колебаниям, Дж. Дарвин назвал полюсным приливом [3]. В начале XX в. была разработана статическая теория полюсного прилива, которая описала зависимость высоты колебаний уровня океана от широты и амплитуды колебаний полюса вращения Земли [4]. Амплитуда статического полюсного прилива может быть представлена как

$$\Delta H = \frac{\Delta U}{g} (1 + k - h), \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения, $k \approx 0.30$ и $h \approx 0.61$ — числа Лява, определяющие реакцию сферически симметричной Земли на воздействие приливных сил [5], ΔU — изменение потенциала центробежной силы Земли:

$$\Delta U = -\frac{1}{2} \omega^2 a^2 \Delta \theta \sin 2\theta, \quad (2)$$

где ω — угловая скорость вращения Земли, a — средний радиус Земли, θ — дополнение до широты (colatitude), а $\Delta \theta$ — модуль радиус-вектора движения полюса Земли относительно среднего положения. Как следует из выражения (2), амплитуда полюсного прилива достигает максимума в районе 45° с. ш. и ю. ш., а по направлению к полюсам и к экватору эта амплитуда уменьшается.

Реальные движения полюса вращения Земли носят достаточно сложный характер и испытывают заметные многолетние изменения [1, 5]. Это означает, что чандлеровские колебания могут рассматриваться как амплитудно-модулированный процесс; при этом временной масштаб изменчивости $\Delta \theta$ составляет 10–15 лет [5], а сама величина $\Delta \theta$ меняется от 0.05 до $0.40''$ (дуговой секунды). Если взять характерное значение $\Delta \theta = 0.22''$, что примерно соответствует амплитуде нутаций Земли, равной 6.8 м, то, согласно (1), максимальное значение амплитуды полюсного прилива (на широте 45°) составит $\Delta H_{\max} = 0.8$ см [1]. Однако, как показывает анализ данных долговременных измерений колебаний уровня моря, фактически наблюдаемый полюсный прилив в некоторых районах Мирового океана существенно сильнее, чем это следует из статической теории (см., например, [1]). Наибольшая высота полюсного прилива наблюдается в Балтийском море — до 5–6 см [1, 6, 7], тогда как теоретическое значение статического прилива на широте моря согласно

(1) составляет 0.6–0.7 см. Таким образом, наблюдаемые значения превышают теоретические примерно в 8-10 раз. Механизм формирования аномально высокого полюсного прилива в Балтийском море до сих пор остается неясным. В работе [8] было показано, что межгодовая изменчивость амплитуды и периода полюсного прилива в Балтийском море связана больше с изменением зонального ветра над этим регионом, чем с изменениями оси вращения Земли (движениями полюса). В настоящем исследовании будет подробно рассмотрена связь движений полюса Земли и колебаний уровня Балтийского и Северного морей, а также изменчивость их амплитуды и периода в течение XIX–XXI вв.

2. ДАННЫЕ

Для настоящего анализа были использованы данные о координатах полюса Земли (Earth Orientation Parameter) с 1846 по 2017 гг., которые были взяты на портале Международной службы вращения Земли (International Earth Rotation Service [20]). Эти данные имели временное разрешение 0.1 года для периода наблюдений с 1846 по 1889 г. и 0.05 года для периода наблюдений с 1890 по 2017 г. В рамках настоящего анализа из имеющихся данных были созданы ряды среднемесячных значений координат полюса Земли. Для анализа колебаний уровня моря были использованы ряды среднемесячных значений уровня моря на 8 прибрежных станциях в Северном и Балтийском морях. Эти ряды были сформированы на основе данных портала Постоянной Службы Среднего Уровня Моря (Permanent Service for Mean Sea Level, PSMSL [9]) и Единой Государственной Системы Информации об Обстановке в Мировом Океане (ЕСИМО [21]). Расположение прибрежных станций показано на рис. 2, а период временного покрытия данными представлен в табл. 1.

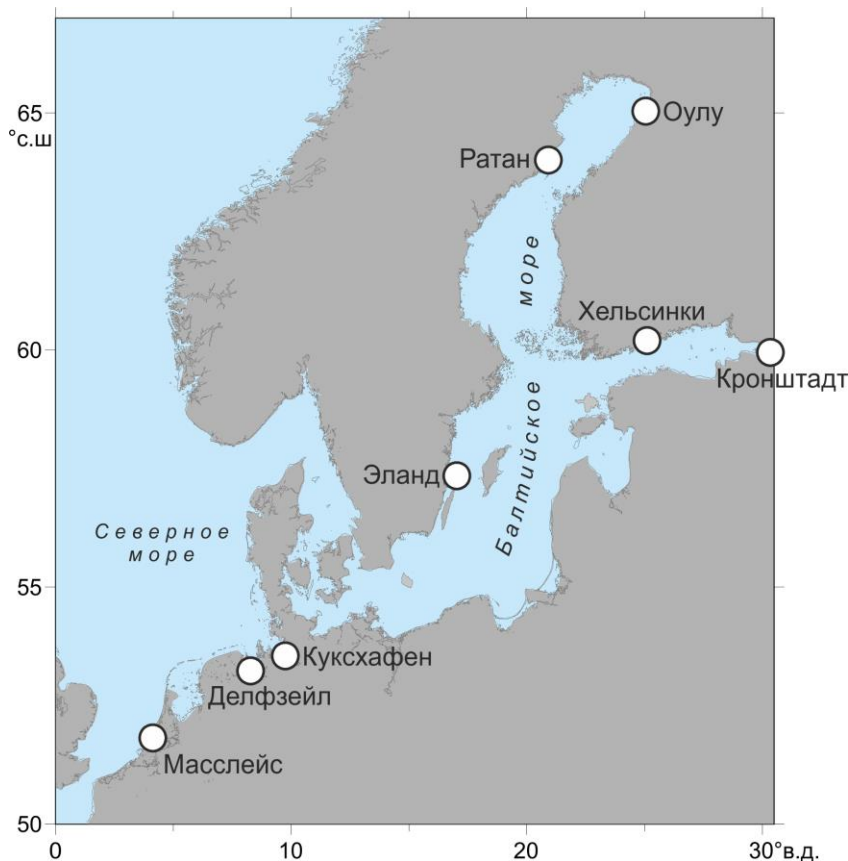


Рис. 2. Расположение прибрежных станций, данные которых были использованы в настоящем исследовании.

Таблица 1. Ряды среднемесячных значений уровня моря на 6 станциях в Балтийском и Северном морях, использованные в настоящем исследовании. Расположение станций показано на рис. 2.

№	Станция	Координаты		Страна	Период наблюдений	Длительность (годы)	Качество данных (%)
		Широта (°с.ш.)	Долгота (°в.д.)				
1	Масслейс	51.918	4.250	Нидерланды	1848-2016	169	100
2	Делфзейл	53.326	6.933	Нидерланды	1865-2016	152	100
3	Куксхафен	53.867	8.717	Германия	1843-2016	174	100
4	Эланд Норра Удде	57.366	17.097	Швеция	1887-2016	130	100
5	Ратан	63.986	20.895	Швеция	1892-2016	125	100
6	Оулу	65.040	25.418	Финляндия	1889-2016	128	96
7	Хельсинки	60.154	24.956	Финляндия	1879-2016	138	100
8	Кронштадт	59.983	29.767	Россия	1835-2016	182	100

3. РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

В движениях оси вращения (полюса) Земли выделяются периодические компоненты, главные из которых годовая и 14-месячная чандлеровская, а также наблюдается постоянное смещение местоположения полюса с преобладающим направлением в сторону Северной Америки (меридиан 290° в. д.) со скоростью около 10 см в год [10]. Чандлеровские биения мгновенной оси вращения Земли представляют собой узкополосный стохастический процесс с центральной частотой около 0.84 цикл/год и шириной около 0.11 цикл/год (от 0.80 до 0.91 цикл/год) [8].

Для анализа периодических компонент движения полюса Земли в настоящем исследовании применялся ротарный спектральный анализ, основанный на методе вращательных компонент [11]. При расчетах спектра было использовано спектральное окно Кайзера — Бесселя с половинным перекрытием, длина сегмента $N = 344$ мес., количество степеней свободы (ν) составляло 20, а частотное разрешение $\Delta f \approx 0.035$ цикл/год. В движении полюса Земли преобладает положительное вращение (против часовой стрелки) и выявляются две основные составляющие: годовая (S_a) с периодом 1 цикл/год и чандлеровская (P_{14}) с периодом ~ 0.84 цикл/год (рис. 3а). Значение спектра у чандлеровской компоненты на полпорядка выше, чем у годовой. В спектре движения полюса в направлении по часовой стрелке годовая и чандлеровская составляющие на фоне непрерывного спектра не выделяются. Такой характер спектра говорит о том, что обе компоненты представляют собой практически правильные окружности с направлением вращения против часовой стрелки.

Колебания уровня моря представляют собой скалярный временной ряд, поэтому спектр этого процесса рассчитывался с помощью классического спектрального анализа, основанного на быстром преобразовании Фурье и осреднении спектра по методу Уэлча [11]. При расчетах спектра также было использовано спектральное окно Кайзера — Бесселя с половинным перекрытием с длиной сегмента $N = 344$ мес., $\nu = 20$. На рисунке 3 (б-д) показаны спектры колебаний уровня моря на четырех станциях в Северном и Балтийском морях. В спектре вариаций уровня моря преобладают пики, связанные с сезонными колебаниями с годовым (S_a) и полугодовым (S_{sa}) периодами. Пик на частоте чандлеровских биений (P_{14}) выделяется слабее, но все равно имеет значимую спектральную плотность. В работах [7, 8] было показано, что при увеличении частотного разрешения в спектрах колебаний уровня и движений полюса спектральный максимум с чандлеровским периодом разделяется на несколько локальных пиков. Основные периоды следующие: 415, 433 и 443 сут. Подобное деление максимума на несколько локальных при увеличении спектрального разрешения вызвано изменчивостью доминирующего периода полюсного прилива с течением времени. Более подробно со спектральными свойствами полюсного прилива в этих морях можно ознакомиться в работах [7, 8]. Целью настоящего исследования является оценка связи чандлеровских биений движения полюса и колебаний уровня моря на соответствующей частоте. Для этого при помощи взаимного ротарного спектрального анализа были рассчитаны функции когерентности между двумя процессами.

Для расчета взаимной спектральной функции были использованы синхронные ряды наблюдений за движениями полюса Земли и вариациями уровня моря на четырех прибрежных станциях. На рисунке 4 представлены результаты расчетов когерентности. Так как в движениях

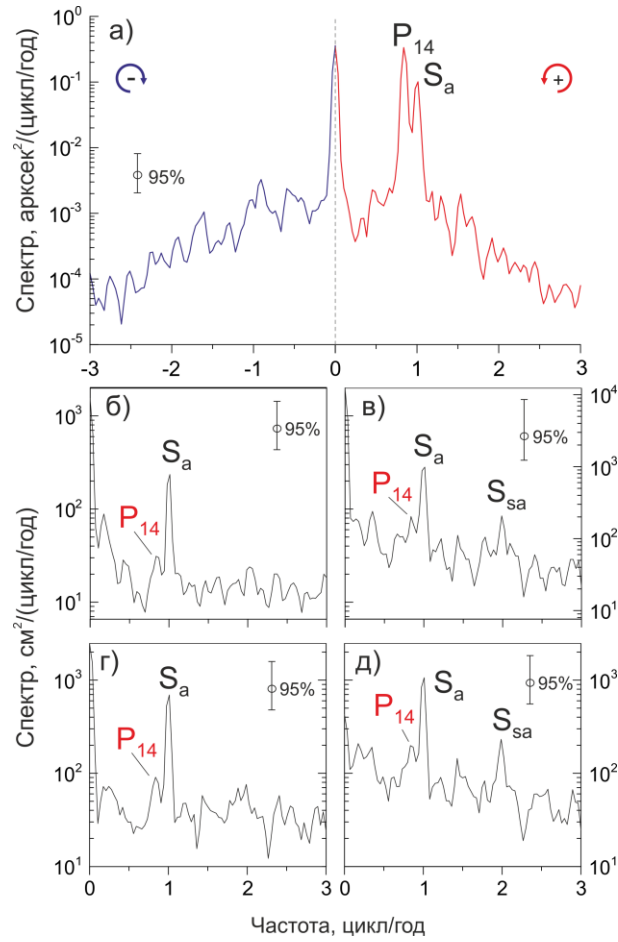


Рис. 3. Двусторонний спектр движения мгновенной оси вращения Земли (а), красная кривая — положительное вращение, синяя кривая — отрицательное вращение. Спектр колебаний уровня моря на станциях Масслейс (б), Оулу (в), Куксхафен (г) и Кронштадт (д).

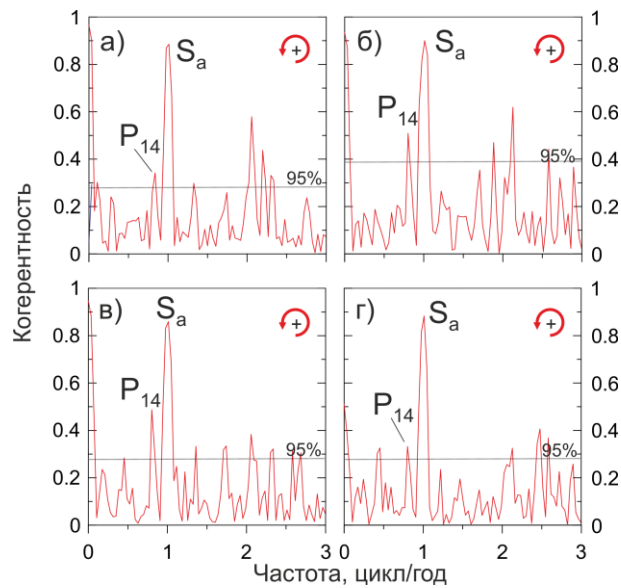


Рис. 4. Когерентность между движениями мгновенной оси вращения Земли в антициклональном направлении и колебаниями уровня на станциях Масслейс (а), Оулу (б), Куксхафен (в) и Кронштадт (г).

полюса Земли чандлеровская и годовая компоненты имеют преимущественно положительное вращение, то когерентность рассматривалась исключительно для движений полюса с положительным вращением (против часовой стрелки). Взаимный спектральный анализ между движениями полюса и колебаниями уровня показал высокую когерентность (0.8 – 0.9) на частоте 1 цикл/год, тогда как на чандлеровской частоте когерентность ниже (от 0.3 до 0.5). Высокая когерентность на годовом периоде не означает, что годовые колебания уровня моря непосредственно зависят от движений полюса Земли. Вероятно, высокая когерентность между этими процессами с астрономической природой сезонных колебаний уровня моря и устойчивой разностью фаз между этими двумя процессами. Известно, что годовые биения полюса возбуждаются сезонным перераспределением масс в атмосфере и гидросфере [12], вследствие чего можно предположить, что фаза этих биений от года к году слабо меняется. Сезонные колебания уровня Балтийского моря имеют, в основном, гидрометеорологическое происхождение [13] и их фаза также достаточно устойчива. Вследствие чего и в движении полюса Земли, и в изменении уровня моря амплитуда и фаза годовых колебаний подвержены относительно слабым вариациям (по сравнению с колебаниями на чандлеровской частоте), что и обуславливает высокую когерентность между соответствующими процессами.

В целом, представленные результаты подтверждают выводы, полученные в работах [8, 14], что колебания уровня моря с частотой около 0.84 цикл/сут слабо связаны с чандлеровскими биениями оси вращения Земли. В работах [8, 14, 15, 16] показано, что полюсный прилив в Северном и Балтийском морях формируется под воздействием атмосферных процессов, в частности, изменений скорости зонального ветра с соответствующим периодом.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА

Известно [5], что период чандлеровских биений не остается постоянным по времени, отклонение от среднего составляет около $\pm 4\%$. Период и амплитуда полюсного прилива (14-месячных колебаний уровня моря) в Мировом океане также меняется от года к году. В рамках настоящего исследования при помощи спектрально-временного анализа (СВАН) [17], модифицированного для анализа векторных процессов [18], были изучены особенности временной изменчивости этих процессов.

На рисунке 5. представлены СВАН-диаграммы движения полюса Земли по часовой (а) или против часовой (б) стрелки и колебаний уровня в Северном море (д — Делфзейл, ж — Куксхафен) и в Балтийском море (в — Эланд, г — Ратан, е — Хельсинки, з — Кронштадт) в частотном диапазоне от 0.5 до 1.5 цикл/год. В движениях полюса Земли в направлении по часовой стрелке заметных пиков на СВАН-диаграммах обнаружено не было (рис. 5а), что согласуется с результатами ротарного спектрального анализа, представленными в предыдущем разделе. На движениях полюса Земли в направлении против часовой стрелки преобладают чандлеровская (14-месячная) и годовая составляющие (рис. 5б). Чандлеровская компонента испытывает заметные изменения в амплитуде и периоде колебаний. Так, с 1920 по 1940 гг. наблюдалось ослабление чандлеровских биений. Годовой сигнал имеет меньшую магнитуду и испытывает относительно слабые вариации в амплитуде и периоде в течение всего рассматриваемого периода.

В работе [19] было показано, что спектр амплитудно-модулированных чандлеровских биений автоматически будет иметь раздвоенные пики на чандлеровском периоде. В предыдущем разделе было упомянуто, что при высоком разрешении спектр движений полюса Земли с периодом около 14 месяцев разделяется на два локальных пика примерно одинаковой амплитуды с периодами 427 и 436 суток. Суперпозиция этих двух периодов приводит к модуляции чандлеровских колебаний с периодом около 60 лет, что хорошо согласуется с результатами СВАН-анализа.

На спектрально-временных диаграммах колебаний уровня моря преобладает годовая составляющая (рис. 5в–з). Магнитуда 14-месячной составляющей сильно меняется в течение XIX–XX вв. Сигнал хорошо выражен в период наблюдений с 1920 по 1990 гг. Следует отметить схожую амплитудно-частотную изменчивость 14-месячных колебаний на всех рассматриваемых прибрежных станциях в Северном и Балтийском морях (рис. 5в–з). Точная частота (период) этих колебаний существенно изменяется на всем протяжении наблюдений. Если изменения частоты чандлеровских биений движения полюса происходит в диапазоне $\pm 4\%$ от центральной частоты 0.84 цикл/год (рис. 5б), то колебания частоты наблюдаемых 14-месячных колебаний уровня моря составляют $\pm 9\%$ от центральной частоты 0.84 цикл/год (рис. 5в–з).

Примечательно, что значительное усиление 14-месячных колебаний уровня моря наблюдается в период с 1920 по 1940 гг., т. е. в период ослабления чандлеровских биений движения полюса (рис. 5б). Это противоречит статической теории полюсного прилива, согласно которой, должно было происходить уменьшение амплитуд чандлеровских колебаний уровня моря. Возможно, чандлеровские биения полюса Земли возбуждают колебания уровня моря с близким периодом в Балтийском и Северном морях не напрямую, а опосредованно, например, через метеорологическое воздействие. Так, в работе [8] увеличение амплитуды 14-месячных колебаний в этих морях объясняется действием зональной компоненты ветра на уровень моря на соответствующих частотах, которое усиливается из-за мелководности рассматриваемых морских бассейнов.

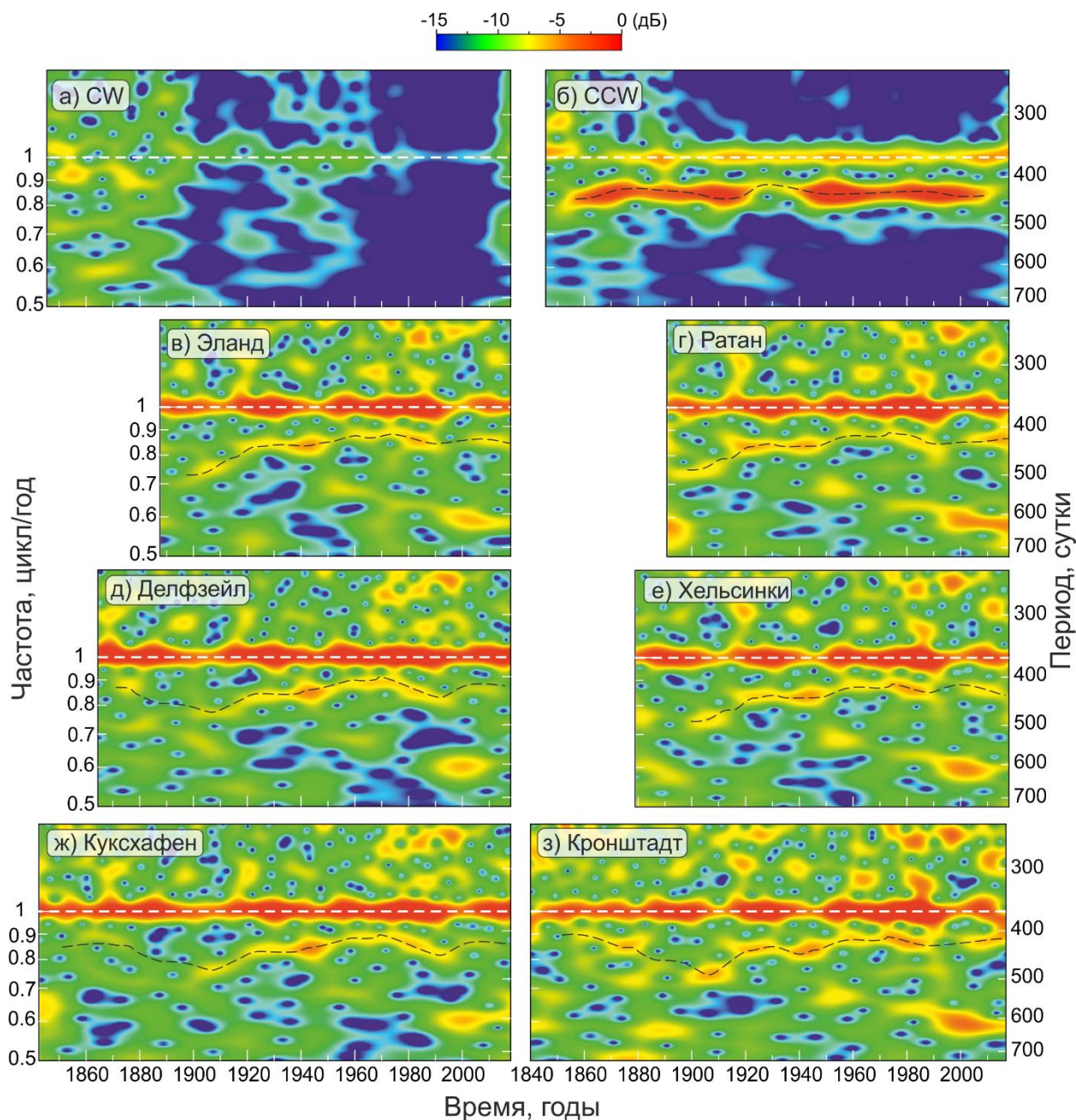


Рис. 5. Спектрально-временные диаграммы движений полюса Земли в направлении по часовой стрелке (а) и против часовой стрелки (б), и колебаний уровня моря на станциях Эланд (в), Ратан (г), Делфзейл (д), Хельсинки (е), Куксхафен (ж) и Кронштадт (з).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании на основе анализа длительных рядов наблюдений за колебаниями мгновенной оси вращения Земли и вариациями уровня Северного и Балтийского морей было показано, что 14-месячные колебания в этих морях слабо связаны с чандлеровскими биениями оси вращения Земли. При помощи взаимного ротарного спектрального анализа были получены оценки когерентности этих явлений: 0.3 – 0.5. При помощи спектрально-временного анализа было показано, что амплитуда и периоды 14-месячных колебаний в морях претерпевает более сильные изменения в течение XIX–XX вв., чем соответствующие характеристики чандлеровских биений оси вращения Земли. Возможно, чандлеровские биения полюса Земли возбуждают эти колебания в Балтийском и Северном морях не напрямую, а опосредованно, например, через метеорологическое воздействие. В будущих исследованиях предстоит получить количественные и качественные оценки связанности полюсного прилива в море и вариаций атмосферных процессов на периодах чандлеровских биений.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0015) и при финансовой поддержке гранта РФФИ 16-35-60071.

ЛИТЕРАТУРА

1. Максимов И. В. Геофизические силы и воды океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. 447 с.
2. Chandler S. On the variation of latitude // *Astronomical Journal*. 1891. V. 11. No. 248. P. 59–61.
3. Darwin G. H. The tides and kindred phenomena in the Solar System. – London: J. Murray, 1898. 342 p.
4. Schweydar W. Die Bewegung der Drehachse der elastischen Erde im Erdkörper und im Raum // *Astronomische Nachrichten*. 2016. V. 203, P. 103–114.
5. Манк У., Макдональд Г. Вращение Земли. – М.: Мир, 1964. 384 с.
6. Miller S. P., Wunsch C. The pole tide // *Nature Physical Science*. 1973. V. 246. No. 155. P. 98–102.
7. Медведев И. П., Рабинович А. Б., Куликов Е. А. Полюсный прилив в Балтийском море // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 2. С. 137–148.
8. Medvedev I. P., Rabinovich A. B., Kulikov E. A. The pole tide/14-month oscillations in the Baltic Sea during the 19th and 20th centuries: Spatial and temporal variations // *Continental Shelf Research*. 2017. V. 137. P. 117–130.
9. Holgate S. J., Matthews A., Woodworth P. L. et al. New Data Systems and Products at the Permanent Service for Mean Sea Level // *Journal of Coastal Research*. 2013. V. 29. No. 3. P. 493–504.
10. Сидоренков Н. С. Физика нестабильностей вращения Земли. – М.: Физматлит, 2002. 384 с.
11. Thomson R. E., Emery W. J., *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*, Third and revised edition. – New York, Elsevier, 2014. 716 p.
12. Wahr J. M. The Earth's rotation // *Annual review of earth and planetary sciences*. 1988. V. 16. No. 1. P. 231–249.
13. Медведев И. П. Сезонные колебания уровня Балтийского моря // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 12. С. 42–54.
14. Ekman M. The changing level of the Baltic Sea during 300 years: a clue to understanding the Earth. – Åland Islands: Summer Institute for Historical Geophysics, 2009. 155 p.
15. Tsimplis M. N., Flather R. A., Vassie J. M. The North Sea pole tide described through a tide-surge numerical model. *Geophysical Research Letters*. 1994. V. 21. N. 6. P. 449–452.
16. O'Connor W. P., Chao B. F., Aheng D., Au A. Y. Wind stress forcing of the North Sea 'Pole Tide'. *Geophys. J. Int.* 2000. V. 142. P. 620–630.
17. Dziewonski A., Bloch S., Landisman M. A technique for the analysis of transient seismic signals. *Bulletin of the seismological Society of America*. 1969. V. 59. N. 1. P. 427–444.

18. Kulikov E. A., Rabinovich A. B., Carmack E. C. Barotropic and baroclinic tidal currents on the Mackenzie shelf break in the southeastern Beaufort Sea. *Journal of Geophysical Research – Oceans*. 2004. V. 109. N. C05020. doi:10.1029 /2003JC001986.
19. Dickman S. R. Investigation of controversial polar motion features using homogeneous International Latitude Service data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1981. V. 86 (B6). P. 4904–4912.
20. www.iers.org.
21. www.esimo.ru.

CHANDLER WOBBLE AND POLE TIDE IN THE NORTH AND BALTIC SEAS

I. P. Medvedev, E. A. Kulikov, A. B. Rabinovich, V. B. Lapshin

Based on an analysis of long-term observation series of the polar motions and sea level variations in the North and Baltic seas, it was shown that the pole tide in these seas is weakly related to the Chandler wobble of the Earth's rotation axis. Using cross rotary spectral analysis, the coherence (from 0.3 to 0.5) of these phenomena were obtained. Using multiple-filter technique, it was shown that the amplitude and period of the pole tide in the seas have stronger changes during the XIX – XX centuries, rather than the corresponding characteristics of the Chandler wobble. Probably, the Chandler wobble excites the pole tide in the Baltic and North seas indirectly, for example, through meteorological forcing.

KEYWORDS: CHANDLER WOBBLE, POLE TIDE, SEA LEVEL VARIATIONS, SPECTRAL ANALYSIS, FREQUENCY-TEMPORAL ANALYSIS