

О СИНХРОНИЗАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ С ЧАСТОТАМИ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯ – ЛУНА – СОЛНЦЕ

Н.С. Сидоренков

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации
sidorenkov@mecom.ru*

Введение

350 лет назад Христиан Гюйгенс открыл явление самосинхронизации маятниковых часов. Сейчас установлено, что явление синхронизации – это, по выражению И.И. Блехмана, «свойство материальных объектов самой различной природы вырабатывать единый ритм совместного движения, несмотря на различие индивидуальных ритмов и на подчас весьма слабые взаимные связи» [1].

Явления синхронизации обнаружены в акустических и электромеханических системах, электрических цепях, радиотехнических, радиофизических, механических и технических устройствах, живых системах.

Широко известны синхронизации (соизмеримости) частот обращений и вращений планет и спутников в Солнечной системе.

Под синхронизацией, соизмеримостью или резонансностью системы, в которой тела обращаются с угловыми скоростями ω_i , понимают выполнение линейных выражений вида:

$$n_1\omega_1 + n_2\omega_2 + \dots + n_k\omega_k = 0, \quad (1)$$

в которых коэффициенты n_i являются небольшими целыми числами.

Движение полюсов Земли

Леонард Эйлер в 1765 году теоретически доказал: если ось вращения не совпадает с осью фигуры Земли, то должно происходить движение астрономических полюсов вокруг полюсов фигуры с периодом $T_R = \frac{A}{C - A} \frac{2\pi}{\Omega} \approx 305$ звездных суток (где A и C – экваториальный и полярный момент инерции Земли; Ω – угловая скорость суточного вращения Земли в рад/сут).

В XIX веке неоднократно предпринимались безрезультатные попытки найти 305-суточный период в рядах широтных наблюдений обсерваторий Пулково, Вашингтона, Берлина и др. В 1891 г. С. Чандлер (Chandler) опубликовал результаты своего анализа широтных наблюдений и показал, что в них имеется члены с периодами 428 и 365 сут. Столь неожиданный результат поначалу вызвал сомнения. Однако вскоре С. Ньюком указал, что период 305 сут. верен в случае, если бы Земля была абсолютно твердой. Упругие деформации Земли и океанов могут вызвать увеличение периода с 10 до 14 мес.

В книгах автора [7, 17] указано, что период Чандлера синхронизован с частотами системы Земля – Луна – Солнце. Напомним, что Земля совершает два орбитальных движения: месячное и годовое. С месячным периодом она обращается вокруг барицентра системы Земля – Луна, а с годовым периодом – вместе с этим барицентром – вокруг Солнца. Плоскость месячной орбиты Земли и Луны прецессирует с периодом 18,61 г., а перицентр движется с запада на восток с периодом 8,85 г.

Атмосферный форсинг движения полюсов с периодом солнечного года 365,24 сут. модулируется из-за прецессии месячной орбиты Земли с периодом 18,61 г. и из-за движения ее перигея с периодом 8,85 лет. В итоге результирующий солнечный годовой форсинг порождает движения полюсов с периодом Чандлера 1,20 года:

$$\frac{1}{1,0} - \left(\frac{1}{18,61} + \frac{1}{8,85} \right) = \frac{1}{1,20}. \quad (2)$$

Выражение (2) соответствует выражению (1) с коэффициентами $|n_i|=1$. Оно описывает четырехчастотную синхронизацию, или резонанс. В этом смысле можно говорить, что частота чандлеровского движения полюса синхронизована с фундаментальными частотами системы Земля – Луна – Солнце.

Квазидвухлетняя цикличность зонального ветра

Среди многочисленных несезонных колебаний общей циркуляции земной атмосферы следует выделить квазидвухлетнюю цикличность как наиболее стабильную и значимую. Квазидвухлетняя цикличность (КДЦ) направления ветра в экваториальной стратосфере была открыта в начале 60-х годов при изучении циркуляции экваториальной стратосферы [17]. Сейчас установлено, что в экваториальной широтной зоне ($\pm 10^\circ$) в слое от 18 до 31 км направление зонального ветра изменяется с периодом около 28 месяцев. Причем смена фаз западных ветров на восточные происходит не одновременно на всех высотах, а опускается сверху вниз со скоростью около 1 км в месяц. Мгновенный вертикальный профиль зонального ветра в слое 18–31 км имеет форму одной волны с чередованием слоев восточного и западного ветра. Эта волна всегда опускается вниз, исчезая около тропопаузы (на высоте ≈ 17 км) (рис. 1).

Ход во времени усредненной по массе слоя скорости \bar{u} зонального ветра в экваториальной стратосфере иллюстрирует рис. 2. За период 1954–2015 гг. произошло 26 циклов средней скорости \bar{u} . Средняя длительность цикла за весь интервал составила 28,2 месяца. Скорость зонального ветра варьировала от -22,5 м/с в июле 1984 г. до +18 м/с в январе 1983 г. Средняя величина скорости \bar{u} за 61 год составила -3,8 м/с, а среднеквадратическое (стандартное) отклонение $\pm 9,1$ м/с [17].

КДЦ зонального ветра в экваториальной атмосфере принято объяснять взаимодействием волн Кельвина, движущихся с запада на восток, и смешанных Россби-гравитационных волн, движущихся с востока на запад, с зональным ветром в экваториальной стратосфере [15].

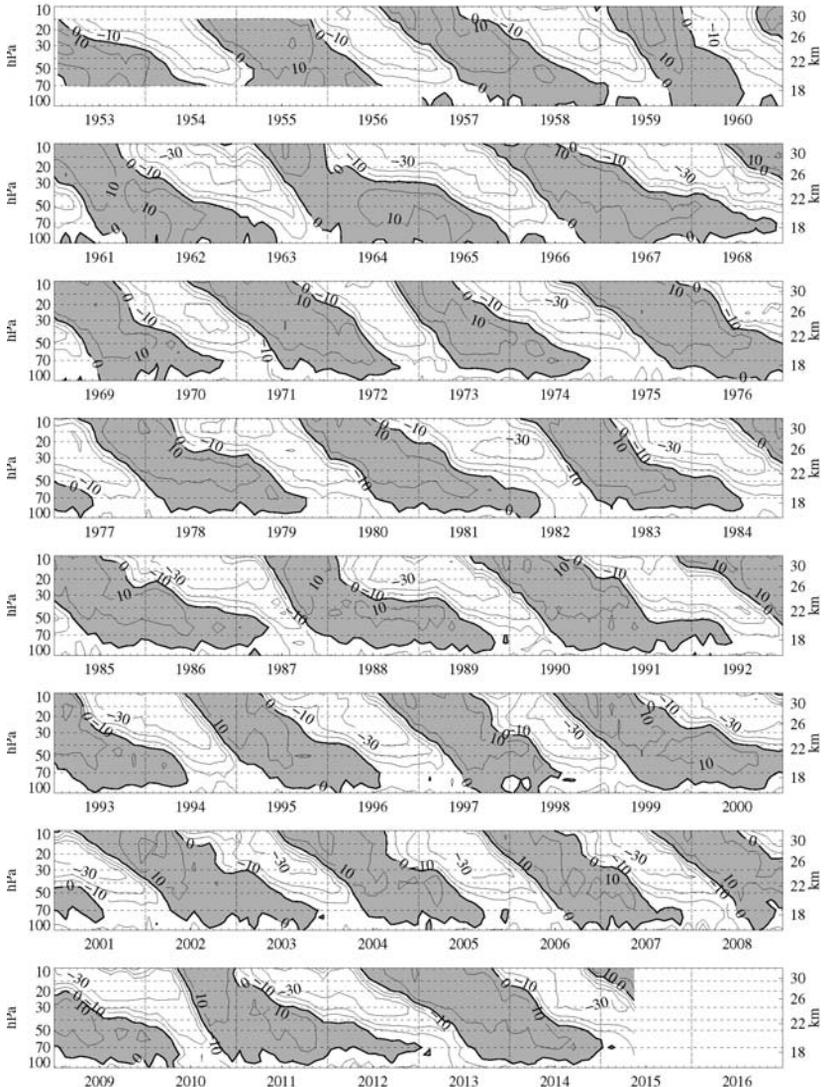


Рис. 1. Высотно временная диаграмма зонального ветра в экваториальной стратосфере. Положительные величины (заштрихованы) – западные ветры, а отрицательные – восточные ветры.

(http://www.geo.fu-berlin.de/met/ag/strat/produkte/qbo/qbo_wind_pdf.pdf)

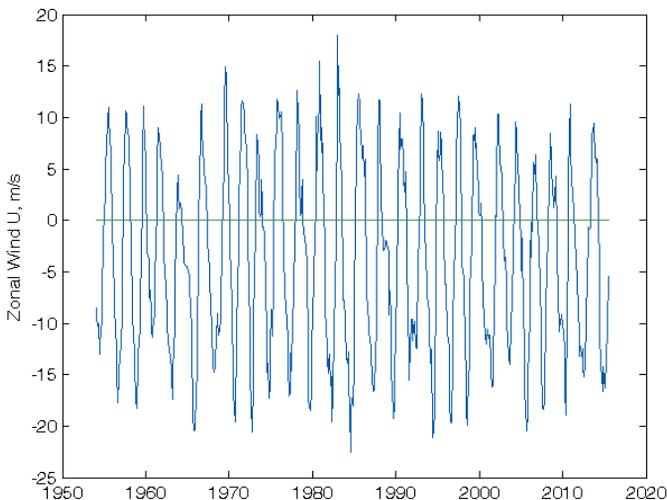


Рис. 2. Изменение скорости \bar{u} (средней в слое 19–31 км) зонального ветра в экваториальной зоне с 1954 по 2015 г. [17].

В описанной модели [15] период КДЦ зависит только от расстояния между экваториальной тропопаузой и уровнем полугодовых колебаний ветра в стратосфере и от интенсивности атмосферных волн.

Явление КДЦ часто рассматривают как один из видов параметрического резонанса, возникающего при воздействии на атмосферные возмущения сил, изменяющихся с годовым периодом [2]. При этом появляются колебания с частотой, равной половине годовой частоты притока тепла от Солнца. Появление сбоев в нелинейной системе атмосферы приводит к увеличению периода КДЦ до 28 месяцев. Для доказательства этого в [13] применяется вейвлет-анализ данных наблюдений. Показано, что КДЦ скорости экваториального стратосферного ветра на всех стратосферных уровнях проявляются в основном в виде двух режимов с периодами 2 и 2,5 года. Причем в некоторые десятилетия преобладает период ровно 2 года, а в некоторые – 2,5 года.

В [7, 17] вычислена периодограмма средней скорости \bar{u} ветра в экваториальной стратосфере по его временному ряду за период

1954–1999 гг. Она представлена на рис. 3, на котором видно, что в спектре Фурье доминирует гармоника с периодом около 2,33 г. (28 мес.). Это колебание и называется квазидвухлетней циклическостью. Амплитуда КДЦ варьирует от 8 до 13 м/с. Выделяется также гармоника с периодом около 2,0 г. (24 мес.), но ее амплитуда более, чем в 5 раз, меньше амплитуды 28-месячной гармоники. Можно отметить также слабые пики на периодах 1,0 и 1,2; 2,8 и 4,8 г. Сложение этих гармоник порождает амплитудную модуляцию колебаний скорости \bar{u} во времени. Она хорошо видна на рис. 2.

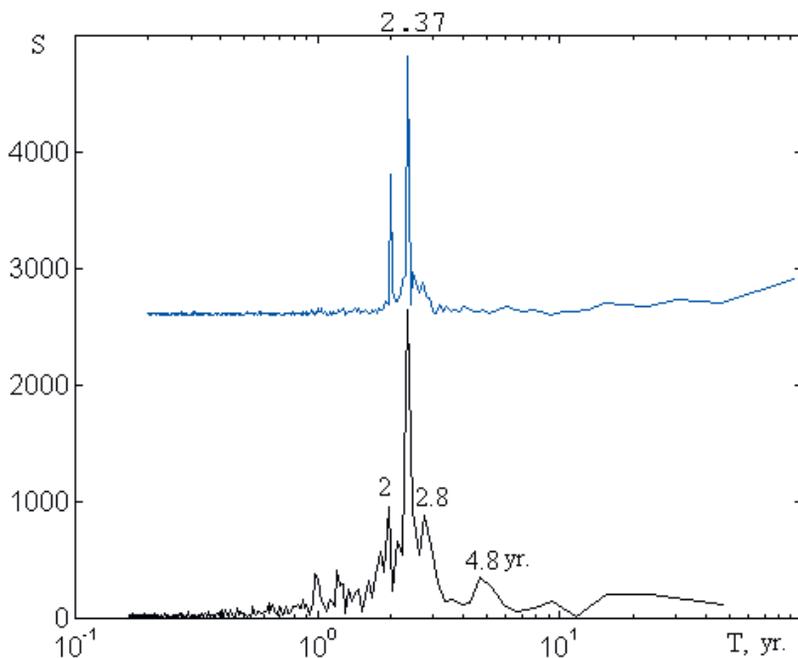


Рис. 3. Спектры координаты полюса x (вверху) и средней скорости \bar{u} ветра в экваториальной стратосфере (внизу) за период 1954–1999 гг. Для демонстрации подобия двух спектров кривая для координаты полюса x преобразована следующим образом: $T=2T_0$ и $S=30S_0+2600$, где T_0 и S_0 – фактические величины периода и спектральной плотности соответственно.

Далее мы вычислили периодограммы координат x и y северного географического полюса по их временным рядам за период с 1954 по 1999 г. (всего 920 величин с дискретностью 0,05 г.) (IERS Annual Report). Они получились практически одинаковыми. Поэтому здесь приведена только периодограмма координаты x (рис. 3). Среди гармоник доминирует составляющая с периодом Чандлера 1,18 г. Имеется также хорошо выраженная годовая гармоника. Ее мощность меньше мощности чандлеровской гармоники более чем в 3 раза.

Удивительной особенностью спектров скорости \bar{u} и координат полюса x и y является их подобие с коэффициентом 1:2. Увеличим, например, ровно в два раза масштаб периодов на оси абсцисс y спектра координат полюса, как это сделано на рис. 3, и тогда все детали спектров скорости ветра \bar{u} и движения полюса совпадут, т. е. частота движения полюса Земли синхронизована с удвоенной частотой КДЦ в атмосфере. Однако еще раз отметим, что периоды изменения координаты полюса не такие, как для КДЦ, а получены линейным преобразованием, поэтому механизм именно такого влияния, если оно и существует, неясен.

Обобщение экспериментальных и теоретических исследований привело нас к пониманию того, что период КДЦ равен линейной комбинации частот, соответствующих удвоенным периодам приливного года (0,97 г.), прецессии (18,6 г.) и движения перигея (8,85 г.) месячной орбиты Земли

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{0,97} - \frac{1}{8,85} - \frac{1}{18,61} \right) = \frac{1}{2,3}. \quad (3)$$

Частота приливного года используется в (3), потому что механизм возбуждения КДЦ связан с поглощением волн Кельвина и смешанных Россби-гравитационных волн в экваториальной стратосфере. Однако природа этих волн не ясна. По нашим наблюдениям за изменениями полей аномалий давления, геопотенциала, температуры и облачности, планетарные атмосферные волны, называемые волнами Россби и Кельвина, ведут себя и имеют те же характеристики, что и лунные приливные волны [9]. Исследование экваториальных компонент момента импульса атмосферных

ветров также показало, что в их спектре доминируют полумесячная и квазинедельные лунные волны, которые в метеорологии трактуют как волны Янаи. Эккарт еще в 1960 г. показал, что волны Россби – это, по существу, колебания, описываемые приливным уравнением Лапласа [14, с. 319]. Учитывая все это, мы полагаем, что волны Россби, Кельвина и Янаи есть видимые проявления приливных волн в атмосфере. От года к году они повторяются не с периодом тропического года 365,24 сут., а с периодом 13 тропических месяцев, равным 355,16 сут. $\approx 0,97$ г. Он называется приливным годом [3].

В отличие от резонансного выражения (2), в (3) все частоты имеют удвоенные периоды. Это означает, что выражение (3) соответствует не основному резонансу, а резонансу n -го рода, то есть субгармоническому колебанию, существование которого следует из теории Мандельштама и Папалекси [4].

Итак, квазидвухлетняя цикличность смены направления ветра в экваториальной стратосфере является комбинационным колебанием, возникающим вследствие воздействия на атмосферу трех периодических процессов: а) лунно-солнечных приливов, б) прецессии орбиты месячного обращения Земли вокруг барицентра системы Земля – Луна и в) движения перицентра этой орбиты. В случае КДЦ синхронизация происходит на комбинационных частотах n -го рода.

Естественные синоптические периоды Мультиановского

Лунно-солнечные приливы деформируют Землю, изменяют момент инерции Земли и, как следствие, оказывают заметное влияние на скорость суточного вращения Земли. Теория позволяет вычислять приливные колебания скорости вращения Земли на любой интервал времени [7, 17]. В качестве иллюстрации на рис. 4 приведен график приливных отклонений скорости v суточного вращения Земли от эталонной ($2\pi/86400$ рад/с) в относительных единицах на 2015 год.

На рисунке можно видеть, что на протяжении тропического месяца v испытывает два полумесячных колебания с максимумами при максимальном удалении Луны от небесного экватора, как в

Северное, так и в Южное полушарии (т. е. при луностояниях), и минимумами при пересечении Луной экватора (т. е. при равноденствиях).

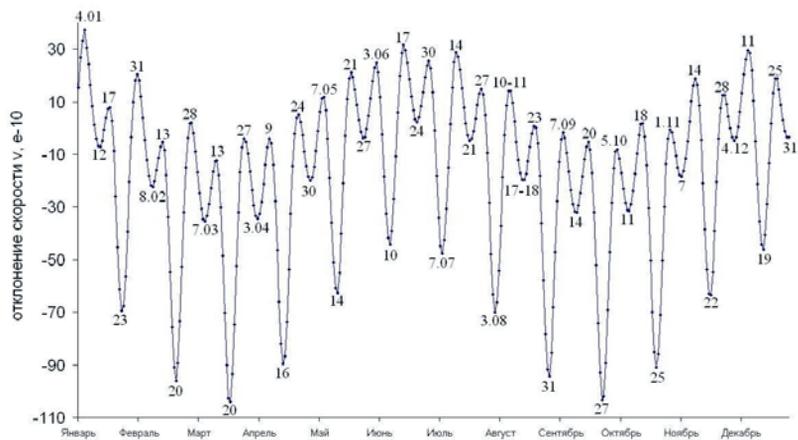


Рис. 4. Приливные колебания скорости вращения Земли в 2015 г. Цифры на кривой – даты наступления максимумов и минимумов и

Мониторинг приливных колебаний скорости v , эволюции синоптических процессов в атмосфере, режимов атмосферной циркуляции и вариаций гидрометеорологических характеристик во времени показал, что большая часть типов синоптических процессов в атмосфере изменяется **синхронно** с приливными колебаниями скорости вращения Земли [6, 7, 10, 17]. На ретроспективных данных мы проверили, как часто экстремумы (минимумы или максимумы) угловой скорости совпадают с моментами перестроек элементарных синоптических процессов (ЭСП) по типизации Г.Я. Вангенгейма. Статистический анализ показал, что в 76 % случаев моменты экстремумов угловой скорости совпадают в пределах ± 1 сут. с датами перестроек ЭСП. В 24 % случаев моменты экстремумов v отличаются на два и более дня от ближайших дат перестроек ЭСП [6].

Многолетний сравнительный мониторинг изменений метеорологических характеристик в Москве, Владивостоке и других пунктах с ходом приливных колебаний скорости v отчетливо

подтверждает вывод о совпадении погодных вариаций с квазинеделльными экстремумами v (<http://geoastro.ru>). Мониторинг хода метеоэлементов в других городах проводится пока только С.П. Перовым и Л.В. Зотовым. Они подтверждают, что изменения погоды синхронизируются с колебаниями скорости вращения Земли.

В настоящее время заинтересовавшийся читатель сам может убедиться в том, что смены режимов погоды происходят не случайно, а синхронизуясь с датами экстремумов приливных колебаний скорости вращения Земли v . Для этого надо сравнивать приводимые на сайте ООО "Данио-Пресс" (<http://hmn.ru>) недельные графики изменения метеорологических характеристик (температуры, давления, влажности, ветра) на метеостанциях Земного шара с датами минимумов или максимумов приливных колебаний v на графике, ежегодно размещаемом на сайте автора (<http://geoastro.ru>).

Смены режимов погоды совпадают с экстремумами приливных колебаний скорости v , которые соответствуют моментам лунностояний и лунных равноденствий. Подобно трехмесячным сезонам года, связанным с обращением Земли вокруг Солнца, в режимах погоды выделяются своего рода квазинеделльные «сезоны» погоды.

Квантование погодных режимов впервые описал сто лет назад Б.П. Мультановский и назвал их **естественными синоптическими периодами** (ЕСП) [5]. Указанные выше наблюдения свидетельствуют о том, что ЕСП Мультановского, вероятно, возникают вследствие месячного обращения Земли и Луны вокруг их барицентра. Погода синхронизируется с моментами лунных равноденствий и луностояний. В отличие от солнечных сезонов лунные ЕСП непостоянны: они варьируют от 4 до 9 сут. при средней продолжительности 6,8 сут. Эти вариации обусловлены частотной модуляцией колебаний приливных сил вследствие движения перигея лунной орбиты. Графики приливных колебаний скорости v дают своего рода расписание ЕСП, демонстрируя, что длительности ЕСП изменяются неслучайным образом. К сожалению, работы, в которых динамика ЕСП ошибочно рассматривается в формате боруновского движения, все еще появляются.

Заметим, что синхронизация не определяет механизмы возникновения термобарических образований вследствие бароклинной неустойчивости атмосферы, а навязывает атмосферным процессам ритмы эволюции, близкие к колебаниям приливных сил (точнее, к ритмам системы Земля – Луна – Солнце). Современные прогностические модели не учитывают рассматриваемые выше приливные колебания скорости вращения Земли, однако на временных масштабах около недели способны правильно воспроизводить смену синоптических режимов.

Декадные изменения климата

Синхронизация изменений метеорологических характеристик с изменениями скорости вращения Земли v и динамикой системы Земля – Луна – Солнце отмечается не только на внутримесячных масштабах времени, но и на межгодовых и декадных масштабах. Уже несколько десятилетий известно, что многолетние изменения аномалий глобальной температуры воздуха T коррелируют с декадными флуктуациями скорости вращения Земли v . Рис. 5, построенный по данным среднегодовых аномалий температуры HadleyCRUT3 и ряда v , иллюстрирует эту связь. Можно видеть, что при ускорении вращения Земли температура T растет, а при замедлении – падает. Коэффициент корреляции T с v равен 0,67.

Сингулярный спектральный анализ (разложение по эмпирическим ортогональным функциям времени) рядов скорости вращения Земли, глобальных аномалий температуры воздуха и уровня моря указывает на присутствие в них периодов, близких к лунным периодам 18,6 и 8,85 года [18].

В [8] выявлена корреляция эпох атмосферной циркуляции в Северном полушарии с изменениями в скорости вращения Земли. На рис. 6 кривая накопленных сумм $\sum C'$ аномалий частоты появления формы C (по типизации Г.Я. Вангенгейма) сравнивается с кривой изменений длительности суток δP ($\delta P = -86400 v$). Можно видеть, что убывающая часть кривой $\sum C'$ (пониженная частота появления формы C) соответствует ускорению вращения Земли (уменьшению длительности суток).

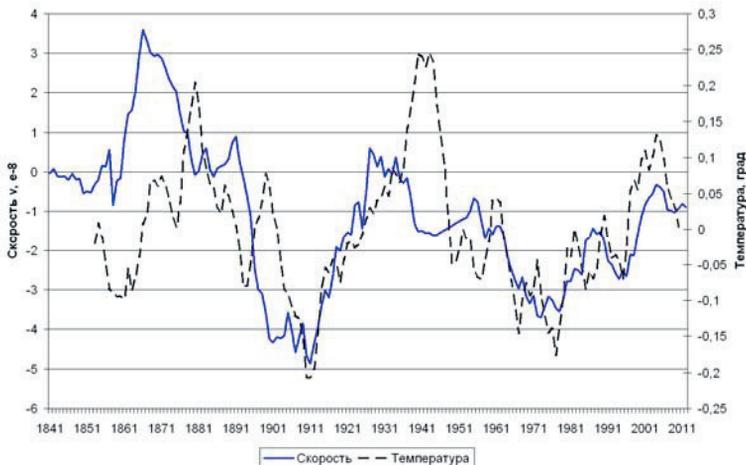


Рис. 5. Синхронные изменения скорости вращения Земли ($v \times 10^8$) в относительных единицах (сплошная) и глобальных аномалий температуры воздуха T (штриховая) по данным HadCRUT3 после исключения параболического тренда и скользящего пятилетнего сглаживания.

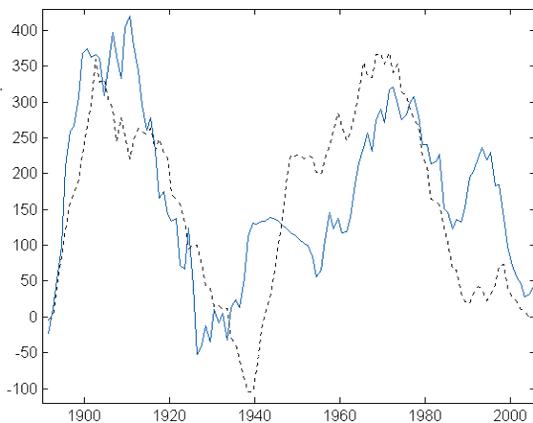


Рис. 6. Синхронные изменения длительности суток (сплошная кривая) и накопленной суммы аномалий частоты появления формы циркуляции C (пунктирная кривая). По оси ординат отложены длительность суток в 10 мкс и накопленная сумма аномалий частоты C в днях/год.

Когда форма C наблюдается более часто, чем обычно ($\Sigma C'$ растёт), вращение Земли замедляется (длительность суток увеличивается). Коэффициент корреляции между кривыми $\Sigma C'$ и δP равен $0,70 \pm 0,04$.

Вращение Земли ускорялось с 1858 до 1866, с 1904 до 1934, с 1973 до 2003 г., а замедлялось с 1867 до 1903, с 1935 до 1972 и с 2004 г. по настоящее время. Именно вблизи этих смен режимов вращения Земли наблюдались смены декадных тенденций изменения глобальной температуры и температуры Северного полушария, смены эпох атмосферной циркуляции, интенсивности индийского муссона, массы ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии [12, 17].

Экстремально жаркие летние сезоны с возгораниями торфяных болот и холодные зимы в европейской части России наблюдались в годы, близкие к 2002/2010, 1972, 1936/1938 и 1901 гг. [11]. Все они практически совпадают со сменами многолетних режимов скорости вращения Земли.

Все это свидетельствует о тенденции к синхронизации климатических изменений со сменами многолетних режимов суточного вращения Земли. При этом нельзя полагать, что декадные изменения скорости вращения Земли влияют на атмосферные процессы и динамику климатической системы.

На внутригодовых масштабах времени выполняется закон сохранения момента импульса системы Земля – атмосфера: при увеличении (уменьшении) суперротации атмосферы скорость вращения Земли замедляется (ускоряется). В ослабленном виде эта закономерность проявляется еще и на квазидвухлетних и Эль-Ниньо – Южное колебание масштабах времени. Однако на более длительных периодах времени она исчезает и начинают действовать иные механизмы корреляции.

Декадные вариации скорости вращения Земли в десятки раз превосходят внутригодовые и межгодовые изменения. Поэтому их уже невозможно связать с изменениями суперротации атмосферы из-за отсутствия последних на многолетних интервалах времени. В [7, 17] показано, что декадные вариации скорости вращения, вероятно, вызваны изменениями момента инерции литосферы Земли

вследствие вариаций массы ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии. При увеличении (уменьшении) момента инерции литосферы скорость ее дрейфа по астеносфере (под действием непрерывных приливных вибраций) уменьшается (увеличивается). Эти вариации скорости дрейфа литосферы интерпретируются как декадные вариации угловой скорости вращения всей Земли. Состояние ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии определяется процессами в климатической системе. Поэтому климатические характеристики (температура, эпохи циркуляции, муссоны, массы ледниковых щитов и т.п.) коррелируют с изменениями скорости вращения Земли.

Подробности можно найти в публикациях Н.С. Сидоренкова (см. сайт <http://geoastro.ru>). Там же приведены графики сравнения хода метеоэлементов с экстремумами скорости v за 2012–2015 гг.

Список использованных источников

1. *Блехман И.И.* Синхронизация в природе и технике. – М.: Наука, 1981. – 352 с.
2. *Гледзер Е.Б., Должанский Ф.В., Обухов А.М.* Системы гидродинамического типа и их применение. – М.: Наука, 1981.
3. *Дуванин А. И.* Приливы в море. – Л.: ГИМИЗ, 1960.
4. *Мандельштам Л.И.* Полное собрание трудов. Том II. – М.: Изд-во АН СССР, 1947.
5. *Мультиановский Б.П.* Основные положения синоптического метода долгосрочных прогнозов погоды. – М.: Изд-во ЦУЕГМС, 1933. – 139 с.
6. *Сидоренков Н.С.* Приливные колебания атмосферной циркуляции // Труды Гидрометцентра России. – 2000. – Вып. 331. – С. 49–63.
7. *Сидоренков Н.С.* Атмосферные процессы и вращение Земли. – СПб.: Гидрометеоздат, 2002. – 366 с.
8. *Сидоренков Н.С., Орлов И.А.,* Атмосферные циркуляционные эпохи и изменения климата // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 9. – С. 22–29.
9. *Сидоренков Н.С.* О неправильной оценке роли приливных явлений в геофизике // Геофизические исследования. – 2010. – Т. 11. Спец. вып. – С. 119–128.
10. *Сидоренков Н.С., Сумерова К.А.* Синхронизация вариаций атмосферной циркуляции колебаниями лунно-солнечных приливов и подбор

аналогов для долгосрочных прогнозов погоды // Труды Гидрометцентра России. – 2010. – Вып. 344. – С. 238–251.

11. *Сидоренков Н.С., Сумерова К.А.* Биения колебаний температуры как причина аномально жаркого лета 2010 г. на Европейской территории России // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 6. – С. 81–94.

12. *Сидоренков Н.С., Сумерова К.А.* Геодинамические причины декадных изменений климата // Труды Гидрометцентра России. – 2012. – Вып. 348. – С. 195–214.

13. *Gruzdev A.N., Bezverkhny V.A.* Two regimes of the quasi-biennial oscillation in the equatorial stratospheric wind // J. Geoph. Res. – 2000. – Vol. 105, No. D24. – P. 29435–29443.

14. *Eckart C.* Hydrodynamics of Oceans and Atmospheres. – New York: Pergamon Press, 1960. – 293 p.

15. *Lindzen R.S., Holton J.R.* A theory of the quasi-biennial oscillation // J. Atmos. Sci. – 1968. – Vol. 25. – P. 1095–1107.

16. *Reed R.J.* A tentative model of the 26-month oscillation in tropical latitudes // Q. J. R. Meteorol. Soc. – 1964. – Vol. 90. – 441–466.

17. *Sidorenkov N.S.* The interaction between Earth's rotation and geophysical processes. – Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009. – 317 p.

18. *Zotov L.V., Bizouard Ch., Sidorenkov N.S.* Common oscillations in global Earth temperature, sea level, and Earth rotation // Geoph. Res. Abstr. – 2014: – Vol. 16. – EGU2014-5683.

Поступила в редакцию 17.08.2015 г.