МНОГОКАНАЛЬНЫЙ СИНГУЛЯРНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УГЛОВОГО МОМЕНТА АТМОСФЕРЫ

Зотов Л.В.[1,2,4], Сидоренков Н.С.[3], Бизуар К.[4], Пастушенкова М.В.[2]

[1]Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им М.В. Ломоносова, Москва, Россия

[2]Московский институт электроники и математики Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, Москва, Россия

[3]Гидрометцент России, Москва

[4]Парижская обсерватория, SYRTE Париж, Франция

Вариации во вращении Земли в первую очередь вызваны изменениями момента импульса атмосферы (AAM). Изменение скорости вращения Земли тесно связано с изменением его наиболее сильно меняющейся осевой компоненты χ_3. С использованием многоканального сингулярного спектрального анализа (МССА) выполнено исследование данных по моменту импульса атмосферы AAM на сетке широт и долгот по данным NCEP/NCAR с 1948 по 2011 г. Применение МССА совместно к компонентам массы и движения позволило выделить годовые, полугодовые, четырехмесячные, квазидвухлетние, пятилетние и низкочастотные колебания, а также выявить главные компоненты (ГК) связанные с Эль-Ниньо Южным Колебанием (ЭНЮК). Результаты исследования могут быть полезны для изучения распространения Эль-Ниньо в атмосфере. Компонента тренда, возможно, отражает изменения атмосферной циркуляции, связанные с изменениями климата.

***Ключевые слова**: вращение Земли, циркуляция атмосферы, угловые моменты атмосферы, многоканальный сингулярный спектральный анализ, Эль-Ниньо южное колебание, изменения продолжительности суток*

1. Введение

В последние десятилетия было установлено, что обмен моментом импульса между атмосферой, океаном и твердой Землей является основной причиной колебаний скорости вращения Земли (изменения продолжительности суток, LOD) и движения полюсов [17,20,32]. Влияние атмосферы на скорость вращения Земли особенно велико на периодах год и менее в связи с тем, что атмосфера более подвижна, чем океан, и ее зональный поток не столь ограничен континентами, как течения в океане. Осевая (зональная) компонента вектора углового момента атмосферы подвержена наибольшим изменениям ($\sim 5\cdot 10^{25}$ кг·м^2·с$^{-1}$) [30, 31]. Т.о. изучение зональной циркуляции и осевой компоненты AAM имеет огромное значение для объяснения вариаций в скорости вращения Земли. Меридиональные компоненты AAM, в свою очередь, возбуждают движение полюсов.

AAM может быть вычислен на основе метеорологических данных и моделей глобальной циркуляции. Такие центры, как американский метеорологический центр NCEP/NCAR, японский JMA, европейский ECMWF [35] предоставляют данные по AAM, получаемые в ходе реанализа данных. Проинтегрированный по всем широтам и долготам AAM называется эффективным угловым моментом атмосферы (EAAM) и может использоваться для сравнения с изменениями продолжительности суток после вычитания прочих эффектов, таких как зональные приливы и др. Такие сравнения, выполнявшиеся многими авторами [2, 4; 10, 18, 21, 22], показали, что в широком частотном диапазоне – от нескольких дней до нескольких лет – атмосфера вызывает основную часть изменений в продолжительности суток LOD.

Этот вывод подтверждает рис. 1, где слева представлены графики EAAM и LOD. При этом мы разделили высокочастотные и низкочастотные колебания LOD (зональные приливы удалены), используя фильтр Пантелеева [40] с частотой среза f_0=1/500 сут$^{-1}$. Видно, что высокочастотные колебания LOD хорошо согласуются с изменениями AAM (суммой компонент ветра и IB-давления). Коэффициент корреляции на интервале 1962-2010 гг. составляет r=0.959±0.001. Высокочастотные компоненты AAM и LOD, усредненные на всем интервале по дням года, представлены на рис. 1 справа. Коэффициент корреляции между этими кривыми составляет r=0.992±0.002. Это не оставляет сомнений в том, что обмен угловым моментом между атмосферой и твердой Землей на внутригодовых периодах практически не требует дополнительного вклада океана.
Что касается низкочастотных колебаний LOD, для их объяснения недостаточно только вклада атмосферных процессов, и требуется возбуждение со стороны океана и ядра [5,17,20]. Недавно мы показали [40], что такая климатическая характеристика, как глобальная приповерхностная температура на Земле антикоррелирована с низкочастотными изменениями LOD на декадных шкалах времени 60 и 20 лет, (см. рис. 1 слева). Для прояснения причин этого явления необходимы исследования изменений зональной циркуляции атмосферы, связанных с естественными колебаниями и климатическими процессами. В этой работе предприняты попытки такого исследования с применением МССА к картам AAM.

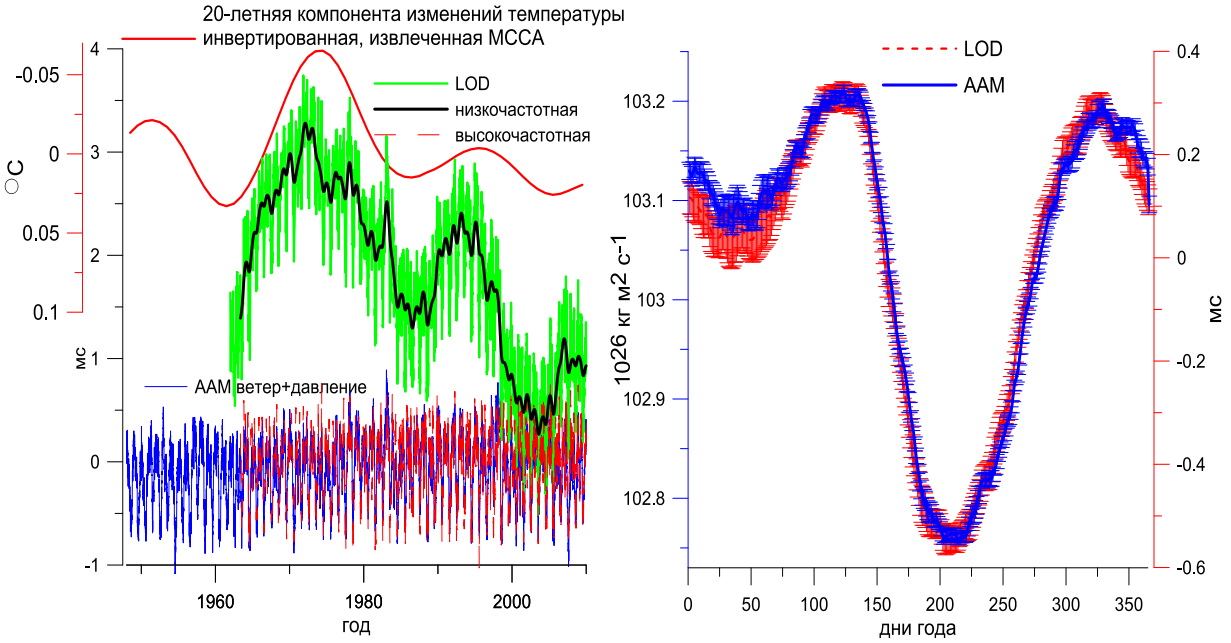


Рис. 1. Высокочастотные и низкочастотные изменения продолжительности суток LOD, изменения эффективного углового момента атмосферы EAAM (давление+IB-ветер) и инвертированная 20-летняя компонента изменений глобальной температуры (слева). Изменения EAAM и LOD, усредненные по дням года на интервале 1962-2010 гг. (справа).

Влияние атмосферы на скорость вращения Земли может быть разделено на влияние ветров и давлений. Таким образом, осевая компонента EAAM χ_3 включает две компоненты: давления (массы) χ_3^P и ветра (движения) χ_3^W. Первая связана с изменениями тензора инерции атмосферы, а вторая связана с относительным моментом импульса зональных ветров. Земля ускоряется, когда атмосферный момент инерции χ_3^P возрастает в результате перераспределения воздушных масс. В соответствии с законом сохранения момента импульса увеличение χ_3^W также приводит к замедлению скорости

вращения Земли и к увеличению LOD. Западные ветра, принимая угловой момент от Земли, дают положительный вклад в AAM, при этом уменьшая скорость вращения Земли. Усиление восточных ветров, наоборот, ускоряет Землю и замедляет суперротацию атмосферы. В среднем, за 70 суток (оборотов Земли) атмосфера совершает 71 оборот [32]. Это видно из положительного среднего значения углового момента ветров $<\chi_3^W>=1.4\cdot10^{26}$кг·м^2·с$^{-1}$,его стандартное отклонение составляет $\sigma(\chi_3^W)=2.3\cdot10^{25}$кг·м^2·с$^{-1}$ Для давления среднее составляет $<\chi_3^P>=102\cdot10^{26}$кг·м^2·с$^{-1}$, стандартное отклонение $\sigma(\chi_3^P)=0.4\cdot10^{25}$кг·м^2·с$^{-1}$. Изменчивость компоненты ветра больше, чем давления, однако последняя имеет большее среднее значение. Из рис. 1 видно, что максимумы AAM приходятся на 1/05 и 7/12, минимумы - на 4/08 и 27/02, что определяется сезонным изменением ветров.

Связь между глобальным вращением планеты и её оболочек имеет большое значение не только для астрометрии и геодинамики, но и для метеорологии и климатологии, для моделирования атмосферы и океана. Распределения ветров и давлений, которые представлены данными AAM, связаны с LOD и динамикой вращения Земли. В нашем исследовании особое внимание уделено региональным аспектам изменений AAM. Целью было изучение осевых компонент AAM, представленных в виде карт (многомерных временных рядов) на сетке широт и долгот с помощью многоканального сингулярного спектрального анализа (MCCA). Являясь обобщением метода эмпирических ортогональных функций (ЭОФ), хорошо известного в атмосферных и климатических исследованиях [15, 24, 26, 29, 33], MCCA, в то же время, более гибок, чем простой метод ЭОФ [39]. Исследование осевого AAM на интервале 1970-1998 гг. уже выполнялось в работах [6, 7, 8]. В них AAM усреднялся по 20 долготным поясам и обрабатывалось MCCA. MCCA также применялся к 1104 ячейкам пространственных карт AAM в работе [3]. Там также была выделена компонента, связанная с Эль-Ниньо на периодах 5 и 2 года, и показано полярное движение углового момента на графиках Ховмеллера. Наша работа расширяет предыдущие исследования для региональных компонент AAM на сетке широт и долгот для интервала 1948-2010 г. Нами впервые применен совместный MCCA для компоненты массы и движения. Новый метод совместного включения двух компонент позволяет точнее выявлять коррелированные изменения в обеих компонентах. Анимированные карты позволяют оценить поведение различных компонент, учитывая их связь с различными модами климатических колебаний, таких как Эль-Ниньо. Компоненты получаются без предварительной фильтрации непосредственно в результате MCCA. Исходные данные и метод их вычисления представлены в следующем разделе. Математическая основа метода MCCA и результаты представлены в третьем и четвертом разделах. В заключении обсуждается вопрос о применимости результатов к исследованиям вращения Земли и перспективы метода.

2. Использованные данные и теория

Уравнения Эйлера-Лиувилля для вращающейся Земли дает для малых вариаций m_3 угловой скорости вращения Земли выражение:

$$m_3=\psi_3. \qquad (1)$$

Здесь справа стоит осевая компонента возбуждения, которая может рассматриваться как входной процесс, приводящий к изменениям в скорости вращения Земли. Возбуждение зависит от изменений тензора инерции Земли возникающих вследствие перераспределения масс, а также от относительного углового момента ветров и течений. Процессы в атмосфере, океане, земном ядре и мантии влияют на вращение планеты, вызывая соответствующее возбуждение. Момент внешних сил также играет свою роль. В данной работе мы ограничимся рассмотрением осевой компоненты атмосферного возбуждения.

В уравнении (1) переменная m_3 может быть выражена через изменения продолжительности суток LOD как $m_3 = -\Delta LOD/LOD$ [9,14]. Вместо возбуждающих функций принято использовать функции эффективного углового момента ЕААМ χ_3, осевая компонента которых отличается только знаком $\psi_3 = -\chi_3$. Хорошее согласие между изменениями LOD и ЕААМ проиллюстрировано Рис.1 и позволяет считать, что выполняется равенство $\Delta LOD/LOD = \chi_3$, и все полученные в данной работе компоненты ААМ сказываются на вращении Земли, приводя к соответствующим изменениям LOD. Для того, чтобы сразу оценивать эффект в LOD, мы перевели величины ЕААМ в величины, принятые для LOD, домножив χ_3 на стандартное число миллисекунд в году LOD=86 400 000 мс. Региональный АММ будет дан в миллисекундах на кв. градус.

Нами использованы данные реанализа NCEP/NCAR, полученные на основе климатических моделей с ассимиляцией всех имевшихся у агентства метеорологических наблюдений. Интерполированные поля ветра и давления доступны в рамках этого реанализа с 1948 года с шагом в 6 часов. Данные для различных высот (уровней давления) расположены по ссылке http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html.

Эти данные были преобразованы в карты ААМ нашими коллегами (Y.H. Zhou) в центре астрогеодинамики Шанхайской обсерватории. В каждой ячейке широтно-долготной карты компонента давления вычисляется по формуле

$$X_3^P(\lambda,\varphi) = \frac{0.756R^4}{C_m g} p_s(\lambda,\varphi)\cos^3\phi, \qquad (2)$$

а компонента ветра – по формуле

$$X_3^W(\lambda,\varphi) = \frac{R^3}{C_m \Omega g}\int u(\lambda,\varphi,p)\cos^2\phi dp \qquad (3)$$

где R и Ω – средний радиус и скорость вращения Земли, Cm – главный момент инерции мантии относительно оси вращения, g – ускорение свободного падения, λ и φ – долгота и широта, приписанные ячейке, p - уровень давления, p_s - приземное давление, u – скорость зональных ветров, проинтегрированная по выбранной ячейке широтно-долготной карты. Компонента давления, приведенная к поверхности в формуле (2), вычислялась с учетом гипотезы обратного барометра (IB) [36], предполагающей компенсацию изменений атмосферного давления над поверхностью океана изменением его уровня. Выражение (3) предполагает интегрирование по всем уровням атмосферного давления (барических высот). Эта компонента учитывает не только поверхностные, но и высотные, к примеру, тропосферные ветра [28].

Обработка исходных 6-часовых карт на сетке $2.5^o \times 2.5^o$ за 50 лет довольно трудоемка, поэтому мы преобразовали их к сетке $5^o \times 5^o$ и временному разрешению 10 дней. Это уменьшило объем вычислений в 240 раз и позволило выполнить их на персональном компьютере с 4-х ядерным процессором AMD и 32 Гб оперативной памяти.

Интегрирование ААМ по всем широтам и долготам дает эффективный угловой момент ЕААМ

$$\chi_3^{P,W} = \iint X_3^{P,W}(\lambda,\varphi)d\lambda d\varphi \qquad (4)$$

Сравнение интегрального ЕААМ с данными, предоставленными Бюро геофизических флюидов Международной службы вращения Земли IERS (http://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/Geophysical FluidsData/geoFluids.html) показало полное их согласие. Исходные данные ЕААМ ветра и давления представлены на рис. 2 слева, а спектры - на рис. 3 жирной линией. Отчетливо выделяются периоды год, полгода и треть года.

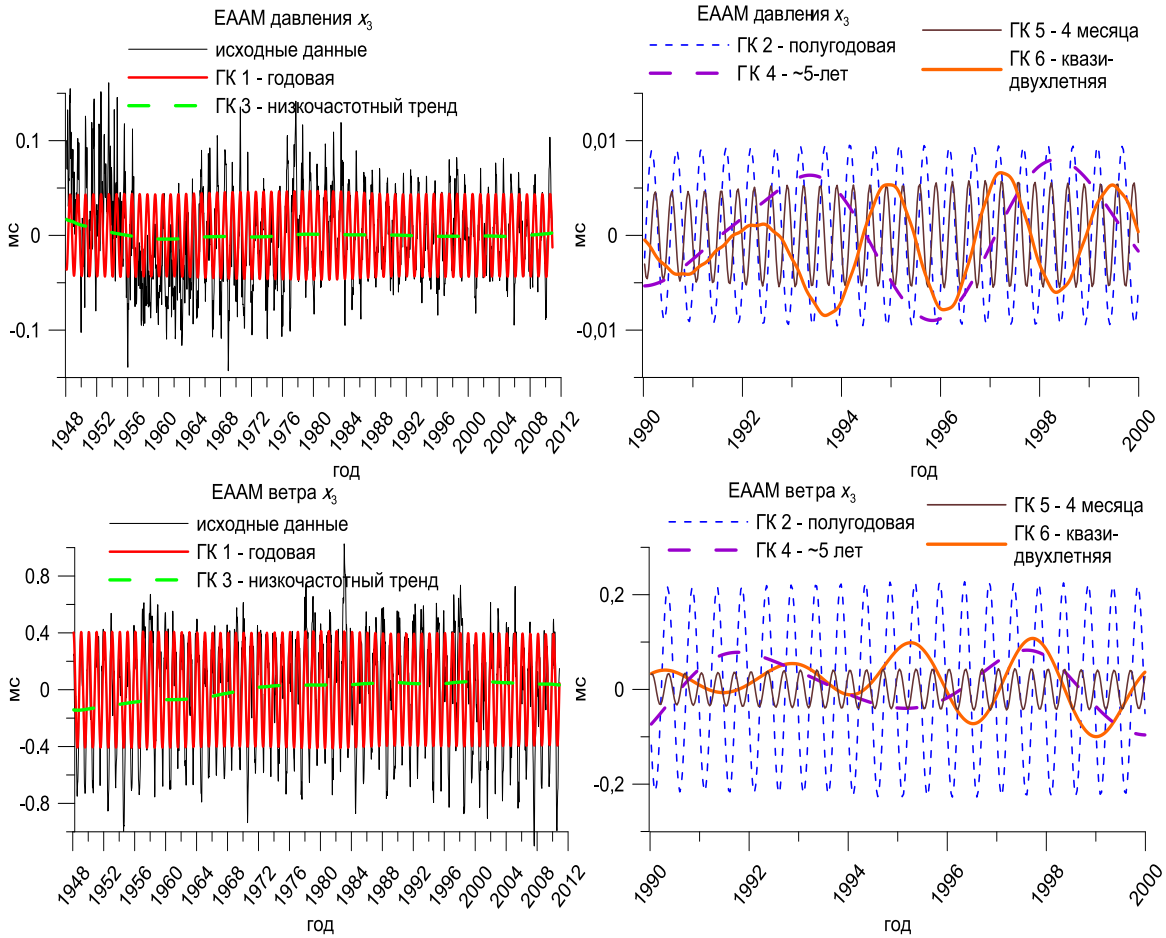


Рис. 2. Главные компоненты (ГК) ААМ давления (вверху) и ветра (внизу), проинтегрированные по всем широтам и долготам. Слева годовая ГК 1 и тренд ГК 3 сопоставлены с исходными данными. Справа даны графики с 1990 по 2000 год, представляющие ГК, связанные с полугодовым (ГК 2), квазипятилетним (ГК 4), четырехмесячным (ГК 3) и двухлетним колебаниями (ГК 6).

3. Многоканальный сингулярный спектральный анализ

Многоканальный сингулярный спектральный анализ, также называемый расширенным ЭОФ, является обобщением сингулярного спектрального анализа ССА для многокомпонентных (многоканальных) временных рядов [11,12,13,16,27]. ССА, в свою очередь, основан на МГК, обобщенном для временных рядов таким образом, что вместо обычной корреляционной матрицы анализируется траекторная матрица. Ее получают вложением временного ряда в пространство размерности L. Параметр L именуют лагом, или длиной “гусеницы”. При $L = 1$ ССА вырождается в МГК (траекторная матрица без задержки/лага становится ковариационной матрицей). Алгоритм ССА включает четыре этапа: (а) формирование траекторной матрицы, (б) ее разложение по сингулярным числам (SVD), (в) группировку сингулярных чисел и (г) восстановление главных компонент (ГК) посредством генкелизации. Алгоритм ССА описан детально в [4,12,13]. МССА содержит ту же последовательность операций.

Вначале (а) мы выбираем параметр задержки L. Для каждой ячейки данных на широтно-долготной карте мы располагаем временным рядом длины N. Будем считать каждый такой ряд каналом, а значения в нем обозначать $Cij(t_k)$, где $k = 0, \ldots, N-1$ задает моменты времени, а i,j – индексы ячейки на карте. Для каждого канала многомерного временного ряда строится траекторная матрица

$$X_{Cij} = \begin{pmatrix} \Delta Cij(t_0) & \Delta Cij(t_1) & \cdots & \Delta Cij(t_{K-1}) \\ \Delta Cij(t_1) & \Delta Cij(t_2) & \cdots & \Delta Cij(t_K) \\ \cdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ \Delta Cij(t_{L-1}) & \Delta Cij(t_L) & \cdots & \Delta Cij(t_{N-1}) \end{pmatrix} \quad (5)$$

где $K = N - L + 1$.

Все траекторные матрицы $\mathbf{X_{Cij}}$ для всех каналов *Cij* встраиваются в большую блочную матрицу **X**

$$\mathbf{X=[X_{C0,0}, X_{C1,0}, X_{C0,1}\ X_{C1,1}, X_{C2,0}, \ldots.\ X_{Ci,j}, \ldots\ X_{Cl,m}]^T} \quad (6)$$

В нашей реализации мы располагаем блоки один под другим. Эта многокомпонентная траекторная матрица, содержащая блоки для каждого канала, может быть использована для вычисления ковариационной матрицы с задержкой $\mathbf{A} = \mathbf{X^T X}$.

На втором этапе (б) сингулярное разложение SVD применяется к матрице **X**

$$\mathbf{X= USV^T}.$$

В результате получают набор сингулярных чисел s_i, стоящих по диагонали матрицы **S** в порядке убывания (см. Рис. 2) и соответствующих им $\mathbf{v}_i$ (левых) и $\mathbf{u}_i$ (правых) собственных векторов. Если решать задачу на собственные значения для $\mathbf{A= VS^TSV^T}$, тогда собственные значения будут квадратами сингулярных чисел $\lambda_i = s_i^2$, а левые собственные вектора **v***i* (столбцы матрицы **V**) составят базис из эмпирических ортогональных функций (ЭОФ).

Компоненте с номером *i* соответствует матрица

$$\mathbf{X}^i = s_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T .$$

В МССА мы восстанавливаем векторную ГК из матрицы, зная ее структуру, соответствующую структуре **X**. Это делается посредством генкелизации (г), позволяющей восстановить каждый канал *i*-й ГК из соответствующих блоков матрицы $\mathbf{X}^i$, организованной как в (6). Положим, нам требуется восстановить канал *Clm*. Тогда каждый *k*-й отсчет может быть получен усреднением вдоль побочной диагонали соответствующего блока матрицы $\mathbf{Y} = \mathbf{X}^i_{Clm}$. Первые и последние *L* элементов ГК вычисляются по меньшему числу значений матрицы **Y**, поэтому соответствующие значения рядов будут менее состоятельными. Считается, что компоненты вдоль боковых диагоналей матрицы **Y** практически совпадают, и матрица почти Генкелева. Когда это строго не выполняется, появляются краевые эффекты.

Группировка (в) компонент необходима, если некоторые из сингулярных чисел (СЧ) связаны с одной и той же ГК и имеют сходное поведение, что можно выявить вычислив *w*-корреляции и другими способами [13]. В таких случаях (s_i) должны быть сгруппированы вместе и восстановлены как одна ГК. Это может быть сделано как до, так и после генкелизации (г) простым поэлементным суммированием компонент. Особенности группировки и теоремы о разделимости компонент представлены в [13, 38]. В результате получим набор ГК с убывающими по амплитуде модами изменчивости.

Основной параметр алгоритма – временной лаг *L*, который определяет размерность пространства вложения временного ряда, выбирается эвристически на основе рекомендаций, приведенных в [13, 38]. Он не должен превышать *N*/2, и желательно выбирать его так, чтобы ожидаемы во временном ряде периодичности укладывались в задаваемый *L* интервал целое число раз. Мы провели сравнение для *L* соответствующего 2, 5, 6, и 18 годам и пришли к выводу, что результаты весьма схожи. В данном исследовании было выбрано значение *L* эквивалентное 6 годам (*L* = 219 при шаге данных 10 дней), как наиболее оптимальное.

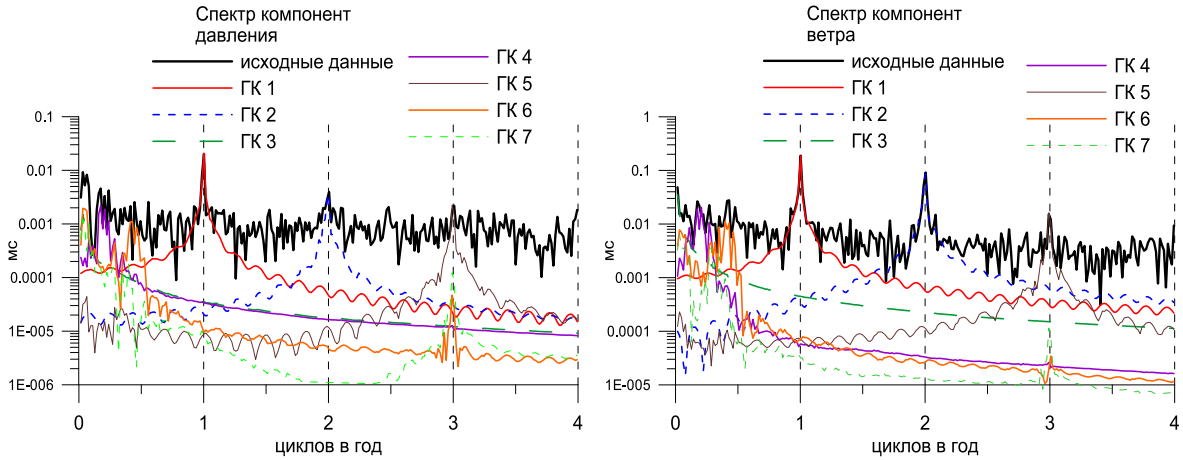


Рис. 3. Спектры выделенных ГК для давления (слева) и ветра (справа). Жирной сплошной кривой показаны спектры исходных данных. Остальные кривые отражают спектры главных компонент: ГК 1 имеет годовую периодичность, ГК 2 - полугодовую, ГК 3 соответствует низкочастотным колебаниям, ГК 4 – квазипятилетней моде, связанной с ЭНЮК, ГК 5 имеет четырехмесячную периодичность, ГК 6 и ГК 7 связаны с квазидвухлетним и низкочастотным колебаниями, коррелированными с ЭНЮК.

4. Совместный МССА компонент ААМ ветра и давления

Перед МССА-обработкой средние по компонентам ветра и давления за 62 года были вычтены. Карты средних полей представлены на рис. 4 вместе с интегральными графиками сумм по широтам и долготам. Они отражают постоянную составляющую распределения давлений и ветров на планете.

Среднее давления, рис. 4 вверху, показывает, что основной вклад поступает из экваториального пояса и быстро спадает на широтах $\pm 30^{o}$. В среднем, компонента массы дает больший вклад в суммарный ААМ, чем компонента движения (ветров). Вклад полярных и горных районов мал, что видно из интегральных кривых.

Среднее ветра, рис. 4 внизу. Минимум зональных ветров простирается вдоль экватора, а максимумы находятся на широтах $\pm 45^{o}$. Это связано с преобладанием восточных ветров в стратосфере на низких широтах, дающих отрицательный вклад в ААМ. Картина меняется на обратную на “конских широтах ” $\pm 30^{o}$ в обоих полушариях. Широты от 30^{o} до 60^{o} к северу и к югу характеризуются западными тропосферными потоками. Западные ветра, превалирующие здесь, содержат избыточный угловой момент (атмосфера вращается немного быстрее планеты в целом). Согласно теории зональной циркуляции Н.С. Сидоренкова [31, 23] угловой момент перераспределяется от экваториальных широт, где он закачивается в атмосферу от твердой Земли, к умеренным широтам, где он наоборот передается от атмосферы к твердой Земле, благодаря работе тепловой машины, переносящей теплый тропический воздух на более высокие широты, с одновременным сокращением его расстояния от оси вращения Земли.

После вычитания среднего мы применили МССА совместно к компонентам массы и движения ААМ. Это позволило выделить ГК, представляющие связанные изменения в ветрах и давлении. Соответствующие карты были размещены в интернете http://lnfm1.sai.msu.ru/_tempus/science/MSSA/ATMZ/.

На рис. 2 представлены интегральные кривые ЕААМ для выделенных компонент давления вверху и ветра внизу. Их спектры даны на рис. 3, откуда отчетливо ясно, каким спектральным компонентам соответствуют те или иные ГК. Оба эти рисунка убеждают нас в том, что МССА позволил эффективно разделить компоненты с периодами 5, 2, 1 год, полгода и треть года от долгопериодического тренда и шумов. В таб-

лице 1 представлены стандартные отклонения для изменчивости первых семи ГК массы и движения. Они вобрали в себя основную изменчивость сигнала. Компоненты с большими номерами имеют меньшую амплитуду и, в основном, имеют шумовую природу. Они в данной работе не исследуются.

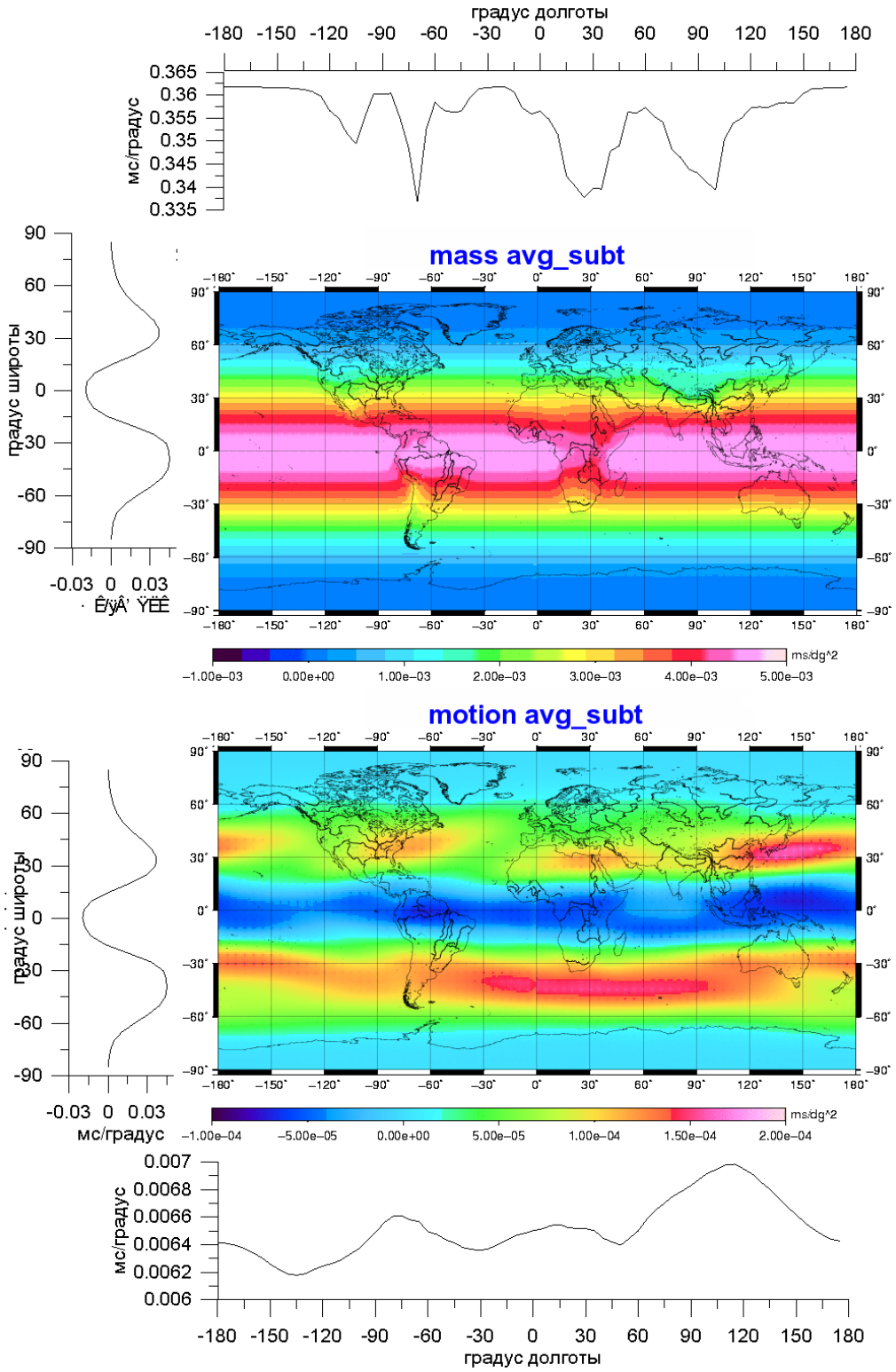


Рис. 4. Усредненные карты значений осевых компонент ААМ давления (вверху) и ветра (внизу). Графики сверху, снизу и слева от карты показывают значения, просуммированные по меридианам и параллелям.

ГК 1 давления (получена группировкой 1 и 2 сингулярных чисел СЧ) отражает годовой цикл изменчивости давления. На континентах изменения более заметны, чем на океанах. В январе положительные значения ААМ превалируют в северном полушарии, отрицательные – в южном. Это связано с антициклонической активностью и увеличением массы воздуха в зимнем полушарии, перераспределением масс воздуха с океана на континенты. Начало года при этом соответствует глобальному минимуму ГК1 ЕААМ (рис. 2, слева вверху). Области, ускоряющие вращение Земли, при этом доминируют над областями, замедляющими ее. К концу июня ситуация меняется на обратную: максимумы становятся минимумами, минимумы – максимумами. Противоположный знак аномалий в горных районах и прилегающих к ним долинах хорошо согласуется с результатами Сидоренкова [31].

ГК 1 ветра (1+2 СЧ) отражает годовое колебание, имеющее интегральный максимум в начале года и противоположное по фазе компоненте давления ГК 1. Амплитуда компоненты ветра на порядок больше чем компоненты давления (см. таблицу 1), именно она определяет годовую изменчивость ААМ, годовой минимум и максимум LOD (рис. 1 справа). Влияние компоненты ветра над океанами несколько сильнее влияния над континентами. Зоны одного знака простираются зональными поясами с некоторым наклоном к северо-востоку. Картина наиболее контрастна в конце января, когда зона конвергенции смещается к югу, полоса минимума находится в южном полушарии, а полоса максимума ААМ находится в северном полушарии на широтах около 30^{o}. Картина меняется на обратную в конце июля. В это время наблюдается минимум ААМ ветров и LOD, что говорит об ускоренном вращении Земли.

ГК 2 давления (3+4 СЧ) соответствует полугодовому колебанию. Экстремум этой компоненты запаздывает примерно на месяц относительно экстремумов и нулей годовой компоненты ГК 1. В январе и июле ГК 2 имеет максимум над Африкой, особенно к югу от Сахары, Бразилией, Мексикой и югом США, минимум над Восточной Канадой, Австралией и Азией. Интегральный ЕААМ давления имеет в эти месяцы максимум. Картина меняется на обратную в апреле и октябре.

ГК 2 ветра (3+4 СЧ) также имеет период полгода с интегральным минимумом в начале и середине года, совпадающими с экстремумами и нулями годового колебания. Карта ГК 2 довольно сложна. Зона максимума на 25^{o} с.ш. в Тихом океане сопровождается минимумом в Атлантике, Западной Сахаре, Мексике, северном и экваториальном Тихом океане, в Индийском океане к западу от Австралии. Картина меняется на обратную с полупериодом в 3 месяца.

ГК 3 давления (5 СЧ) отражает медленные изменения (тренд). Карта разности для ГК 3 с 1948 по 2011 гг. представлена на рис. 5 (слева). Видно, что за этот период давление возросло над Южной Америкой, Африкой, Западной Европой, Азией и Австралией. При этом тренд показывает увеличение ААМ давления над континентами и уменьшение над океанами. На рис. 5 слева внизу представлена интегральная кривая уменьшения этой ГК.

Таблица. 1 Стандартные отклонения (СКО) выделенных главных компонент в миллисекундах. Умножение на $\sqrt{2}$ даст амплитуду для гармоник.

	все	ГК 1	ГК 2	ГК 3	ГК 4	ГК 5	ГК 6	ГК 7
масса $\cdot 10^{-2}$	4.84	3.14	0.73	0.34	0.54	0.42	0.57	0.28
движение $\cdot 10^{-1}$	3.77	2.84	1.60	0.61	0.53	0.30	0.39	0.17

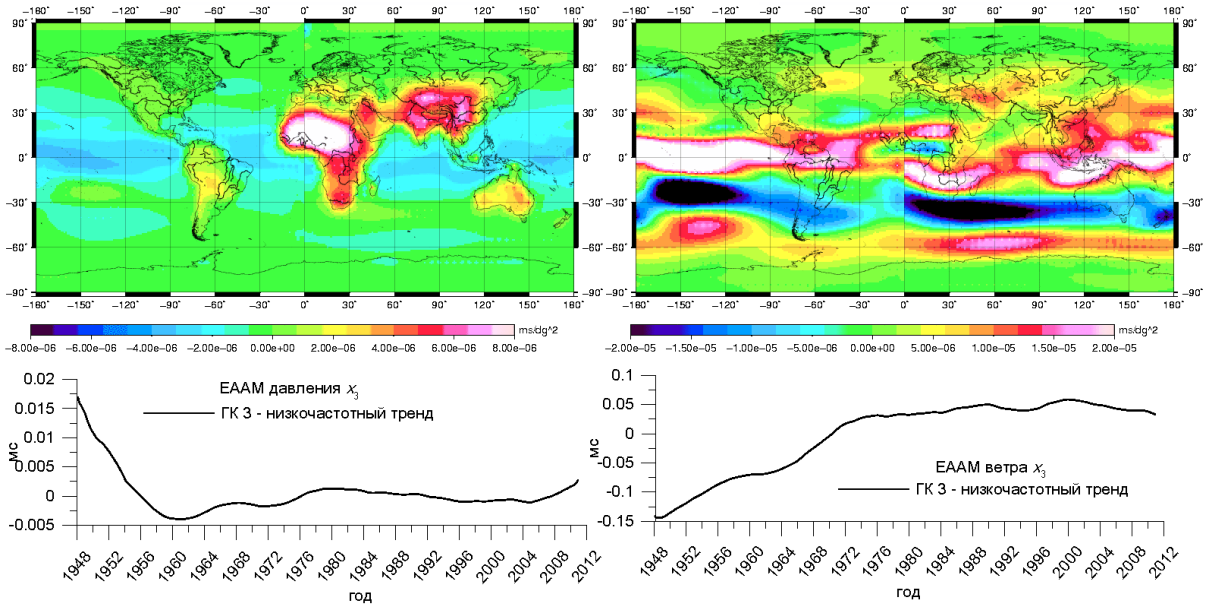


Рис. 5. Карты трендов с 1948 по 2011 гг. для ГК 3 компонент массы (слева) и движения (справа), внизу соответствующие графики для эффективного ЕААМ.

ГК 3 ветра (5 СЧ) представлена картой на рис. 5 (справа). Разность между 1948 и 2011 г. характеризуется увеличением ААМ вдоль экватора и 60° ю.ш., сопровождаемым уменьшением ААМ на широтах 30° ю.ш. Это может быть связано с усилением западной составляющей ветров на экваторе и над антарктическим циркумполярным течением и усилением восточных ветров над 30° ю.ш. Общий рост ветровой ЕААМ показан графиком на Рис. 5 справа внизу. Не исключено, что этот тренд имеет климатологическую природу, он, в частности, может отражать некоторое усиление ENSO.

Анализ компонент тренда ГК 3, представленных на рис. 5, показывает, что компонента давления ускоряет Землю на ~0.02 мс за 60 лет. Но замедляющее воздействие ААМ ветра, связанное с усилением западных ветров, превосходит его и составляет около -0.25 мс за 60 лет. LOD при этом увеличивалась. Заметим, что полученные величины качественно (по знаку и порядку величины) согласуются с оценками возможного влияния процесса глобального потепления на LOD, которые даны в работе [5], на интервале 60 лет они составляют −0.05 мс для ААМ давления и +0.11 мс - для ветра.

В указанной работе [5] возможной причиной таких изменений названы изменение полярного сжатия атмосферы, ускоряющего Землю, с одной стороны, и увеличение западных ветров, особенно в южном полушарии, тормозящее Землю – с другой. Это сходно с тем, что мы наблюдаем дл компоненты ГК 3 на рис. 5. Странно то, что изменения ГК 3 ветра особенно велики над Сахарой, где число метеорологических наблюдений мало. Достоверность измерений приповерхностного давления в середине XX в. можно считать более высокой, чем ветра, особенно на больших высотах. Мы не можем быть до конца уверены в том, что выделенный тренд не является артефактом в данных реанализа ААМ NCEP/NCAR.

ГК 4 (6+7 СЧ) имеет период около 5 лет как для компоненты ветра, так и давления. Выборка из трех карт для ГК 3 представлена на рис. 6 слева - для давления, справа - для ветра. Наиболее сильные изменения давления затрагивают континенты вокруг Индийского океана, ветровая компонента наиболее выражена в восточном Тихом океане. Сравнение интегрального ЕААМ для этих компонент с индексом южного колебания SOI, описывающим активность ЭНЮК на рис 7. показывает сильную связь ГК 4 с фазами Эль-Ниньо южного колебания. Индекс SOI был предварительно сглажен фильтром Пантелеева с частотой среза 0.3 колебаний в год и инвертирован. Максимумы и

минимумы давления и ветра хорошо соответствуют друг другу и экстремумам южного колебания. Коэффициент корреляции со сглаженным индексом SOI для ГК 4 ветра составляет $r = -0.72 \pm 0.02$, для ГК 4 давления $r = -0.56 \pm 0.03$.

В фазе Эль-Ниньо глубина термоклина в западном Тихом океане уменьшается, а в южном и восточном регионе Тихого океана увеличивается (по сравнению с нормой), это уменьшает градиент температуры, пассатные ветра ослабевают и иногда даже становятся направленными с запада на восток. Изменения циркуляции захватывают также верхнюю атмосферу, приводя к увеличению осевого ААМ, что и наблюдается на рис. 6 вверху и на рис. 7. При этом LOD увеличивается на величину порядка 0.1 мс. Карта на рис. 6 вверху для ГК 4 давления (слева) отражает его увеличение над Австралией, Индией, Африкой, Амазонкой. В противоположной фазе Ла-Нинья (внизу) картина меняется на обратную. Компонента ветра (рис.6 справа) во время Эль-Ниньо (вверху) имеет существенную положительную составляющую в восточном Тихом океане на широтах $\pm 30^{o}$. Минимум расположен на экваторе и на высоких широтах $\pm 70^{o}$. Максимумы во время Эль-Ниньо также присущи Аравийскому полуострову, Индии, Мадагаскару на широтах $\pm 20^{o}$. Минимумы наблюдаются над США и Аргентиной. С развитием Ла-Нинья картина меняется на обратную. Все это говорит о том, что южное колебание – глобальная мода климатической изменчивости атмосферы, распространяющаяся по всему миру [1, 41]. Анимированные карты показывают, как влияние ЭНЮК распространяется в атмосфере над океанами и континентами, захватывая довольно отдаленные регионы, в т.ч. Евразию. Они могут использоваться для исследований взаимосвязей ЭНЮК с метеорологическими явлениями и для выявления предвестников Эль-Ниньо/Ла-Нинья. В работах [3, 7, 8, 19] на графиках Ховмеллера показано полярное распространение углового момента зональных ветров в цикле ЭНЮК. Это связывается с откликом ветров на изменения температуры. Мы также построили график Ховмеллера (рис. 8), усреднив по долготам ГК 4 ветра. На нем хорошо заметны V-образные (лучше сказать C-образные) сигнатуры. Однако график не дает полной картины. На анимированных картах хорошо видно, что распространение углового момента происходит не вдоль меридианов от экватора к полюсам, но имеет смещение вдоль параллелей, в ходе которого знак аномалий меняется на обратный в динамике, напоминающей шахматный порядок (рис. 6). В ходе Эль-Ниньо положительные и отрицательные аномалии для ветров, четко выраженные в Тихом океане, распространяются на восток. При чередовании Эль-Ниньо/Ла-Нинья знак аномалий меняется на обратный (рис. 6, середина). Поток углового момента при усреднении по долготе формирует картину распространения от экватора к полюсам.

ГК 5 давления (9+10 СЧ) имеет период 4 месяца. Минимумы наблюдаются в декабре, апреле и августе. Отрицательные аномалии ААМ при этом возникают в Северной Африке, Европе, Азии за исключением Индии, центральной Амазонке, Антарктиде. Спустя 2 месяца картина меняется на обратную.

ГК 5 ветра (9+10 СЧ) имеет сложную структуру на карте и период 4 месяца. Мы не будем ее описывать.

ГК 6 давления (11+12 СЧ) также квазидвухлетняя и имеет похожее на ГК 4 поведение (отпечаток) с меньшей амплитудой (см. таблицу 1).

ГК 6 ветра (11+12 СЧ) имеет период около 2 лет и связана с квази-двухлетним колебанием (QBO), в свою очередь связанным с ЭНЮК [8, 25,34]. Карты для ГК 6 содержат отпечатки, очень сходные с ГК 4. Этой компоненте также присуще полярное распространение углового момента от экватора к полюсам. Сравнение ГК 6 ветра с отфильтрованным фильтром Пантелеева в диапазоне от $f_0 = 0.3$ до $f_0 = 1$ цикла в год индексом SOI дало корреляцию $r = -0.52 \pm 0.02$.

ГК 7 (8 СЧ), по всей видимости, связана с низкочастотной составляющей ЭНЮК. На карте отпечатки как компоненты ветра, так и давления очень схожи с наблюдаемыми для ГК 4 и ГК 6. Период ГК 7 – от 3 до 15 лет, с некоторым включением квазидвухлетней волны. Амплитуда этой компоненты достаточно мала (таблица 1).

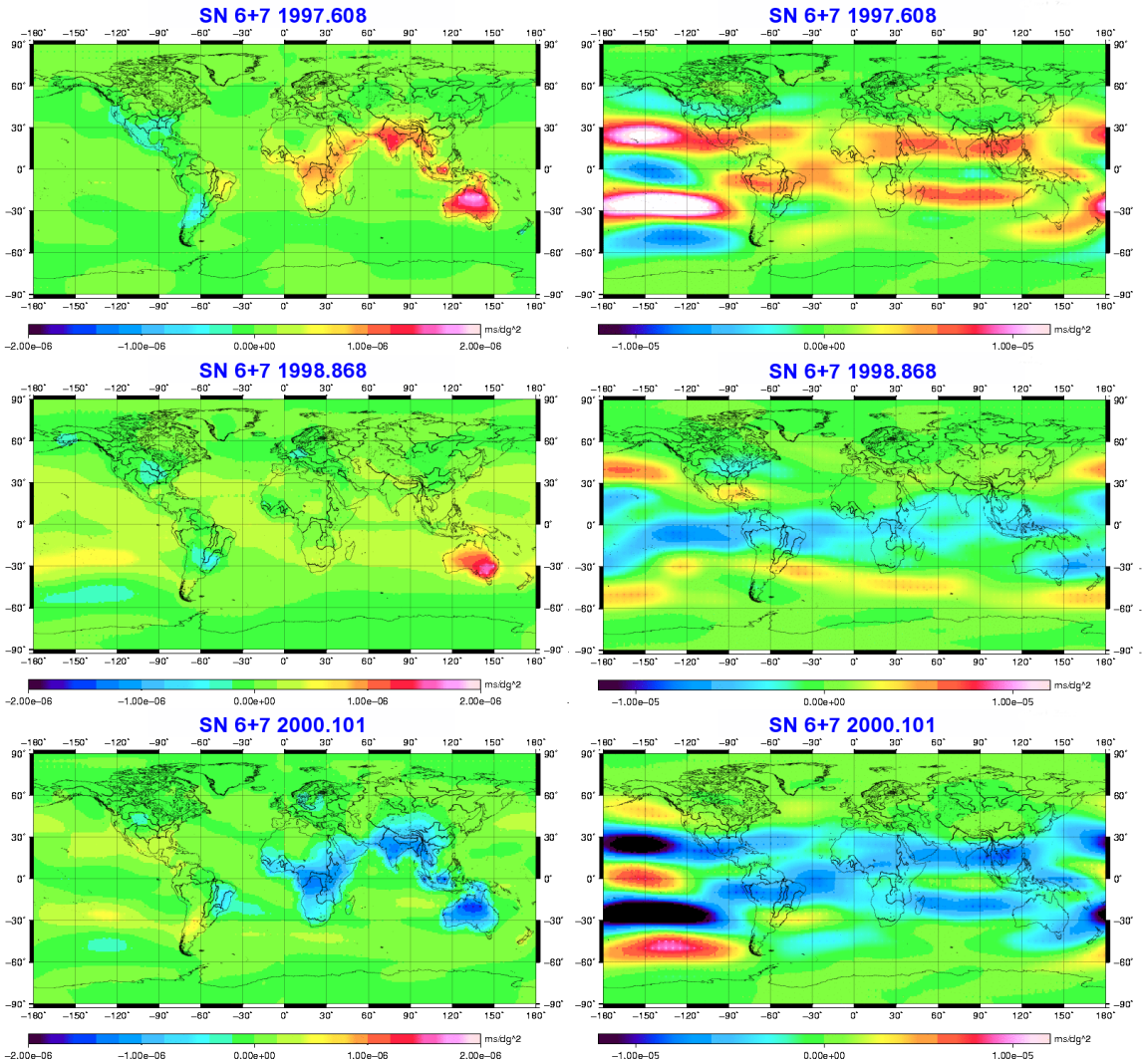


Рис. 6. Выборка из трех карт ГК 4 AAM давления (слева) и ветра (справа). Карты вверху соответствуют развитой фазе Эль-Ниньо, внизу - стадии Ла-Нинья. Карты посередине показывают фазовый переход от стадии Эль-Ниньо к Ла-Нинья.

4. Заключение и дискуссия

В данной работе впервые выполнен совместный МССА компонент ветра и давления углового момента атмосферы AAM, позволивший выделить синхронные изменения сразу двух этих компонент. Было показано, что МССА позволяет эффективно отделить главнее компоненты ГК с периодами 5, 2, 1 год, полгода и треть года от низкочастотного тренда и шумов. Получены анимированные карты главных компонент. Низкочастотные, пяти- и двухлетние ГК отражают изменения ветров и давлений по всем широтам и долготам во взаимосвязи с Эль-Ниньо южным колебанием ЭНЮК и квазидвухлетним циклом QBO. Показано, что влияние ЭНЮК на длительность суток LOD находится на уровне 0.1 мс. Сильнейшее Эль-Ниньо 2015 года также замедлило вращение Земли на величину такого порядка.

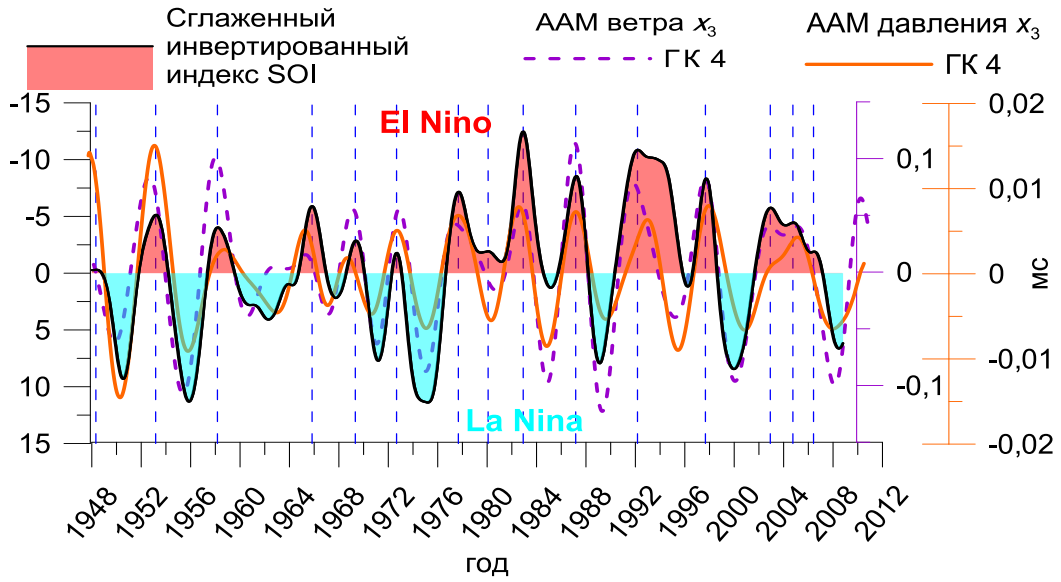


Рис. 7. ГК 4 AMM давления и ветра, проинтегрированного по всем широтам и долготам в сравнении со сглаженным инвертированным индексом южного колебания SOI.

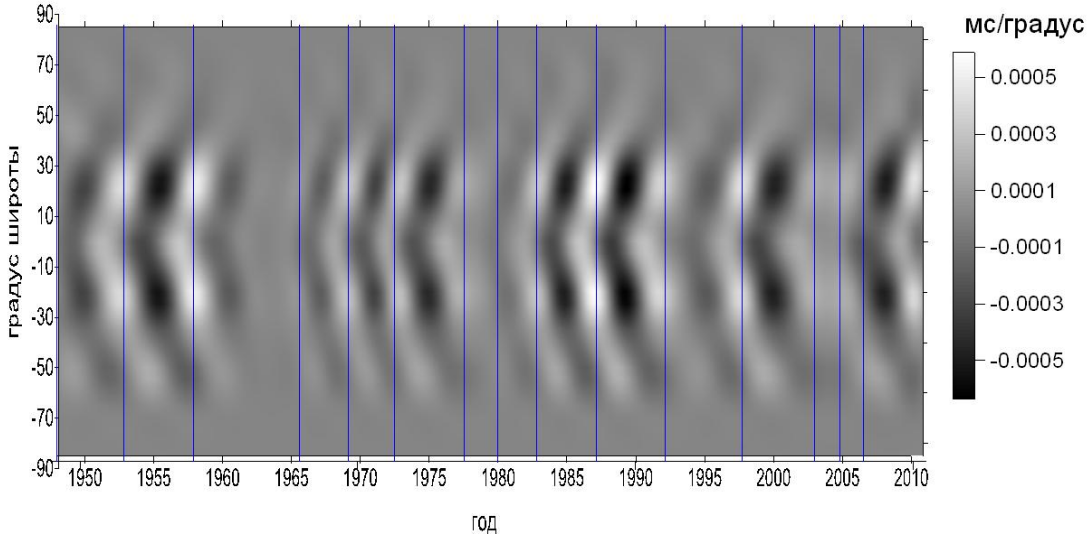


Рис. 8. Долготный график Ховмеллера для ГК 4 ветра, связанной с ЭНЮК. С-образные светлые и темные участки иллюстрируют полярное распространение углового момента ветров в этой моде. Максимумы отфильтрованного и инвертированного индекса SOI, соответствующего стадиям Эль-Ниньо, помечены вертикальными линиями.

Полученные анимированные карты отражают отклик ветров и давлений на различные метеорологические и климатические процессы, такие как ежегодное перераспределение воздушных масс, изменение циркуляции зональных ветров, формирование Эль-Ниньо. Они могут способствовать изучению влияния ЭНЮК на разных континентах и его предвестников. Показано также, что эволюция главных компонент, связанных с ЭНЮК имеет комплексный характер и не может быть упрощённо сведена к полярному распространению углового момента, что дополняет ранее полученные результаты [3,8,19]. В нашей работе, опираясь на исследования Сидоренкова [31], мы лишь кратко описали основные особенности зональной циркуляции атмосферы, выделенные в разные ГК.

Очевидным приложением полученных результатов является исследование изменений скорости вращения Земли. Каждая составляющая ГК AAM вносит вклад в инте-

гральный EAAM и непосредственно передается твердой Земле, вызывая изменения продолжительности суток LOD в соответствии с уравнением (1). Использованные нами данные по AAM могут содержать шумы наблюдений и моделирования. МССА помогает отфильтровать их и улучшает разделимость сигналов. Мы попытались собрать аргументы для ответа на вопрос – до какой степени изменения климата и циркуляции атмосферы могут влиять на вращение Земли.

Выявленные низкочастотные компоненты тренда ГК 3 (рис. 5) могут быть связаны как с реальными долговременными процессами в атмосфере, имевшими место с 1948 по 2011 гг., так и с артефактами данных. Полученные тренды усиления западных ветров, особенно в южном полушарии, дают вклад на уровне 0.25 мс, замедляющем вращение Земли. Небольшой тренд давления наоборот ускоряет Землю на 0.02 мс за 60 лет. Эти результаты качественно согласуются с теоретическими расчетами О. де Вирона и др. [5]. Однако это не объясняет антикорреляции глобальной температуры и LOD (рис. 1 слева) – для этого не хватает одного-двух порядков величин.

Помимо влияния на скорость вращения Земли, атмосферный AAM содержит экваториальные компоненты χ_1 , χ_2 , влияющие на движение полюса. Их исследование здесь не представлено. О влиянии атмосферы на годовое и Чандлеровское движения полюса можно узнать в [2,4,21,30,37]. Основными целями представленного здесь исследования было обоснование применимости МССА и его возможностей для обработки многомерных рядов, а также исследование влияния атмосферы на скорость вращения Земли.

Благодарности: работа поддержана грантами РФФИ 16-05-00753, 17-05-00989 и НИУ ВШЭ. Первый автор также поддержан позицией в Парижской обсерватории.

Литература

1. В.И. Бышев, В.Г. Нейман, Ю.А. Романов, И.В. Серых, 2014, Глобальные атмосферные осцилляции в динамике современного климата. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 11. No 1. С. 62-71
2. A. Brzezinski, Ch. Bizouard, S. Petrov, 2002. Influence Of The Atmosphere On Earth Rotation: What New Can Be Learned From The Recent Atmospheric Angular Momentum Estimates? Surveys in Geophysics, 23(1), 33-69
3. R.X. Black, D.A. Salstein, R.D. Rosen, 1996. Interannual 503 Modes of Variability in Atmospheric Angular Momentum. J. Climate, 9, 28342849.
4. B.F. Chao, 1985. On the excitation of the Earth's polar motion, Geophys. Res. Lett., , Vol. 12, Iss. 8, pp. 526529.
5. O. de Viron, V. Dehant, H. Goosse, and M. Crucifix, 2002. Participating CMIP Modeling Groups, Effect of global warming on the length-of-day, Geophys. Res. Lett., , Vol. 29, Iss. 7, doi:10.1029/2001GL013672
6. J.O. Dickey, S. L. Marcus, J. A. Steppe, R. Hide, 1992. The Earth's Angular Momentum Budget on Subseasonal Time Scales. Science 255, 321-324
7. J.O. Dickey, P. Gegouat, S.L. Marcus, 1999. Earth-atmosphere angular momentum exchange and ENSO: The rotational signature of the 1997-98 event. Geophys. Res. Lett., 26(16), 2477-2480
8. J.O. Dickey, S.L. Marcus, O. de Viron, 2003. Coherent interannual and decadal variations in the atmosphere-ocean system. Geophys. Res. Lett., 30(11), 27-1-27-4
9. T.M. Eubanks, 1993. Variations in the Orientation of the Earth, American Geophysical Union Monograph, Geodynamics Series, Vol. 24.

10. T.M. Eubanks , J. A. Steppe, J.O. Dickey, and P.S. Callahan, 1985. A spectral analysis of the Earth's angular momentum budget,J. Geophys. Res., , 90(B7).
11. M. Ghil, R.M. Allen, M.D. Dettinger et al., 2002. Advanced spectral methods for climatic time series, Rev. Geophys., 40(1), 3.1-3.41.
12. N. Golyandina, V. Nekrutkin, A. Zhigljavsky, 2001. Analysis of Time Series Structure SSA and Related Techniques, CHAPMAN & HALL/CRC.
13. S.A. Golyadina, 2004. Method "Caterpillar-SSA": prediction of the time series, Snt-Petersburg, in Russian
14. R.S. Gross, 2007. Earth rotation variations 532 long period, in Physical Geodesy edited by T. A. Herring, Treatise on Geophysics, Vol. 11, Elsevier, Amsterdam.
15. E.S. Ince,M.G. Sideris,E. Rangelova, 2009. Deriving long-term sea level variations at tide gauge stations in Atlantic North America, Eos Trans. AGU, 90(22), Jt. Assem. Suppl, Abstract CG73A-01
16. I.T. Jollife, 2001. Principal Component Analysis, Springer.
17. K. Lambeck, 1980, The Earth's Variable Rotation; Geophysical Causes and Consequences, Cambridge University Press.
18. P. Morgan, R. King, I. Shapiro, 1985. Length of Day and Atmospheric Angular Momentum: A Comparison for 1981-1983, J. Geophys. Res., 90(B14) 12645–12652.
19. K.C. Mo, J.O. Dickey, and S.L. Marcus, 1997. Interannual fluctuations in atmospheric angular momentum simulated by the National Centers for Environmental Prediction medium range forecast model, J. Geophys. Res., 102, 67036713.
20. W. Munk, G. MacDonald, 1960, The rotation of the Earth, Cambridge Univ. Press.
21. J. Nastula, D.A. Salstein, 2012. Regional Geophysical Excitation Functions of Polar Motion over Land Areas, Geodesy for Planet Earth International Association of Geodesy Symposia, 136(3), 499–505.
22. M. Schindelegger, J. Bohm, D. Salstein, H. Schuh, 2011. High-resolution atmospheric angular momentum functions related to Earth rotation parameters during CONT08 J. Geod, 85(7), 425-433.
23. J.P. Peixoto, A.H. Oort, 1984. Physics of climate, Reviews of Modern Physics, Vol. 56, Iss. 3 pp. 365-429.
24. Cecile Penland, Michael Ghil, 1993. Forecasting Northern Hemisphere 700-mb Geopotential Height Anomalies Using Empirical Normal Modes. Mon. Wea. Rev., 121, 23552372.22
25. C. Penland, De. Zh. Sun, A. Capotondi and 561 D. J. Vimont, 2010. A Brief Introduction to El Nino and La Nina,Climate Dynamics: Why Does Climate Vary?, Geophys. Monogr. Ser., 189, 216, AGU, Washington, D.
26. E. Rangelova, W. van der Wal, M.G. Sideris, and P. Wu, 2010. Spatiotemporal Analysis of the GRACE-Derived Mass Variations in North America by Means of Multi-Channel Singular Spectrum Analysis, Gravity, Geoid and Earth Observation, International Association of Geodesy Symposia 135, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
27. Reager J.T.,. Thomas B.F., Famiglietti J.S., 2014, River basin flood potential inferred using GRACE gravity observations at several months lead time // Nature Geoscience, doi:10.1038/ngeo2203,
28. R.D. Rosen, D.A. Salstein, 1985. Contribution of Stratospheric Winds to Annual and Semiannual Fluctuations in Atmospheric Angular Momentum and the Length of Day, J. Geophys. Res., 90(D5), 8033-8041.
29. B. Wouters, E. Schrama, 2007. Improved accuracy of GRACE gravity solution through empirical orthogonal function filtering of spherical harmonics. Geophys. Res. Lett., 34, L23711.

30. D. Salstein, 2000. Atmospheric excitation of polar motion, ASP Conference Series, 208, 437-446.
31. N.S. Sidorenkov, 2009. The Interaction Between Earth's Rotation and Geophysical Processes, Wiley-VCH Verlag, Weinheim.
32. Н. Сидоренков, К. Бизуар, Л. Зотов ,2014, Д. Салстейн, Угловой момент атмосферы, Природа, N. 4 стр. 22-28, РАН.
33. D.-Z. Sun, and F. Bryan (Eds.), 2010. Climate Dynamics: Why Does Climate Vary? Geophys. Monogr. Ser., 189, 216, AGU, Washington, D.C., doi: 10.1029/GM189.
34. Wu Yun-Hao, 2010. Spatio-Temporal Variations of Sea-Level for ENSO: Intercomparison Study of Geodetic Satellite Data, Doctoral Dissertation.
35. Zhong Min, Yan Haoming, Zhu Yaozhong, 2002. The investigation of atmospheric angular momentum as a contributor to polar wobble and length of day change with AMIP II GCM data, Advances in Atmospheric Sciences, Volume 19, Issue 2, pp 287-296.23.
36. Y.H. Zhou, D.A. Salstein. and J.L. Chen, 2006. 592 Revised atmospheric excitation function series related to Earth's variable rotation under consideration of surface topography, J. Geophys. Res., 111, D12108, doi:10.1029/2005JD006608
37. L.V. Zotov, C. Bizouard , 2012. On modulations of the Chandler wobble excitation, J. of Geodynamics, 62, 30-34. 10.1016/j.jog.2012.03.010
38. L. Zotov, 2010. Theory of filtering and time series processing, course of lectures, Moscow State University.
39. L. Zotov, 2011. Application of Multichannel singular spectrum analysis to geophysical fields and astronomical images. Advances in Astronomy and Space Physics 2(1), 082-084, Kyiv, Ukraine.
40. Zotov L., Bizouard C., Shum C.K., 2016, A possible interrelation between Earth rotation and climatic variability at decadal time-scale, Geodesy and Geodynamics, Volume 7, Issue 3, May 2016, Pages 216-222, KeAi, China, doi:10.1016/j.geog.2016.05.005.
41. Серых И.В., Сонечкин Д.М. , 2015, О влиянии квазипериодических внешних сил на ритмичность Эль-Ниньо. В книге: Триггерные эффекты в геосистемах. Тезисы докладов III Всероссийского семинара-совещания. Институт динамики геосфер РАН С. 95

MULTICHANNEL SINGULAR SPECTRUM ANALYSIS OF THE ATMOSPHERIC ANGULAR MOMENTUM

L.V. Zotov[1,2], N. S. Sidorenkov[3], C. Bizouard[3], M. Pastushenkova[2]
1 Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
2 Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia
3 Hydro-Meteorological Center of Russia, Global Atmospheric Circulation Laboratory
4 Paris Observatory, Service de la Rotation de la Terre (SYRTE), France

Earth's variable rotation is primarily produced by the variability of the Atmospheric Angular Momentum (AAM). In particular, the axial AAM component χ_3, which undergoes especially strong variations, induces changes in the Earth's rotation rate. In this study we analyzed regional forcing producing the effective axial AAM from 1948 through 2011 using the NCEP/NCAR reanalysis data. Global zonal circulation patterns related to the Length of Day (LOD) variations were described. We then applied the Multichannel Singular Spectrum Analysis (MSSA) jointly to pressure and wind components of AAM, which allowed us to extract annual, semiannual, 4-month, quasi-biennial, 5-year, and low-frequency oscillations. Decomposed principal components (PCs) reveal their strong correlations to the El Nino Southern Oscillation (ENSO). Thus they can be used to study ENSO-induced changes in pressure and wind fields and their coupling to LOD. Finally, the PCs probably have captured slow atmospheric circulation changes possibly related to climate variability.