

СВЯЗЬ ИЗМЕНЕНИЙ ГЛОБАЛЬНОЙ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ С НЕКОТОРЫМИ ЕСТЕСТВЕННЫМИ И АНТРОПОГЕННЫМИ ФАКТОРАМИ: ОЦЕНКИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

I. I. Мокхов¹⁾, Д. А. Смирнов²⁾, А. А. Карпенко¹⁾

Россия, 119017 Москва, Пыжевский пер., д. 3, Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН. ¹⁾mokhov@ifaran.ru, karpenko@ifaran.ru

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, д. 38, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. ²⁾smirnovda@yandex.ru

Реферат. Получены оценки связи изменений глобальной приповерхностной температуры (ГПТ) с серединой XIX века с некоторыми естественными и антропогенными факторами по эмпирическим данным на основе анализа причинности по Грейнджеру с использованием также кросс-вейвлетного анализа. Наряду с вариациями солнечной и вулканической активности и изменениями содержания в атмосфере диоксида углерода дополнительно оценивалась роль долгопериодных циклов в земной климатической системе, проявляющихся в вариациях угловой скорости вращения Земли и океанической циркуляции. На основе эмпирических регрессионных моделей сделан вывод о существенном влиянии естественных климатических циклов с периодами в несколько десятилетий только на относительно быстрые вариации ГПТ, тогда как определяющее влияние на долгопериодный тренд ГПТ на интервале порядка столетия оказывают изменения концентрации CO₂ в атмосфере. При учете этих факторов оценки непосредственного влияния солнечной и вулканической активности на ГПТ оказываются относительно незначительными.

Ключевые слова. Глобальная приповерхностная температура, воздух, естественные факторы, антропогенные факторы, оценка причинности, Грейнджер, долгопериодные циклы, угловая скорость, вращение Земли, концентрация CO₂, солнечная активность, вулканическая активность.

RELATIONSHIP OF GLOBAL SURFACE AIR TEMPERATURE CHANGES WITH SOME NATURAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS: ESTIMATES BASED ON OBSERVATIONS

I. I. Mokhov¹⁾, D. A. Smirnov²⁾, and A. A. Karpenko¹⁾

Obukhov Institute of Atmospheric Physics of RAS, Pyzhevskii per., 3, 119017 Moscow, Russia. ¹⁾mokhov@ifaran.ru, karpenko@ifaran.ru

Saratov Branch, Kotelnikov Institute of Radioelectronics and Electronics of RAS, Zelenaya ul., 38, 410019 Saratov, Russia. ²⁾smirnovda@yandex.ru

Abstract. Presented are estimates of relationship of global surface air temperature (GSAT) changes since the middle of the 19th century with some natural and anthropogenic factors from empirical data on the basis of Granger causality estimation procedure also using cross-wavelet analysis. Analyzed is contribution of long-period cycles in Earth's climate system manifested in the variations of the angular velocity of Earth's rotation and oceanic circulation along with solar and volcanic activity variations and changes in the atmospheric carbon dioxide concentration. As it results from empirical regression models, natural climatic cycles with periods of several decades have essential influence on relatively short-term GSAT variations only, while the changes in atmospheric CO₂ concentration have a significant influence on a long-term GSAT trend on the centennial time scale. If these factors are taken into account, the direct influence of solar and volcanic activity on the GSAT trend appears relatively insignificant.

Key words. Global surface temperature, air, natural factors, anthropogenic factors, causality estimation, Granger, long-period cycles, angular velocity, Earth's rotation, CO₂ concentration, solar activity, volcanic activity.

Введение

Одной из ключевых современных проблем является оценка роли естественных и антропогенных факторов глобальных изменений климата. Естественная климатическая изменчивость, не связанная с внешними воздействиями, характеризуется широким спектром временных и пространственных масштабов, и трудно выделить на фоне естественной изменчивости эффекты антропогенного характера. Задача выделения антропогенного воздействия существенно усложняется эффектами нелинейности и стохастичности в климатической системе при внешних естественных квазициклических и нерегулярных воздействиях (Оценочный доклад, 2008а, б).

Судя по изменениям климата последнего столетия, естественные вариации климата играли существенную роль. В XX веке отмечались два периода потепления, в частности в средних и высоких широтах Северного полушария, с 1910-х до 1940-х годов и с 1970-х годов. Этим вариациям соответствуют квазициклические изменения климата с периодом около 60 лет. В связи с этим уже давно высказывались сомнения в том, что на современные изменения климата влияют антропогенные факторы, и высказывались утверждения, что климатические изменения объясняются естественными факторами — собственными колебаниями в климатической системе или внешними воздействиями неантропогенного характера (Оценочный доклад, 2008а).

Согласно (Мохов, Смирнов, 2009; Smirnov, Mokhov, 2009), вследствие изменения содержания CO_2 в атмосфере можно объяснить около трех четвертей тренда глобальной приповерхностной температуры в последние десятилетия. При этом не учитывался вклад климатических циклов, в частности не оценивалась роль вариаций температуры с периодом около 60 лет. Подобные вариации характерны для термохалинной циркуляции в Северной Атлантике, проявляются в изменениях угловой скорости вращения Земли (Оценочный доклад ,2008а; Панин, Дзюба, 2006; Sidorenkov, 2009).

Цель данной работы — количественные оценки связи изменений ГПТ с разными естественными и антропогенными факторами по эмпирическим данным на основе анализа причинности по Грейндже (Granger, 1969) с использованием также кросс-вейвлетного анализа. По сравнению с (Мохов, Смирнов, 2008; Мохов, Смирнов, 2009; Smirnov, Mokhov, 2009) наряду с вариациями солнечной и вулканической активности и изменениями содержания в атмосфере диоксида углерода дополнительно учитывались вариации вращения Земли и атлантической мультидекадной осцилляции (Atlantic Multidecadal Oscillation — AMO) с характерным периодом около 60 лет.

Данные и методы анализа

На рис. 1 приведены межгодовые изменения ГПТ (T) (<http://www.cru.uea.ac.uk>), потока солнечного излучения I (Lean et al., 2005), индекса вулканической активности V (Sato et al., 1993), содержания CO_2 в атмосфере c (Conway et al., 1994), угловой скорости вращения Земли R (Sidorenkov, 2009), индекса AMO I_A (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO>).

На рис. 2 представлены результаты вейвлет-анализа анализируемых переменных. Согласно рис. 2 a , b , заметный вклад в изменчивость ГПТ вносят квазипериодические вариации с периодом около 60 лет. Вариации с близким периодом проявляются и в угловой скорости вращения Земли на рис. 2 i , k и для индекса AMO I_A на рис. 2 l , m . В спектрах для I и c вклад вариаций с подобной цикличностью четко не выделяется, а для V характерен даже минимальный вклад. В связи с этим следует ожидать, что анализ роли разных естественных и антропогенных факторов в формировании изменений ГПТ без учета факторов с подобной периодичностью будет недостаточно полным.

Причинность по Грейндже оценивалась с использованием попарного (линейного и нелинейного) и многокомпонентного (линейного) анализа аналогично (Мохов, Смирнов, 2008; Мохов, Смирнов, 2009; Smirnov, Mokhov, 2009) с использованием эмпирических данных. Количественная характеристика причинно-след-

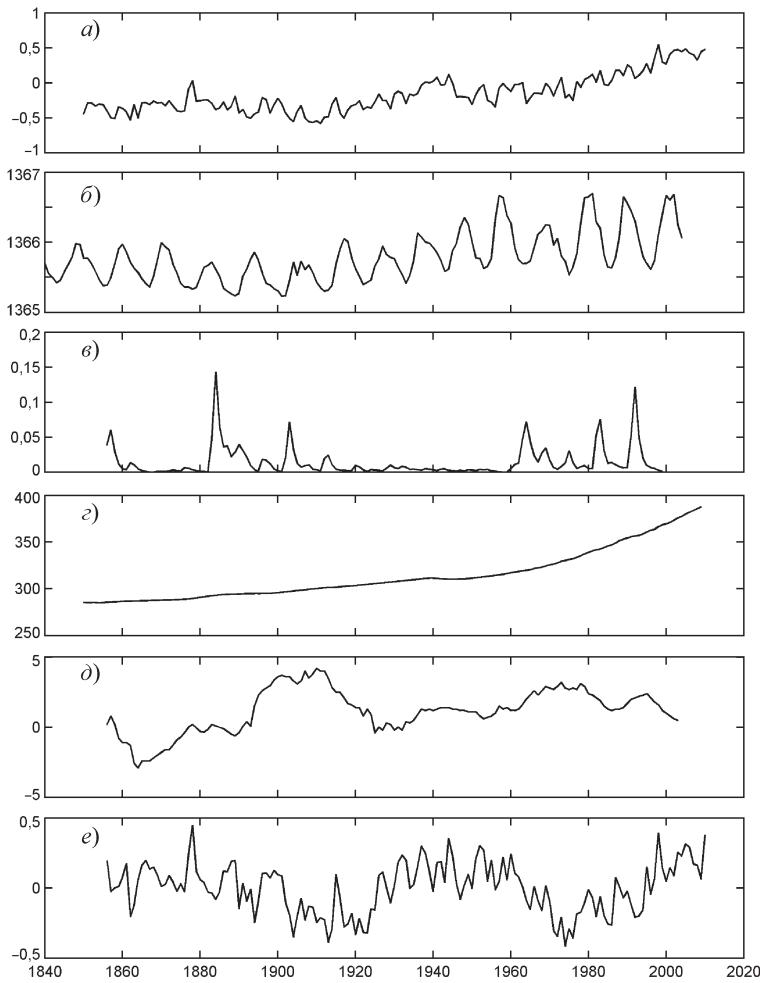


Рис. 1. Межгодовые изменения: ГПТ (a), потока солнечного излучения I (б), индекса вулканической активности V (в), содержания CO_2 в атмосфере n (г), угловой скорости вращения Земли R (д), индекса АМО I_A (е).

ственной связи по Грейнджеу рассчитывается как улучшение прогноза одной переменной при учете данных для другой по сравнению с вариантом без этого учета. Для этого строятся эмпирические модели для переменных x и y :

$$x_n = f(x_{n-1}, x_{n-d_x}, \dots, y_{n-1-\Delta_{y \rightarrow x}}, \dots, y_{n-d_{y \rightarrow x}-\Delta_{y \rightarrow x}}) + \xi_n,$$

$$y_n = g(y_{n-1}, y_{n-d_y}, \dots, x_{n-1-\Delta_{x \rightarrow y}}, \dots, x_{n-d_{x \rightarrow y}-\Delta_y}) + \eta_n.$$

Здесь x_n и y_n — значения переменных x и y на временном шаге n ; f и g — многочлены порядков K_x и K_y ; d_x и d_y — индивидуальные размерности; $d_{y \rightarrow x}$ и $d_{x \rightarrow y}$ — число добавленных значений другого процесса (характеристики инерционности воздействий); $\Delta_{y \rightarrow x}$ и $\Delta_{x \rightarrow y}$ — времена запаздывания; ξ_n и η_n — нормальный белый шум.

Наряду с причинностью по Грейндже для анализа причинно-следственных связей использовался кросс-вейвлетный анализ (Jevrejeva et al., 2003), в том числе анализировались характеристики локальной когерентности и фазовые сдвиги.

Результаты анализа

В частности, проведенный многокомпонентный анализ показал, что межгодовые вариации ГПТ $T(t)$ с серединой XIX века (по данным (<http://www.cru.uea.ac.uk>)) с временным шагом $\Delta t = 1$ год могут быть представлены в виде

$$T(t) = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i T(t-i) + b_c c(t-1) + b_I I(t-1) b_V V(t) + b_R R(t-1) + \eta(t). \quad (1)$$

Здесь I — поток солнечного излучения (вариации солнечной постоянной, $\text{Вт}/\text{м}^2$); V — индекс вулканической активности, характеризуемой, в частности, вариациями оптической толщины слоя вулканического аэрозоля в атмосфере t); c — содержание в атмосфере CO_2 , изменения которого характеризуют антропогенные воздействия; R — вариации угловой скорости вращения Земли; $\eta(t)$ — шум; a_i , b_c , b_I , b_V , b_R — коэффициенты многокомпонентной эмпирической модели.

При этом получено, что влияние антропогенного фактора c на современные изменения T на больших интервалах времени доминирует. Это влияние было оценено значимым на уровне $p = 0,00006$, тогда как значимость влияния вариаций R (угловой скорости вращения Земли), V (вулканической активности) и I (потока солнечного излучения) была оценена на уровне 0,07, 0,15 и 0,6 соответственно. Отмечено, что эффекты переменной R проявляются для относительно короткопериодных изменений T без значимого вклада в долгопериодные тренды (в частности, столетние).

При попарном линейном анализе R и T рассматривалась совместная авторегрессионная (AP) модель

$$T_k(t) = a_{k,0} + \sum_{i=1}^4 a_{k,i} T_k(t-i) + \sum_{i=1}^{d_{R \rightarrow T}} b_{k,i} R(t-i - \Delta_{R \rightarrow T}) + \eta_k(t), \quad (2)$$

где $d_{R \rightarrow T}$ — размерность дополнения, связанного с R , а $\Delta_{R \rightarrow T}$ — пробное время запаздывания. Аналогичное представление использу-

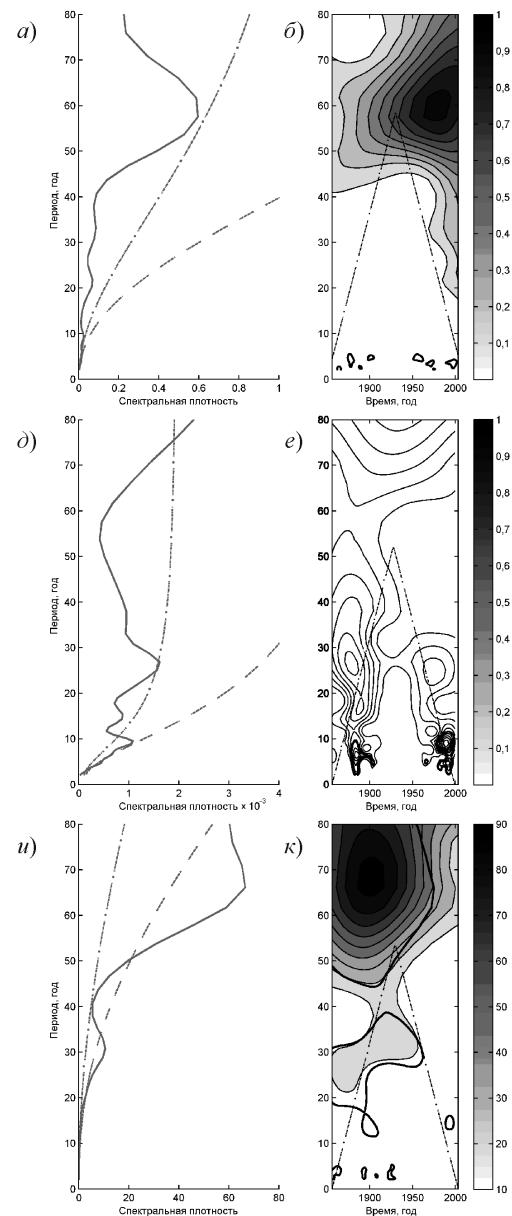
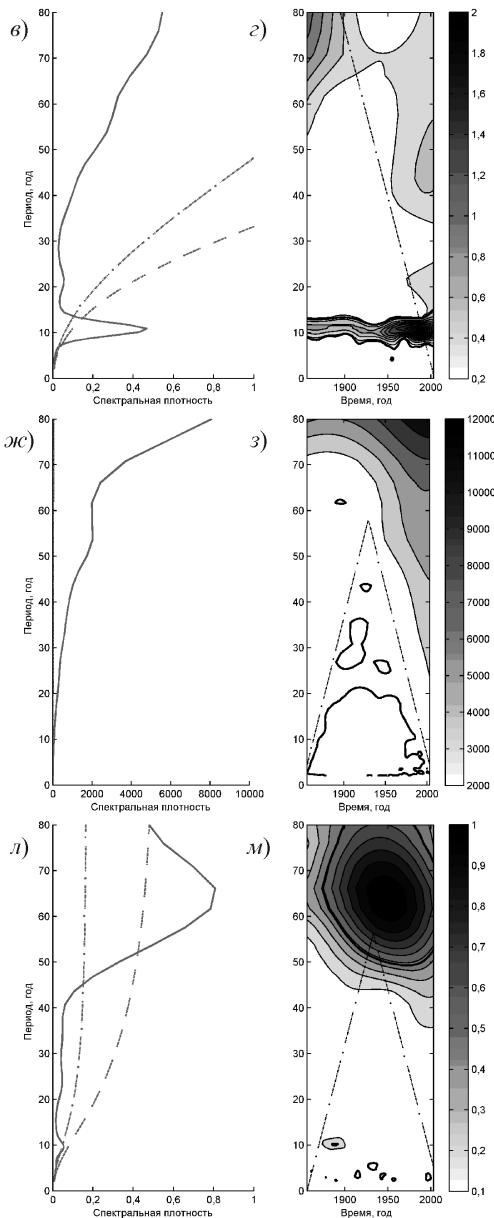


Рис. 2. Локальные ($b, e, \varepsilon, z, \kappa, m$) и интегральные ($a, \delta, \vartheta, \partial, \mathcal{Z}, u, \lambda$) вейвлет-спектры концентрации $V(\partial, e)$, содержания CO_2 в атмосфере c (\mathcal{Z}, z), угловой скорости вращения Земли — отделяют области краевых эффектов, а жирные линии ограничивают области, где мощность уровня значимости $p = 0,05$. На интегральных спектрах штриховые линии показывают, а штрихпунктирные —



для ГПТ (а, б), потока солнечного излучения I (в, з), параметра вулканической активности R (и, к) и индекса АМО I_A (л, м). На локальных спектрах штрихпунктирные линии — это сигналы больше, чем ожидается для модели стационарного красного шума на 95%-ный квантиль значений мощности для модели стационарного красного шуме среднее значение.

зовалось для оценки обратного влияния ГПТ на R . По среднегодовым данным влияние T на R незначимо; некоторое влияние R на T проявляется, но уровень значимости недостоверен. При нелинейном анализе по среднегодовым данным выявлены только слабые признаки взаимного влияния R и T .

По среднемесячным данным проявляется значимое влияние T на R без запаздывания и с запаздыванием при линейном анализе и нелинейное влияние R на T с запаздыванием.

В случае многокомпонентного линейного анализа с дополнительным учетом по сравнению с (2) вариаций содержания CO_2 в атмосфере c , но без учета вариаций солнечной и вулканической активности, эмпирическая модель имеет вид

$$T_k(t) = a_{k,0} + \sum_{i=1}^4 a_{k,i} T_k(t-i) + b_n c(t-1) + \\ + b_R R(t-1 - \Delta_{R \rightarrow T}) + \eta_k(t). \quad (3)$$

По среднегодовым данным наиболее значимые результаты получены при запаздывании $\Delta_{R \rightarrow T} = 5$ лет, но при $\Delta_{R \rightarrow T} = 0$ они различаются незначительно. Выявлено значимое влияние на T вариаций R с тенденцией уменьшения T при увеличении R .

При учете в эмпирической модели (1) вариаций солнечной и вулканической активности отмечено снижение значимости результатов. С другой стороны, учет фактора вариаций угловой скорости вращения Земли несколько снижает уровень достоверности выводов о наличии их прямого значимого влияния на изменения T .

Аналогичный анализ был проведен с многокомпонентными эмпирическими моделями для ГПТ с учетом вариаций индекса АМО, характеризующего цикличность атлантической термохалинной циркуляции. Эффект АМО с использованием данных <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/> с середины XIX века проявляется только для относительно кратковременных изменений (в пределах нескольких десятилетий) ГПТ без значимого вклада в долговременный тренд T .

При линейном попарном анализе причинности по Грейндджеру с использованием среднемесячных значений выявляется двунаправленная связь ГПТ и АМО со временем инерционности 2–3 месяца. Это значимая связь (с уровнем значимости менее 0,01), но улучшение прогноза и ГПТ и АМО при ее учете довольно небольшое.

При попарном анализе с использованием среднегодовых данных отмечено значимое (на уровне значимости 0,03) влияние только в одну сторону: АМО на ГПТ (учет прошлогоднего значения АМО позволяет несколько улучшить прогноз). Однако в случае много-

компонентного анализа с учетом в эмпирической модели вариаций ГПТ не только вариаций индекса АМО, но и изменений содержания CO_2 в атмосфере влияние АМО становится незначимым. Определяющую роль при многокомпонентном анализе играют изменения содержания CO_2 в атмосфере (а также вариации вулканической активности, если они также учитывются). Это является существенным отличием от результатов, полученных при анализе с учетом вариаций угловой скорости вращения Земли. Влияние R на T оставалось значимым и при учете трех других факторов (c , I , V).

Следует отметить, что в отличие от вариаций R вариации индекса АМО, связанного с температурным режимом в Северной Атлантике, достаточно сильно коррелированы с вариациями ГПТ без временного сдвига (с коэффициентом корреляции 0,35, значимым на уровне 0,07). При этом если в модели для ГПТ учитывать одновременное значение индекса АМО, а не его значение в предыдущий год, то влияние АМО характеризуется как очень сильное. И, наоборот, в этом случае отмечается очень сильное влияние ГПТ на АМО. Подобное рассмотрение при анализе по Грейнджеру возможно только при заведомо односторонней связи. Без дополнительной диагностики причин сильной корреляции можно использовались только прошлые значения индекса АМО в эмпирической модели для ГПТ.

В целом результаты многокомпонентного анализа связи изменений ГПТ с разными факторами по эмпирическим данным на основе анализа причинности по Грейнджеру при учете вариаций индекса АМО менее значимые, чем при учете вариаций угловой скорости вращения Земли.

Влияние на ГПТ разных естественных и антропогенных факторов оценивалось также с использованием кросс-вейвлетного анализа (Jevrejeva et al., 2003). В частности, рисунок 3 характеризует локальную когерентность межгодовых вариаций угловой скорости вращения Земли R (см. (Sidorenkov, 2009)) и ГПТ T по данным <http://www.cru.uea.ac.uk>. Согласно рис. 3, для последнего столетия не проявляется значимая долгопериодная взаимосвязь вариаций R и T на временных интервалах около 30 лет и более. (Стрелки на рис. 3 характеризуют фазовый сдвиг между соответствующими вариациями переменных: стрелка направо — синфазность, налево — противофазность, вверх — вторая переменная опережает первую, вниз — первая переменная опережает вторую.)

Отмеченное при анализе причинности по Грейнджеру влияние скорости вращения Земли на ГПТ (с антикорреляцией изменений R и T), заметное только при учете в эмпирической модели изменений содержания в атмосфере CO_2 , соответствует проявляющемуся на

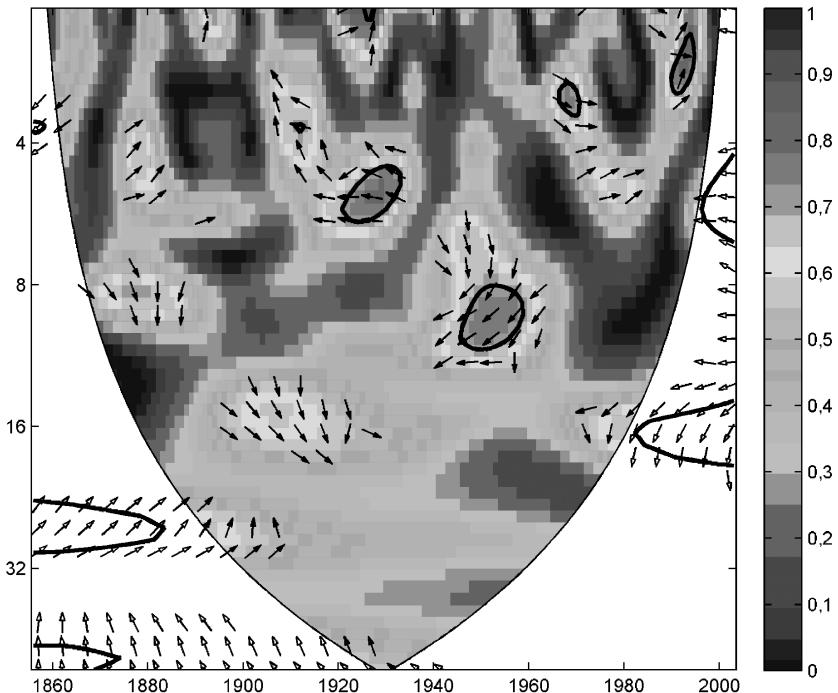


Рис. 3. Вейвлет-когерентность угловой скорости вращения Земли R и ГПТ T . Жирными кривыми выделены области с вейвлет-когерентностью на уровне значимости $p = 0,05$. Стрелки характеризуют фазовый сдвиг: стрелка направо – синфазность, налево – противофазность, вверх – вариации T опережают вариации R на 90° , вниз – вариации R опережают вариации T на 90° . Отмечены также области влияния краевых эффектов.

рис. 3 режиму взаимосвязи долгопериодных вариаций R и T (с периодами более 40 лет) во второй половине XIX века с последующим ослаблением и не детектируемым уже в середине XX века. Продолжительных временных интервалов со значимой когерентностью R и T не выявлено, хотя можно отметить, что с конца XX века начала проявляться когерентность противоположных по знаку вариаций R и T с периодами около 5 и 20 лет. При этом вариации ГПТ с периодом около 20 лет опережают по фазе вариации R .

Кросс-вейвлетный анализ вариаций ГПТ и индекса АМО по данным <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/> выявил значимую когерентность их долгопериодных вариаций (с периодами более 40–50 лет) с опережающими по фазе изменениями ГПТ (рис. 4). При этом не отмечено режимов значимой когерентности индекса АМО и ГПТ для более короткопериодных вариаций с периодами

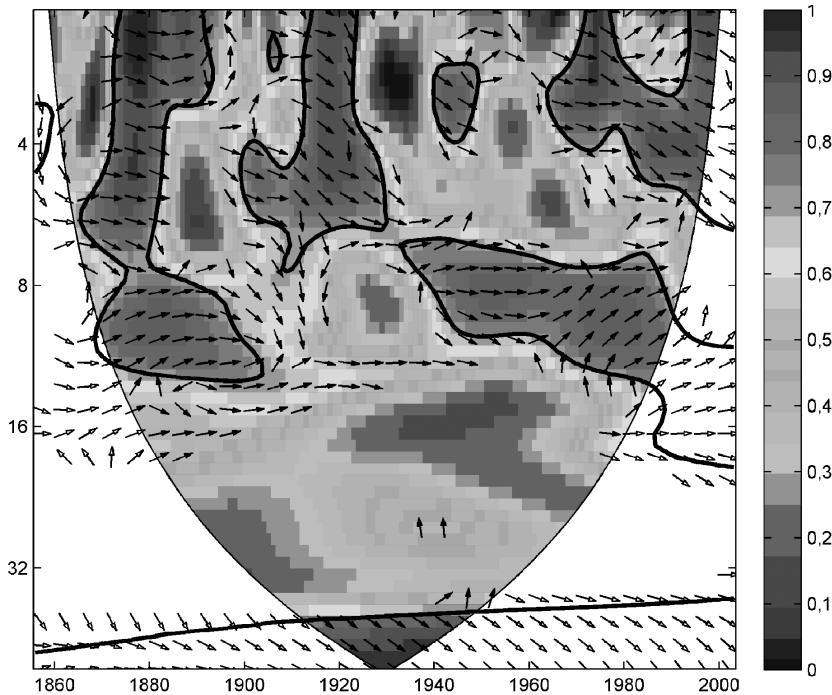


Рис. 4. Вейвлет-когерентность ГПТ и индекса АМО. Обозначения как на рис. 3.

около 20—40 лет. Для вариаций с периодами менее двух десятилетий проявляются эффекты перемежаемости режимов с когерентными вариациями АМО и ГПТ и режимов без их значимой взаимосвязи. Наряду с этим отмечены изменения в сдвиге фаз между вариациями АМО и ГПТ. В периоды их когерентности межгодовые вариации ГПТ в целом опережали вариации АМО. При этом для вариаций с периодами около 10 лет во второй половине XX в. проявились режимы с опережающими вариациями АМО. Следует отметить, что в последние десятилетия проявляется тенденция расширения временного диапазона когерентных изменений ГПТ и АМО с опережающими межгодовыми вариациями и долгопериодными изменениями ГПТ.

Выводы

Результаты кросс-вейвлетного анализа проявили общие закономерности с результатами анализа причинности по Грейнджеу.

Следует отметить, что региональные проявления глобальных изменений климата существенно различаются (см., например,

(Груза и др., 2010)). При этом по-разному проявляется роль различных естественных и антропогенных факторов, в частности над континентами и океанами, в полярных, средних и тропических широтах, для разных сезонов. В целом же для земной климатической системы полученные результаты на основе эмпирических регрессионных моделей свидетельствуют о существенном влиянии естественных климатических циклов с периодами в несколько десятилетий только на относительно быстрые вариации ГПТ, тогда как определяющее влияние на долгопериодный тренд ГПТ на интервале порядка столетия оказывают изменения концентрации CO₂ в атмосфере. При учете этих факторов оценки непосредственного влияния солнечной и вулканической активности на ГПТ оказываются относительно слабо значимыми.

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ, Министерства образования и науки РФ и программ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Платова Т. В. 2010. Оценка сезонных особенностей региональных проявлений изменения глобального климата. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XXIII. М.: ИГКЭ. С. 11–22.
- Мохов И. И., Смирнов Д. А. 2008. Диагностика причинно-следственной связи солнечной активности и глобальной приповерхностной температуры Земли. Известия. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 44, № 3. С. 283–293.
- Мохов И. И., Смирнов Д. А. 2009. Эмпирические оценки воздействия различных факторов на глобальную приповерхностную температуру. Доклады Академии наук. Т. 426. № 5. С. 679–684.
- Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. I. Изменения климата. 2008а. М.: Росгидромет. 227 С.
- Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. II. Последствия изменений климата. 2008б. М.: Росгидромет. 288 С.
- Панин Г. Н., Дзюба А. В. 2006. Изменения направления и скорости ветра от Арктики до Каспийского моря как проявление современных изменений климата. Водные ресурсы. Т. 33, № 5. С. 1–17.
- Conway T. J., Tans P. P., Waterman L. S., Thoning K. W., Kitziis D. R., Masarie K. A., and Zhang N. 1994. Evidence for interannual variability of carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration. J. Geophys. Res. Vol. 99. PP. 22831–22855.
- Granger C. W. J. 1969. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. Econometrica. Vol. 37. PP. 424–438.
- Jevrejeva S., Moore J., and Grinsted A. 2003. Influence of the Arctic Oscillation and El Nino – Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet approach. J. Geophys. Res. Vol. 108(D21). P. 4677, doi: 10.1029/2003JD003417.
- Lean J., Rottman G., Harder J., and Kopp G. 2005. SORCE contributions to new understanding of global change and solar variability. Solar Phys. Vol. 230, No. 1–2. PP. 27–53.
- Sato M., Hansen J. E., McCormick M. P., and Pollack J. B. 1993. J. Geophys. Res. Vol. 98. PP. 22987–22994.
- Sidorenkov N. S. 2009. The interaction between Earth's rotation and geophysical processes. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 305 P.
- Smirnov D. A. and Mokhov I. I. 2009. From Granger causality to long-term causality: Application to climatic data. Phys. Rev. E. Vol. 80. PP. 016208.