

УДК 551.5

ОЦЕНКИ СВЯЗИ ИЗМЕНЕНИЙ ГЛОБАЛЬНОЙ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ С РАЗНЫМИ ЕСТЕСТВЕННЫМИ И АНТРОПОГЕННЫМИ ФАКТОРАМИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2012 г. Член-корреспондент РАН И. И. Мохов, Д. А. Смирнов, А. А. Карпенко

Поступило 15.11.2011 г.

Получены оценки связи изменений глобальной приповерхностной температуры (ГПТ) с середины XIX в. с разными естественными и антропогенными факторами по эмпирическим данным на основе анализа причинности по Грейнджеру и с использованием кросс-вейвлетного анализа. Наряду с вариациями солнечной и вулканической активности и изменениями содержания в атмосфере углекислого газа оценивалась роль квазициклических процессов в земной климатической системе. В том числе учитывались климатические вариации, детектируемые индексом атлантической мультидесятилетней осцилляции (АМО) с характерным периодом около 60–70 лет, и вариации угловой скорости вращения Земли.

На основе эмпирических регрессионных моделей по данным с середины XIX в. сделан вывод об определяющем влиянии на долгопериодные (столетние) тренды ГПТ изменений концентрации CO_2 в атмосфере, при этом естественные климатические циклы с периодами в несколько десятилетий существенно влияют только на относительно быстрые вариации ГПТ. Влияние на долгопериодные тренды естественных факторов, связанных с солнечной и вулканической активностью, заметно менее значимо.

Одна из ключевых современных проблем — 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 эффекты антропогенного характера трудно выделить на фоне естественной изменчивости. Задача выделения антропогенного воздействия существенно усложняется эффектами не-

линейности и стохастичности в климатической системе при внешних естественных квазициклических и нерегулярных воздействиях [1, 2]. Результаты ансамбля модельных расчетов при разных начальных условиях свидетельствуют о возможности проявления при глобальном антропогенном потеплении даже отрицательных региональных температурных трендов в отдельных численных реализациях, в том числе и для регионов с наибольшими скоростями регионального потепления климата в конце XX в. [3].

Согласно результатам эмпирического анализа [4, 5], за счет изменений содержания CO_2 в атмосфере можно объяснить около трех четвертей тренда ГПТ в последние десятилетия. При этом не учитывался вклад проявляющихся в климатической системе собственных циклов с периодами от нескольких лет до нескольких десятилетий и более долгопериодных.

По температурным данным для последнего столетия естественные вариации играют существенную роль в изменениях климата. В XX в. были отмечены два периода потепления, в частности в средних и высоких широтах Северного полушария: с 1910-х до 1940-х годов и с 1970-х годов. Эти вариации соответствуют квазициклическим изменениям климата с периодом около 60–70 лет (см., например, [1, 6, 7]). В связи с этим высказывались мнения, что современные изменения климата не связаны с антропогенными факторами и их вполне можно объяснить естественными факторами — собственными колебаниями в климатической системе или внешними воздействиями не антропогенного характера.

Цель данной работы — количественные оценки связи изменений ГПТ с разными естественными и антропогенными факторами по эмпирическим данным на основе анализа причинности по Грейнджеру [8] и с использованием также кросс-вейвлетного анализа [9] (см. также [10]). По сравнению с [4, 5, 11] наряду с вариациями солнечной и вулканической активности и изменениями содержания в атмосфере углекислого газа дополни-

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской Академии наук, Москва*

*Саратовский филиал Института радиотехники
и электроники им. В.А. Котельникова
Российской Академии наук*

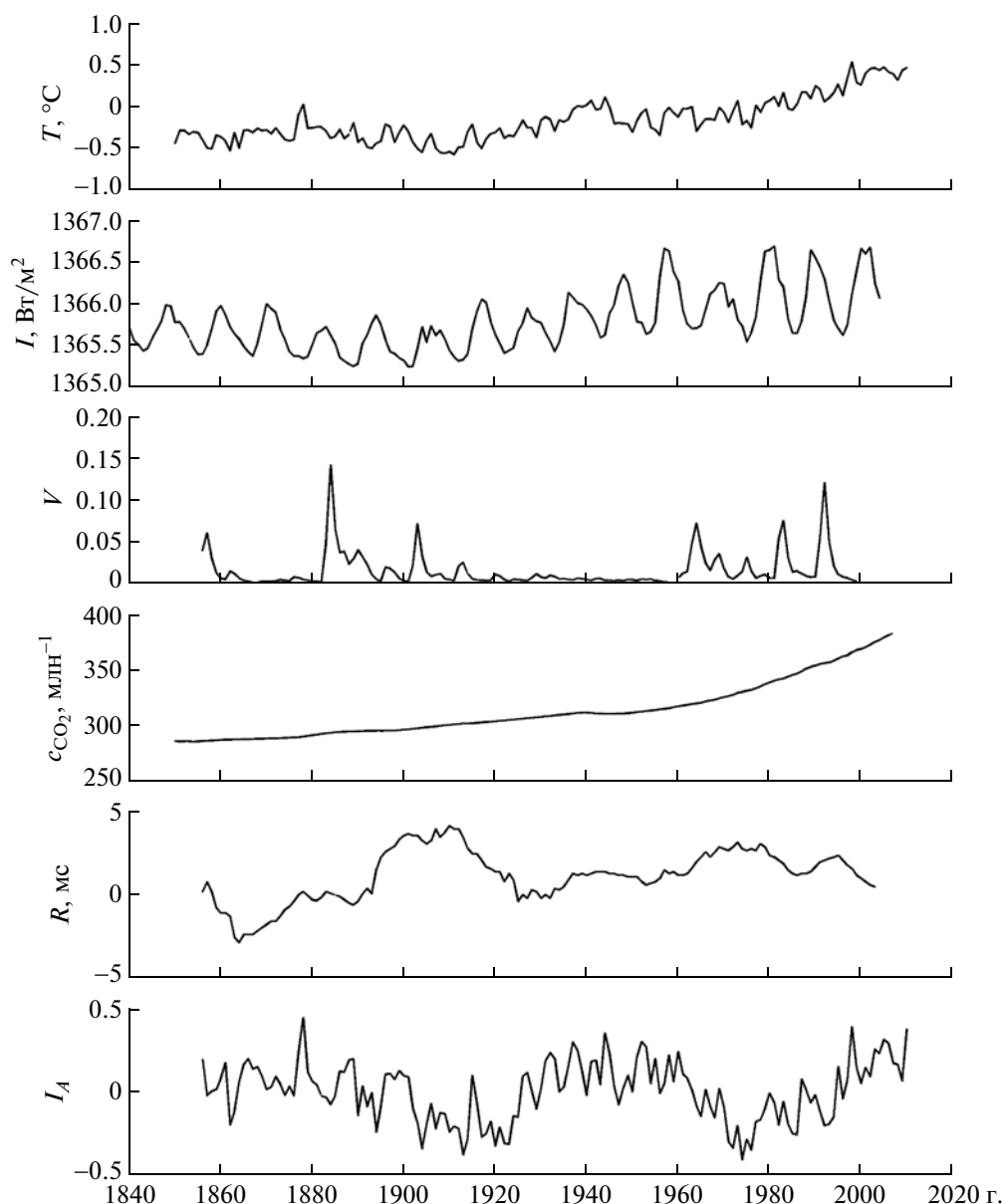


Рис. 1. Межгодовые изменения ГПТ T , потока солнечного излучения I , индекса вулканической активности V , содержания CO_2 в атмосфере c , длительности суток R и индекса АМО I_A .

тельно учитывались эффекты АМО и вариации вращения Земли с характерными периодами около 60–70 лет [12].

На рис. 1 показаны межгодовые изменения ГПТ (T) (<http://www.cru.uea.ac.uk>), потока солнечного излучения I [13], индекса вулканической активности V [14], содержания CO_2 в атмосфере c [15], угловой скорости вращения Земли или длительности суток R [7], индекса АМО I_A (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>).

На рис. 2 приведены результаты вейвлет-анализа обозначенных переменных. На локальных спектрах штрихпунктирные линии отделяют области краевых эффектов, а жирные линии огра-

ничивают области, где мощность сигнала больше, чем ожидается для “модели стационарного красного шума” на уровне значимости 95%. На интегральных спектрах штриховые линии показывают значимость на уровне 95%, а штрихпунктирные – спектр красного шума.

Согласно рис. 2 заметный вклад в изменчивость ГПТ вносят квазипериодические вариации с периодом около 60 лет. Вариации с близким периодом проявляются в угловой скорости вращения Земли и для индекса АМО I_A . В спектрах для I и c вклад вариаций с подобной цикличностью четко не выделяется, а для V характерен даже минимальный вклад. Это указывает на то, что ана-

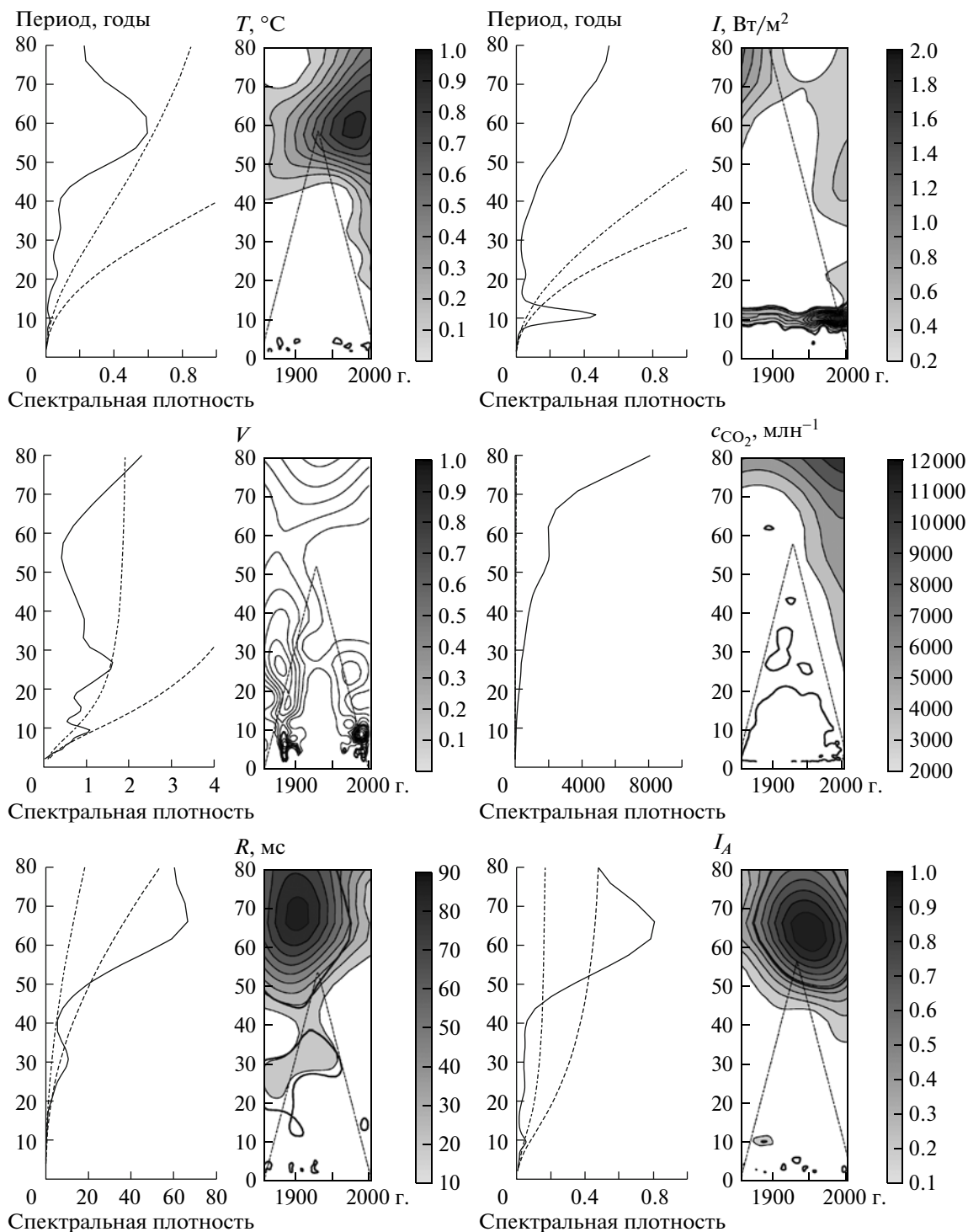


Рис. 2. Локальные (справа) и интегральные (слева) вейвлет-спектры для ГПТ T , потока солнечного излучения I , параметра вулканической активности V , содержания CO_2 в атмосфере c , продолжительности земных суток R и индекса АМО I_A .

лиз роли разных естественных и антропогенных факторов в формировании изменений ГПТ без учета факторов с подобной периодичностью будет недостаточно полным.

Причинность по Грейнджеру оценивалась с использованием попарного (линейного и нелинейного) и многокомпонентного (линейного) анализа аналогично [4, 5, 11] с использованием

эмпирических данных. Количественная характеристика причинно-следственной связи по Грейнджеру рассчитывалась как улучшение прогноза одной переменной при учете данных для другой по сравнению с вариантом без этого учета. Для этого строились эмпирические модели для переменных x и y :

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

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

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 , d_y – индивидуальные размерности; $d_{y \rightarrow x}$ и $d_{x \rightarrow y}$ – количество добавленных значений другого процесса (характеристики инерционности воздействий); $\Delta_{y \rightarrow x}$, $\Delta_{x \rightarrow y}$ – времена запаздывания; ξ_n и η_n – нормальные белые шумы.

В частности, с использованием многокомпонентного анализа получено, что межгодовые вариации ГПТ $T(t)$ с середины XIX в. (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 в Вт/м²); V – индекс вулканической активности, характеризуемой, в частности, вариациями оптической толщины слоя вулканического аэрозоля в атмосфере (τ); c – содержание в атмосфере CO₂ (млн⁻¹), изменения которого характеризуют антропогенные воздействия; R – вариации длительности земных суток (c); $\eta(t)$ – шум; a_i , b_c , b_I , b_V , b_R – коэффициенты многокомпонентной эмпирической модели.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что влияние антропогенного фактора (c) на современные изменения T на больших интервалах времени доминирует. Это влияние было оценено значимым на уровне $p = 0.00006$. (Чем меньше значение p , характеризующее вероятность случайной ошибки вывода о наличии влияния, тем достовернее вывод. Обычно считается достаточно надежным вывод с $p < 0.05$ или $p < 0.1$. Асимптотическая оценка величины p получена с помощью F-теста или теста Грейнджера–Сарджента.) При этом оценки уровня значимости влияния вариаций R (длительность суток), V (вулканическая активность) и I (поток солнечного излучения) получены равными 0.07, 0.15 и 0.6 соответственно. Отмечено, что эффекты переменной R проявляются для относительно короткопериодных изменений T без значимого влияния на долгопериодные тренды (на столетние тренды, в частности).

При попарном линейном анализе R и T рассматривалась совместная авторегрессионная модель

$$T(t) = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i T(t-i) + \sum_{i=1}^{d_{R \rightarrow T}} b_i R(t-i-\Delta_{R \rightarrow T}) + \eta(t), \quad (2)$$

где $d_{R \rightarrow T}$ – размерность дополнения, связанного с R , а $\Delta_{R \rightarrow T}$ – пробное время запаздывания. Аналогичное представление использовалось для оценки обратного влияния ГПТ на R . По среднегодовым данным при линейном анализе влияние T на R незначимо; некоторое влияние R на T проявляется лишь при больших запаздываниях и не соответствует даже 90%-й достоверности выводов. При нелинейном анализе по среднегодовым данным выявлены только слабые признаки взаимного влияния R и T , но нелинейные модели содержат слишком много оцениваемых параметров, так что используемые асимптотические оценки уровня значимости не применимы и выводы не достоверны.

По среднемесячным данным выявлено значимое влияние T на R без запаздывания и с запаздыванием при линейном анализе, а также нелинейное влияние R на T с запаздыванием.

В случае многокомпонентного линейного анализа с дополнительным учетом по сравнению с (2) вариаций содержания CO₂ в атмосфере c , но без учета вариаций солнечной и вулканической активности эмпирическая модель имеет вид

$$T(t) = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i T(t-i) + b_c c(t-1) + b_R R(t-1-\Delta_{R \rightarrow T}) + \eta(t). \quad (3)$$

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

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/AMO/>) с середины XIX в. проявляется только для относительно кратковременных изменений (в пределах нескольких десятилетий) ГПТ без значимого вклада в долговременный тренд T .

При линейном попарном анализе причинности по Грейнджеру с использованием среднемесячных значений выявлена двунаправленная связь ГПТ и АМО со временем инерционности 2–3 месяца. Это – значимая связь (с уровнем зна-

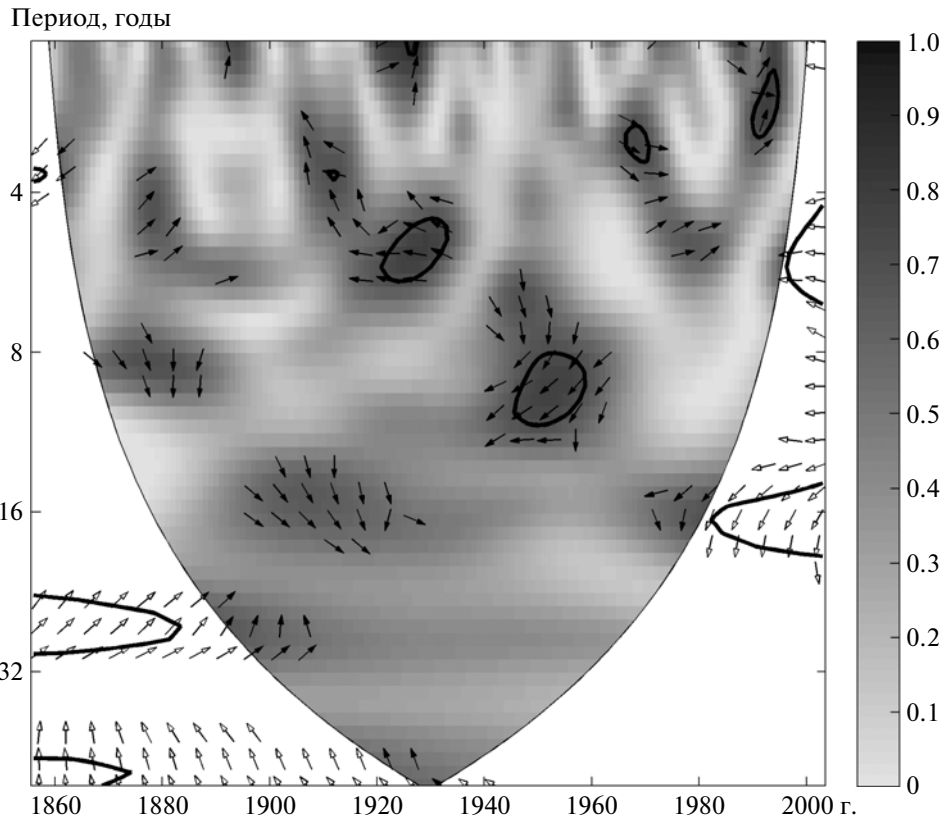


Рис. 3. Вейвлет-когерентность продолжительности земных суток R и ГПТ T . Жирными кривыми выделены области с вейвлет-когерентностью на уровне значимости 95%. Здесь и на рис. 4 стрелки характеризуют фазовый сдвиг: стрелка вправо – синфазность, влево – противофазность, вверх – вариации T опережают вариации R на 90° , вниз – вариации R опережают вариации T на 90° ; отмечены также области влияния краевых эффектов.

чимости менее 0.01), но улучшение прогноза и ГПТ, и АМО при ее учете довольно слабое.

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 многокомпонентного анализа с учетом в эмпирической модели вариаций ГПТ не только вариаций индекса АМО, но и изменений содержания CO_2 в атмосфере влияние АМО оценено незначимым. При многокомпонентном анализе выявляется определяющая роль изменений содержания CO_2 в атмосфере (а также вариации вулканической активности, если они также учитываются). Это является существенным отличием от результатов, полученных при анализе с учетом вариаций угловой скорости вращения Земли. Влияние R на T оценивалось 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 в противоположном случае отмечается очень сильное влияние ГПТ на АМО. Подобное рассмотрение при анализе по Грейнджеру возможно только при заведомо однонаправленной связи. Без дополнительной диагностики причин сильной корреляции можно использовать только прошлые значения индекса АМО в эмпирической модели для ГПТ.

В целом результаты многокомпонентного анализа связи изменений ГПТ с различными 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 [9]. В частности, рис. 3 характеризует локальную когерентность межгодовых вариаций длительности суток R (см. [7]) и ГПТ T по данным (<http://www.stu.uea.ac.uk>). Согласно рис. 3 для последнего столе-

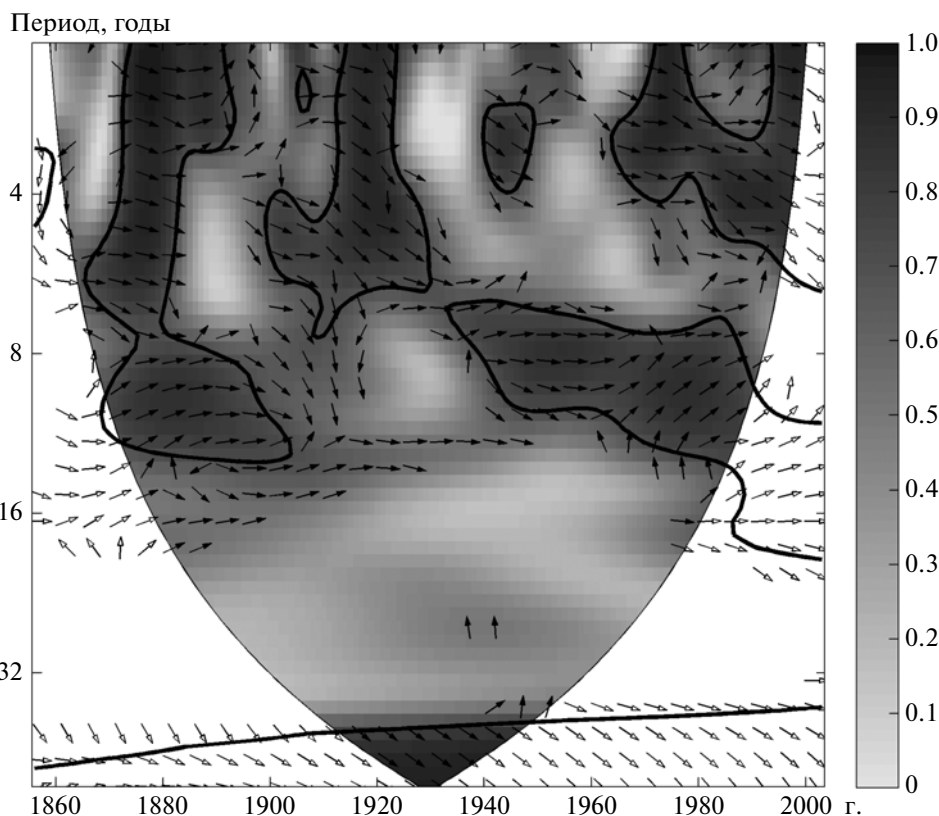


Рис. 4. Вейвлет-когерентность ГПТ T и индекса АМО. Жирными кривыми выделены области с вейвлет-когерентностью на уровне значимости 95%.

тия не проявляется значимая долгопериодная взаимосвязь вариаций R и T на временных интервалах около 30 и более лет.

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 режиму взаимосвязи долгопериодных вариаций R и T (с периодами более 40 лет) во второй половине XIX в. с последующим ослаблением, не детектируемым уже в середине XX в. Продолжительных временных интервалов со значимой когерентностью R и T не выявлено, хотя можно отметить, что с конца XX в. начала проявляться когерентность противоположных по знаку вариаций R и T с периодами около 5 и около 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/АМО/>) 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 индек-

са АМО и ГПТ для более короткопериодных вариаций с периодами 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. Результаты кросс-вейвлетного анализа свидетельствуют о тенденции с долгопериодными изменениями (с периодами около 20 лет и более) содержания CO_2 в атмосфере (по измерениям на станции Мауна-Лоа со второй половины 1950-х годов), опережающими изменения ГПТ в последние десятилетия.

В целом результаты кросс-вейвлетного анализа проявили общие с результатами анализа причинности по Грейнджеру закономерности.

Следует отметить, что региональные эффекты глобальных изменений климата существенно различаются. 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, но не на столетние тренды. При этом определяющее влияние на долгопериодный тренд ГПТ на временных интервалах порядка столетия связано с антропогенными изменениями, в частности с изменениями содержания CO_2 в атмосфере. С учетом всех этих факторов вклад непосредственного влияния солнечной и вулканической активности на ГПТ оценен относительно слабо значимым.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. М: Росгидромет, 2008. 227 с.
2. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 2. Последствия изменений климата. М: Росгидромет, 2008. 288 с.
3. Мохов И.И., Карпенко А.А., Стотт П.А. // ДАН. 2006. Т. 406. № 4. С. 538–543.
4. Мохов И.И., Смирнов Д.А. // ДАН. 2009. Т. 426. № 5. С. 679–684.
5. Smirnov D.A., Mokhov I.I. // Phys. Rev. E. 2009. V. 80. P. 016208.
6. Панин Г.Н., Дзюба А.В. // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. № 5. С. 1–17.
7. Sidorenkov N.S. The Interaction between Earth's Rotation and Geophysical Processes. Weinheim: Wiley, 2009. 305 p.
8. Granger C.W.J. // Econometrica. 1969. V. 37. P. 424–438.
9. Jevrejeva S., Moore J., Grinsted A. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № D21. P. 4677.
10. Мохов И.И., Безверхний В.А., Карпенко А.А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 5. С. 579–592.
11. Мохов И.И., Смирнов Д.А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 3. С. 283–293.
12. Мохов И.И., Смирнов Д.А., Карпенко А.А. // Пробл. экол. мониторинга и моделирования экосистем. 2011. Т. 24.
13. Lean J., Rottman G., Harder J., Kopp G. // Solar Phys. 2005. V. 230. № 1/2. P. 27–53.
14. Sato M., Hansen J.E., McCormick M.P., Pollack J.B. // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 22987.
15. Conway T.J., Tans P.P., Waterman L.S., et al. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 22831.