

ПРИРОДНИЧО-ГЕОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК 551.590.2

DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2019.04.003>**В.Ф. Логинов, В.С. Микуцкий**

Институт природопользования НАН Беларуси

ОЦЕНКА СИНХРОННОСТИ ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ И ЦИКЛИЧНОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ МИРОВОГО ОКЕАНА, УДЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРЫ И СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ЗА ПЕРИОД С 1960 ПО 2018 ГОДЫ

Мета дослідження – оцінка впливу сонячної активності на кліматичну систему Землі шляхом визначення спряженості температури Світового океану, питомої вологості атмосфери і показників сонячної активності. У роботі при аналізі даних про температуру Світового океану, питому вологість атмосфери Земного шару і сонячну активність широко використані методи математичної статистики. На базі попередньо відфільтрованих від високочастотних складових рядів температури Світового океану і питомої вологості атмосфери встановлено їх статистично значущу спряженість. Методами спектрального аналізу (періодограм-аналіз, крос-спектральний аналіз) виявлено чіткий 11-річний сонячний цикл у змінах температури поверхні океану і питомої вологості атмосфери.

Ключові слова: температура Світового океану; вологість атмосфери; сонячна активність.

V. F. Loginov, V. S. Mikutsky

Institute for Nature Management of NAS of Belarus

ESTIMATION OF SYNCHRONICITY OF TEMPORAL CHANGES AND CYCLICITY OF GLOBAL OCEAN TEMPERATURE, SPECIFIC HUMIDITY ATMOSPHERE AND SOLAR ACTIVITY FROM 1960 TO 2018

The aim of the study is to assess the influence of solar activity on the climate system of the Earth by assessing the conjugacy of global sea-surface temperature (SST), specific atmospheric humidity, and solar activity indices. The methods of mathematical statistics are widely used in the analysis of data on SST, specific humidity of the Earth's atmosphere and solar activity. On the basis of series of SST and specific humidity of the atmosphere pre-filtered from their high-frequency components their statistically significant conjugacy is established. Spectral analysis (periodogram-analysis, cross-spectral analysis) revealed a clear 11-year solar cycle in changes in SST and atmospheric specific humidity. The study of cyclic (quasiperiodic) effects of internal and external factors on the climate is important for understanding the role of "small" forces in modulating cyclic fluctuations in the climate system.

Keywords: global sea-surface temperature; atmospheric humidity; solar activity.

Актуальность темы исследования

В климатической системе, состоящей из атмосферы, гидросферы, криосферы, поверхностной литосферы и биосферы, которая под воздействием солнечного излучения, падающего на Землю, определяет ее климат [1, с. 238], могут развиваться автоколебания различной длительности: от нескольких месяцев до нескольких сотен тысяч лет. Колебания в климатической системе могут модулироваться внешними периодическими и квазипериодическими источниками, такими как: годовой ход инсоляции, долгопериодные изме-

нения солнечной активности и изменения инсоляции вследствие колебаний параметров земной орбиты, многолетние лунно-солнечные приливы и, возможно, циклические динамические воздействия изменений момента инерции орбитального вращения планет [2–6].

Исследование циклических (квазипериодических) воздействий внутренних и внешних факторов на климат имеет важное значение для понимания роли «малых» сил в модуляции циклических колебаний в климатической системе. Исследование устойчивых во времени циклов может открыть возможности для сверхдолгосрочного прогнозирования изменений климата.

© В.Ф. Логинов, В.С. Микуцкий, 2019

Состояние изучения вопроса, основные труды Автоколебания в климатической системе возникают в результате, в первую очередь, обмена энергией между её инерционными накопителями (морские льды и тёплый океан низких широт) [7, 8]. В работе Ш.А. Мусаэяна показано, что наличие облачности в качестве регулятора приводит к существованию автоколебаний в системе «океан-атмосфера» [9]. В работе В.С. Брокера [10] представлена система циркуляции вод Мирового океана, которая может оказывать большое влияние на климат Земли. Развивающаяся система плотностных течений глубинных солёных вод от Атлантики к Тихому океану и соответствующая система менее солёных вод в поверхностном слое обеспечивают компенсацию солевого состава в Мировом океане. Такая циркуляция является автоколебательной, поскольку избыточное испарение вызывает глубинные плотностные течения к югу, а глубинные течения, в свою очередь, могут инициировать избыточное испарение. Изложенная В.С.Брокером система циркуляции может оказать серьёзное влияние на содержание

в атмосфере главного естественного парникового газа – водяного пара. Циклы длительностью 12–13, 37–39 и 179 лет обнаружены Б.Г. Шерстюковым в изменении моментов вращения Солнца вокруг центра масс Солнечной системы (личное сообщение). Следует подчеркнуть, что проблема влияния названных малых сил на климатическую систему Земли до сих пор остаётся предметом острых дискуссий [2–6, 22].

Целью данного исследования является оценка влияния солнечной активности на климатическую систему Земли путём оценки сопряжённости температуры Мирового океана, удельной влажности атмосферы и показателей солнечной активности.

Методы исследования

В работе использовались такие методы математической статистики как корреляционный и регрессионный анализы, спектральный и кросс-спектральный анализы с использованием данных о температуре Мирового океана (HadSST3

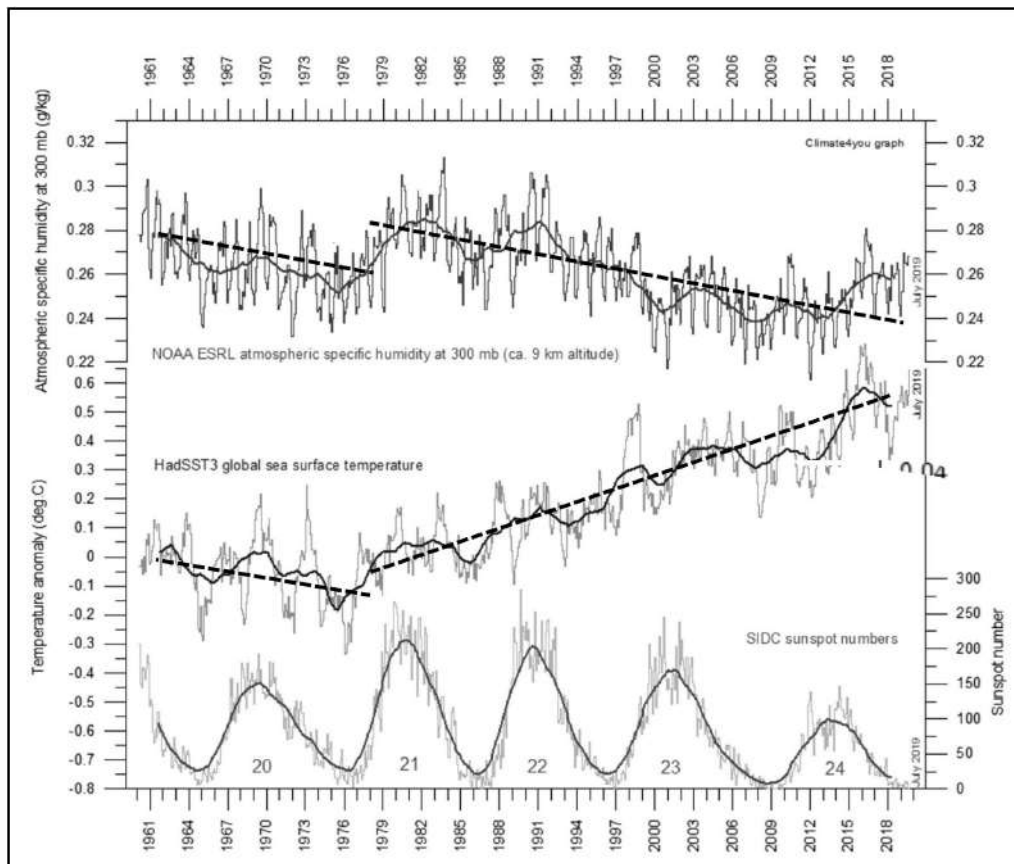


Рис. 1. Многолетняя динамика глобальных показателей температуры поверхности океана, удельной влажности воздуха на изобарической поверхности 300 мбар и относительных чисел Вольфа [16].

[11]) и удельной влажности атмосферы Земного шара (NOAA ESRL [12]) за период наблюдений с 1960 по 2018 гг. В качестве показателя солнечной активности используем широкоизвестный индекс солнечной активности – относительные числа Вольфа W [13]. Использовались также показатели индекса Эль-Ниньо в районе 3 – 4 [14].

Изложение основного материала с обоснованием полученных научных результатов

На *рис. 1* представлены многолетние изменения удельной влажности атмосферы Земного шара (H) на высоте 300 мбар (около 9 км), температуры Мирового океана (HadSST3) и относительных чисел Вольфа W (SIDC). Штрихованными прямыми линиями отмечены линейные тренды периодов падения и роста температуры поверхности океана (ТПО) и H для двух частей ряда: 1960–1978 и 1979–2018 гг. Сплошными гладкими линиями показаны сглаженные значения сопоставляемых характеристик.

Сглаживание дает возможность отфильтровать в величинах удельной влажности и ТПО эффект событий Эль-Ниньо¹, цикличность которых составляет 3–7 лет [15].

Качественный анализ многолетних изменений температуры поверхности океана и удельной влажности показывает наличие слабого ступенчатого отрицательного тренда в изменении удельной влажности для периодов 1960–1978 и 1979–2018 гг. В изменении ТПО заметен слабый отрицательный тренд в период с 1960 по 1978 гг. и существенный положительный тренд в последние десятилетия.

В изменении относительных чисел Вольфа хорошо просматриваются квази 11-летняя и квазивековая составляющие.

Для проведения дальнейшего количественного анализа сопряженности значений удельной влажности H , ТПО и W были вычислены линейные тренды H и ТПО за отмеченные выше подпериоды падения и роста значений указанных характеристик (1960 – 1978 – 2018 гг., *рис. 1*) и получены отклонения последних от выявленных линейных трендов для разных подпериодов (*рис. 2*). Для

¹ Эль-Ниньо - аномальное потепление воды в океане у западного побережья Южной Америки, замещающее холодное течение Гумбольдта, что приносит сильные ливни в прибрежные районы. Случается в результате воздействия юго-восточных пассатов в Тихом океане [1, с 609].

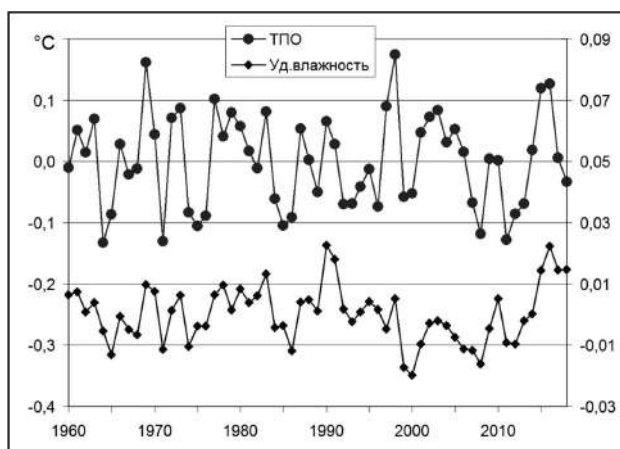


Рис. 2. Многолетняя динамика отклонений температуры поверхности Мирового океана и удельной влажности воздуха на изобарической поверхности 300 мбар от линейных трендов

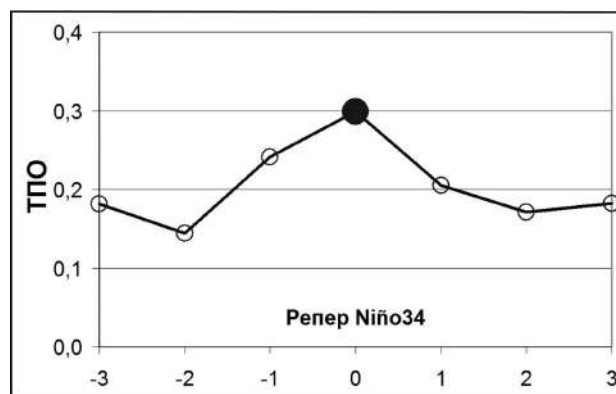


Рис. 3. Значения температуры поверхности океана до и после реперных дат

относительных чисел Вольфа получены отклонения от параболического тренда.

С целью оценки вклада Эль-Ниньо в изменение ТПО методом наложения эпох рассмотрены изменения ТПО до и после событий Эль-Ниньо. В качестве реперного (нулевого) года использованы даты максимального развития событий Эль-Ниньо в период с 1960 по 2018 гг. (*рис. 3*).

Из *рис. 3* следует, что в среднем превышение ТПО в эпоху максимального развития событий Эль-Ниньо составляло около 0,3 °С, что подтверждает полученные в ряде работ выводы об увеличении температуры поверхности океана во время событий Эль-Ниньо [15, 17, 18].

Результаты тесноты связи и знака корреляции отклонений ТПО от линейных трендов с индексом Niño3.4 для последовательных 23-летних периодов представлены на *рис. 4*.

Из *рис. 4* следует, что теснота связи рассмат-

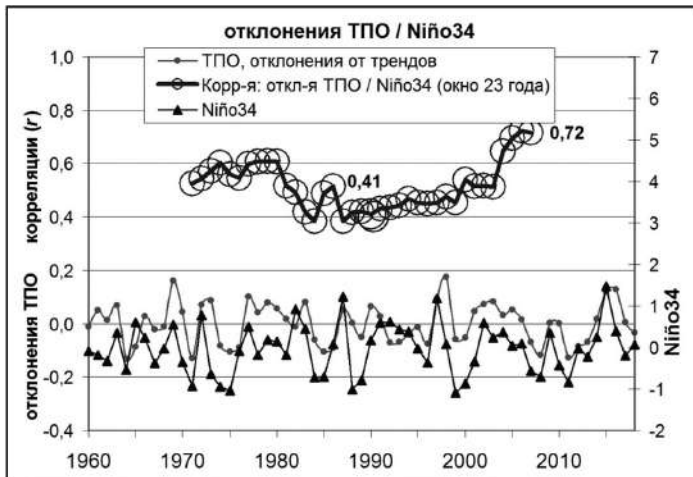


Рис. 4. Динамика индексов Niño3.4, отклонений температуры поверхности океана от линейных трендов и их линейная корреляция для 23-летних скользящих интервалов

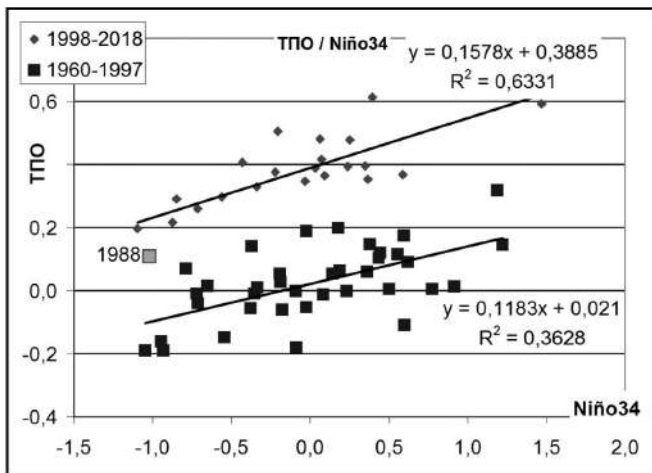


Рис. 5. Диаграмма рассеяния температуры поверхности океана /индекс Niño3.4

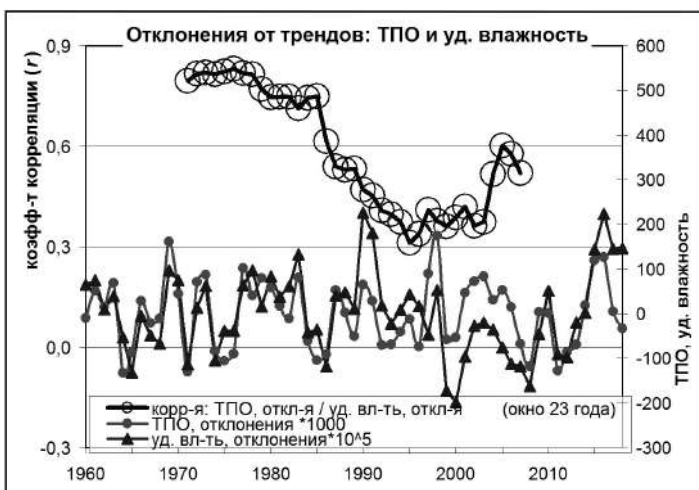


Рис. 6. Отклонения от линейных трендов удельной влажности ($\times 10^5$) и температуры поверхности океана ($\times 10^3$) и их скользящая корреляция для 23-летних скользящих интервалов

риваемых характеристик для 23-летних скользящих периодов находится в интервале $+0,38 - +0,72$. Наибольшая теснота связи характерна для начальных и конечных периодов – до 1981 (окно 1970 – 1992 гг.) и после 2000 года (окно 1989 – 2011 гг.), то есть приблизительно через 30-летний интервал теснота связи сопоставляемых величин существенно увеличивается, что может свидетельствовать о наличии квази-тридцатилетней составляющей в изменении тесноты связи сопоставляемых величин.

Поскольку в первой части ряда ТПО была в среднем на $0,3\text{ }^\circ\text{C}$ ниже, чем во второй, то диаграмма разброса сопоставляемых величин разбивается на два кластера – для первой (1960–1997 гг.) и второй (1998–2018 гг.) частей ряда. Для каждого периода сохраняется положительная линейная связь ТПО индекса Niño3.4 (рис. 5). Более высокое значение коэффициента линейного тренда и высокая детерминация (R^2) для второй части ряда (1998–2018 гг.) свидетельствует не только о некотором усилении влияния событий Эль-Ниньо на увеличение температуры Мирового океана, но и о более «ярком» его проявлении во второй части ряда (меньшем разбросе значений ТПО), чем в первой. В то же время, наличие двух обособленных кластеров на рисунке 5 констатирует факт резкого увеличения ТПО при переходе ко второму периоду. Его можно связать с увеличением радиационного воздействия парниковых газов на климат в последние два десятилетия, когда оно превысило 2 Вт/м^2 [19].

Известно, что содержание влаги в атмосфере зависит от температуры подстилающей поверхности и скорости ветра. И если трендовые составляющие ТПО и удельной влажности (Н) показывают отрицательную корреляцию (рис. 1), то отклонения этих характеристик от линейных трендов обнаруживают для большей части ряда статистически значимую положительную связь (рис. 6).

Значения коэффициентов корреляция отклонений ТПО и Н от линейных трендов приведены в таблице 1.

Теснота связи сопоставляемых величин статистически значима. Из таблицы сле-

дует, что эта связь была особенно тесной ($r > 0,8$) для первой части ряда (1960–1988 гг.). В последующие годы теснота связи уменьшилась до существенно меньших значений, оставаясь, впрочем, статистически значимой ($p_{случ} < 10\%$) за исключением двух 23-летних интервалов 1984–2006 и 1985–2007 гг. ($r = 0,31$ и $r = 0,34$, соответственно). Причины таких существенных различий тесноты связей ТПО и Н на разных временных интервалах остаются для нас не вполне понятными. Одной из причин может являться недостаточная длина используемых для расчётов выборок. Кроме того, зависимость испарения от скорости ветра может вносить определенный вклад в изменение тесноты связи ТПО и удельной влажности.

Особый интерес представляет анализ спектров удельной влажности и температу-

Таблица 1.

Изменение тесноты связей отклонений температуры поверхности океана и удельной влажности от трендов для различных интервалов времени

Период, гг.	Корреляции	$p_{случ}$
1960–2018	0,59	< 1%
1960–1988	0,81	< 1%
1988–2018	0,48	< 5%

ры поверхности океана. Известно [20, 21], что почти любой периодический сигнал можно представить в виде суммы отдельных гармонических составляющих (синусоид и косинусоид со своими амплитудами A , периодами T и, следовательно, частотами ω). При анализе временных рядов используется дискретный вариант такого разложения – конечная сумма монохроматических синусоидальных колебаний (гармоник). Графи-

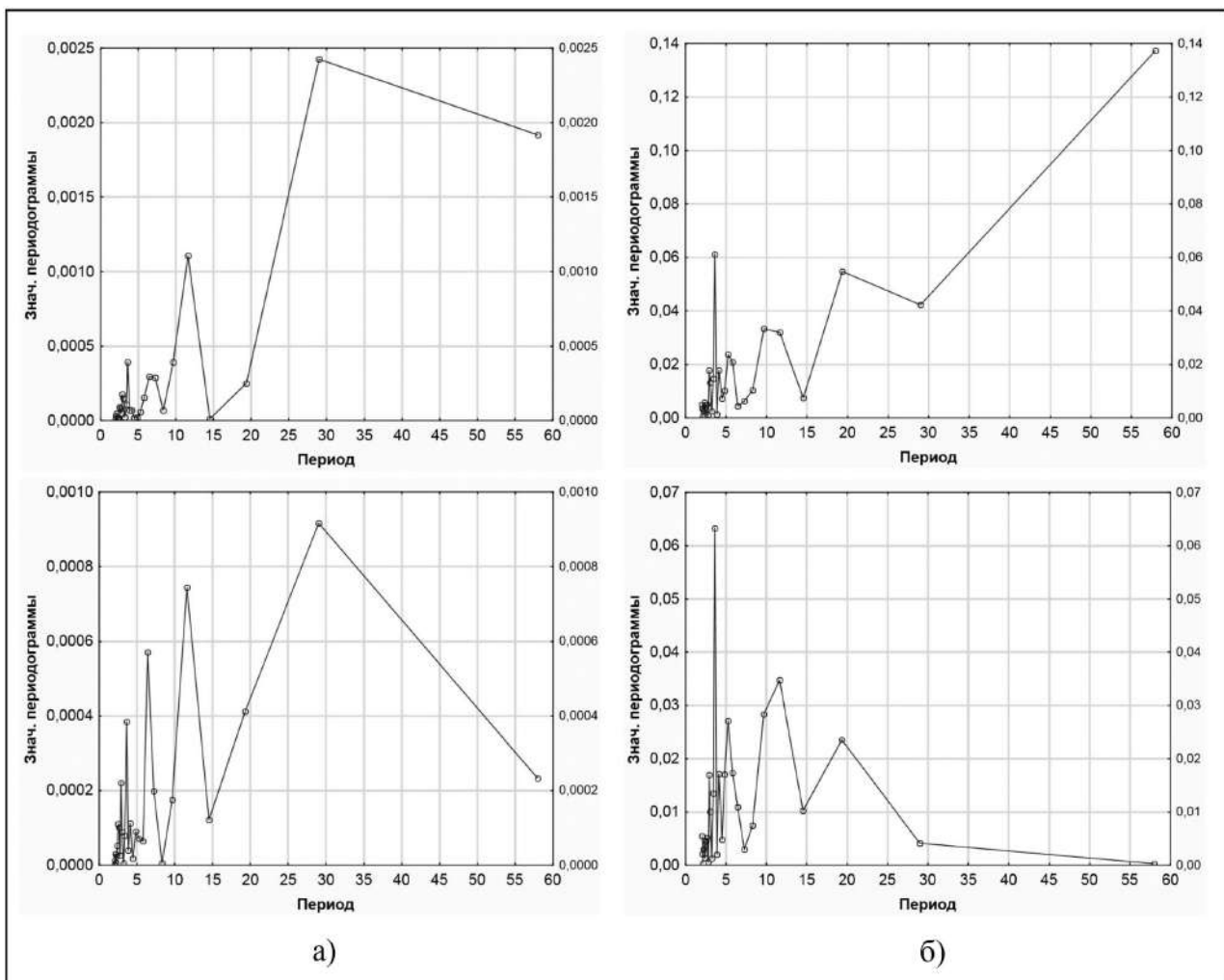


Рис. 7. Периодограммы рядов: удельной влажности воздуха (а) и температуры поверхности океана (б).

Периодограммы верхнего ряда рисунка относятся к исходным рядам, нижнего ряда – к их отклонениям от трендов, 1960–2017 гг.

ческая форма зависимости квадрата амплитуды сигнала (его мощности) от частоты или периода представляет собой т.н. периодограмму, иногда называемую спектром.

На *рис. 7* приведены спектры удельной влажности атмосферы Земли (а) и ТПО (б), для исходных рядов – верхняя часть рисунка, для их отклонений от линейных трендов за период с 1960 по 2017 г. – нижняя часть рисунка.

Из рисунка 7 а) следует, что в спектрах удельной влажности обнаружены две наиболее значимых составляющих, близких по продолжительности к известному 11-летнему циклу солнечной активности и 30-летнему циклу. Более короткопериодные составляющие близки по длительности к колебаниям, присущим Эль-Ниньо (3–7 лет) [15].

Рисунок 7, б) показывает, что в спектрах ТПО содержатся сходные по длительности составляющие в короткопериодной части, а в долгопериодной части спектра имеются существенные различия. Так, в спектре наблюдаемых ТПО содержится квазидвадцатилетняя составляющая, а также мощная долгопериодная (трендовая) составляющая. Определить её продолжительность невозможно в силу наличия короткой выборки (58 лет).

Следует отметить, что в нашей работе [22] выявлена статистически значимая квазидвадцатилетняя составляющая в изменении величины линейных трендов температуры Мирового океана. Она оказалась особенно выраженной в период

до 70-х годов прошлого столетия, когда влияние антропогенных факторов на климат было незначительным, особенно в Южном полушарии Земли, где меньшая площадь суши. В чётном 11-летнем цикле наблюдалось уменьшение величины линейных трендов температуры; минимальные величины линейных трендов отмечались в конце нисходящих ветвей 11-летних чётных солнечных циклов – 1911–1914, 1930–1933, 1951–1954, 1973–1976 и 1993–1996 годы.

По аналогии со спектральным анализом отдельных временных рядов проводится и совместный парный анализ временных рядов (кросс-спектральный анализ). Цель его – оценка связи значений двух рядов на соответствующих частотах, то есть связей отдельных составляющих (гармоник) с совпадающими частотами. Для этого используется такая характеристика, как кросс-амплитуда. Она может интерпретироваться как мера ковариации между соответствующими частотными компонентами двух рядов и представляет собой коспектральный аналог мощности спектра.

Нормировка кросс-амплитуды позволяет получить уточняющую характеристику – коэффициент когерентности, представляющий собой квадрат корреляции между циклическими компонентами двух рядов соответствующей частоты. Однако, следует иметь в виду, что при малых амплитудах указанных компонент когерентность оценивается ненадёжно.

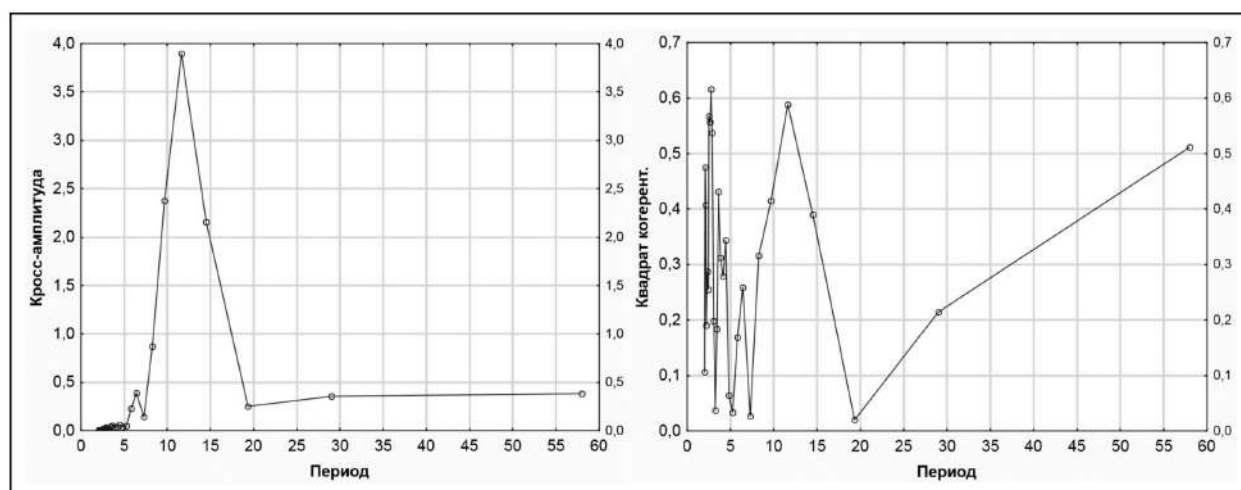


Рис. 8. Кросс-амплитуда (слева) и квадрат когерентности (справа) сглаженных остатков удельной влажности воздуха и остатков относительных чисел Вольфа, 1961–2018 гг.

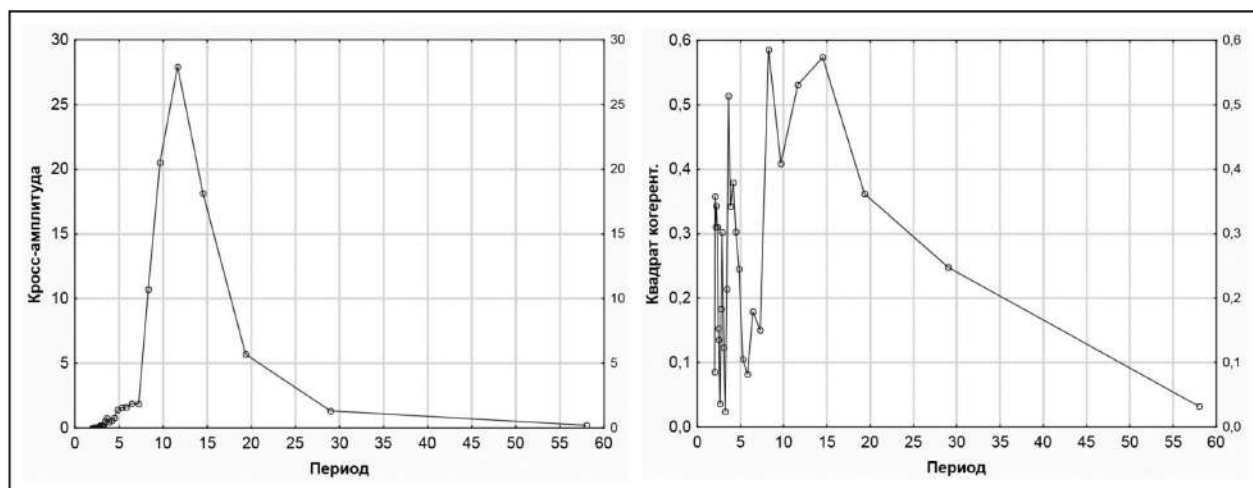


Рис. 9. Кросс-амплитуда (слева) и квадрат когерентности (справа) сглаженных остатков температуры поверхности океана и остатков относительных чисел Вольфа, 1961–2018 гг.

Используя аппарат кросс-спектрального анализа, рассмотрим связи удельной влажности воздуха и ТПО с солнечной активностью. Как и ранее, будем использовать отклонения от линейных трендов указанных характеристик.

Выше отмечалась достаточно тесная связь отклонений от тренда ТПО (остатков ТПО) и индекса Niño3.4 (рис. 3, 4). Тесная связь отмечается и в случае сопоставления удельной влажности воздуха и ТПО. Для более корректной оценки сопряженности остатков удельной влажности воздуха, ТПО и солнечной активности дополнительно была проведена высокочастотная фильтрация первых двух рядов с целью исключения эффекта, связанного с влиянием Эль-Ниньо.

Наиболее эффективен при этом метод параболического сглаживания скользящим средним по трем точкам, когда сигнал преобразуется по формуле:

$$x_{i+1} = (x_i + 2x_{i+1} + x_{i+2})/4, \quad i=1, \dots, n-2. \quad [23]$$

На рис. 8 и 9 представлены графики кросс-амплитуд и коэффициентов когерентности сглаженных остатков (отклонений от тренда) удельной влажности воздуха, а также ТПО с числами Вольфа W .

Для удельной влажности воздуха и ТПО обнаруживаются доминирующие пики на частотах, близких к известному 11-летнему циклу солнечной активности (11,6 года для 1961–2018 гг. и 10,4 года для периода 1960–2011 гг.). Это со-

гласуется с отмеченными ранее максимумами периодограмм удельной влажности воздуха и ТПО (рис. 7).

Согласно изложенному выше, ввиду весьма малых амплитуд высокочастотных гармоник в ряду чисел Вольфа W (периоды до 5 лет), когерентность на соответствующих частотах оценивается ненадежно.

Выводы

С использованием предварительно стационаризованных рядов (с отфильтрованными высокочастотными колебаниями) между изменениями температуры Мирового океана и удельной влажности атмосферы установлена статистически значимая корреляционная связь. Выявлен 11-летний солнечный цикл в изменениях температуры поверхности Мирового океана и удельной влажности атмосферы.

Новизна исследования заключается в том, что с использованием спектральных методов математической статистики (периодограмм-анализ, кросс-спектральный анализ) и предварительного исключения линейных трендов и эффекта событий Эль-Ниньо в изменении температуры поверхности Мирового океана и удельной влажности атмосферы установлена статистически значимая сопряженность указанных рядов и выявлен 11-летний солнечный цикл в их изменениях. Это имеет важное как научное, так и прикладное значение.

References [Литература]

1. Kotlyakov V.M., Komarova A.I. (2007). *Geography: Concepts and Terms*. Dictionary in five languages. Moscow. [In Russian].
[Котляков В.М., Комарова А.И. География: понятия и термины: пятиязычный академический словарь. Москва, 2007.]
2. Vitinsky Yu.I., Ol' A.I., Sazonov B.I. (1976). *The Sun and the atmosphere of the Earth*. Leningrad. 351 p. [In Russian].
[Витинский Ю.И., Оль А.И., Сазонов Б.И. Солнце и атмосфера Земли. Ленинград. 1976. 351 с.]
3. Herman J. R., Goldberg R. A. (1978). *Sun, Weather, and Climate*. Washington.
[Герман Дж. Р., Голдберг Р.А. Солнце, погода, климат. Ленинград. 1981. 320 с.]
4. Krivolutsky A.A., Repnev A.I. (2009). *Impact of space factors on the Earth's ozonosphere*. Moscow, 484 p. [In Russian].
[Криволицкий А.А., Репнев А.И. Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. Москва. 2009. 484 с.]
5. Neushkin A.I. et al. (2012). *Monitoring the global circulation of the atmosphere. Northern hemisphere*. Obninsk. 123 p. [In Russian].
[Мониторинг общей циркуляции атмосферы. Северное полушарие / Неушкин А.И. и др. Обнинск. 2012. 123 с.]
6. Fyodorov V.M. (2018). *Insolation of the Earth and modern climate changes*. Moscow, 231p. [In Russian].
[Фёдоров В.М. Инсоляция Земли и современные изменения климата. Москва. 2018. 231 с.]
7. Shulei'kin V.V. (1968). *Physics of sea*. Moscow, 1083 p. [In Russian].
[Шулейкин В.В. Физика моря. Москва, 1968. 1083 с.]
8. Iakovleva N. I. (1969). On the cause of quasi-periodic climate fluctuations, *Proc. of the MGO*, Iss. 236, 35 – 44. [In Russian].
[Яковлева Н.И. К вопросу о причине квазипериодических колебаний климата // Тр. ГГО, 1969. Вып. 236. С. 35–44.]
9. Musaelian Sh.A. (1978). *On the nature of some super-long atmospheric processes*. Leningrad, 142 p. [In Russian].
[Мусаелян Ш.А. О природе некоторых сверхдлительных атмосферных процессов. Ленинград, 1978. 142 с.]
10. Broecker W.S. The great ocean conveyor. *Oceanography*. Vol. 4(2), 79–89.
11. Kennedy J.J., Rayner, N.A., Smith, R.O., Saunby, M. and Parker, D.E. (2011c). Reassessing biases and other uncertainties in sea-surface temperature observations since 1850 part 2: biases and homogenisation. *J. Geophys. Res.*, 116, D14104, doi:10.1029/2010JD015220
12. *Monthly/seasonal mean time series from the NCEP Reanalysis Dataset, accessed 3 June 2019* <https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/timeseries/timeseries1.pl>
13. *SILSO, World Data Center - Sunspot Number and Long-term Solar Observations, Royal Observatory of Belgium, on-line Sunspot Number catalogue, accessed 3 June 2019* http://sidc.oma.be/silso/DATA/SN_y_tot_V2.0.txt
14. *Climate Timeseries, accessed 3 June 2019* https://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/Data/nino34.long.anom.data
15. Polonsky A.B. (2008). *The role of the ocean in climate change*. Kyiv, 183 p. [In Russian].
[Полонский А.Б. Роль океана в изменениях климата. Киев, 2008, 183 с.]
16. *Climate4you, accessed 3 June 2019* <https://climate4you.com/Sun.htm>
17. Lysenko S.A., Loginov V.F. (2018). The role of the ocean in global and regional climate change. *Report of BSUIR*, 7 (117). 58–63. [In Russian].
[Лысенко С.А., Логинов В.Ф. Роль океана в изменениях глобального и регионального климата // Доклады БГУ-ИР. 2018. № 7 (117). С. 58–63.]
18. Hu S., Fedorov A.V. (2017). The extreme El Niño of 2015–2016 and the end of global warming hiatus. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 44, 8. 3816–3824.
19. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels, A. Xia Y., Bex V. and Midgley P.M. (eds.). *IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
20. Bendat J.S., Piersol A.G. (1980). *Engineering applications of correlation and spectral analysis*, New York.
[Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. Москва. 1983. 312 с.]
21. Terebizh V. Yu. (1992). *Time series analysis in astrophysics*. Moscow, 392 p. [In Russian].
[Теребиж В. Ю. Анализ временных рядов в астрофизике. Москва. 1992. 392 с.]
22. Loginov V. F., Mikutsky V.S. (2017). *Climate change: trends, cycles, pauses*. Minsk, 180 p. [In Russian].
[Логинов В.Ф., Микуцкий В.С. Изменения климата: тренды, циклы, паузы. Минск. 2017. 180 с.]
23. Kulaichev A.P. (2007). *Computer electrophysiology and functional diagnostics*. Moscow, 640 p. [In Russian].
[Кулаичев А.П. Компьютерная электрофизиология и функциональная диагностика. Москва. 2007. 640 с.]

Статья поступила в редакцию 23.09.2019