

В.Н.Еремеев*, А.Н.Жуков**, М.А.Крашенинникова**,
А.А.Сизов**, А.Е.Чехлан**

**Океанологический центр НАН Украины, г.Севастополь*

***Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ В РЕГИОНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

На примере текущего векового цикла солнечной активности показано, что зональный перенос в атмосфере Атлантико-Европейского сектора, характеризующийся индексом САК, увеличивается в годы роста и спада векового цикла солнечной активности и уменьшается в годы его максимума. Таким образом, формируется «вековая волна» изменчивости циркуляции атмосферы в Атлантико-Европейском секторе, которая определяет вековой цикл («вековую волну») изменчивости зимней температуры воздуха и воды в прибрежной части ЮБК и в регионе Черного моря.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *индекс САК, вековой цикл солнечной активности, среднегодовая температура воздуха, среднегодовая температура моря, Черное море.*

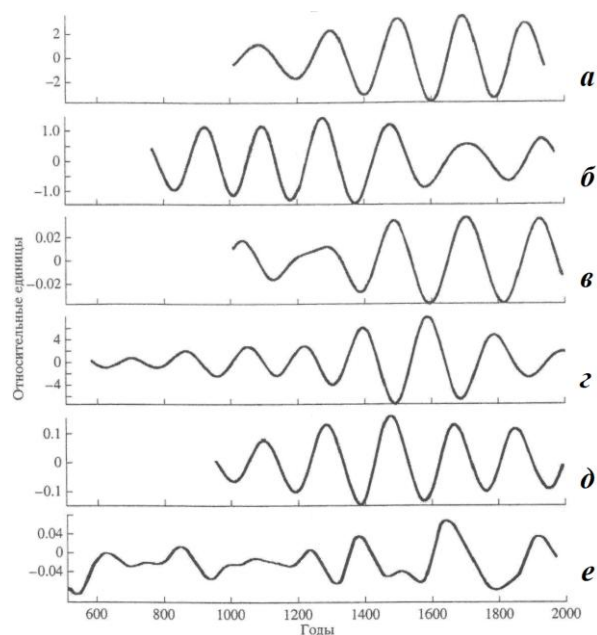
В настоящее время появляется большое число работ, в которых обсуждается необходимость учета солнечной активности в исследовании глобальной и региональной климатической изменчивости. Учитывая, что земная атмосфера испытывает периодически повторяющиеся воздействия планетарного и космического происхождения, в ряде работ [1, 2] делается попытка классификации групп таких циклических возмущений атмосферы. Наиболее известными из таких групп являются «короткие» или «циклы Миланковича» продолжительностью 93000, 41000 и 25750 лет и «ультракороткие» продолжительностью 6000, 2300, 210, 87 и 60 лет. К этой же группе относятся хорошо изученные 22- и 11-летние циклы солнечной активности.

Квазипериодический (циклический) сигнал, поступающий к Земле, имеет небольшую мощность, но в силу нелинейности климатической системы Земли, происходит ее подстройка к циклическому сигналу (явление «стохастического резонанса»), в результате в отклике системы проявляется квазипериодичность, определяемая слабым циклическим сигналом [2, 3].

В последние годы появились работы, в которых с использованием палеоклиматических данных исследуется циклический (квазиволновой) характер изменчивости приземной температуры [4 – 11]. Во всех этих работах, описываются климатические ритмы, которые связываются с солнечной циклическостью. Установлено, что ~ 200-летний цикл – один из самых интенсивных солнечных циклов, и он доминирует в течение всего голоцена [9]. На рис.1 показаны взятые из [9] результаты фильтрации палеоклиматических данных для различных районов северного полушария. Для выделения ~ 200-летнего цикла использовался полосовой фильтр Баттерфорда 6-го порядка в диапазоне периодов 180 – 230 лет.

Оценка солнечной активности выполнялась по данным о концентрации ^{14}C в кольцах деревьев.

© В.Н.Еремеев, А.Н.Жуков, М.А.Крашенинникова,
А.А.Сизов, А.Е.Чехлан, 2010



Р и с . 1 . Результаты фильтрации палеоклиматических хронологий в диапазоне масштабов 180 – 230 лет [9]: вариации ^{14}C (а); хронологии для Тянь-Шань (б, в); хронология для Тибетского плато (г); хронология для района Скалистых гор в Западной Канаде (д); хронология для севера Скандинавии (е).

В [9] показано, что корреляция квазидвухсотлетнего климатического ритма с аналогичным солнечным циклом имеет региональный характер, в частности Северо-Атлантический регион относится к области ослабленной и неоднозначной

корреляции этого климатического ритма с соответствующим циклом солнечной активности. В то же время в [5] указывается на существование ярко выраженного квазидвухсотлетнего ритма в приземной температуре Европейской части России. По-видимому, региональные особенности в проявлении квазидвухсотлетнего ритма в поле приземной температуры Атлантико-Европейского сектора связаны с особенностями циркуляции атмосферы в годы максимума и минимума «ультракоротких» циклов солнечной активности.

Целью статьи является анализ долговременной изменчивости приземной температуры воздуха и поверхностной температуры Черного моря в разные фазы циклической (волновой) изменчивости циркуляции атмосферы в Атлантико-Европейском секторе.

Материалы и методика расчета. В работе использовались среднемесячные значения температуры воздуха и воды в Ялте за весь период инструментальных наблюдений (с 1864 по 2008 гг.), а также массив данных реанализа *NCEP/NCAR* [12], из которого выбирались значения приземной температуры для региона Черного моря и поверхностная температура моря за 1948 – 2006 гг. Среднегодовые числа Вольфа брались из каталога *FTP/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_NUMBERS/* на *ftp.ngdc.noaa.gov*, а индекс САК, средний за декабрь – март, был взят из [13].

Для анализа вековой изменчивости солнечной активности (W) и циркуляции атмосферы в Атлантико-Европейском секторе (САК) и связанных с ними флуктуаций приземной температуры (ПТ) и ТПО в районе Южного берега Крыма (ЮБК), проводилось осреднение исходных данных по десятилетиям. Десятилетиям присваивались условные номера, которые использовались в дальнейшем на временных осях графиков. Номера десятилетий показаны в скобках: 1861 – 1870 гг. (1), 1871 – 1880 гг. (2), 1881 – 1890 гг. (3), 1891 – 1900 гг. (4), 1901 – 1910 гг. (5), 1911 – 1920 гг. (6), 1921 – 1930 гг. (7), 1931 – 1940 гг. (8), 1941 – 1950 гг. (9), 1951 – 1960 гг. (10), 1961 –

1970 гг. (11), 1971 – 1980 гг. (12), 1981 – 1990 гг. (13), 1991 – 2000 гг. (14).

Построенные по осредненным величинам графики аппроксимировались полиномами пятой степени и оценивалась точность аппроксимации (R^2).

Пространственная структура аномалий температуры и приземного давления в регионах Атлантики и Черного моря получалась по рядам отклонений осредненных за январь – март значений этих характеристик за выбранные годы от их средних значений за январь-март во все годы, используемые в анализе. Аномалии вычислялись для каждой точки выбранного пространства с шагом $2,5 \times 2,5^\circ$. Пространство в Атлантическом океане ограничивалось координатами: $\varphi = 20 - 40^\circ$ с.ш., $\lambda = 50 - 70^\circ$ з.д. (Саргассово море). Регион Черного моря ограничивался координатами: $\varphi = 40 - 47^\circ$ с.ш., $\lambda = 27,5 - 42^\circ$ в.д.

Доверительная вероятность полученных результатов оценивалась с использованием критерия Стьюдента [14].

Результаты. Ряды наблюдений САК и температуры позволяли анализировать процессы в пределах одного векового цикла («цикла Глайсберга»). Для исключения высокочастотных компонент, все данные осреднялись по десятилетиям. Графики рядов W и САК вместе с аппроксимирующими кривыми (полиномы 5-й степени) показаны на рис.2, а, б. Как хорошо видно, на фазе роста солнечной активности во второй половине XIX ст. (от минимума Дальтона в последнее десятилетие XIX в.) формировался интенсивный зональный перенос в атмосфере Атлантико-Европейского сектора (максимум САК), который, в свою очередь, создавал условия для понижения зимней температуры воздуха и воды в районе ЮБК (рис.2, в, г). Такой же отклик в зимних температурах наблюдался и у юго-восточного побережья моря в районе Батуми (эти данные не показаны на рис.2). Отметим, что минимум САК наблюдался в годы современного максимума солнечной актив-

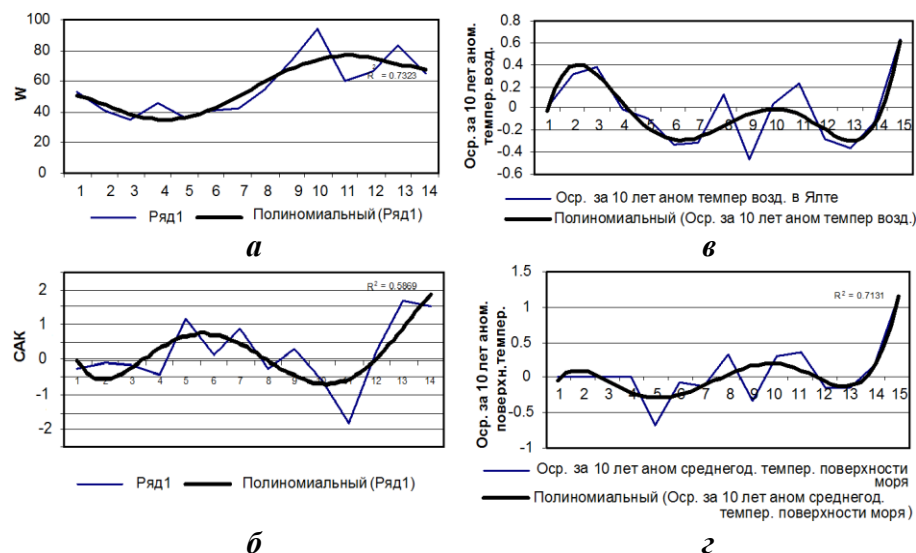
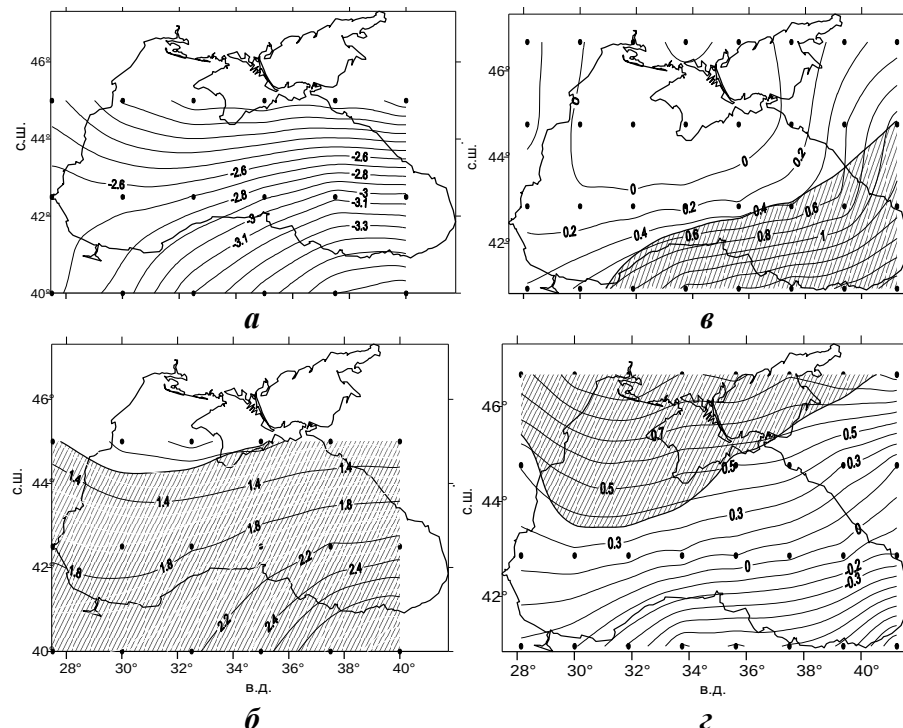


Рис. 2. Вековой цикл изменчивости осредненных по десятилетиям гидрометеорологических характеристик: числа Вольфа (а); индекс САК (б); среднегодовая температура воздуха в Ялте (в); среднегодовая температура моря у побережья Ялты (г).

ности (вторая половина двадцатого столетия), что создавало условия для формирования положительных зимних температур воздуха и воды у ЮБК (точки 9, 10 на временной оси, что соответствовало двадцатилетию 1941 – 1960 гг.). Двадцатилетие 1971 – 1990 гг. (точки 12, 13) характеризовалось отрицательным трендом векового цикла солнечной активности и положительным трендом индекса САК. В первом десятилетии XXI в. зональный перенос в атмосфере резко ослабел (индекс САК уменьшился до величины – 0,21). По-видимому, с этим связан положительный тренд температуры воздуха и воды у ЮБК в это десятилетие (точка 15 на временной оси).

Данные ре-анализа *NCEP/NCAR* позволяют представить пространственную структуру аномалий полей приземного давления и температуры воздуха в регионе Черного моря в годы минимума векового цикла индекса САК ($САК \leq -1$; 1951 – 1970 гг.) и в годы максимума векового цикла этого индекса ($САК \geq 1$; 1981 – 2000 гг.). Эти аномалии показаны на рис.3. Как следует из рис.3, *а*, в годы минимума зонального переноса в атмосфере ($САК \leq -1$) над всем регионом Черного моря наблюдалось пониженное по сравнению с климатической нормой атмосферное давление, и, наоборот, в годы максимального зонального переноса в атмосфере ($САК \geq 1$) атмосферное давление над Черным морем превышает климатическую норму (рис.3, *б*). Зимняя приземная температура при $САК \leq -1$ ниже климатической нормы в северной части моря и выше нормы – в его южной части (рис.3, *в*). При $САК \geq 1$, наоборот, над северной частью моря зимой располагается более теплый воз-



Р и с . 3 . Аномалии приземного давления и температуры воздуха в регионе Черного моря в годы с $САК \leq -1$ (1951 – 1970 гг.) (*а*, *в*) и $САК \geq 1$ (1981 – 1998 гг.) (*б*, *г*). Заштрихованные области соответствуют доверительной вероятности 95 %.

дух, а над южной частью – более холодный (рис.3, з). Таким образом, рис.2, 3 иллюстрируют квазиволновой характер изменчивости приземного давления и температуры воздуха и воды в черноморском регионе с периодом, близким к вековому циклу флуктуации индекса САК и солнечной активности.

Помимо векового цикла, в гидрометеорологических полях Черного моря выделяются квазидвадцатилетние циклы изменчивости [15]. В этих циклах, так же, как и в вековом, зимняя поверхностная температура у ЮБК выше климатической при $САК \leq -1$ и ниже климатической нормы при $САК \geq 1$, при этом циркуляция атмосферы, характеризуемая $САК \geq 1$, преобладает в годы четного цикла, а характеризуемая $САК \leq -1$ – в годы нечетного цикла солнечной активности. Таким образом, формируется квазидвадцатилетняя волна изменчивости гидрометеорологических характеристик в регионе Черного моря.

Архив спутниковых данных *PODAAC JPL Pathfinder* (<http://poet.jpl.nasa.gov>) позволил оценить волновой характер изменчивости поверхностной температуры Черного моря на масштабах, меньших квазидвадцатилетнего [16]. Эти оценки относятся к фазе максимума векового цикла индекса САК (1985 – 2005 гг.). Используя процедуру Фурье-преобразования и фильтрации скользящим средним в каждой точке поверхности Черного моря с шагом 18км, для каждой гармоники спектра были построены поля пространственного распределения их амплитуд. На рис.4, а показано распределение амплитуд низкочастотной составляющей (НЧ) гармоники 10,5 лет среднегодовых значений поверхностной температуры в пространстве, ориентированном в направлении запад-восток и ограниченном координатами 42,2 – 43,8° с.ш., 28,8 – 34,9° в.д. (рис.4, а). На рис.4, б показано распределение амплитуд НЧ-составляющей гармоники 5,25 лет в пространстве, ориентированном в направлении север-юг и ограниченном координатами 41,5 – 45,9° с.ш., 30,2 – 31,8° в.д. На рис.5 показаны соответствующие распределения высокочастотных составляющих (ВЧ) амплитуд этих же гармоник. Как хорошо видно, в зональном и меридиональном направлениях выделяются тепловые волны с амплитудой 0,2 – 0,5 °С для НЧ-составляющей и с амплитудой $\geq 0,01$ °С для ВЧ-составляющей среднегодовой поверхностной температуры Черного моря.

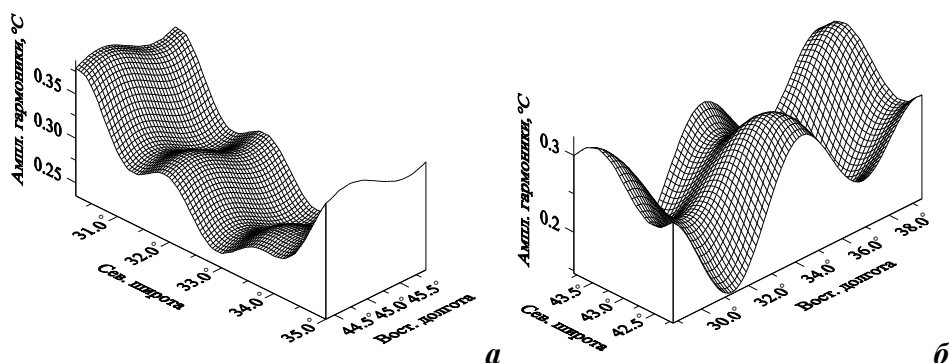
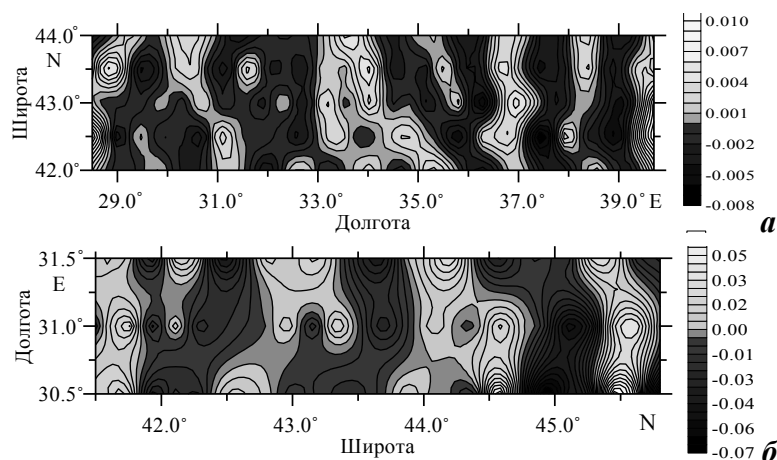


Рис. 4. Распределение амплитуды НЧ-составляющей гармоники 10,5 лет поверхностной температуры Черного моря в направлении «запад – восток» (а) и амплитуды НЧ-составляющей гармоники 5,24 лет поверхностной температуры в направлении «север – юг» (б).



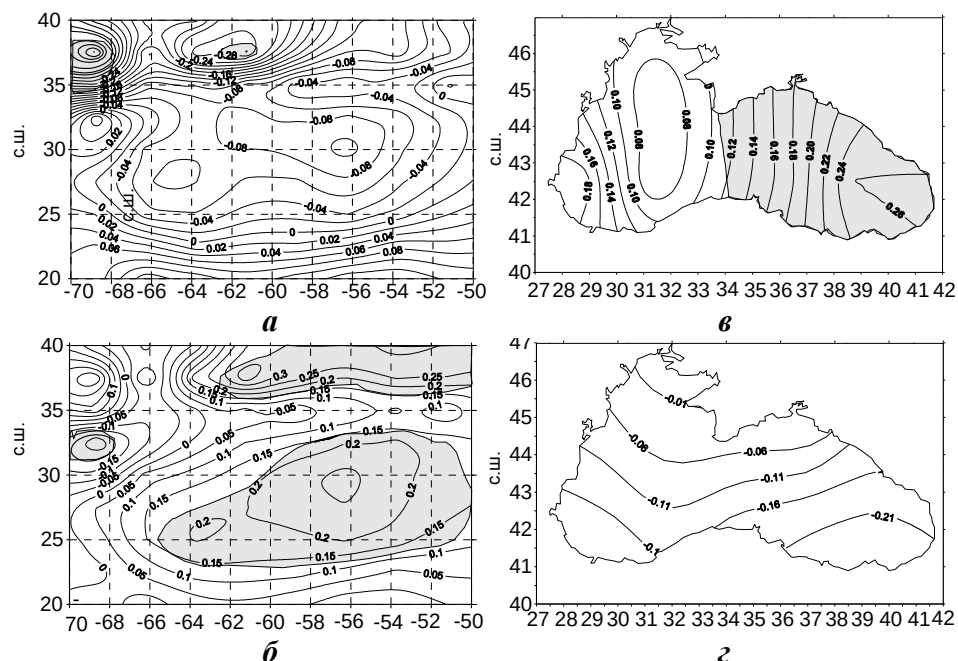
Р и с . 5 . Распределение амплитуды ВЧ-составляющей гармоники 10,5 лет поверхностной температуры Черного моря в направлении «запад – восток» (а) и амплитуды ВЧ-составляющей гармоники 5,25 лет поверхностной температуры в направлении «север – юг» (б).

Волновой (циклический) характер изменчивости температуры воздуха и воды в регионе Черного моря, обусловленный соответствующими циклическими процессами в циркуляции атмосферы, может в значительной степени прояснить климатическую тенденцию, наблюдаемую в настоящее время в Атлантико-Европейском секторе. Согласно гипотезе Айселина, подтвержденной в [17], усиление циркуляции в субтропическом круговороте Северной Атлантики (СТАК) приводит к уменьшению его диаметра и накоплению в центре круговорота аномально теплых водных масс. Соответственно, ослабление циркуляции в СТАК увеличивает его поперечные размеры и уменьшает температуру в его центре.

Усиление (ослабление) циркуляции в круговороте происходит под воздействием циркуляции атмосферы Северной Атлантики, определяемой индексом САК. Этот же механизм формирует температуру воздуха и воды в регионе Черного моря. Как показано на рис.2, в пределах вековой волны (цикла) в годы минимума солнечной активности формируется максимальный зональный перенос в атмосфере Атлантико-Европейского сектора, а вблизи векового максимума солнечной активности регистрируется минимум индекса САК. В поле поверхностной температуры центра СТАК и Черного моря этот процесс показан на рис.6. Здесь, в отличие от рис.3, представлены средние аномалии температуры воды в Саргассовом и Черном морях в двадцатилетие 1951 – 1970 гг. ($САК \leq 0$, рис.6, а, в) и в двадцатилетие 1981 – 1998 гг. ($САК \geq 0$, рис.6, б, г) Хорошо видно, что в годы максимума солнечной активности (минимума индекса САК) в Саргассовом море (центре субтропического круговорота) формируется отрицательная аномалия поверхностной температуры, а в годы начала спада солнечной активности в вековом цикле, в центре круговорота преобладает положительная поверхностная температура. В Черном море этот процесс развивается в противоположном направлении. По-видимому, в пределах квазидвухсотлетней волны (цикла) солнечной активности и тем более цикла Маундера амплитуда из-

менчивости температуры воды и воздуха будет значительно выше той, что показана на рис.6, и в этом случае следует ожидать развитие климатических процессов по сценарию, представленному в [18]. Этот сценарий предполагает значительное уменьшение, и полное прекращение поступления вод Северо-Атлантического течения в Арктический бассейн в годы Ледникового периода. По нашим оценкам, механизм интенсификации (ослабления) СТАК в наибольшей степени проявлялся в годы минимума Дальтона и современного максимума солнечной активности. Именно в эти годы, как показано на рис.2, *а, б*, наблюдалось усиление (ослабление) западного переноса в атмосфере Атлантико-Европейского сектора и соответствующие повышения (понижения) поверхностной температуры в центре СТАК (Саргассово море, рис.6, *а, б*). В связи с этим, можно ожидать, что в ближайшие десятилетия климатическая система Атлантико-Европейского сектора будет находиться под воздействием возрастающей интенсивности зонального переноса в умеренных широтах, определяемой процессами на ветви спада векового цикла солнечной активности. Соответственно, зимняя приземная температура в регионе Черного моря и его зимняя поверхностная температура будут испытывать тенденцию к понижению.

Выводы. Палеоклиматические данные и данные инструментальных измерений позволяют выделить в климатической системе Земли циклические (квазиволновые) процессы изменчивости. Предполагается, что эти циклы (волны) прежде всего в температурных (тепловых) полях возникают под воздействием соответствующих циклов солнечной активности. На примере текущего векового цикла солнечной активности показано:



Р и с. 6. Аномалии средней за январь – март поверхностной температуры Саргассова (*а, б*) и Черного (*в, г*) морей в годы векового минимума индекса САК (1951 – 1970 гг.) (*а, в*) и векового максимума индекса САК (1981 – 1998 гг.) (*б, г*).

– Зональный перенос в атмосфере Атлантико-Европейского сектора (индекс САК) увеличивается в годы роста и спада векового цикла солнечной активности и уменьшается в годы его максимума. Таким образом, формируется «вековая волна» изменчивости циркуляции атмосферы в Атлантико-Европейском секторе, которая определяет вековой цикл («вековую волну») изменчивости зимней температуры воздуха и воды в прибрежной части ЮБК и в регионе Черного моря.

– Квазидвадцатилетний цикл солнечной активности формирует соответствующий цикл («квазидвадцатилетнюю волну») изменчивости индекса САК и полей температуры воздуха и воды в регионе Черного моря [15].

– В пределах квазидвадцатилетнего цикла в поле поверхностной температуры Черного моря формируются короткопериодные (межгодовые) флуктуации, которые на отдельных гармониках представляют хорошо выраженное волновое поле («тепловые волны»), структурированные в зональном и меридиональном направлениях.

– Волновое представление циркуляции атмосферы и температурных полей Саргассова и Черного морей позволяет сделать оценки возможных климатических изменений в Атлантико-Европейском секторе и в регионе Черного моря в ближайшие десятилетия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арманд А.Д. Время в географических науках / Конструкция времени в естествознании: на пути к пониманию феномена времени. Часть 1. Междисциплинарное исследование.– М.: Изд. МГУ, 1996.– С.201-233.
2. Жирмунский А.В., Кузьмин В.И. Критические уровни развития природных систем.– Владивосток: Изд. ДВГУ, 2001.– 180 с.
3. Магнус К. Колебания: введение в исследование колебательных систем.– М.: Мир, 1982.– 304 с.
4. White W.B., Tourre Y.M. Global SST/SLP waves during the 20th century // *Geophys. Res. Lett.*– 2003.– 30, № 12.– P.53-56.
5. Клименко В.В., Климанов В.А., Сирин А.А., Слепцов А.М. Изменение климата на западе европейской части России в позднем голоцене // Докл. РАН.– 2001.– т.376, № 5.– С.679-683.
6. Shindell D.T., Shmidt G.A., Mann M.E., et al Solar forcing of regional climate change during the Maunder minimum // *Science.*– 2001.– 294.– P.2149-2152.
7. Wang Y., Cheng H., Edwards R.L., et al The holocene asian monsoon: links to Solar changes and North Atlantic climate // *Science.*– 2005.– 308.– P.854-857.
8. Sonnet C.P., Suess H.E. Correlation of bristlecone pine ring widths with atmospheric carbon – 14 variations: A climate – San relation // *Nature.*– 1984.– 308.– P.141-143.
9. Распопов О.М., Дергачев В.А., Козырева О.В., и др. География квазидвухсотлетней климатической периодичности и долговременные вариации солнечной активности // Изв. РАН. Сер. геогр.– 2009.– № 2.– С.17-27.
10. Доценко Н.М., Сонечкин Д.М. Реконструкция синхронных вековых колебаний на западе и востоке северного полушария за последние 2000 лет и их связь с солнечной активностью // Изв. РАН. Сер. геогр.– 2009.– № 4.– С.40-48.
11. Исрапилов М.И. Циклы глобальных природных изменений в голоцене по древним солнечным часам и календарям // Изв. РАН. Сер. геогр.– 2009.– № 4.– С.49-55.

12. *Global atmospheric analyses monthly means 1948 – 1998*. NWS/National Centers for Environmental Prediction. Washington D.C., 2001. CD ROM.
13. *Climate Indicts*. <http://www.cgd.ucar.edu/cas/catalog/climind/>.
14. *Абезгауз Г.Г., Тронь А.П., Копенкин Ю.Н. и др.* Справочник по вероятностным расчетам.– М.: Воениздат, 1970.– 530 с.
15. *Сизов А.А., Чехлан А.Е.* Аномалии температуры воды в северной Атлантике и осадки в Крыму в годы с экстремальными значениями индекса североатлантического колебания // *Метеорология и гидрология*.– 2007.– № 1.– С.80-88.
16. *Еремеев В.Н., Жуков А.Н., Лебедев Н.Е., Сизов А.А.* Пространственная анизотропия межгодовой изменчивости температуры воды Черного моря (по спутниковым данным) // *Иссл. Земли из космоса*.– 2007.– № 5.– С.3-10.
17. *Taylor A.H., Stephens J.A.* Latitudinal displacements of the Gulf Stream (1966 to 1977) and their relation to changes in temperature and zooplankton abundance in the NE Atlantic // *Oceanologica Acta*.– 1980.– 3.– P.145-149.
18. *Котляков В.М., Гросвальд М.Г., Кренке А.Н.* Климат Земли: прошлое, настоящее, будущее.– М.: Знание, 1985.– 48 с.

Материал поступил в редакцию 21.10.2010 г.