

Академик НАН Украины В. Н. Еремеев, А. Н. Жуков,
О. Н. Мельникова, А. А. Сизов, А. М. Чухарев

Мультимасштабная квазипериодичность индекса Североатлантического колебания и ее влияние на структуру поля ветра Черного моря

Дана оценка квазипериодических свойств временной изменчивости индекса Североатлантического колебания на междесятилетних и межгодовых масштабах. С помощью методов цифровой фильтрации и вейвлет-анализа показано существование в этой изменчивости группы устойчивых колебаний с периодами, близкими к 140–150, 60–80, ~40, 20–25 и 7–9 годам. По данным ре-анализа NCEP/NCAR показаны изменения, происходящие в структуре поля приземного ветра Черного моря в соответствии с полупериодами ~60–80-летних колебаний.

Индекс Североатлантического колебания (САК) является суммарным показателем изменения состояния циркуляции атмосферы в средних широтах Северной Атлантики. САК отражает колебание атмосферной массы между ее севером и югом с центрами в районе Исландии (минимум) и в районе Азорских островов (максимум). Пространственные особенности и временная изменчивость САК обычно определяются по полю атмосферного давления на уровне моря (SLP), для которого существует наиболее длительный ряд инструментальных наблюдений. Чаще всего индекс САК вычисляется как разность нормированных значений SLP между близко расположенными станциями Понта-Дельгада (Азорские острова) (или Лиссабон, либо Гибралтар) на юге и Рейкьявик (или Стиккисхоульмур, Исландия) на севере [1].

Согласно многочисленным исследованиям, САК в значительной степени определяет погоду (интенсивность и траектории циклонов, аномалии осадков и приземной температуры воздуха) в большинстве стран Европы в зимний сезон. Этот индекс можно рассматривать как меру колебаний процесса выноса теплого и влажного воздуха из Северной Атлантики на территорию Европы. Считается, что тенденции климатических изменений в данном регионе невозможно правильно объяснить без учета изменчивости этого индекса [1, 2].

Хотя взаимосвязь между центрами действия атмосферы проявляется в течение всего года, амплитуда колебаний максимальна в зимний сезон, когда атмосфера динамически наиболее активна [3]. Поэтому, как правило, используются значения индекса, рассчитываемые за зимний сезон с декабря по март. Чаще всего в исследованиях используется такой ряд значений индекса САК за 1864–2011 гг. — Hurrell DJFM North Atlantic Oscillation (NAO) Index (Station — Based) [4] (<http://climatedataguide.ucar.edu/guidance/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based>).

Аналізу свойств временной изменчивости индекса САК посвящено большое число научных публикаций, например [2, 4–7]. При этом преобладает несколько точек зрения. Согласно одной из них, ряды этого индекса во всех имеющихся вариантах реализации близки к шумоподобным сигналам, в лучшем случае к красному шуму [5]. В части других работ показаны отдельные квазипериодические составляющие изменчивости САК, однако подчеркнута неустойчивость таких свойств, их существование лишь на отдельных временных

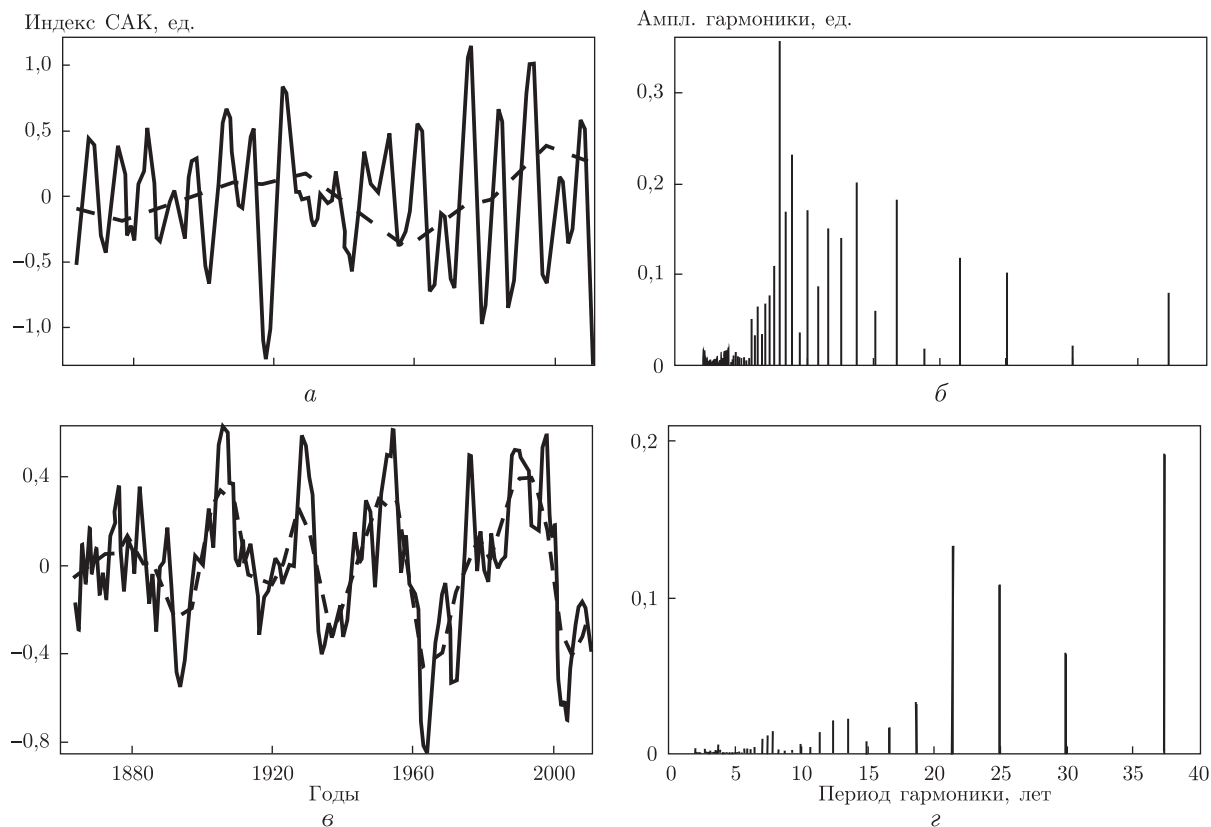


Рис. 1. ВЧ-, НЧ- (штриховая кривая) и СЧ-составляющие ряда индекса САК, выделенные фильтрами (а, в). Часть спектра ВЧ-составляющей, полученного с помощью полного преобразования Фурье, с периодами гармоник < 40 лет (б); спектр СЧ-составляющей (г)

отрезках [7]. Более глубокий анализ временной изменчивости САК и других климатических сигналов с выявлением их амплитудной и других видов модуляции дан, например, в [3].

В предлагаемой работе для изучения временной изменчивости ряда индекса САК использовались методы цифровой фильтрации в виде низкочастотных (НЧ) и полосовых фильтров скользящего среднего (далее фильтры и полосовые фильтры) [8] и вейвлет-анализа [9]. Высокочастотную (ВЧ) составляющую ряда индекса САК, выделенную фильтром с периодом 11 лет и сглаженную фильтром с периодом 3 г., демонстрирует рис. 1, а. Из рисунка видно, что даже отдельная составляющая исходного ряда с периодом $\sim 7-9$ лет, выделенная с помощью фильтрации, является сложным, композиционным сигналом, имеющим амплитудную модуляцию. Приведенный спектр это подтверждает (см. б). Именно эта композиционность и данного сигнала, и ряда индекса САК в целом, его модулированность по средним (СЧ) и низким частотам является основной причиной, по которой применение вейвлет-анализа, так как это было сделано в [7], не дает для ряда индекса САК и его отдельных спектральных составляющих устойчивой картины квазипериодической изменчивости.

На рис. 1, в показан несглаженный сигнал с периодом $\sim 25-35$ лет, чтобы продемонстрировать, как влияет процедура фильтрации на амплитуду результирующих сигналов. Он был выделен из исходного ряда полосовым фильтром в диапазоне 15–25 лет. Одновременно, он же показан после сглаживания фильтром с периодом 9 лет (штриховая кривая).

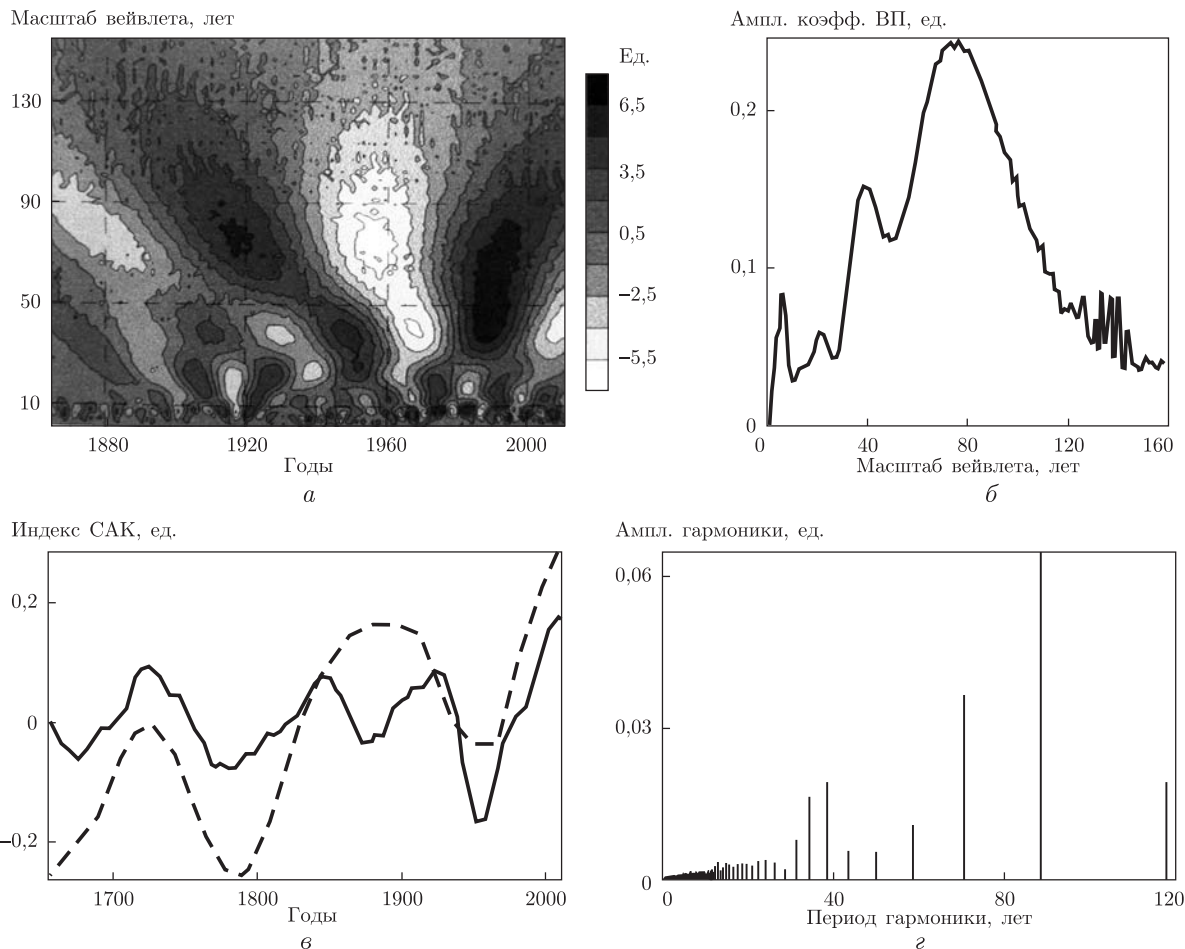


Рис. 2. Картина коэффициентов ВП ряда средних зимних (декабрь — март) значений индекса САК за 1864–2011 гг. (а) [4] и рассчитанный по ним глобальный спектр (б). СЧ- и НЧ-составляющие ряда палеорекострукции индекса САК с периодами 60–80 лет и ~150 лет (штриховая кривая) после фильтрации (в); спектр СЧ-составляющей (г)

Из рисунка в видно, что в среднем при этом амплитуда уменьшается примерно в два раза. В спектре сглаженного сигнала (см. г на рис. 1) вклад гармоники с периодом 37 лет больше, чем гармоники ~25 лет. Это связано со сложностью разделения сигналов с близкими частотами с помощью цифровых фильтров [8]. Кроме того, штриховой кривой (см. а на рис. 1) показана НЧ-составляющая ряда индекса САК с периодом ~60–80 лет, выделенная полосовым фильтром в диапазоне 50–70 лет и сглаженная — фильтром с периодом 15 лет. Эта кривая хорошо совпадает с результатами анализа ряда среднегодовых значений индекса САК, приведенными в монографии [6].

Возвращаясь к возможности использования в данном случае вейвлет-анализа можно заметить, что при более корректном подборе его параметров выявить картину квазипериодической изменчивости САК вполне возможно. На рис. 2 показан результат непрерывного вейвлет-преобразования (ВП) вышеуказанного ряда индекса САК. В качестве материнского здесь использовался хорошо известный вейвлет Морле (Morlet), поскольку его использование дает лучшее разрешение по частоте в сравнении с другими вейвлетами [9].

В картине вейвлет-коэффициентов (см. *a* на рис. 2) отчетливо проявляются периодичности разных масштабов и нестационарность процесса. Глобальный спектр энергии, который является аналогом спектра плотности энергии в гармоническом анализе, иллюстрирует *б* на рис. 2. На нем хорошо заметны колебания с периодами, близкими к 75–77, 40, 23 и 7–8 годам. При этом колебание с периодом ~ 23 года менее выражено по сравнению с тремя другими. В связи с этим заметим, что, скорее всего, и кривая на рис. 1, *в* — это результат сочетания двух колебаний с периодами 20–25 и ~ 40 лет.

Ближкие результаты для анализа межгодовой изменчивости индекса САК с помощью ВП были приведены в работе [3]. Согласно [3], колебание с периодом ~ 60 –80 лет однозначно присутствует в результатах ВП для ряда среднегодовых значений индекса САК и еще пяти параметров, включая индекс Южного колебания. Причем фазы этого колебания индекса САК хорошо совпадают с рис. 1, *a* данного текста.

Доступный в Интернете на сайте NCDC ряд палеореконструкции индекса САК (ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/historical/north_atlantic/nao_mon.txt) за ~ 350 лет более продолжителен. Его обработка методами фильтрации для междесятилетних масштабов также дает близкие результаты. При этом палеоряд за 1658–2001 гг. был дополнен данными наблюдений с 2002 по 2009 гг. Результаты последовательной фильтрации этого ряда фильтрами с периодами 60, 50 и 20 лет демонстрирует *в* на рис. 2. При этом характерно, что результирующая кривая кроме ~ 60 –80-летнего колебания содержит и компоненту с периодом ~ 90 лет. Вторая кривая была получена с помощью фильтров с периодами 60 и 50 лет (см. *в*). Ее отличительной чертой является наличие почти линейного положительного тренда на фоне колебания с периодом, близким к 150 годам. Заметим, что в представленных на рис. 2 результатах ВП тоже есть слабое колебание с периодом ~ 140 лет. Таким образом, на межгодовых и междесятилетних масштабах результаты анализа изменчивости индекса САК с помощью цифровой фильтрации и ВП в основном дают близкие результаты.

Известно, что Черное море является одним из важнейших звеньев глобальной динамической системы Северного полушария и наряду со Средиземным морем играет роль ключевого района, отвечающего за перераспределение потоков тепла и вещества на южной периферии Атлантико-Европейского сектора.

Однако основные механизмы взаимодействия всех факторов, влияющих на погодные условия в этом регионе, пока полностью не изучены. В частности, не ясна связь изменчивости приземного ветра с различными климатообразующими факторами на всех масштабах [10]. Параметры ветрового режима особенно важны для состояния Черного моря, поскольку ветер непосредственно влияет на такие базовые характеристики, как циркуляция и перемешивание вод, тепловой и водный баланс.

Квазипериодические крупномасштабные изменения барического поля Атлантико-Европейского сектора на межгодовых масштабах, индикатором которых является изменчивость индекса САК, неизбежно приводят к перестройке этого поля и в регионе Черного моря [2]. Такая связь поля ветра Черного моря с изменчивостью САК может быть показана на примере описанной выше его НЧ-составляющей с периодом ~ 60 –80 лет (см. *a* на рис. 1).

Проведенный анализ показал, что это колебание доминирует в общей энергетике ряда индекса САК на протяжении 1864–2011 гг. (см. *б* на рис. 2). Рис. 3 демонстрирует поля среднегодовых значений модуля скорости приземного ветра, осредненные за десятилетия, соответствующие минимальным (см. *a* на рис. 3) и максимальным (см. *б* на рис. 3) значениям этого колебания (см. *a* на рис. 1).

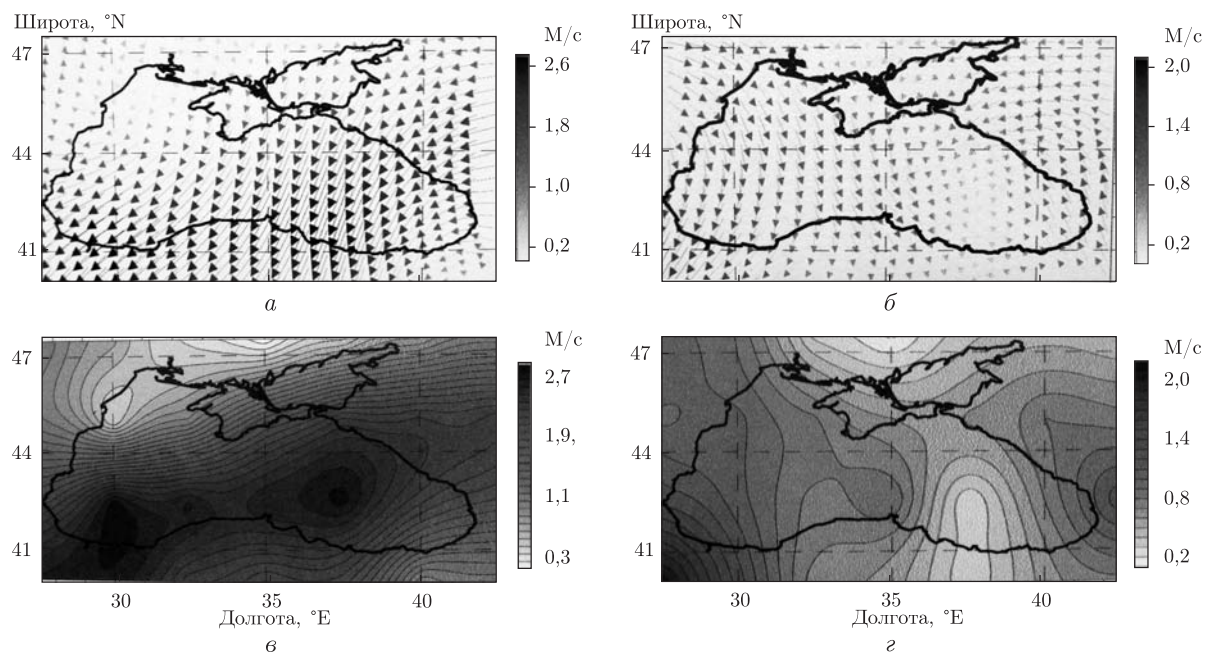


Рис. 3. Среднегодовые поля приземного ветра Черного моря (*а, б*) и модуля его скорости (*в, г*) за 1955–65-й и 1990–2000 гг. соответственно по данным ре-анализа NCEP/NCAR

Выбор только двух отрезков связан с тем, что самые протяженные по времени ряды данных ре-анализа ветра NCEP/NCAR [11] ограничены 1948–2012 гг. (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/reanalysis.shtml>).

Сравнение этих полей с полем среднегодовой скорости ветра за весь период ре-анализа показывает, что в первом приближении его структура в течение этого времени остается устойчивой. Она может быть сведена к наличию четырех, чередующихся между собой областей повышенных и пониженных значений скорости ветра, центры которых располагаются примерно на концах линий косоугольного креста, который можно вписать в этот фрагмент поверхности. В публикации [12] такая структура распределения завихренности напряжения трения ветра над Черным морем была названа квадрупольной. Расположение областей пониженных значений скорости ветра (<1 м/с) связано преимущественно с северо-западом (СЗ) и юго-востоком моря (ЮВ). А области повышенных значений скорости ветра (>2 м/с) располагаются на его северо-востоке (СВ) и юго-западе (ЮЗ).

Таким образом, изменения в структуре поля ветра, связанные с действием НЧ-составляющей ряда индекса САК с периодом ~ 60 – 80 лет, сводятся к изменениям положения центров этих областей и их размеров. Так, в период 1955–65-го гг. центры областей повышенных значений скорости ветра сдвигаются над Черным морем навстречу друг другу, образуя практически над всей его акваторией единую область повышенной скорости ветра, за исключением крайнего СЗ (см. *в* на рис. 3). При этом в наиболее ветреном районе у прол. Босфор среднегодовые значения модуля скорости ветра достигают 3 м/с. Соответственно на рисунке *а* видно, что в среднегодовом представлении область максимальных значений модуля скорости ветра над Черным морем вытянута с СВ на ЮЗ.

При этом на периферии СЗ и ЮВ действуют крупные атмосферные вихри, соответственно антициклон и циклон, описанные в статье [13]. Такая “диагональная”, вытянутая с СВ

на ЮЗ структура поля ветра над Черным морем с циклонической завихренностью ветра над ЮВ приводит к усилению Основного черноморского течения и другим известным изменениям в его гидродинамике [12]. В период 1990–2000 гг., напротив, над большей частью моря в его центре и на востоке сливаются области пониженных значений скорости ветра (см. *г* на рис. 3). В этом случае относительно большие скорости ветра наблюдаются только у западного и восточного побережий моря, а максимальные среднегодовые значения скорости ветра в районе Босфора снижаются до 1,3–1,5 м/с.

В поле ветра в это время центр антициклона смещается на ЮЗ, и он действует над большей частью акватории Черного моря, на его западе и в центре (см. *б* на рис. 3). Циклон, наблюдавшийся в восточной части моря, смещается к Новороссийску и ослабевает. Такая перестройка структуры поля ветра между полупериодами ~60–80-летнего колебания ряда индекса САК формирует противоположные изменения в гидродинамике моря.

Таким образом, согласно выполненным нами исследованиям и данным литературных публикаций, можно сделать следующие выводы:

в спектральной структуре исследованных рядов индекса САК на межгодовых масштабах доминирует несколько групп устойчивых квазипериодических колебаний. Это колебания с периодами, близкими к ~140–150, 60–80, ~40, 20–25 и 7–9 годам. Суммарный вклад этих групп колебаний в общую энергетику ряда индекса САК составляет по предварительной оценке не менее 50–60%;

изменения, происходящие в структуре поля приземного ветра Черного моря по данным ре-анализа NCEP/NCAR, связанные с полупериодами ~60–80-летней составляющей колебаний индекса САК, проявляются в изменении размеров и расположения центров четырех областей повышенных и пониженных значений модуля скорости ветра, формирующих квадрупольную структуру этого поля.

1. *Нестеров Е. С.* Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. – Москва: Триада Лтд, 2013. – 144 с.
2. *Еремеев В. Н., Жуков А. Н., Крашенинникова М. А. и др.* Климатическая изменчивость индекса САК и связанные с ней процессы в верхнем слое Северной Атлантики // Доп. НАН України. – 2012. – № 9. – С. 94–99.
3. *Монин А. С., Сонечкин Д. М.* Колебания климата по данным наблюдений: тройной солнечный и другие циклы. – Москва: Наука, 2005. – 191 с.
4. *Hurrell J. W.* Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation // *Science*. – 1995. – **269**, No 5224. – P. 676–679.
5. *Fernandez I., Hernandez C. N., Pacheco J. M.* Is the North Atlantic Oscillation just a pink noise? // *Phys. A*. – 2003. – **323**. – P. 705–714.
6. *Кляшторин Л. Б., Любушин А. А.* Циклические изменения климата и рыбопродуктивности. – Москва: Изд-во ВНИРО, 2005. – 235 с.
7. *Рыбак Е. А., Рыбак О. О.* О спектральной структуре САК // *Метеорология и гидрология*. – 2005. – № 3. – С. 69–77.
8. *Хэмминг Р. В.* Цифровые фильтры / Пер. с англ. – Москва: Недра, 1987. – 221 с.
9. *Астафьева Н. М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физ. наук*. – 1996. – **166**, № 11. – С. 1145–1170.
10. *Kara A. B., Hurlburt H. E., Wallcraft A. J., Bourassa M. A.* Black Sea mixed layer sensitivity to various wind and thermal forcing products on climatological time scales // *J. Climate*. – 2005. – **18**, No 24. – P. 5266–5293.
11. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al.* The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* – 1996. – **77**. – P. 437–471.
12. *Зацепин А. Г., Кременецкий В. В., Поляков С. Г. и др.* Влияние поля ветра на динамику вод Черного моря // *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря* / Под ред. А. Г. Зацепина, М. В. Флинта. – Москва: Наука, 2002. – С. 91–105.

13. Ефимов В. В., Анисимов А. Е. Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе – численный ре-анализ региональной атмосферной циркуляции // Изв. РАН. ФАО. – 2011. – 47, № 3. – С. 1–13.

Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь
Московский государственный университет
и.м. М. В. Ломоносова

Поступило в редакцию 14.02.2014

Академік НАН України В. М. Єремєєв, О. М. Жуков, О. М. Мельникова,
А. О. Сизов, О. М. Чухарев

Мультимасштабна квазіперіодичність індексу Північноатлантичного коливання та її вплив на структуру поля вітру Чорного моря

Дана оцінка квазіперіодичних властивостей тимчасової мінливості індексу Північноатлантичного коливання на міждесятирічних і міжрічних масштабах. За допомогою методів цифрової фільтрації і вейвлет-аналізу показано існування в цій мінливості групи стійких коливань з періодами, близькими до 140–150, 60–80, ~40, 20–25 і 7–9 років. За даними ре-аналізу NCEP/NCAR показані зміни, що відбуваються в структурі поля приземного вітру Чорного моря відповідно до півперіодів ~60–80-річних коливань.

Academician of the NAS of Ukraine V. N. Eremeev, A. N. Zhukov,
O. N. Melnikova, A. A. Sizov, A. M. Chukraev

Multiscale quasiperiodicity of the NAO index and its influence on the structure of the Black Sea wind field

Quasiperiodic features of the North Atlantic Oscillation temporal variability on interdecadal and interannual scales are assessed. The existence of a group of stable fluctuations with periods close to 140–150, 60–80, ~40, 20–25, and 7–9 years using the time series analysis methods of digital filtration and the wavelet analyses is shown. Based on the NCEP/NCAR re-analysis, the changes in the structure of the Black Sea near-surface wind field occurring in accordance with half-cycles of ~60–80 year fluctuations are shown.