

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

УДК 551.513+551.553.4+519.246.8+551.553.6

Квазипериодичность пространственно-временной изменчивости ветра Черного моря и ее связь с фазами Североатлантического колебания

© 2017 Ю. Н. Горячкин, А. Н. Жуков*, Н. Е. Лебедев, А. А. Сизов

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь
**E-mail: anzucov@mail.ru*

Поступила 28.12.2016 г. После доработки 16.06.2017 г.

Дана оценка квазипериодических свойств пространственно-временной изменчивости модуля скорости ветра (W) Черного моря на межгодовых и междесятилетних масштабах на основе рядов контактных наблюдений длиной 60 – 100 лет восьми береговых станций, а также данных реанализа. Используются массивы *NDP-048*, *NCDC*, *WDC* и реанализы *NCEP/NCAR* за 1948 – 2011 гг., *MERRA* за 1980 – 2015 гг. Посредством вейвлет-анализа показано существование трех групп колебаний стационарных данных W с периодами $T \sim 60 - 90$, $20 - 40$ и $3 - 15$ лет. Для долгопериодных ($T \sim 60 - 90$ лет) колебаний исследованы возможные связи такой квазипериодичности с фазами индекса Североатлантического колебания, который характеризует особенности циркуляции атмосферы. Найдено, что в годы, когда реализуется преимущественно положительная фаза этого индекса, над примыкающими к берегу юго-западным, юго-восточным и восточным участками акватории на 20 – 100 км вглубь моря формируется положительная аномалия W , а над остальной частью акватории – отрицательная. В годы отрицательной фазы индекса практически на тех же участках знаки аномалий W меняются на противоположные.

Ключевые слова: Черное море, модуль скорости ветра, межгодовая изменчивость, квазипериодические свойства, Североатлантическое колебание.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-5-47-55

Введение

Изучение и предсказание изменчивости климата являются одними из важнейших задач наук о Земле, имеющих существенное прикладное значение [1, 2]. Для диагноза и прогноза состояния Черного моря используются параметры ветрового режима, поскольку касательное напряжение ветра непосредственно влияет на волнение моря, циркуляцию и перемешивание вод и опосредованно – на тепловой и водный баланс.

Основные результаты исследований ветра в регионе Черного моря представлены в работах [3, 4]. В них было показано наличие значимых отрицательных линейных трендов рядов среднегодовой скорости ветра и повторяемости штормов в XX в. В работе [4] отмечалось, что с начала 2000-х гг. наметилась тенденция к увеличению повторяемости штормовых ветров практически на всех гидрометеорологических станциях. Однако исследованию цикличности этих процессов почти не уделялось внимания.

Поиск и изучение закономерностей в межгодовой изменчивости ветра и их связей с квазипериодичностью макроциркуляционных процессов в атмосфере разработаны пока недостаточно [5, 6]. Поэтому изучение многолетних тенденций изменения режимных характеристик ветра является одной из наиболее важных практических задач в исследовании изменчивости поля ветра в Черноморском регионе.

В связи с этим целью данной работы является исследование квазипериодических свойств межгодовой и междесятилетней изменчивости модуля скорости ветра в прибрежных районах Черного моря, а также междесятилетней изменчивости его пространственной структуры.

Исходные данные и методы

Объектом исследований выбрана временная изменчивость амплитуд отдельных составляющих колебаний среднегодовых значений модуля скорости ветра (W , м/с) в приземном слое атмосферы в регионе Черного моря, ограниченном координатами $20 - 55^\circ$ в. д. и $30 - 55^\circ$ с. ш. Примененный метод анализа описан в статье [7]. В работе использовались массивы станционных измерений параметров атмосферы *NDP-048* (URL: <http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp048/>), российской части Мирового центра данных (*WDC*) (URL: <http://meteo.ru/mcd/metdata.html>) и Национального центра климатических данных США (*NCDC*) (URL: <http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=temp&layers=1>). Для проверки и коррекции этих массивов были использованы отдельные ряды среднемесячных значений W из архивов МГИ РАН и СоГОИИ.

Анализ станционных данных W проведен на основе их вейвлет-преобразования (ВП) с применением близкого к гармоническим колебаниям комплексного вейвлета Морле вида $\psi(t) = \exp(-t^2/2 + i 2\pi t)$ и нормировкой, позволяющей непосредственно оценивать амплитуды присутствующих в исходном сигнале гармоник [8]. Перед проведением ВП из рядов W были удалены их линейные тренды и постоянные составляющие. Такие ряды обозначены в тексте как W_0 . В целях наглядного представления фаз выявленных в рядах W_0 квазигармонических колебаний представленные ниже на всех рисунках ВП проводились по амплитуде реальной части вейвлета Морле $\text{Re}(\psi(t)) = \exp(-t^2/2)\cos(2\pi t)$. Периоды этих колебаний определялись как точки оси масштаба, соответствующие максимумам их амплитудных вейвлет-спектров S (представляющих собой среднее модулей коэффициентов ВП с данным периодом за все моменты времени), а мгновенные амплитуды колебаний – по разрезам ВП через эти точки вдоль оси времени. По результатам комплексного ВП были построены скелетоны – локальные пики ВП, треки которых наглядно представляют временную эволюцию периодов выявленных квазигармонических составляющих ряда W_0 .

Дополнительными источниками данных по ветру Черного моря были массивы реанализа *NCEP/NCAR* за 1948 – 2011 гг. на сетке $2,5^\circ$ (URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/re-analysis.shtml>) [9] и *MERRA* за 1980 – 2015 гг. на сетке $0,33^\circ$ по долготе и $0,5^\circ$ по широте (URL: http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/MDISC/dataprods/merra_products.shtml) [10].

Анализ полученных результатов

На рис. 1 показаны результаты ВП наиболее длинных (~ 100 лет) рядов W_0 по данным четырех крымских береговых станций (Евпатория, Севастополь, Ялта, Феодосия) с 1915 по 2014 гг., их скелетоны и амплитудные вейвлет-спектры. Они позволили выявить основные квазигармонические колебания с периодами $T \sim 60 - 90, 20 - 40$ и $3 - 15$ лет.

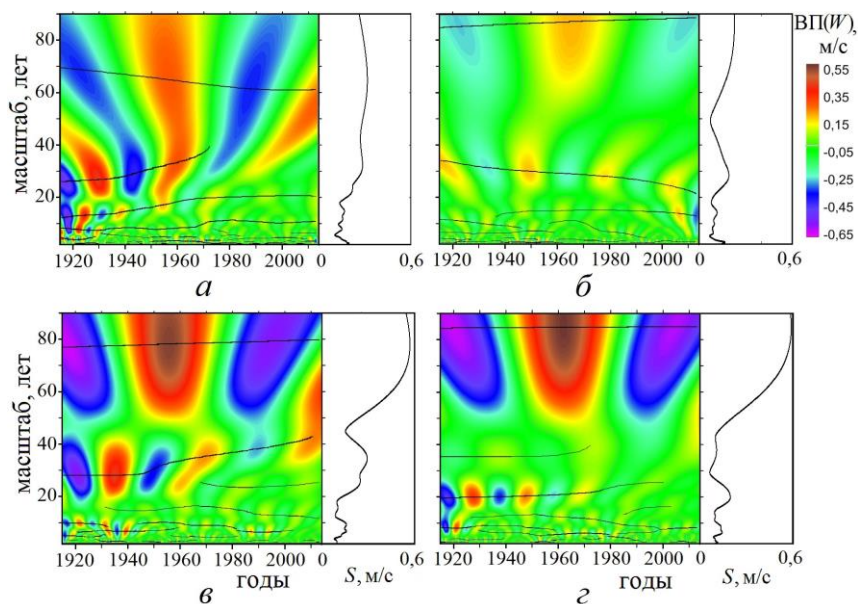


Рис. 1. Картина коэффициентов ВП рядов W_0 с 1915 по 2014 гг. (слева) по данным станций: Евпатория (*a*), Севастополь (*б*), Ялта (*в*) и Феодосия (*з*) в едином масштабе и рассчитанные по ним глобальные спектры (справа)

Таким образом, изменчивость рядов W_0 имеет квазипериодический характер с преобладанием долгопериодных ($T \geq 60$ лет) и среднепериодных ($15 < T < 40$ лет) колебаний. При этом для разных пунктов наблюдений на побережье Крыма низкочастотные составляющие вейвлет-спектров рядов W_0 различаются: в спектре W_0 по данным станции Евпатория доминирует колебание с $T \sim 65$ лет, станции Севастополь ~ 82 года, Ялта ~ 75 лет и Феодосия ~ 85 лет (рис. 2, *a*).

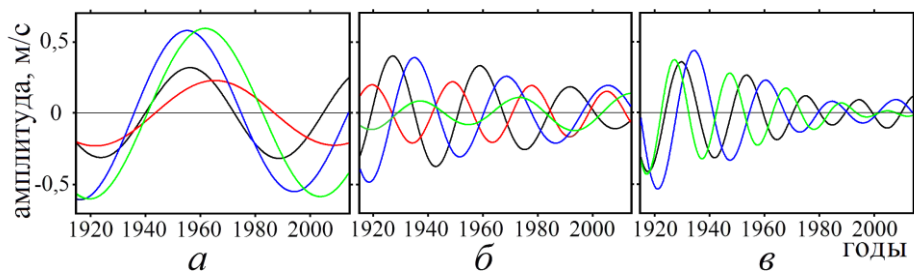


Рис. 2. Составляющие изменчивости рядов W_0 по результатам декомпозиции ВП с периодами $\sim 60 - 100$ (*a*), $\sim 28 - 35$ (*б*) и $\sim 20 - 25$ лет (*в*) станций Евпатория (черные кривые), Севастополь (красные), Ялта (синие) и Феодосия (зеленые)

Свои особенности у составляющих рядов W_0 имеются и на меньших периодах. Так, они более заметны в полосе короткопериодных колебаний ($T < 10 - 15$ лет), при этом на всех станциях у среднепериодных колебаний самые неустойчивые амплитуды (рис. 2, б, в). На этом рисунке видно наличие фазовых сдвигов у колебаний среднего периода между пунктами наблюдений на общем фоне уменьшения их амплитуд в 1,5 – 5 раз. Исключение составляет колебание с $T \sim 28 - 35$ лет (станция Феодосия) – его амплитуда, напротив, за все время наблюдений несколько увеличилась.

Как видно на рис. 1, 2, и по структуре спектров, и по динамике их отдельных составляющих больше всего различаются Евпатория и Феодосия, а наиболее близки Севастополь и Ялта. Вместе с тем имеется частичное сходство между Ялтой и Феодосией. Таким образом, эти особенности пространственной структуры поля ветра на Крымском побережье позволяют разделить его на восточную и западную части примерно по району Ялты.

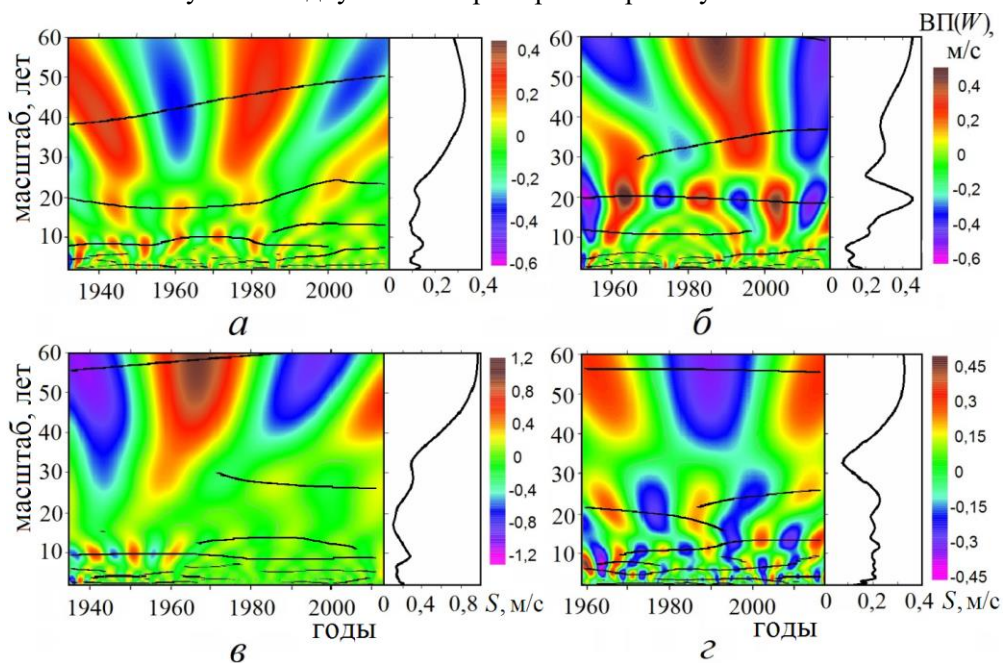


Рис. 3. Вейвлет-преобразования (ВП) рядов W_0 с наложенными скелетонами (слева) и глобальные спектры амплитуд S (справа) по данным станций Одесса (а), Констанца (б), Синоп (в) и Батуми (з)

Ближкие результаты были получены и по более коротким (продолжительностью 57 – 85 лет) рядам W_0 станций, расположенных на северном, западном, восточном и южном берегах моря. Здесь представлены данные по Одессе (1932 – 2016 гг.), Констанце (1952 – 2016 гг.), Синопу (1935 – 2013 гг.) и Батуми (1959 – 2016 гг.) (рис. 3). В спектрах этих рядов W_0 доминируют колебания соответственно с $T \sim 38 - 50, 59 - 70, 56 - 62, 57$ лет. При этом ширина спектральной линии долгопериодного колебания, по данным Одессы, характерна для суперпозиции двух колебаний с периодами 30 – 40 и 60 – 80 лет, но более точные оценки параметров этого колебания возможны для ряда

на несколько десятков лет длиннее. Здесь необходимо отметить, что результаты спектрального (Фурье-, вейвлет-) анализа квазипериодического ряда на отрезке, немногим превышающем период самого низкочастотного колебания, существенно зависят от наличия близкого к нему более высокочастотного колебания и соотношения их периодов, амплитуд и начальных фаз. Данное обстоятельство, значительно ограничивающее точность определения периодов самых низкочастотных составляющих, преодолевается увеличением длины исследуемых рядов.

Спектральный анализ рядов W_0 длиной до 50 лет по данным еще около двух десятков причерноморских станций также показал наличие квазигармонических колебаний с периодами $T \sim 20 - 40$ и $3 - 15$ лет.

Большое число публикаций последних десятилетий посвящено взаимосвязям между планетарными и региональными процессами. Индекс Североатлантического колебания (САК) относится к числу показателей, связанных с понятием глобальных атмосферных осцилляций [11, 12]. Согласно многочисленным исследованиям, САК в значительной степени определяет погоду в большинстве стран Европы в зимний сезон. Это связано с тем, что градиент атмосферного давления между Азорским и Исландским центрами действия атмосферы определяет интенсивность западного переноса в средних широтах [13].

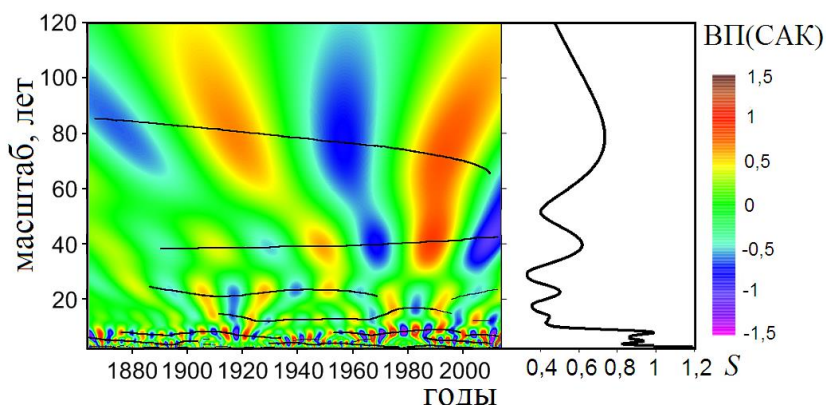


Рис. 4. Вейвлет-преобразование ряда индекса САК с 1864 г. по 2014 г. с наложенным скелетонном (слева) и его глобальный амплитудный спектр (справа)

Поскольку циркуляция атмосферы интенсифицируется в зимний сезон, то чаще используют значения индекса САК, рассчитываемые за декабрь – март. В данной работе в качестве зимних значений индекса САК был взят ряд *Hurrell DJFM North Atlantic Oscillation Index (Station-Based)* за 1864 – 2014 гг. [14]. В картине составляющих ВП индекса САК отчетливо проявляются периодичности разных масштабов и нестационарность процесса (рис. 4). Здесь хорошо заметны колебания с $T \sim 60 - 80, 40, 15 - 25, 2 - 12$ лет. Таким образом, для рядов индекса САК характерны колебания с периодами, близкими к периодам компонент рядов W . Это неудивительно, поскольку циркуляция атмосферы в Атлантико-Европейском секторе, характеризующаяся индексом САК, определяет изменчивость поля ветра в регионе Черного моря. Чтобы

это продемонстрировать, воспользуемся данными реанализа. В осредненной за все время реанализа *NCEP/NCAR* структуре поля ветра можно выделить четыре области повышенных и пониженных значений W , центры которых располагаются крестообразно в регионе Черного моря [15]. Взятые из массивов *NCEP/NCAR* среднегодовые значения W позволили представить в регионе Черного моря пространственную структуру W в десятилетия, соответствующие отрицательной (1955 – 1965 гг.) и положительной (1990 – 2000 гг.) фазам 60 – 80-летнего колебания индекса САК [16].

Пространственная структура W , рассчитанная по этим выборкам, показана на рис. 5, а, б. Как видно, в десятилетие, когда преобладают отрицательные значения индекса САК, скорость ветра в регионе Черного моря выше, чем в десятилетия с преобладанием положительных значений САК. Таким образом, изменения в структуре поля W , связанные с циркуляцией атмосферы, сводятся к изменениям положения центров и размеров областей повышенных и пониженных величин W . В 1955 – 1965 гг. (отрицательная фаза 60 – 80-летнего колебания индекса САК) области повышенных значений W сдвинулись над Черным морем навстречу друг другу, слившись воедино практически над всей акваторией. В 1990–2000 гг. (положительная фаза 60 – 80-летнего колебания индекса САК), напротив, над большей частью моря в его центре и на востоке соединились области пониженных значений W .

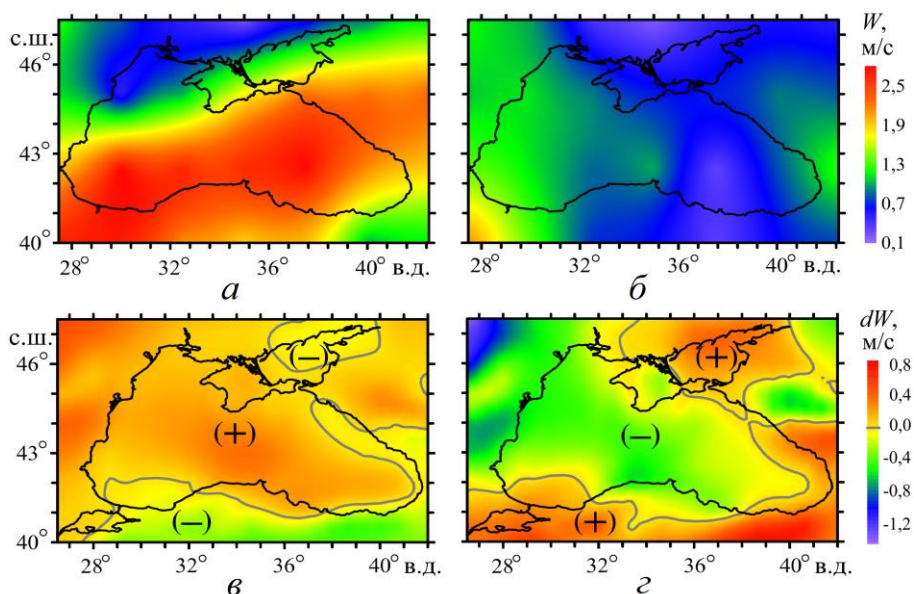


Рис. 5. Среднегодовые поля W Черного моря за десятилетия, соответствующие отрицательной (1955 – 1965 гг.) (а) и положительной (1990 – 2000 гг.) (б) фазам 60 – 80-летнего колебания индекса САК по данным реанализа *NCEP/NCAR*. Поля аномалий W Черного моря по данным реанализа *MERRA* за 1980 – 2015 гг. для совокупности лет, когда индекс САК < -1 (в) и САК > +1 (г)

По массиву *MERRA* на более мелкой сетке были рассчитаны поля аномалий средних за январь – февраль рядов W отдельно для групп лет со значениями индекса САК > +1 и САК < -1. Эти поля продемонстрировали в своей

динамике аномалии разного знака для одних и тех же районов Черного моря (рис. 5, в, з). Из рис. 5 следует, что действие всех групп квазигармонических колебаний W в сочетании с мезомасштабной пространственной неоднородностью поля ветра может приводить к разнонаправленным тенденциям в изменчивости W для разных пунктов наблюдений Черного моря в разные отрезки времени.

Обсуждение

Объяснение полученных результатов может быть следующим. Над регионом Черного моря после 1960-х годов наблюдался рост приземного давления, приведший к возрастанию числа случаев антициклонической циркуляции атмосферы [17, 18]. Такая тенденция привела к отрицательному тренду W . На станциях Евпатория, Севастополь, Ялта, Феодосия, Одесса, Констанца, Синоп, Батуми он составил соответственно (-7,17; -14,5; -2,8; -24,7; -29,1; -35,6; -15,9; -3,7)·10⁻³ м/с за год. Этот процесс не был монотонным, что, по-видимому, связано с межгодовой изменчивостью циркуляции атмосферы, выразившейся в изменении положения траекторий циклонов в Атлантико-Европейском секторе [19]. Квазипериодические особенности этой изменчивости можно представить с помощью фаз индекса САК.

В годы максимальных значений индекса САК скорость приземного ветра над юго-западной и северо-восточной частями Черного моря становится минимальной, а над северо-западной, центральной и юго-восточной – максимальной. В годы минимальных значений индекса САК скорость приземного ветра над восточной и юго-западной частями моря становится максимальной, а над центральной и северо-западной – минимальной (рис. 4, в, з).

Вместе с тем индекс САК представляет собой изменчивость только двух центров действия атмосферы, влияющих на Черноморский регион [3]. Влияние на поле ветра Черного моря, помимо САК, других макроциркуляционных индексов (например, EA , EA/WR , SCA , POL) изучено пока недостаточно. Продолжение исследований в этом направлении будет способствовать лучшему пониманию механизма формирования мезомасштабной структуры регионального поля ветра.

Заключение

1. Анализ рядов модуля скорости ветра W Черного моря по контактными данным показал нестационарность и разнонаправленность пространственно-временной изменчивости поля ветра Черного моря и вместе с тем наличие у нее устойчивых квазипериодических свойств, близких по своим особенностям к аналогичным характеристикам изменчивости индекса САК.

2. Для изменчивости всех этих рядов характерно наличие трех групп колебаний с периодами $T \sim 60 - 90$, $20 - 40$ и $3 - 15$ лет с доминированием долгопериодных ($T \geq 60$ лет) и среднепериодных ($20 \leq T \leq 40$ лет) колебаний.

3. Рассчитанные по массиву реанализа $MERRA$ поля аномалий средних за январь – февраль рядов W отдельно для групп лет со значениями индекса САК $> +1$ и САК < -1 продемонстрировали в своей динамике величины разного знака для одних и тех же районов Черного моря. В годы, когда реализуется преимущественно положительная фаза индекса САК, над примыкающи-

ми к берегу юго-западным, юго-восточным и восточным участками акватории на 20 – 100 км вглубь моря формируется положительная аномалия W , а над остальной частью – отрицательная. В годы отрицательной фазы индекса САК практически на тех же участках знаки аномалий W меняются на противоположные.

Авторы благодарят В.Н. Белокопытова за предоставленные данные станционных измерений.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0011 «Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий» (шифр «Оперативная океанография»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики // Успехи физических наук. – 2000. – 170, № 4. – С. 419 – 445. – doi:10.3367/UFNr.0170.200004d.0419
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме / Под ред. А.В. Фролова. – М.: Росгидромет, 2014. – 58 с. – URL: <http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2015/od2.pdf> (дата обращения: 19.06.2017).
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеиздат, 1991. – 430 с.
4. Горячкин Ю.Н., Репетин Л.Н. Штормовой ветро-волновой режим у Черноморского побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАНУ, 2009. – Вып. 19. – С. 56 – 69.
5. Баянкина Т.М., Сизов А.А., Жуков А.Н. и др. Междесятилетняя изменчивость ветрового режима в регионе Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – № 4. – С. 29 – 36. – doi:10.22449/0233-7584-2015-4-29-36
6. Kara A.B., Hurlburt H.E., Wallcraft A.J. et al. Black Sea mixed layer sensitivity to various wind and thermal forcing products on climatological time scales // J. Clim. – 2005. – 18, No 24. – P. 5266 – 5293. – doi:10.1175/JCLI3573R2.1
7. Булгаков Н.П., Жуков А.Н., Сизов А.А. Исследование общих групп устойчивых ритмов межгодовой изменчивости температуры воздуха и ряда других процессов в прибрежных зонах // Доп. НАН України. – 2004. – № 9. – С. 99 – 104.
8. Вутязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов. – СПб.: изд-во С.-Петербур. ун-та, 2001. – 58 с. – URL: <http://window.edu.ru/resource/987/29987> (дата обращения: 20.06.2017).
9. Kistler R., Collins W., Saha S. et al. The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation // Bull. Amer. Meteorol. Soc. – 2001. – 82, No. 2. – P. 247 – 267. – [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2)
10. Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R. et al. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications // J. Clim. – 2011. – 24, No. 14. – P. 3624 – 3648. – doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1
11. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А. и др. Глобальные атмосферные осцилляции в динамике современного климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – 11, № 1. – С. 62 – 71. – URL: <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=1258> (дата обращения: 20.06.2017).

12. Wanner H., Brönnimann S., Casty C. et al. North Atlantic Oscillation - Concepts And Studies // *Surv. Geophysics*. – 2001. – 22, Iss. 4. – P. 321 – 381. – doi:10.1023/A:1014217317898
13. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. – М.: Триада Лтд, 2013. – 144 с. – URL: <http://method.meteorf.ru/publ/books/nesterov.pdf> (дата обращения: 20.06.2017).
14. Url: https://climatedataguide.ucar.edu/sites/default/files/nao_station_djfm.txt (дата обращения: 20.06.2017).
15. Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Поярково 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. – М.: Наука, 2002. – С. 91 – 105.
16. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Североатлантическое колебание и увлажнение европейской территории России // *Общество. Среда. Развитие*. – 2014. – № 2. – С. 191 – 198. – URL: http://www.terrahumana.ru/arhiv/14_02/14_02_35.pdf (дата обращения: 20.06.2017).
17. Белокопытов В.Н., Кудрявцева Г.Ф., Липченко М.М. Атмосферное давление и ветер над Черным морем (1961 – 1990 гг.) // *Тр. УкрНИГМИ*. – 1998. – Вып. 246. – С. 174 – 181.
18. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – 209 с.
19. Rogers J.C. North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability of northern Europe // *J. Clim.* – 1997. – 10, No. 7. – P. 1635 – 1647. – doi:10.1175/1520-0442(1997)010<1635:NASTVA>2.0.CO;2

Quasi-Periodicity of the Black Sea Wind Spatial-Temporal Variability and Its Relation with the North Atlantic Oscillation phases

Yu. N. Goryachkin, A. N. Zhukov*, N. E. Lebedev, A. A. Sizov

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russian Federation

**e-mail: anzucov@mail.ru*

Quasi-periodic features of the inter-annual and inter-decadal spatial-temporal variability of the wind speed absolute value (W) in the Black Sea area are assessed based on a series of 60 – 100-year-long direct observations performed at eight coastal stations, and also on the re-analysis data obtained from the *NDP-048*, *WDC*, *NCDC*, *NCEP/NCAR* (1948 – 2011) and *MERRA* (1980 – 2015) arrays. Three groups of oscillations with the periods T about 60 – 90, 20 – 40 and 3 – 15 years that present in the direct data W are shown by means of the wavelet analysis. As for long-period oscillations ($T \sim 60 – 90$ years), possible relations of such quasi-periodicity with the phases of the North Atlantic Oscillation index characterizing the atmospheric circulation features are investigated. It is revealed that during the periods when the index positive phase is mainly predominant, the W positive anomaly is formed over the south-western, south-eastern and eastern parts of the sea adjacent to the coast at a distance 20 – 100 km from it, and the W negative anomaly – over the rest of the sea. During the years when the index phase is mainly negative, the signs of the W anomalies over almost the same regions change to the opposite ones.

Keywords: Black Sea, wind speed module, inter-annual variability, quasi-periodicity, North Atlantic Oscillation.