

О НИЗКОЧАСТОТНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОЛЕЙ ВЕТРА И ГЕОСТРОФИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ. ЧАСТЬ 2: МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

А.Б. Полонский^{1,2,3}, А.Н. Серебренников¹

¹ Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

E-mail: apolonsky5@mail.ru; swsily@gmail.com

² Филиал МГУ в г. Севастополе, РФ, г. Севастополь, ул. Героев Севастополя, 7

³ Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

В работе исследуется межгодовая изменчивость поля ветра, геострофических течений и уровня Черного моря на основе спутниковых данных, начиная с 80-х гг. 20-го столетия и по 2017 г. Показано, что в последние 20–30 лет происходит интенсификация атмосферной циркуляции и усиление завихренности поля ветра. Завихренность интенсифицируется как вследствие усиления скорости ветра, так и из-за изменения структуры поля ветра. Геострофические течения на поверхности, рассчитанные по аномалиям уровня моря и стандартным соотношениям геострофической теории, характеризуются максимальной межгодовой изменчивостью в окрестности Основного Черноморского течения в юго-восточной, северо-восточной и северо-западной частях моря. Типичные межгодовые вариации геострофических течений составляют здесь около 7 см/с.

Ключевые слова: межгодовая изменчивость и тренды в полях ветра и геострофических течений Черного моря, тенденции изменения уровня моря

Поступила в редакцию: 28.08.2019. После доработки: 06.09.2019.

Введение. Мониторинг параметров атмосферы и морской среды и прогнозирование их изменений на межгодовых и десятилетних масштабах для акватории Черного моря является актуальной задачей как для фундаментальной науки, так и для многочисленных приложений. Прогноз состояния различных компонентов природной среды на этих масштабах – одна из наиболее приоритетных задач современной геофизической науки. Долгоживущие аномалии характеристик природной среды в Черноморском регионе в значительной степени определяют условия функционирования морских транспортных коридоров, эффективность добычи углеводородного сырья на шельфе, сельскохозяйственный и рекреационный потенциал региона, другие сферы хозяйственной деятельности. Типичная сезонная изменчивость гидрометеорологических полей и циркуляции поверхностных вод Черного моря, на фоне которой формируются аномальные условия, были рассмотрены в первой части работы. В настоящей работе

будет дано описание низкочастотной изменчивости соответствующих региональных параметров и оценены их долгопериодные тренды.

Большинство публикации, посвященные изменению гидрометеорологических и гидрологических параметров Черного моря, выполнены по данным береговых метеорологических станций и точечным экспедиционным измерениям. Приемлемые для исследования всего моря спутниковые данные с разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ по широте и долготе (и лучше) появились с 1980-х гг. Из-за недостатка данных, относящихся к открытой части моря в более ранние периоды, выводы о многолетних тенденциях гидрометеорологических и гидрологических параметров Черного моря (особенно начиная со второй половины 90-х гг. 20-го столетия, когда резко уменьшилось количество экспедиционных данных), сделанные во многих работах, не соответствуют современным представлениям. Если внутригодовые изменения различных региональных характеристик

Черного моря, как правило, подтверждаются современными спутниковыми данными, то данные о межгодовых изменениях и более долгопериодных тенденциях часто не совпадают с результатами, полученными по спутниковым данным последних десятилетий. Например, годовой ход скорости ветра (с максимумом в холодный период и минимумом в теплый), полученный в работе [1], согласуется с результатами первой части нашего исследования [2]. По данным авторов работы [1] в многолетнем ходе величины скорости ветра выделяется значимая тенденция снижения ветровой активности. Вместе с тем, по спутниковым данным, полученным за последние 10–20 лет, наблюдается противоположная тенденция. Аналогичные тенденции обнаруживаются в поле ветра и по данным современных ре-анализов. Так, например, авторы работы [3] исследовали поле ветра в восточной части Чёрного моря за период 1980–2013 гг. по данным ре-анализа NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). По их данным для региона Абхазии (42°–43,5° с.ш.; 40°–42° в.д.) рост среднемесячного значения модуля скорости ветра составил примерно 0.123 м/с за 10 лет. Т.е., по крайней мере в некоторых регионах Черного моря наблюдался рост скорости ветра. Тренды температуры поверхности воды в Черном море, полученные по спутниковым данным и результатам контактных измерений хорошо соответствуют друг другу до второй половины 90-х гг. 20-го столетия, но существенно различаются после этого из-за резкого уменьшения количества прямых температурных наблюдений в море [4]. В настоящей работе рассчитаны и кратко проанализированы межгодовые и трендовые изменения характеристик полей ветра и геострофических течений Черного моря по спутниковым данным, начиная с 80-х гг. 20-го столетия.

Материалы и методы. Описание источников данных и основные методы расчета параметров можно найти в 1-й части работы [2]. Расчеты характеристик межгодовой изменчивости скорости ветра для каждого месяца и общей для всех месяцев за все рассматриваемые годы

производился по следующему алгоритму. Пусть $W_{i,j,k}$ модуль скорости приповерхностного ветра (ПВ) для каждой точки пространства i , каждого месяца j ($j = 1, \dots, m$, где $m=12$) и для каждого года k ($k = 1, \dots, n$, где $n=30$). Среднее значение $AW_{i,j}$ и дисперсия $D_{i,j}$ для точки i и месяца j вычисляются по формулам

$$AW_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n W_{i,j,k} ,$$

$$D_{i,j} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (W_{i,j,k} - AW_{i,j})^2 .$$

Среднеквадратичное отклонение (с.к.о.) $\sigma_{i,j}$ для точки i и месяца j рассчитывается из дисперсии

$$\sigma_{j,i} = \sqrt{D_{i,j}} .$$

Среднее за все месяцы среднеквадратичное отклонения σ_i для точки i рассчитывается как среднее арифметическое для всех месяцев после усреднения дисперсий. Аналогично рассчитывается общее с.к.о. для всех точек пространства (как среднее арифметическое по всем точкам i). Данные привязаны к сетке $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ и получены на основе многочисленных спутниковых наблюдений DOD, NOAA и NASA. Ветер рассчитывался с помощью Remote Sensing Systems, Inc. [5] с использованием процедуры объективного анализа. Аналогично рассчитывались характеристики аномалий скорости геострофических течений на поверхности моря, определяемые по спутниковым наблюдениям уровня и стандартным геострофическим соотношениям на сетке $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

Результаты и их анализ. *Поле ветра и его межгодовая изменчивость.* По данным ре-анализа NCEP-CFSR (U.S. National Centers for Environmental Prediction – Climate Forecast System Reanalysis) и EURO-CORDEX, европейского филиала CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment), модуль среднего ветра в Черном море за период 1992–2007 гг. находился в пределах от 6 м/с до 7 м/с [6]. По данным береговых метеорологических станций наблюдалось снижения ветровой активности во вто-

рой половине XX века. Уменьшение составило 1–2 м/с за 30 лет [7]. По данным региональной климатической модели RCA4 усиление ветра в Черноморском регионе не прогнозируется [8]. Однако, начиная со второй половины 1990 гг. в западной и восточной частях моря, по данным некоторых метеостанций, а также по оценкам интенсивности циркуляции моря наблюдалось усиление ветра [7, 9]. Слабый положительный тренд среднегодовой завихренности поля ветра над Черным морем по данным реанализа NCEP с 1948 г. до 2008 г. отмечен и в работе [10]. Фактически, данные об изменчивости поля ветра за 60 лет, приведенные в этой работе, свидетельствуют о том, что линейный тренд не является хорошей аппроксимацией наблюдаемой изменчивости поля ветра. Во временном ходе характеристик этого поля преобладают низкочастотные квазипериодические компоненты с характерным периодом в несколько десятков

лет. Об этом же свидетельствуют статистические характеристики циклонической активности атмосферы над Черноморским регионом, проанализированные в работе [11]. Наши расчеты также подтверждают сделанные в этих работах выводы.

На рис. 1 показан график межгодовой изменчивости модуля скорости приводного ветра (ПВ), построенный по спутниковым данным за период 1988–2017 гг. Хорошо видно, что положительный (хотя и незначимый) линейный тренд главным образом выделяется за счет данных, полученных за последние 9 лет, т.е., с 2009 г. За весь анализируемый период скорость ПВ выросла на 0,24 м/с. Одной из вероятных причин повышения скорости ПВ над Черным морем в этот период служит аномальное развитие и смещение в пространстве Центров действия атмосферы, включая Сибирский (Азиатский) антициклон [9, 12].

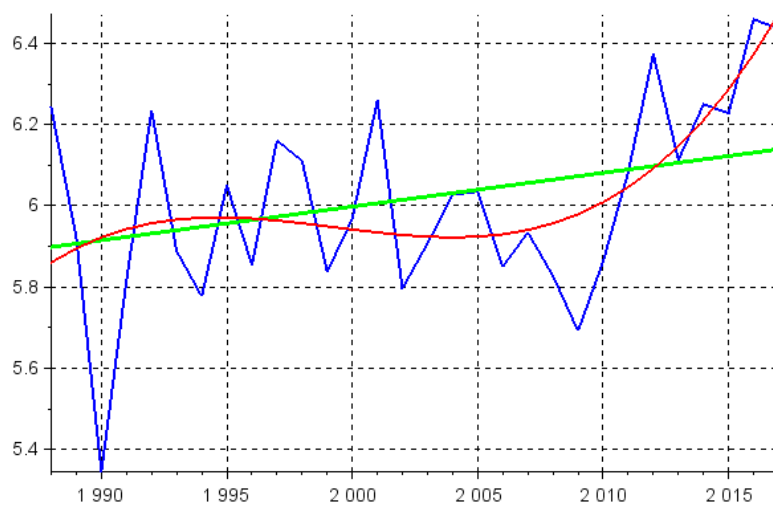


Рис. 1. Межгодовая изменчивость, линейный тренд (зеленая линия) и кубическая аппроксимация (красная кривая) модуля скорости приводного ветра (W , м/с, среднегодовые величины)

Общая для всех месяцев межгодовая изменчивость скорости ветра в терминах с.к.о. представлена на рис. 2. Она максимальна в западной и северо-восточной частях моря. Если не рассматривать ве-

тер в прибрежных точках, в которых он рассчитывается со значительными погрешностям, то отличие в отклонениях между максимальными и минимальными значениями с.к.о. не существенно.

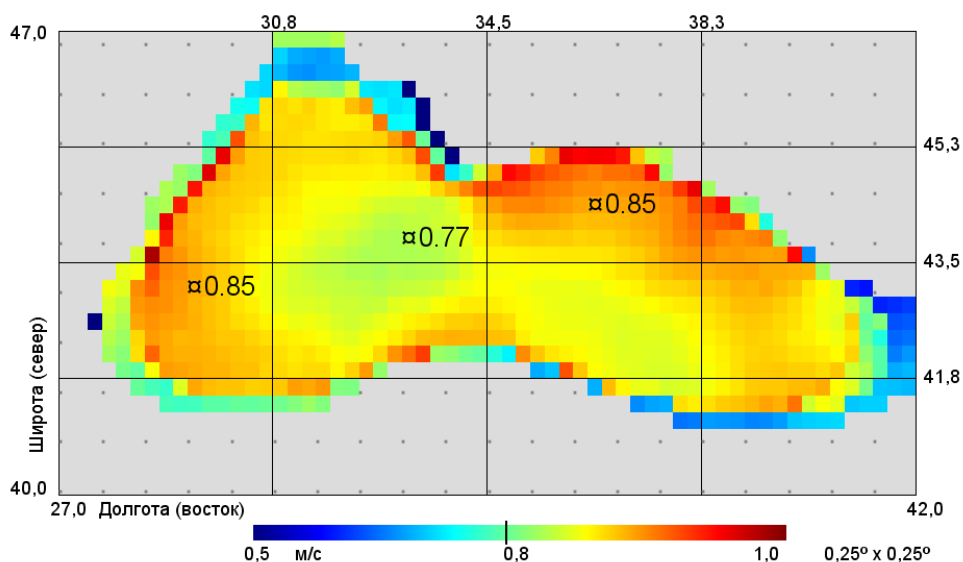


Рис. 2. Осредненное за все месяцы пространственное распределение с.к.о. межгодовой изменчивости скорости ветра (м/с)

Интенсивность и пространственная структура межгодовой изменчивости скорости ветра различна в разные месяцы. Для шести месяцев теплого периода года (с марта по сентябрь) с.к.о. межгодовой изменчивости составляет около 0.7 м/с и его величина равномерно распределена по всему бассейну (рис. 3). В эти месяцы также наблюдаются минимальные средне-климатические значения скорости ПВ (4,5–6,1 м/с). В холодный период года усиливается не только средняя скорость ветра, но ее межгодовые

флюктуации. Для средне-климатического ноября межгодовая изменчивость максимальна на большей части бассейна (рис. 4), величина с.к.о. в этот период года изменяется от 1 до 1,4 м/с. Причем одинаково большие значения с.к.о. отмечаются и в западной, и в восточной частях бассейна. В январе, феврале и декабре величины с.к.о. колеблются в диапазоне 0,9–1,2 м/с, причем максимальные значения с.к.о. наблюдаются в западной части моря (рисунки не приводятся).

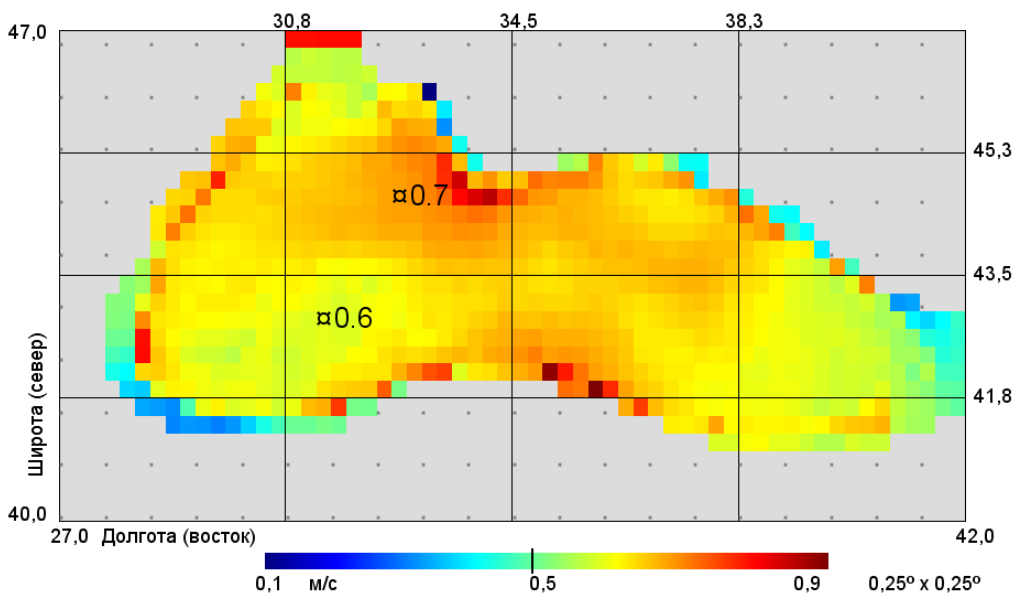


Рис. 3. Пространственное распределение с.к.о. межгодовой изменчивости скорости ветра (м/с) в июне

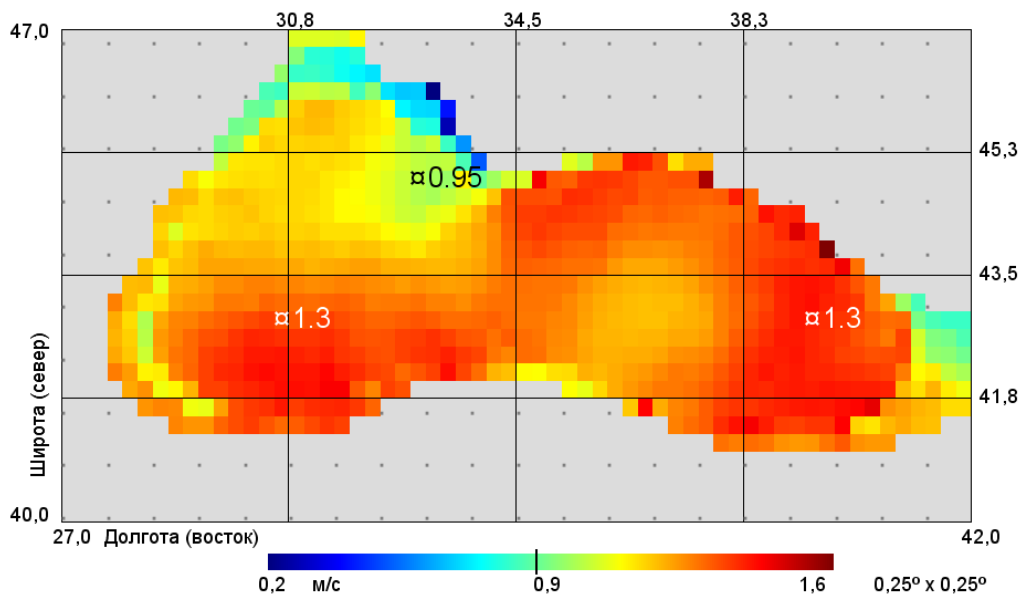


Рис. 4. Пространственное распределение с.к.о. межгодовой изменчивости скорости ветра (м/с) в ноябре

Завихренность поля ветра и ее межгодовая изменчивость. Во второй половине XX века прослеживалась отрицательная тенденция в многолетних колебаниях завихренности касательного напряжения ветра [10, 11]. Такая тенденция в среднегодовых значениях обеспечивалась в основном уменьшением

ротора касательного напряжения ветра ($\text{rot}_z \tau$) в зимний период [13]. В 21 веке тренд вертикальной скорости экмановской накачки (W_{EP}) стал положительным (рис. 5). Значимое усиление вертикальной скорости (рассчитанное по угловому коэффициенту линейного тренда) составило примерно $1,4 \times 10^{-7}$ м/с.

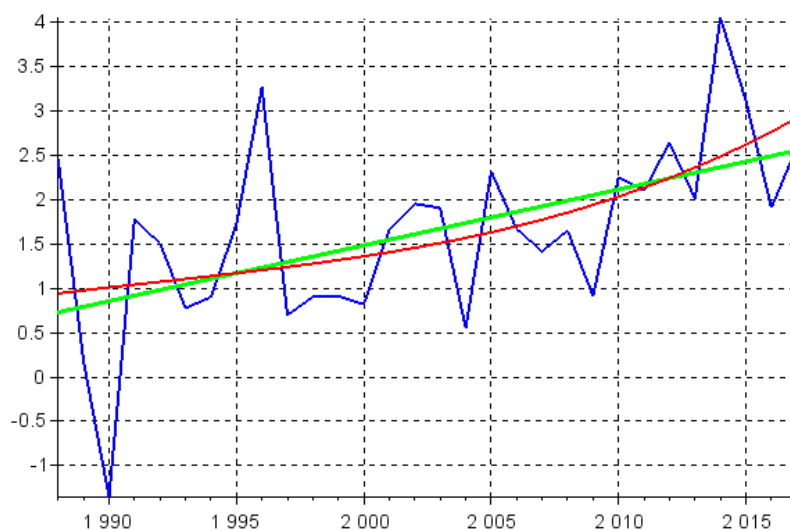


Рис. 5. Межгодовая изменчивость, тренд (зеленая линия) и кубическая аппроксимация (красная кривая) вертикальной скорости экмановской накачки над Черным морем ($W_{EP} \times 10^{-7}$, м/с, $R^2 = 0.251$)

Усиление циклонической завихренности в поле ветра (W_{EP}) обусловлено как изменением структуры этого поля, так и интенсивностью самого ветра. С 2009 года модуль вектора ПВ начал резко усиливаться (рис. 1), но это мало отразилось на значениях W_{EP} (рис. 5). Из последнего рисунка хорошо видно, что завихренность ветра в целом растет, начиная приблизительно с 1990 г.

Межгодовая изменчивость скорости экмановской накачки в разные месяцы отличается как по пространственному распределению, так и по величине. В месяцы с минимальной завихренностью (май – август) с.к.о. в основном находится в диапазоне $(0,1-1,0) \times 10^{-7}$ м/с. В остальные месяцы межгодовая изменчивость завихренности увеличивается и величина с.к.о. в основном лежит в диапазоне $(0,2-1,6) \times 10^{-7}$ м/с.

Межгодовая изменчивость геострофического течения на поверхности моря. На рис. 6 представлена карта средних значений с.к.о. межгодовой изменчивости модулей аномалий геострофических течений на поверхности моря за все месяцы. Межгодовая изменчивость максимальна в восточной части моря (величина с.к.о. около 7 см/с) и в северо-

западной части (около 6 см/с). Значимого тренда межгодовой изменчивости аномалий геострофических течений за исследуемый период выделить не удалось. Этот результат полностью подтверждает выводы авторов работы [10], в которой было показано, что синхронная связь между средней интенсивностью завихренности поля ветра над Черным морем и интенсивностью циркуляции вод не значима. Что касается, отмеченной в этой работе связи пространственной структуры поля ветра и интенсивности циркуляции вод Черного моря, то она будет исследована в другой статье.

Межгодовая изменчивость аномалии уровня моря. На рис. 7 (вверху) показан график межгодовой изменчивости аномалии уровня моря (АУМ) Черноморского бассейна. Положительный незначимый тренд показывает средний подъем уровня моря на 4,88 см. Известно, что повышение уровня моря обычно оказывает разрушительное воздействие на береговую черту. В частности, прибрежная эрозия и вторжение соленой воды представляют собой серьезную угрозу для Черноморских побережий. Таким образом, определение изменений уровня моря в Черном море имеет важное

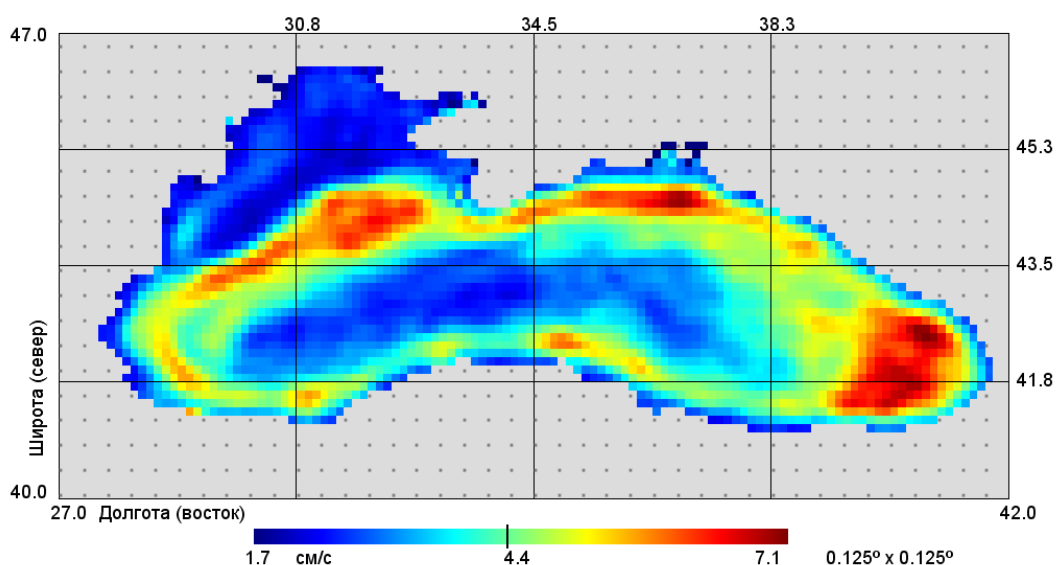


Рис. 6. Среднее за все месяцы пространственное распределение с.к.о. межгодовой изменчивости модулей аномалий геострофических течений (см/с)

значение с точки зрения оценки рисков и планирования хозяйственной деятельности на побережье. Альтиметрические данные, представленные в работе [14], показывают, что уровень Черного моря повышался в среднем на $2,5 \pm 0,5$ мм / год с января 1993 года по май 2017 года. За 25 лет это составило 6,25 см, что несколько выше значений, полученных нами. Разница в оценках обусловлена тем, что мы использовали среднегодовые данные, рассчитанные по полному набору месячных данных. В расчетах, представленных в работе [14], 2017 год оканчивается маем. Поскольку уровень Черного моря подвержен сезонным колебаниям значительной амплитуды, это приводит к существенной погрешности при выделении тренда в среднегодовом уровне.

Скорость подъема уровня, полученная нами, составляет около 2 мм/год, что близко к типичной изменчивости уровня Мирового океана, включая Северную Атлантику (см. нижний график на рис.7). Это соответствует большинству из опубликованных результатов. Так, авторы обзора [15] отмечают, что синхронный и равный по величине тренд уровня по-

верхности воды Черного моря наблюдается в Северной Атлантике. Это доказывает, что основные климатические процессы, определяемые долговременным внешним воздействием атмосферы и определяющие водный баланс Черного моря, имеют единое крупномасштабное происхождение. Пространственное распределение с.к.о. среднегодовых величин АУМ, приведенное на рис. 8, показывает, что межгодовая изменчивость АУМ максимальна в восточной части моря.

Заключение. На основании анализа спутниковых данных для акватории Черного моря с 80-х гг. 20-го столетия и по 2017 год в настоящей работе показано, что в последние 20-30 лет происходит интенсификация атмосферной циркуляции и усиление завихренности поля ветра в регионе. Завихренность интенсифицируется не столько вследствие усиления ветра, сколько из-за изменения структуры поля ветра. Геострофические течения на поверхности, рассчитанные по аномалиям уровня моря и стандартным соотношениям геострофической теории, характеризуются максимальной

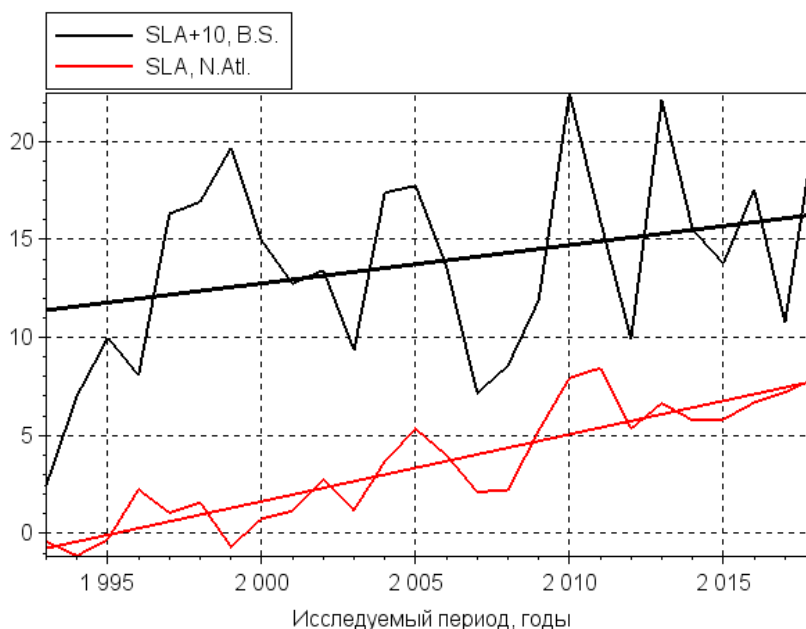


Рис. 7. Межгодовая изменчивость и тренд аномалии уровня моря (см), осредненные для всего Черного моря (черная кривая, смещенная на 10 см вверх) и района Северной Атлантики ($10-15^{\circ}$ с.ш., $40-30^{\circ}$ з.д., красная кривая)

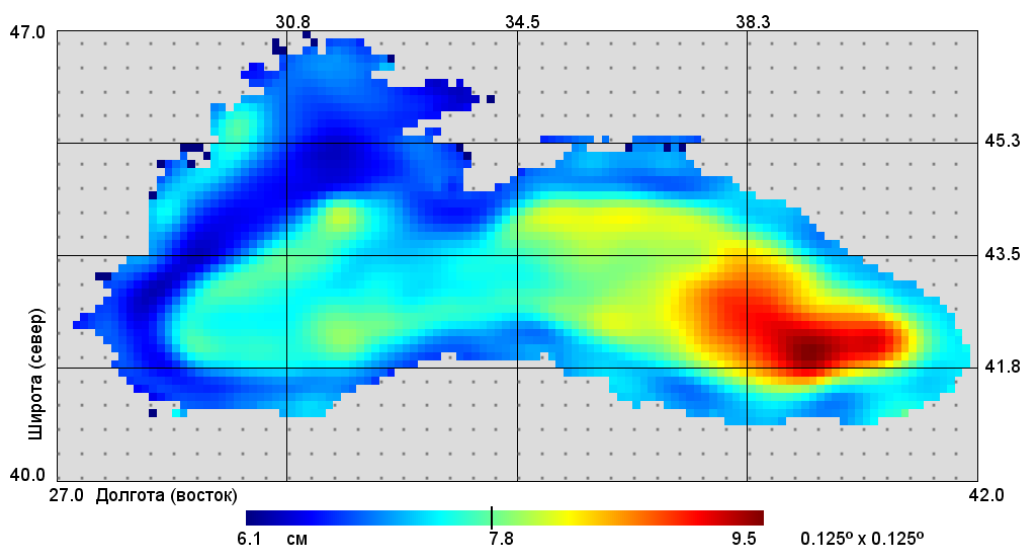


Рис. 8. Среднее за все месяцы пространственное распределение с.к.о. межгодовой изменчивости аномалии уровня моря (см)

межгодовой изменчивостью в окрестности Основного Черноморского течения в юго-восточной, северо-восточной и северо-западной частях моря. Типичные межгодовые вариации геострофических течений составляют здесь около 7 см/с. Долгопериодные тренды в скорости геострофических течений на поверхности моря незначимы. Скорость подъема уровня Черного моря, усредненная за весь период спутниковых наблюдений, составляет около 2 мм/год, т.е. близка к типичной скорости роста уровня в Мировом океане.

Работа выполнена в рамках госзадания (тема № 0012–2019–0002: Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды глобального и регионального масштабов) при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-45-920014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н. Режим ветра над побережьем и шельфом северо-восточной части Черного моря //

Наук. праці УкрНДГМІ, 2008, Вып. 257. С. 84–104.

2. Полонский А.Б., Серебренников А.Н. О низкочастотной изменчивости полей ветра и геострофических течений Черного моря по спутниковым данным. Часть 1: сезонный цикл // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. Вып. 2 (36). 2019. С. 64–72.

3. Климатические изменения модуля скорости ветра в регионе восточного побережья Чёрного моря / Е.А. Костяная, И.В. Серых, А.Г. Костяной [и др.] // Вестник ТвГУ. Серия "География и Геоэкология". 2018. № 3. С. 79–98.

4. Новикова А.М., Полонский А.Б. Междесятилетняя изменчивость температуры поверхности и холодного промежуточного слоя в Черном море // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. № 4 (34), 2018. С. 110–115 DOI: 10.33075/2220-5861-2018-4-110-115.

5. <http://www.remss.com> (дата обращения: 14.09.2019)

6. Rusu L., Raileanu A.B., Onea F. A comparative analysis of the wind and wave climate in the Black Sea along the shipping routes // Water 2018, 10(7), 924; <https://doi.org/10.3390/w10070924>.

7. *Ilyin Y.P.* Observed Long-Term Changes in The Black Sea Physical System and Their Possible Environmental Impacts. Towards a “Mediterraneanization” of the Black Sea? // *Physical and Biological Changes, CIESM Workshop Vol. 39, 3–6 June, 2009, Trobzon, Turkey*. P. 27–43.

8. *Climate* change impacts on wind energy potential in the European domain with a focus on the Black Sea / R. Davy, N. Gnatik, L. Pettersson [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 81, P. 2. 2018. P. 1652–1659 // <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.253>.

9. Южные моря России: потепление климата – причины и следствия: обзор [Электронный ресурс] // Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова. Москва, 2012, 53 с. URL: <http://гоин.рф/index.php/component/jdownload/finish/11/209>.

10. Михайлова Э.Н., Полонский А.Б., Шокурова И.Г. О связи интенсивности циркуляции в Черном море с завихренностью поля ветра // Украинский гидрометеорологический журнал. 2013. № 12. С. 193–203.

11. Полонский А.Б., Воскресенская Е.Н., Бардин М.Ю. Об особенностях циклогенеза в Черноморском регионе. //

Морской гидрофизический журнал. 2007. № 6. С. 47–58.

12. Латышева И.В., Лощенко К.А., Шахаева Е.В. Исследование динамики Азиатского антициклона и холодных циркуляционных периодов на территории Иркутской области // Серия «Науки о Земле». 2011. Т. 4, № 2. С. 161–171.

13. Полонский А.Б., Шокурова И.Г. Многолетняя изменчивость завихренности касательного напряжения трения ветра в Черном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. 2011. Вып. 24. С. 182–189.

14. Avsar N.B., Jin S., Kutoglu S.H. Recent sea level changes in the Black Sea from satellite gravity and altimeter measurements // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-3/W4*. 2018.

15. Kara A.B., Barron C.N., Wallcraft A.J. Interannual Variability of Sea Surface Height over the Black Sea: Relation to Climatic Patterns // *Institute of Marine Sciences, Middle East Technical University, Erdemli, Icel, Turkey*. 2008. DOI: 10.1175/2008EI259.1.

LOW-FREQUENCY CHANGE OF WIND FIELDS AND GEOSTROPHIC FLOWS OF THE BLACK SEA ACCORDING TO SATELLITE MONITORING. PART 2: ANNUAL VARIABILITY

A.B. Polonsky^{1,2,3}, A.N. Serebrennikov¹

¹Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

²Branch of Moscow State University in Sevastopol, RF, Sevastopol, Geroyev Sevastopol St., 7

³Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The work examines the interannual variability of the wind field, geostrophic currents and Black Sea level based on satellite data starting from the 80s of the 20th century to 2017. It has been shown that in the last 20–30 years there has been an intensification of atmospheric circulation and an increase in the vorticity of the wind field. The vorticity is intensified due to both an increase in wind speed and changes in the structure of the wind field. Surface geostrophic currents calculated from sea level anomalies and standard ratios of the geostrophic theory are characterized by maximum interannual variability in the vicinity of the Main Black Sea Rim Current in the southeastern, northeastern, and northwestern parts of the sea. Typical interannual variations in geostrophic currents are represented here at about 7 cm/s.

Keywords: interannual variability and trends in the fields of wind and geostrophic currents of the Black Sea, trends in sea level changes.