


Среднегодовое спектральные характеристики долгопериодных колебаний прибрежного течения у Южного берега Крыма

А. С. Кузнецов , И. К. Иващенко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
 kuznetsov_as@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 30.05.2024; одобрена после рецензирования 09.08.2024;
принята к публикации 20.11.2024.

Аннотация

Цель. Основной целью данного исследования является анализ долгопериодной изменчивости характеристик циркуляции прибрежных вод Черного моря при оценке их энергетического вклада по данным многолетнего контактного мониторинга прибрежных течений.

Методы и результаты. Изменчивость кинетической энергии долгопериодных осцилляций прибрежного течения у Южного берега Крыма анализируется на основе материалов базы океанографических данных Морского гидрофизического института РАН, полученных за период 2002–2023 гг. Особенности структуры долгопериодных осцилляций прибрежных вод исследованы методами статистического и спектрального анализа энергетической изменчивости циркуляции вдольберегового течения в слое 5–20 м за 22-летний период измерений. Во внутрigoдовом диапазоне изменчивости течений статистически достоверно систематизирован энергетический вклад сезонных колебаний на периодах 1,0, 0,5, 0,33 и ~ 0,2 года. По результатам анализа векторно-осредненных данных также выделен спектральный состав долгопериодных колебаний течения на периодах ~ 2,7, 3,6, 5,3, 7,1 года и 11-летних колебаний в пределах 22-летнего цикла изменчивости. Выполнены сопоставления спектрального состава межгодовых осцилляций прибрежного течения и индекса североатлантического колебания. За период фазы интенсификации солнечной активности в 2007–2020 гг. отмечен рост в 1,5 раза значений модуля скорости межгодовых осцилляций прибрежного течения.

Выводы. По результатам анализа многолетних натурных данных у побережья Черного моря выделены и систематизированы долгопериодные колебания прибрежного течения, включая диапазон короткопериодных климатических осцилляций. Показаны перспективы дальнейшего развития исследований связей таких колебаний течения с долгопериодными циркуляционными процессами в атмосфере Черноморского региона.

Ключевые слова: прибрежное течение, долгопериодные колебания, короткопериодные климатические осцилляции, энергетический спектр колебаний, контактные измерения, Южный берег Крыма, Черное море


Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0016 «Исследование пространственно-временной изменчивости океанологических процессов в береговой, прибрежной и шельфовых зонах Черного моря под воздействием природных и антропогенных факторов на основе контактных измерений и математического моделирования».

Для цитирования: Кузнецов А. С., Иващенко И. К. Среднегодовое спектральные характеристики долгопериодных колебаний прибрежного течения у Южного берега Крыма // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 1. С. 36–49. EDN KKOLDF.

© Кузнецов А. С., Иващенко И. К., 2025

Long-Term Average Annual Spectral Characteristics of the Coastal Current Long-Period Oscillations off the Southern Coast of Crimea

A. S. Kuznetsov , I. K. Ivashchenko

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
 kuznetsov_as@mhi-ras.ru

Abstract

Purpose. The main purpose of the study is to analyze the long-term variability of the circulation characteristics of coastal waters in the Black Sea when assessing their energy contribution based on the long-term contact monitoring data on coastal currents.

Methods and Results. The variability of kinetic energy of long-term oscillations of the coastal current off the Southern Coast of Crimea is analyzed based on the materials for 2002–2023 of the oceanographic database of Marine Hydrophysical Institute, RAS. The features of structure of the coastal water long-term oscillations are studied using the methods of statistical and spectral analysis of the energy variability of along-coastal current circulation in the 5–20 m layer over a 22-year measurement period. Within the intra-annual range of current variability, the energy contribution of seasonal oscillations is statistically reliably systematized for the periods 1.0, 0.5, 0.33 and ~0.2 years. The results of analyzing the vector-averaged data made it possible to identify the spectral composition both of long-term current oscillations for the periods ~2.7, 3.6, 5.3, 7.1 years and 11-year oscillations within the 22-year variability cycle. The spectral composition of coastal current interannual oscillations was compared to the North Atlantic Oscillation index. During the period of solar activity intensification in 2007–2020, a 1.5-fold increase in the values of velocity modulus of the coastal current interannual oscillations was noted.

Conclusions. The long-term oscillations of coastal current including a range of short-term climatic oscillations were identified and systematized based on the results of analyzing the long-term field data obtained off the Black Sea coast. The prospects for further investigating the relations between such current oscillations and long-term circulation processes in the atmosphere of the Black Sea region are shown.

Keywords: coastal current, long-term oscillations, short-term climate oscillations, energy spectrum of oscillations, contact measurements, Southern Coast of Crimea, Black Sea

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of theme of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0016 “Study of spatio-temporal variability of oceanographic processes in the coastal and shelf zones of the Black Sea under the influence of natural and anthropogenic factors based on contact measurements and mathematical modeling”.

For citation: Kuznetsov, A.S. and Ivashchenko, I.K., 2025. Long-Term Average Annual Spectral Characteristics of the Coastal Current Long-Period Oscillations off the Southern Coast of Crimea. *Physical Oceanography*, 32 (1), pp. 32-45.

Введение

Знание локальных особенностей динамики прибрежных вод Черного моря в зонах сопряжения с сушей, включая ближнюю акваторию материковой отмели, заливы, бухты и эстуарии, необходимо для обеспечения устойчивого экономического развития приморского региона, сосредоточенного у побережья. В шельфовой зоне Черного моря развитие динамики вод происходит в основном за счет формирования гидродинамических возмущений Основного

Черноморского течения (ОЧТ), в том числе разномасштабных антициклонических и циклонических вихревых структур, включая квазистационарные [1–8]. При этом вдольбереговые течения повсеместно наблюдаются в условиях различных геоморфологических структур суши и рельефа дна прилегающей акватории. Согласно сведениям, систематизированным в лоции Черного моря¹, течения вблизи прямолинейно ориентированных участков берега имеют циклоническую направленность, как и струйное ОЧТ на траверзе прилегающего участка берега.

У сравнительно прямолинейного участка береговой линии м. Кикинеиз Южного берега Крыма (ЮБК), имеющей плавное очертание, где Голубой (Лименский) залив незначительно вдается в сушу, в море на удалении ~ 0,5 км при глубине места 28 м выделены и исследованы режимные характеристики квазистационарного вдольберегового течения и ряд его внутrigодовых колебаний [9, 10]. При этом эллиптические орбитальные движения вод шельфовой зоны [3] трансформируются у берега практически в возвратно-поступательные колебания вдольберегового течения [11].

Как известно [12–17], сезонная изменчивость гидросферы Черного моря трансформирует региональные циркуляционные процессы в атмосфере, включая поле приземного ветра в зоне, подстилающей атмосферу поверхности моря и суши. Приводное напряжение поля ветра и его завихренность существенно влияют на физические процессы в прибрежной зоне моря, что проявляется при формировании разномасштабной изменчивости вдольберегового течения, включая регулярную генерацию пакетов антициклонических инерционных колебаний. Мезомасштабные возмущения циркуляции прибрежных вод, взаимодействуя с интенсивными инерционными колебаниями, формируют режим бимодального распределения повторяемости направлений мономодального течения по всей глубине прибрежной зоны [10, 17]. Такой характер циркуляции и переноса прибрежных вод в западо-юго-западном направлении вдоль м. Кикинеиз наблюдается круглогодично со среднегодовыми скоростями в диапазоне 5,8–9,4 см/с [9].

Целью данной работы являются аналитические исследования долгопериодной изменчивости характеристик циркуляции прибрежных вод Черного моря по данным многолетнего контактного мониторинга прибрежных течений для систематизации структуры долгопериодных колебаний при оценке их энергетического вклада. Новые эмпирические результаты исследования особенностей долгопериодной изменчивости характеристик циркуляции прибрежных вод практически полезны для развития и верификации модельной прогностической системы динамики прибрежных вод на подспутниковых полигонах в Черном море [18], а также системного моделирования морских эколого-экономических процессов прибрежной зоны у ЮБК [19].

Материалы и методы

Исследования энергетических спектральных характеристик долгопериодных осцилляций прибрежных вод выполнены на основе обработки и анализа

¹ Лоция Черного моря / Под ред. М. Н. Лапина. Ленинград : Изд-во Гидрографического управления Военно-Морских сил, 1954. 506 с.

материалов базы океанографических данных Морского гидрофизического института (МГИ) РАН [20], полученных за 22-летний период контактных измерений характеристик поля течений у м. Кикинеиз, ЮБК. Инструментальные измерения изменчивости вертикальной структуры течений выполнены комплексом векторно-осредняющих эйлеровых измерителей, установленных в деятельном слое на гидрологических горизонтах с океанографической платформы Черноморского гидрофизического подспутникового полигона (ЧГПП) МГИ [9–11]. Карта района исследований с батиметрией, положением платформы и расстановкой вертикальной антенны кластера измерителей схематически показана на рис. 1 в работе [11, с. 508]. Измерители регистрируют хронологические последовательности векторно-осредненных пар горизонтальных компонентов течения, вычисленных за временной интервал 5 мин по ежесекундным отсчетам значений ортогональных проекций вектора течения. В работе использованы данные мониторинга течений, полученные за 2002–2023 гг. на стандартных гидрологических горизонтах (далее – горизонтах) 5, 10, 15, 20 м. Из исходных массивов векторных данных, прошедших процедуру контроля качества, сформированы векторно-осредненные среднечасовые и 8035 пар среднесуточных отсчетов для каждого измерительного горизонта. Материалы среднечасовой базы данных представлены в формате *dbf* и зарегистрированы как результат интеллектуальной деятельности МГИ [9, 10]. Объем базы данных за 8035 сут составил 771,4 тыс. пар среднечасовых значений соответствующих компонентов вектора течения.

Долгосрочный натурный эксперимент в условиях открытого моря выполняется при непрерывном контроле качества функционирования отечественных измерительных комплексов. Информационная технология оперативного контроля качества измерений при определенной избыточности полного набора данных комплекса измерителей, установленных со свайного основания стационарной океанографической платформы, позволила исключить вклад сбоев, значимых методических и систематических погрешностей в суммарную погрешность измерений течений. Метрологическое единство многолетнего набора векторных данных, полученных при соблюдении единообразия условий и средств инструментальных измерений течений, после осреднения исходных массивов позволило минимизировать их случайные погрешности до значений чувствительности соответствующих первичных измерительных преобразователей комплексов. При этом суммарная погрешность векторно-осредненных значений модуля скорости не превышает 0,1 см/с, направления течения – 3° [10, 17].

Для спектрального анализа в МГИ ранее разработан программный модуль, который применяется при исследованиях изменчивости энергетических и пространственно-временных характеристик полей ветра, течения, длинноволновых движений и внутреннего волнения ² [9–10, 15–18]. Суть используемой фильтровой (линейной) оценки энергетического спектра изложена в ³. При об-

² Иванов В. А., Янковский А. Е. Длинноволновые движения в Черном море. Киев : Наукова думка, 1992. 110[2] с.

³ Коняев К. В. Спектральный анализ случайных океанологических полей. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1981. 207 с.

работке статистических характеристик вертикального распределения горизонтальных компонент скорости течения использован метод аналитической фильтрации векторных данных [21]. Векторная фильтрация временных рядов использована также для минимизации искажений, возникающих при расчетах спектральных характеристик в присутствии интенсивных разномасштабных колебаний, которые вносят искажения в оценку фактического уровня спектральной плотности энергии в исследуемом диапазоне изменчивости. В работе представлены результаты соответствующих расчетов компонентов и полных энергетических спектров долгопериодных осцилляций векторов течения. При аналитической обработке массивов межгодовых вариаций среднегодовых векторных значений течений, полученных синхронно на горизонтах в слое 5–20 м, также использовалась процедура центрирования среднегодовых значений векторных рядов, т. е. покомпонентное исключение из реализации соответствующих значений вектора математического ожидания, вычисленных за 22-летний период измерений.

Результаты и обсуждение

Результаты исследований режимных характеристик и особенностей долгопериодной изменчивости течения получены на основе статистического и спектрального анализа данных 22-летнего мониторинга течений в слое 5–20 м на ЧГПП МГИ. Новые результаты позволяют аргументированно исследовать распределения спектральной плотности полной (кинетической) энергии колебаний прибрежных вод во внутригодовых и межгодовых вариациях значений характеристик прибрежного течения в слое 5–20 м.

Режимные характеристики прибрежного течения. Значения компонентов вектора математического ожидания скорости течения западо-юго-западных румбов и среднеквадратических отклонений (СКО) рассчитаны за период 2002–2023 гг. В таблице приведены оценки режимных характеристик компонентов вектора скорости течения и соответствующих СКО на измерительных горизонтах 5, 10, 15, 20 м.

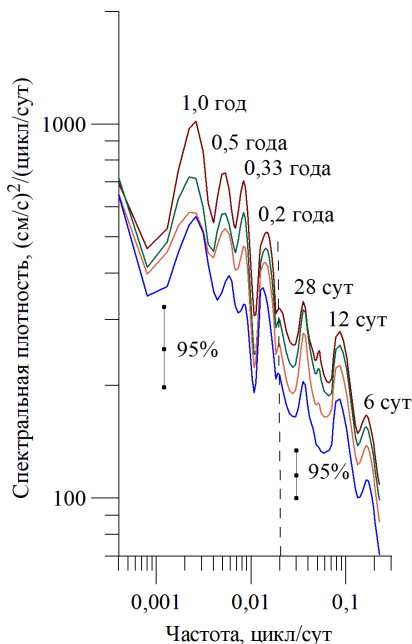
Оценки режимных характеристик прибрежного течения в слое 5–20 м
Estimates of the regime characteristics of coastal current in the 5–20 m layer

Глубина, м / Depth, m	Скорость, см/с / Velocity, cm/s	СКО _V , см/с / RMS _V , cm/s	Направление, ° / Direction, °	СКО _D , ° / RMS _D , °
5	8,1	0,8	254	3
10	8,0	0,8	240	3
15	7,7	0,8	234	3
20	6,9	0,8	217	3

Значения режимных характеристик вдольберегового течения, представленные в таблице, практически совпадают с оценками, полученными ранее в [10]. Возвратно-поступательные колебания течения на каждом измерительном горизонте, аналогично [11], происходят реверсивно вдоль соответствующего генерального западо-юго-западного направления течения. Векторно-осредненное в слое 5–20 м течение за 22-летний период измерений имеет значение модуля скорости 7,5 см/с и направление 237° вдоль прямолинейного

участка береговой линии, ориентированного на запад-юго-запад. Представленные в таблице значения режимных характеристик течения используются при векторном центрировании среднегодовых данных для расчета среднегого-летнего энергетических спектров долгопериодных межгодовых осцилляций.

Спектральные характеристики долгопериодных колебаний прибрежного течения. Сезонные колебания течения на годовом периоде и его годовых гармониках выделены в [9, 17]. Колебания течения на периодах ~ 6 и 12 сут и особенности их сезонной изменчивости рассмотрены в [9, 10, 17].

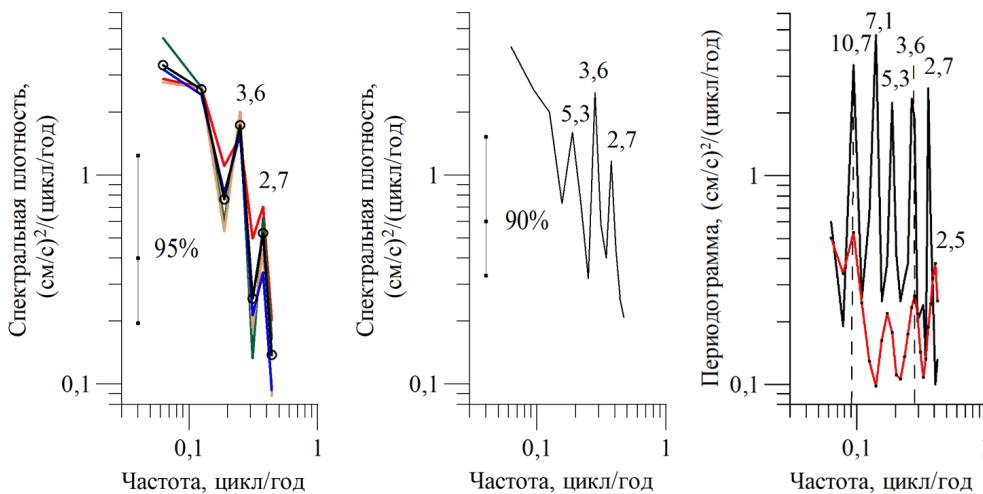


Р и с. 1. Среднего-долгосрочные полные энергетические спектры внутригодовой изменчивости прибрежного течения в диапазоне периодов 4 сут – 6 лет на горизонтах 5, 10, 15, 20 м (красная, зеленая, оранжевая и синяя линии соответственно) за 2002–2023 гг. при 95%-ных доверительных интервалах для диапазонов 4–50 сут и 50 сут – 6 лет (вертикальная штриховая линия соответствует периоду 50 сут)

Fig. 1. Average long-term full energy spectra of the coastal current intra-annual variability in the range of periods 4 days – 6 years at horizons 5, 10, 15, 20 m (red, green, orange and blue lines, respectively) for 2002–2023 at the 95% confidence intervals for the ranges 4–50 days and 50 days – 6 years (vertical dashed line corresponds to the 50-day period)

Результаты проведенной аналитической и спектральной обработки данных наряду с полученными ранее оценками позволили систематизировать и оценить характеристики долгопериодных колебаний прибрежного течения на масштабах внутригодовой и межгодовой изменчивости. На рис. 1 показаны статистически достоверные спектральные максимумы энергии внутригодовых колебаний течения в слое 5–20 м в диапазоне изменчивости 4 сут – 6 лет.

Подобный вид спектра сезонных колебаний уровня поверхности моря ранее был получен при исследовании альтиметрических данных многолетних дистанционных спутниковых зондирований уровня Черного моря, при этом выделены долгопериодные колебания уровня на годовом и полугодовом периоде, обусловленные соответствующими сезонными изменениями тангенциального напряжения трения ветра [22]. В указанной работе также отмечено, что спектральные максимумы колебаний уровня вблизи низших годовых гармоник соответствуют собственной изменчивости циркуляции вод Черного моря. Использование при обработке временных реализаций процедуры аналитической фильтрации позволило статистически достоверно выделить спектральный пик сезонных колебаний на периоде ~ 0,2 года (рис. 1).



Р и с. 2. Среднемноголетние оценки полных энергетических спектров межгодовой изменчивости прибрежного течения в диапазоне периодов 2–16 лет (показаны цифрами у энергетических пиков): *a* – на горизонтах 5, 10, 15, 20 м (красная, зеленая, оранжевая и синяя линии соответственно) и в среднем по слою (черная линия с кружочками) при 95%-ном доверительном интервале; *b* – в слое 5–20 м при 90%-ном доверительном интервале; периодограммы колебаний течения (черная линия) и индекса североатлантического колебания (красная линия) показаны на фрагменте *c*

F i g. 2. Average long-term estimates of full energy spectra of the coastal current inter-annual variability in the range of periods 2–16 years (shown by the numbers at energy peaks): *a* – at horizons 5, 10, 15, 20 m (red, green, orange and blue lines, respectively) and on average over the layer (black line with circles) at the 95% confidence interval; *b* – in the 5–20 m layer at the 90% confidence interval; periodograms of current oscillations (black line) and the North Atlantic Oscillation index (red line) are shown in fragment *c*

Наименее изученным как экспериментально, так и теоретически в настоящее время остается диапазон долгопериодных межгодовых осцилляций течений в Черном море. Развитие таких исследований стало возможным благодаря долгосрочным контактными измерениям течений, которые выполняются в МГИ у ЮБК. Наличие 22-летних массивов репрезентативных данных контактного мониторинга поля течений в прибрежной зоне обеспечило получение новых эмпирических результатов по исследуемой проблеме. На рис. 2, *a* представлены энергетические спектры межгодовой изменчивости прибрежного течения, рассчитанные на каждом измерительном горизонте, где выделяются близкие по интенсивности спектральные пики на периодах $\sim 2,7$ и 3,6 года.

При анализе относительной изменчивости уровней спектральных плотностей (рис. 1; 2, *a*) следует отметить, что различия в их значениях между соседними горизонтами измерений не превышают пределы указанных 95%-ных доверительных интервалов фактически во всем диапазоне изменчивости. Таким образом, спектры, рассчитанные в 15-метровом слое прибрежных вод между горизонтами 5 и 20 м, подобны и статистически однородны, что позволяет использовать всю совокупность данных, полученных в этом слое, для интегральных оценок спектральных характеристик колебаний слоя в целом. Расчет спектра стационарного процесса (рис. 2, *b*) выполнен на основе сформированной

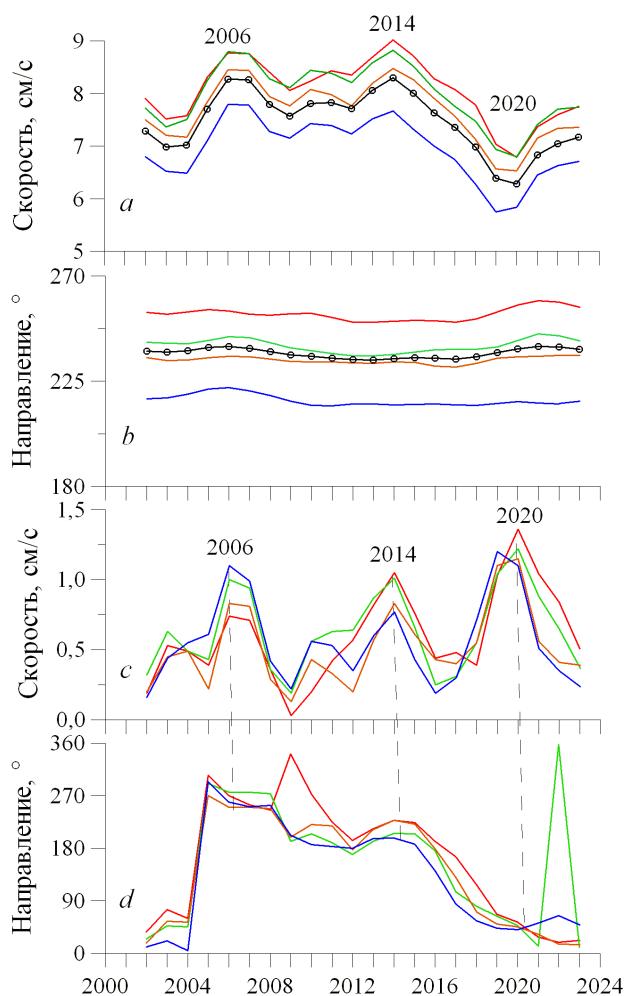
совокупности центрированных векторных данных, полученных в слое. Периодограмма (рис. 2, с, черная линия) рассчитана для определения полного спектрального состава и значений периодов колебаний прибрежного течения, вносящих вклад в исследуемую реализацию. Из оценки спектра следует, что в совокупности векторно-центрированных среднегодовых вариаций, полученных за 2002–2023 гг., наряду с колебаниями прибрежного течения на периодах ~ 2,7, 3,6 и 5,3 года вклад вносят значимые колебания на периодах ~ 7,1 и 10,7 года.

В настоящее время интенсивно развиваются научно-теоретические исследования связей долгопериодных (климатических) осцилляций циркуляционных процессов в атмосфере и гидросфере Мирового океана с фактической изменчивостью солнечной активности [23–25]. В отечественных научных публикациях проблема оценки роли и характеристик долгопериодных вариаций вод океана и атмосферы в формировании изменений климата обсуждается с 1936 г. В работе [26] на основе анализа автоколебаний в системе океан – атмосфера – материк были исследованы причины долгопериодных межгодовых колебаний режима атлантических течений и получена оценка периода исследуемых колебаний, равная ~ 3,5 года. Согласно [27], 5-летняя цикличность выражена в индексе Южного колебания (ЮК) и в данных об изменчивости ветра в тропиках, а на основе статистического и спектрального анализа набора многолетних натуральных данных выделены 4–5-летние колебания зональных температур. В [23] отмечено, что короткопериодные климатические вариации в системе океан – атмосфера с типичными периодами от 2 до 7–8 лет носят глобальный характер и надежно выделяются в различных регионах земного шара по различным типам данных. Межгодовая изменчивость гидрометеорологических полей в Северном полушарии наиболее значимо отражена в дальнедействующих климатических североатлантическом колебании (САК) и ЮК [23–25]. В работе [28] показано, что аналог индекса САК и уровень Черного моря заметно проявляют 22-летнюю цикличность: при межгодовой изменчивости этих характеристик, связанных с особенностями фаз 11-летнего солнечного цикла, возникают заметные отличия в формировании условий циркуляции атмосферы и проявляется устойчивая тенденция в изменчивости интенсивности ОЧТ и пространственной структуры двух макроциклонических круговоротов течений Черного моря.

Выполнены сопоставления спектрального состава короткопериодных климатических колебаний течения прибрежной зоны Черного моря (рис. 2, с, черная линия) и межгодовых осцилляций индекса климатического САК (рис. 2, с, красная линия). На сайте <https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/norm.nao.monthly.b5001.current.ascii.table> доступны данные об изменчивости среднемесячного индекса САК. Из последовательности среднемесячных значений вычислена межгодовая вариация среднегодовых значений индекса САК и рассчитана оценка спектра этих осцилляций. При анализе спектрального состава выделены значимые климатические осцилляции индекса САК с периодами ~ 2,5, 3,6, 5,8, 10,7 года (рис. 2, с, красная линия), которые имеют близкие значения с соответствующими периодами (~ 2,7, 3,6, 5,3 и 10,7 года) колебаний прибрежного течения в Черном море (рис. 2, с, черная линия). Отметим, что, несмотря на

близость сопоставленных значений периодов межгодовых колебаний, в исследуемом диапазоне изменчивости гидрометеорологических полей в осцилляциях индекса САК спектральный пик на периоде ~ 7 лет не выделяется (рис. 2, *c*).

Характеристика составляющих межгодовых колебаний течения. В результате применения процедуры векторного центрирования к 22-летним межгодовым вариациям сглаженных среднегодовых значений модуля скорости (рис. 3, *a*) и направления вектора течения (рис. 3, *b*) были сформированы межгодовые вариации модуля скорости (рис. 3, *c*) и направления (рис. 3, *d*) центрированного вектора течения на горизонтах в слое 5–20 м. Сглаживание выполнено с целью минимизации вклада колебаний вдольберегового течения с периодами менее 3 лет.

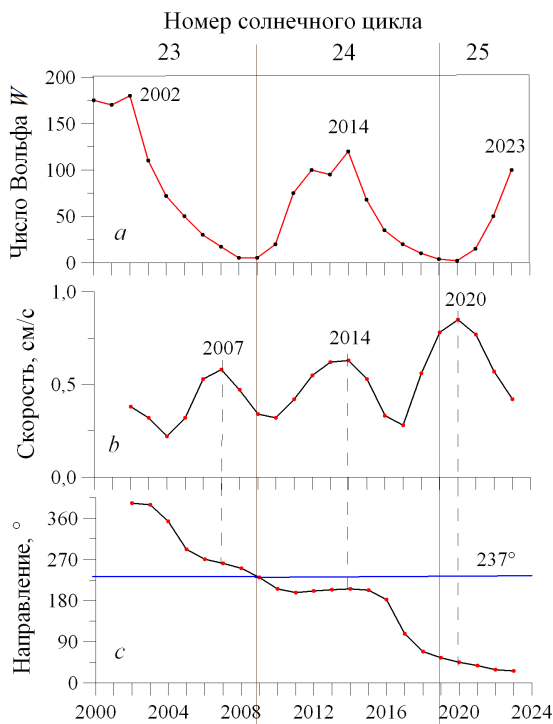


Р и с. 3. Межгодовые вариации сглаженных среднегодовых значений модуля скорости (*a*) и направления (*b*) компонентов исходных векторов течения на горизонтах 5, 10, 15, 20 м (красная, зеленая, оранжевая и синяя линии соответственно) и их векторно-осредненных в слое 5–20 м значений (черные линии с кружочками), а также межгодовая изменчивость компонентов соответствующих центрированных векторов течения – модуля скорости (*c*) и направления (*d*) в слое 5–20 м

F i g. 3. Inter-annual variations of smoothed average annual values of

current module (*a*) and direction (*b*) of the components of initial current vectors at horizons 5, 10, 15, 20 m (red, green, orange and blue lines, respectively) and their vector-averaged (in the 5–20 m layer) values (black lines with circles), as well as inter-annual variability of the components of corresponding centered current vectors: current module (*c*) and direction (*d*) in the 5–20 m layer

Межгодовые осцилляции модулей скорости и направлений центрированных векторов течения на периодах ~ 5 и 7 лет на всех измерительных горизонтах имеют близкие по годам значения. Выполнено векторное осреднение компонентов центрированных векторов течения в слое 5–20 м и вычислены сглаженные оценки их интегральных компонентов (рис. 4, *b*, *c*). Сглаживание выполнено с целью минимизации вклада колебаний течения с периодами 5 лет.

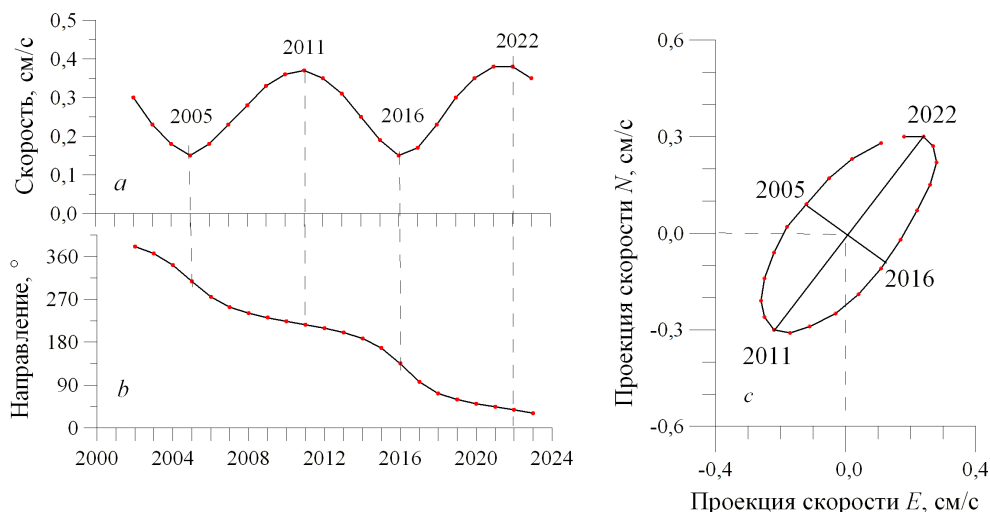


Р и с. 4. Межгодовые вариации сглаженных среднегодового числа Вольфа (*a*), модуля скорости (*b*) и направления (*c*) векторно-осредненного в слое 5–20 м центрированного вектора течения. Вертикальные сплошные линии – границы 24-го стандартного солнечного цикла, синяя горизонтальная линия соответствует западо-юго-западному направлению (237°) стационарного вдольберегового течения

F i g. 4. Inter-annual variations in the smoothed annual average Wolf number (*a*), current module (*b*) and direction (*c*) of the vector-averaged (in the 5–20 m layer) centered current vector. Vertical solid lines are the boundaries of the 24th standard solar cycle, and blue horizontal line corresponds to the west-southwest direction (237°) of the stationary along-coastal current

Данные о межгодовых вариациях среднегодового числа Вольфа доступны на сайте <https://www.side.be/SILSO/ssngraphics>. На рис. 4, *b* в результате сглаживания в явном виде выделены три полных периода 7-летних осцилляций центрированного вектора течения, по временным срокам соответствующих определенным фазам 23, 24, 25-го циклов солнечной активности (рис. 4, *a*). На рис. 4, *c* представлена сглаженная реализация полного циклонического разворота направления осцилляции течения за 22-летний период измерений. При этом в течение 2006–2015 гг. вдольбереговое перемещение вод при 7-летних осцилляциях прибрежного течения происходит практически в фазе, а в 2002–2003 и 2020–2023 гг. – в противофазе генеральному направлению вдольберегового течения (сплошная синяя линия 237°). Таким образом, в составе вдольберегового течения содержится изменяющийся по направлению вклад вектора 7-летних осцилляций, что приводит к периодическим изменениям модуля скорости стационарного течения. В исходных вариациях течения, приведенных на рис. 3, *a*, среднегодовой модуль скорости в 2014 г. достигал максимального значения 9,4 см/с, а в 2020 г. экстремально снижался до 5,8 см/с, что объясняется периодической изменчивостью вклада выявленных долгопериодных колебаний течения. Выделенные долгопериодные осцилляции прибрежных вод

по своим временным масштабам соответствуют короткопериодным климатическим вариациям, активно исследуемым в атмосфере и океане в связи с их особой ролью в формировании изменений климатической системы.



Р и с. 5. Межгодовые вариации сглаженных среднегодовых значений модуля скорости (*a*), направления (*b*) и годографа (*c*), соответствующего 22-летнему циклу циркуляции осредненного в слое 5–20 м центрированного вектора течения при минимизации вклада колебаний с периодами < 7 лет

F i g. 5. Inter-annual variations in the smoothed annual average values of the current module (*a*), direction (*b*) and hodograph (*c*) corresponding to a 22-year circulation cycle of the vector-averaged (in the 5–20 m layer) centered current vector with minimization of the oscillation (with periods < 7 years) contributions

При векторной фильтрации 7-летних осцилляций течения в межгодовых вариациях сглаженных среднегодовых значений модуля скорости (рис. 5, *a*) выделены 11-летние колебания при полном развороте направления на 360° (рис. 5, *b*) центрированного вектора течения по завершении 22-летнего цикла измерений. На рис. 5, *c* показан соответствующий годограф, имеющий форму эллипса при циклоническом вращении среднегодовой скорости центрированного вектора течения. Годограф, построенный в правосторонней ортогональной системе координат, ориентированной на север, демонстрирует практически полный 22-летний цикл вращения вектора скорости течения за период 2002–2023 гг. Осевые линии эллипса на рис. 5, *c* показывают ориентацию вектора течения в 2005, 2011, 2016, 2022 гг. в соответствии с экстремальными значениями колебаний модуля скорости (рис. 5, *a*).

Представленные результаты исследования изменчивости характеристик долгопериодных колебаний течения в прибрежной зоне являются информативным показателем климатической изменчивости системы течений Черного моря. На рис. 4, *a* приведены межгодовые вариации среднегодовых значений числа Вольфа, согласно которым выполненные исследования течений приурочены ко второй половине 23-го (нечетного), первой и второй половинам 24-го

(четного) и первой половине текущего 25-го (нечетного) стандартного 11-летнего солнечного цикла. В [29–31] показана особая роль нечетных и четных солнечных циклов при формировании межгодовой изменчивости гидрометеорологических полей. При этом в [29] отмечено, что наиболее интенсивными, обладающими повышенной солнечной активностью являются временные сроки, включающие вторую половину четных и первую половину нечетных стандартных солнечных циклов. При интенсификации солнечной активности во время второй половины 24-го четного и первой половины 25-го нечетного текущего солнечного цикла (рис. 4, *a*) с 2007 по 2020 г. происходит постепенное увеличение в 1,5 раза значений модуля скорости межгодовых осцилляций течения (рис. 3, *c*; 4, *b*). Предыдущая фаза спада солнечной активности наблюдалась во второй половине 23-го солнечного цикла с 2002 по 2008 г., а очередная фаза спада, согласно [29], наступает во второй половине 25-го цикла после 2023 г.

В [30] отмечено, что долгопериодные осцилляции гидрометеорологических полей возможны при совместном влиянии эффектов солнечной активности с периодами ~ 11 лет и динамики нижележащей атмосферы с периодами ~ 2 –7 лет. Представленные в работе результаты и наличие в МГИ необходимых материалов долгосрочного комплексного мониторинга течений и гидрометеорологических условий позволяют продолжить натурные исследования долгопериодной динамики прибрежных вод и циркуляционных процессов в атмосфере Черноморского региона в диапазоне межгодовой (внутридекадной) и междекадной изменчивости.

Заключение

Одной из приоритетных задач, решаемых Морским гидрофизическим институтом РАН, является исследование особенностей изменчивости характеристик долгопериодных колебаний вод Черного моря вблизи берега как природного фактора, непосредственно влияющего на динамику морских эколого-экономических процессов прибрежной зоны у Южного берега Крыма. Использование верифицированной информационной технологии контактного мониторинга обеспечило метрологическое единство регистрируемых значений характеристик вертикальной структуры горизонтальных компонентов прибрежного течения при предельной точности инструментальных измерений их векторно-осредненных значений. Впервые в практике натурального эксперимента в прибрежной зоне Черного моря выделены, исследованы и систематизированы характеристики долгопериодных (сезонных и межгодовых) колебаний квазистационарного прибрежного течения. Исследованы структура и состав короткопериодных климатических вариаций прибрежного течения, сосредоточенных в диапазоне изменчивости 2,7–7,1 года, а также 11-летние осцилляции течения в пределах 22-летнего цикла изменчивости. При сопоставлении спектрального состава межгодовых колебаний черноморского прибрежного течения и соответствующих осцилляций индекса САК отмечен ряд близких значений периодов сопоставляемых колебаний. Установлено, что одновременно с интенсификацией солнечной активности происходит рост модуля скорости и реверсивное изменение фазы межгодовых колебаний течения в период 2007–2020 гг. Аналитические результаты позволяют продолжить исследования особенностей долгопериодной изменчивости системы прибрежных течений Черного моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с. EDN XPERZR.
2. Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data / G. Korotaev [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003. Vol. 108, iss. C4. 3122. <https://doi.org/10.1029/2002JC001508>
3. *Овчинников И. М., Титов В. Б., Кривошея В. Г.* Новые данные о временной изменчивости течений по результатам многолетних измерений со стабилизированного буя на шельфе Черного моря // *Доклады Академии наук СССР*. 1986. Т. 286, № 5. С. 1250–1254.
4. *Кривошея В. Г., Москаленко Л. В., Титов В. Б.* К вопросу о режиме течений на шельфе северо-кавказского побережья Черного моря // *Океанология*. 2004. Т. 44, № 3. С. 358–363. EDN OWJTDR.
5. *Серебряный А. Н., Лаврова О. Ю.* Антициклонический вихрь на шельфе северо-восточной части Черного моря: совместный анализ космических снимков и данных акустического зондирования толщи моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2008. Т. 5, № 2. С. 206–215. EDN LVLRAK.
6. *Демьяшев С. Г., Евстигнеева Н. А.* Моделирование мезо- и субмезомасштабных особенностей циркуляции у восточного берега Крыма на основе численного расчета // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52, № 5. С. 628–638. EDN WORWMR. <https://doi.org/10.7868/S0002351516050047>
7. О влиянии изменчивости течения в глубоководной зоне Черного моря на динамику вод узкого северокавказского шельфа / А. Г. Зацепин [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 3. С. 16–25. EDN WNAFSL. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-3-16-25>
8. *Белокопытов В. Н., Никольский Н. В.* Устойчивые антициклонические вихри у южного и западного побережья Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2015. № 1. С. 47–53. EDN VHGRAN.
9. *Кузнецов А. С.* Среднегодовалая сезонная изменчивость прибрежного течения у Южного берега Крыма в 2002–2020 годах // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 2. С. 151–164. EDN VKOPIF. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-2-151-164>
10. *Кузнецов А. С., Иващенко И. К.* Особенности формирования вдольбереговой циркуляции вод прибрежного экотона у южного побережья Крыма // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 2. С. 189–204. EDN GNXBSC. <https://doi.org/10.29039/0233-7584-2023-2-189-204>
11. *Иванов В. А., Кузнецов А. С., Морозов А. Н.* Мониторинг циркуляции прибрежных вод у Южного берега Крыма // *Доклады Академии наук*. 2019. Т. 485, № 4. С. 507–510. EDN AOQDNJ. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524854507-510>
12. Вопросы теплового и динамического взаимодействия в системе море-атмосфера-суша Черноморского региона / Л. А. Ковешников [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2001. № 3. С. 9–52. EDN ZCNMDR.
13. *Ефимов В. В., Шокуров М. В., Барабанов В. С.* Физические механизмы возбуждения ветровой циркуляции внутренних морей // *Известия Академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2002. Т. 38, № 2. С. 247–258.
14. *Ефимов В. В., Барабанов В. С., Крупин А. В.* Моделирование мезомасштабных особенностей атмосферной циркуляции в Крымском регионе Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2012. № 1. С. 64–74. EDN TGLDOL.
15. *Иванов В. А., Янковский А. Е.* Локальный динамический эксперимент в шельфовой зоне Южного берега Крыма // *Океанология*. 1993. Т. 33, № 1. С. 49–56.
16. *Кузнецов А. С.* Спектральные характеристики изменчивости ветра в прибрежной зоне Южного берега Крыма в 1997–2006 годах // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2023. № 2. С. 6–20. EDN XYCHJS. <https://doi.org/10.29039/2413-5577-2023-2-6-20>

17. Кузнецов А. С. Особенности межсезонной изменчивости вдольбереговой циркуляции ветра и прибрежного течения у Южного берега Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 31–44. EDN EBWSKZ.
18. Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. 526 с. EDN TZMZJT.
19. Тимченко И. Е., Игумнова Е. М. Управление эколого-экономическими процессами в интегральной модели прибрежной зоны моря // Морской гидрофизический журнал. 2011. № 1. С. 48–66. EDN TMJWST.
20. Information Resources of Marine Hydrophysical Institute, RAS: Current State and Development Prospects / Т. М. Bayankina [et al.] // Processes in GeoMedia – Volume II / Ed. T. Chaplina. Cham : Springer, 2021. P. 187–197. (Springer Geology Series). https://doi.org/10.1007/978-3-030-53521-6_22
21. Озмидов Р. В. Некоторые данные о крупномасштабных характеристиках поля горизонтальных компонент скорости в океане // Известия Академии наук СССР. Серия геофизическая. 1964. № 11. С. 1708–1719.
22. Korotaev G. K., Saenko O. A., Koblinsky C. J. Satellite altimetry observations of the Black Sea level // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2001. Vol. 106, iss. C1. P. 917–933. <https://doi.org/10.1029/2000JC900120>
23. Полонский А. Б. Роль океана в изменениях климата. Киев : Наукова думка, 2008. 182[1] с.
24. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1973. 615 с.
25. The role of the oceans in climate / G. R. Bigg [et al.] // International Journal of Climatology. 2003. Vol. 23, iss. 10. P. 1127–1159. <https://doi.org/10.1002/joc.926>
26. Шулейкин В. В., Еришова Н. Д. Причина периодических колебаний режима атлантических течений // Доклады Академии наук СССР. 1936. Т. I (X), № 5. С. 217–222.
27. Монин А. С., Шишков Ю. А. О пятилетней цикличности глобальной погоды // Доклады Академии наук. 1998. Т. 358, № 3. С. 395–398.
28. Сизов А. А., Белокопытов В. Н. Особенности гидрометеорологических и гидрологических полей Черного моря в фазу спада 11-летнего цикла солнечной активности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2004. № 10. С. 109–118. EDN YMTPET.
29. Cliver E. W., Boriakoff V., Bounar K. H. The 22-year cycle of geomagnetic and solar wind activity // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1996. Vol. 101, iss. A12. P. 27091–27109. <https://doi.org/10.1029/96JA02037>
30. Михалев А. В., Медведева И. В. Солнечные циклы в вариациях атмосферной эмиссии 557,7 нм // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22, № 9. С. 896–900. EDN KUSCTZ.
31. Apostolov E. M., Altadill D., Todorova M. The 22-year cycle in the geomagnetic 27-day recurrences reflecting on the F2-layer ionization // Annales Geophysicae. 2004. Vol. 22, iss. 4. P. 1171–1176. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-1171-2004>

Об авторах:

Кузнецов Александр Сергеевич, ведущий научный сотрудник, заведующий отделом гидрофизики шельфа, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **SPIN-код: 1838-7191**, **ORCID ID: 0000-0002-5690-5349**, **Scopus Author ID: 57198997777**, kuznetsov_as@mhi-ras.ru

Ивашенко Игорь Кондратьевич, старший научный сотрудник, отдел гидрофизики шельфа, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат экономических наук, **SPIN-код: 7626-4616**, journal@mhi-ras.ru