

Научная статья
УДК 551.46
EDN EBWSKZ

Особенности межсезонной изменчивости вдольбереговой циркуляции ветра и прибрежного течения у Южного берега Крыма

А. С. Кузнецов

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
e-mail: kuznetsov_as@mhi-ras.ru*

Аннотация

По результатам анализа средних за десятилетие 2013–2022 гг. статистических и спектральных характеристик мезомасштабной и синоптической изменчивости поля ветра приводного слоя атмосферы и приповерхностного течения выделены закономерности и особенности изменчивости ветра и квазистационарного вдольберегового течения у м. Кикинеиз Южного берега Крыма. Комплексный инструментальный мониторинг выполнен кластерами гидрометеорологических и океанологических измерителей в условиях открытого моря со стационарной океанографической платформы Черноморского гидрофизического подспутникового полигона Морского гидрофизического института РАН. Для количественных оценок значений и выявления тенденций в межсезонной изменчивости характеристик поля ветра и течения использован набор хронологических последовательностей среднечасовых векторно-осредненных данных за полугодия май – октябрь и ноябрь – апрель. В выделенные временные периоды у побережья наблюдались явные сезонные различия в термической структуре и динамике как приповерхностного поля ветра, так и прибрежных вод. На основе материалов инструментального мониторинга исследованы особенности циркуляции прибрежных вод при сезонной изменчивости местных ветровых условий. По результатам спектрального анализа получены оценки энергетического вклада бризовой циркуляции ветра в период сезонной интенсификации мезомасштабной изменчивости вдольберегового течения. В течение всего годового цикла у побережья в море наряду с фоновым крупномасштабным полем ветра выявлены разномасштабные вдольбереговые возвратно-поступательные колебания ветра, ориентированные параллельно хребту Главной гряды Крымских гор. Такие колебания ветра влияют на изменчивость вдольбереговой циркуляции прибрежных вод, что позволяет исследовать условия и особенности формирования бимодального распределения повторяемости направления квазистационарного вдольберегового течения у м. Кикинеиз.

Ключевые слова: Черное море, Южный берег Крыма, прибрежная зона, инструментальный мониторинг, поле местного ветра, вдольбереговое течение, энергетический спектр

© Кузнецов А. С., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

Для цитирования: 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.

Peculiarities of Interseasonal Variability of Alongshore Wind Circulation and Coastal Currents off the Southern Coast of Crimea

A. S. Kuznetsov

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia
e-mail: kuznetsov_as@mhi-ras.ru*

Abstract

The paper analyses decade-average (2013–2022) statistical and spectral characteristics of mesoscale and synoptic variability of the wind field for the atmosphere surface layer and the surface current to reveal regularities and peculiarities of the wind variability and quasi-stationary alongshore current near Cape Kikineiz of the Southern Coast of Crimea. Complex instrumental monitoring was carried out under open sea conditions using clusters of hydrometeorological and oceanological meters at the stationary oceanographic platform of the Black Sea hydrophysical sub-satellite testing area of Marine Hydrophysical Institute of RAS. The author used a dataset of chronological sequences of mean-hourly vector-averaged data for May–October and November–April half-year periods to quantify the values and identify trends in the interseasonal variability of wind and current field characteristics. During the selected time periods, clear seasonal differences in the thermal structure and dynamics of both the surface wind field and coastal waters were observed near the coast. Based on instrumental monitoring materials, peculiarities of coastal water circulation under seasonal variability of local wind conditions were studied. The spectral analysis results estimate the energy contribution of breeze wind circulation to the seasonal intensification of the mesoscale variability of the alongshore current. During the entire annual cycle, multiscale alongshore reciprocating wind fluctuations, parallel to the Main Ridge of the Crimean Mountains, were detected at the seacoast apart from the background large-scale wind field. Such wind fluctuations influence the variability of the coastal-waters alongshore circulation, which allows studying the conditions and peculiarities of the bimodal distribution formation of the direction recurrence of the quasi-stationary alongshore current near Cape Kikineiz.

Keywords: Black Sea, Southern Coast of Crimea, coastal zone, instrumental monitoring, local wind field, alongshore current, energy spectrum

Acknowledgements: The work was performed under state assignment of Marine Hydrophysical Institute of RAS on topic FNNN-2021-0005 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems”.

For citation: Kuznetsov, A.S., 2024. Peculiarities of Interseasonal Variability of Alongshore Wind Circulation and Coastal Currents off the Southern Coast of Crimea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 31–44.

Введение

Исследования причин интенсивной изменчивости течений у побережья Крыма обусловлены необходимостью надежного навигационного обеспечения морских перевозок, а также добычи и воспроизводства ресурсов в прибрежной зоне Черного моря. На территории Южного берега Крыма (ЮБК) интенсивно развивается сфера рекреационных услуг, строятся жилищные и хозяйственные комплексы, а в зоне сопряжения суши и моря сформирована сеть портовых, гидротехнических и очистных сооружений с канализационными коллекторами придонного сброса промышленно-сточных вод с суши в прибрежную зону моря.

В такой ситуации сохранность состояния природной экосистемы ЮБК зависит от сбалансированного потребления и воспроизводства природных ресурсов при ограничении поступления загрязнений в море в ходе утилизации отходов. Существование и устойчивое экономическое развитие такой социальной эколого-экономической системы возможно только при рациональном управлении природоохранной деятельностью и оперативном контроле качества морской среды [1].

Естественным фактором, неизменно минимизирующим последствия техногенных и антропогенных нагрузок на морскую среду, является специфическая структура переноса прибрежных вод и загрязнений у побережья Крыма. Многолетний инструментальный мониторинг динамики прибрежных вод, выполняемый Морским гидрофизическим институтом (МГИ) на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне (ЧГПП) у м. Кикинеиз (ЮБК), позволяет достоверно оценить влияние изменений природно-климатических и антропогенных факторов на состояние прибрежной экосистемы.

Целью работы является получение новых научных знаний об особенностях межсезонной изменчивости вдольбереговой циркуляции ветра и прибрежного течения по результатам статистического и спектрального анализа данных инструментального мониторинга за 2013–2022 гг.

Материалы и методы исследования

На ЧГПП МГИ в п. Кацивели, расположенном у м. Кикинеиз, с 1929 г. функционирует и постоянно совершенствуется система гидрометеорологических и океанографических наблюдений [2]. Инструментальный мониторинг характеристик прибрежной акватории выполняется гидрометеорологическими и океанологическими измерителями с океанографической платформы, расположенной в открытом море на удалении ~ 500 м от берега.

Для исследований характеристик поля ветра используются данные автоматизированных гидрометеорологических комплексов с первичными измерительными преобразователями анеморумбометра М-63 и ИПВ-М в составе комплекса МГИ-6503 [2], ДВМ в составе комплекса КСГД [3], которые установлены компактно на высоте 18 м над уровнем моря на сигнальной мачте океанографической платформы. Комплексы работают в ежесекундном режиме измерений при паспортной чувствительности измерительного канала модуля скорости ветра не более 0.1 м/с и канала направления ветра не более 3°. За период мониторинга 2013–2022 гг. сформирован векторно-осредненный ряд из 87 648 пар среднечасовых отсчетов компонентов вектора.

Для исследования циркуляции прибрежных вод используются данные измерителей течений МГИ-1308 [2, 4] на гидрологических горизонтах от приповерхностного до придонного слоя при глубине места ~ 28 м. Измерители регистрируют векторно-осредненные за временной интервал 5 мин ежесекундные отсчеты скорости и направления вектора течения при паспортной чувствительности измерительного канала модуля скорости, равной 0.1 см/с, и канала направления течения 3°. Для каждого измерительного горизонта 5, 10, 15, 20 м за указанный 10-летний период сформированы базовые векторно-осредненные ряды из 87 648 пар среднечасовых отсчетов компонентов вектора течения.

Первичные измерительные преобразователи комплексов в установленном порядке проходят метрологическую аттестацию в службе метрологии и стандартизации МГИ. Дальнейший оперативный технологический контроль качества измерений обеспечивает соблюдение метрологического единства при долгосрочных измерениях характеристик прибрежных течений и ветра, что позволяет исключить вклад сбойных значений и существенных методических погрешностей измерений. Дальнейшее осреднение результатов обработки позволяет повысить точность статистически осредненных значений как течения, так и ветра до уровня предельных случайных погрешностей, ограниченных разрешающей способностью (паспортной чувствительностью) соответствующих первичных измерительных преобразователей комплексов.

Используемая в работе совокупность систематизированных за 2013–2022 гг. материалов обладает научной новизной, что подтверждено свидетельствами о государственной регистрации^{1), 2), 3)}. При статистическом и спектральном анализе использованы материалы баз векторных данных синхронного мониторинга прибрежного течения и ветра придонного слоя атмосферы. На основании полученных количественных оценок исследованы интенсивность и пространственно-временные особенности динамики вод и ветра у ЮБК. Спектральный анализ изменчивости энергетической интенсивности колебаний течения и ветра выполнен в рамках линейной оценки спектра через сглаживание периодограмм по программе обработки, разработанной МГИ на основе работы⁴⁾ и использованной в работах [4–6].

¹⁾ База данных мониторинга динамики прибрежных течений Черного моря у Южного берега Крыма за 2008–2015 гг. по измерениям на стационарной океанографической платформе у мыса Кикинеиз / А. С. Кузнецов, В. В. Зима ; ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН». Электрон. дан. Москва, 2019. № гос. регистрации 2019620377.

²⁾ База данных мониторинга поля течений прибрежной зоны Черного моря у Южного берега Крыма за 2016–2019 гг. / А. С. Кузнецов, В. В. Зима ; ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН». Электрон. дан. Москва, 2020. № гос. регистрации 2020621445.

³⁾ База данных мониторинга характеристик ветра акватории прибрежного экотона Черного моря у мыса Кикинеиз Южного берега Крыма за 2013–2022 гг. / А. С. Кузнецов, А. В. Гармашов, В. В. Зима ; ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН». Электрон. дан. Москва, 2023. № гос. регистрации 2023622482.

⁴⁾ *Коняев К. В.* Спектральный анализ случайных океанологических полей. Ленинград : Гидрометеоздат, 1981. 207 с.

Результаты и обсуждение

В рамках мониторинга оценка вклада прибрежной циркуляции ветра в формирование особенностей межсезонной изменчивости вдольберегового течения является актуальной проблемой. Согласно [4], в прибрежной зоне у м. Кикинеиз достоверно выражено квазистационарное вдольбереговое течение и исследованы основные режимы его изменчивости. Как отмечено в работе [7], пространственные особенности динамики вод у побережья обусловлены конфигурацией береговой линии и рельефом дна. В работе [4] представлены результаты исследований ориентации главной оси трансформированных у побережья волно-вихревых эллиптических орбитальных движений вод. В общем направления таких возвратно-поступательных колебаний ориентированы вдоль направления течения, которое на конкретном измерительном горизонте ориентировано вдоль соответствующей изобаты рельефа дна [8]. В приповерхностном слое моря на горизонте 5 м средняя за 2013–2022 гг. скорость вдольберегового квазистационарного течения равна 7.9 см/с при западо-юго-западном направлении (253°), а в придонном слое на горизонте 20 м она составляет 6.7 см/с при направлении 215° . На рис. 1 представлены средние за 2013–2022 гг.

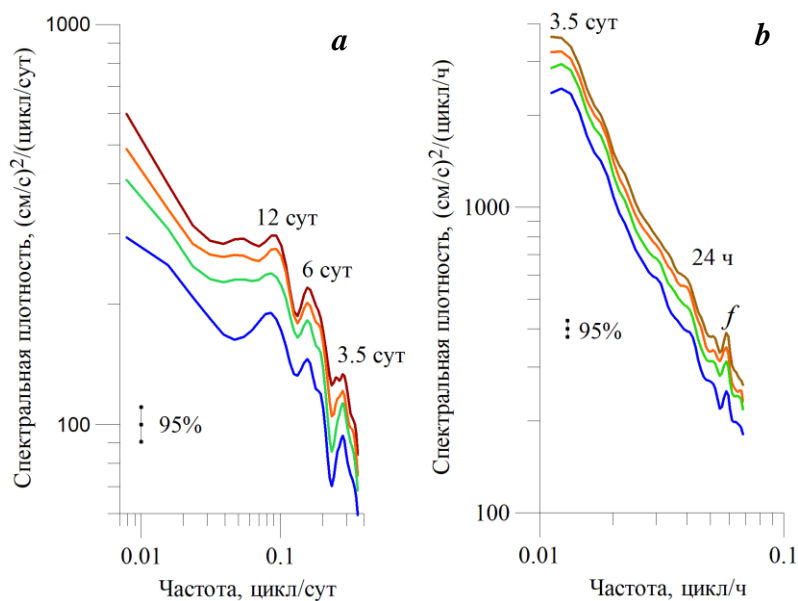


Рис. 1. Полные энергетические спектры колебаний прибрежного течения у ЮБК на гидрологических горизонтах 5, 10, 15, 20 м (коричневая, оранжевая, зеленая, синяя линии соответственно) при 95%-ном доверительном интервале в диапазоне периодов: *a* – 3–128 сут; *b* – 14–96 ч; *f* – локальная инерционная частота

Fig. 1. Full energy spectra of coastal current fluctuations near the Southern Coast of Crimea at 5, 10, 15, 20 m hydrological horizons (brown, orange, green, blue lines, respectively) at 95% confidence interval in the range of periods: *a* – 3–128 days; *b* – 14–96 h; *f* is local inertial frequency

энергетические спектры колебаний прибрежного течения на гидрологических горизонтах для диапазона периодов 3–128 сут (рис. 1, *a*) и 14–96 ч (рис. 1, *b*), подобные результатам, полученным ранее [4, 5].

В работе [7] отмечено, что изменчивость ветровых условий у ЮБК вызывает оперативную перестройку структуры прибрежного течения. Далее рассмотрены результаты анализа режима и изменчивости ветровых условий, полученные по материалам инструментального мониторинга за 2013–2022 гг., необходимые для дальнейшего обсуждения.

Особенности среднемноголетней изменчивости ветра. Суммарное поле ветра Черноморского региона формируется в результате вклада фонового ветра и суперпозиции местных ветров термического и орографического происхождения, которые являются существенным фактором в формировании поля ветра приповерхностного слоя атмосферы [7, 9, 10]. Данные настоящего инструментального мониторинга позволили достоверно выделить и уточнить спектральный состав колебаний поля ветра у ЮБК. На рис. 2 представлены средние за 2013–2022 гг. энергетические спектры изменчивости ветра приповерхностного слоя атмосферы в диапазоне периодов 3–128 сут (рис. 2, *a*), 6–96 ч (рис. 2, *b*) и 14–96 ч (рис. 2, *c*).

На рис. 2, *a* представлен энергетический спектр колебаний ветра в диапазоне мезомасштабной и синоптической изменчивости, где достоверно выделены спектральные пики на периодах около 4 и 6 сут, а также выражена интенсификация синоптических колебаний ветра на периодах 8, 13 и 21 сут.

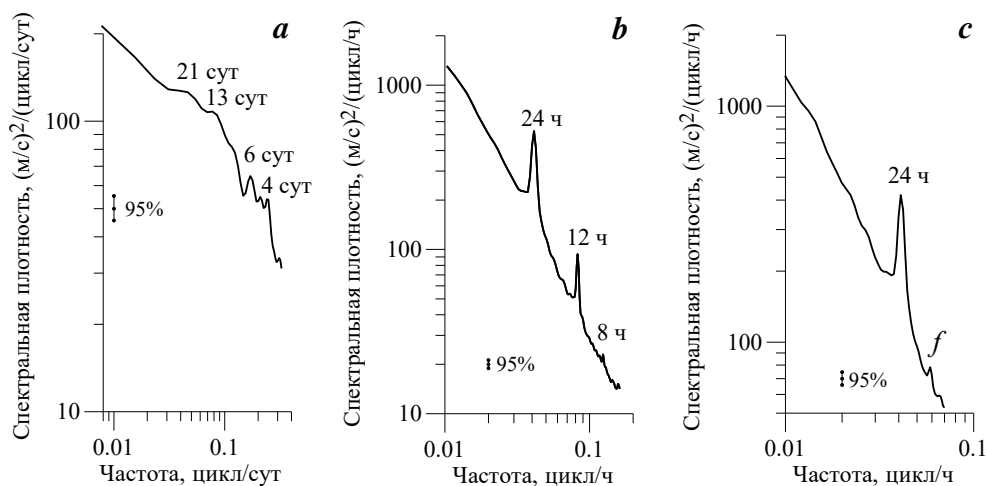


Рис. 2. Полный энергетический спектр изменчивости ветра приповерхностного слоя атмосферы в зоне прибрежного экотона моря у ЮБК при 95%-ном доверительном интервале в диапазоне периодов: *a* – 3–128 сут; *b* – 6–96 ч, *c* – 14–96 ч; *f* – локальная инерционная частота

Fig. 2. Full energy spectrum of wind variability in the atmosphere surface layer in the coastal marine ecotone zone near the Southern Coast of Crimea at 95% confidence interval in the range of periods: *a* – 3–128 days; *b* – 6–96 h; *c* – 14–96 h; *f* is local inertial frequency

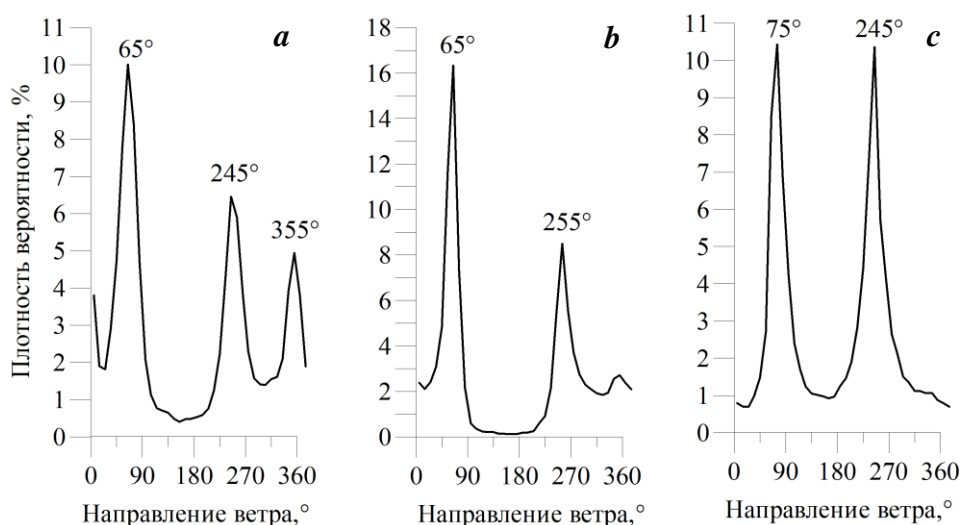
В работе [9] отмечено, что при обтекании ветром горного рельефа, окружающего Черное море, орографический эффект должен заключаться в генерации стационарных инерционно-гравитационных волн, захваченных поверхностью. По известным результатам численного моделирования [10–12] и анализа данных натурных исследований [6], местные бризы и ветры склонов гор имеют выраженную суточную периодичность. Энергетический спектр колебаний ветра на рис. 2, *b* содержит спектральные максимумы колебаний ветра на периодах около 8, 12 и 24 ч.

С целью выделения инерционных колебаний ветра в присутствии интенсивных внутрисуточных колебаний из исходной реализации методом цифровой фильтрации удален вклад гравитационных колебаний с периодами менее 14 ч. На рис. 2, *c* представлен энергетический спектр колебаний ветра, рассчитанный в диапазоне периодов 14–96 ч, где достоверно выявлен спектральный пик колебаний ветра с периодом ~ 17 ч (локальная инерционная частота).

Особенности пространственной ориентации поля ветра. Согласно полученным результатам, в приводном слое атмосферы выявлены особенности пространственной ориентации основных составляющих суммарного поля ветра в регионе. На рис. 3, *a* представлена эмпирическая функция плотности вероятности распределения направлений поля ветра, вычисленная в угловых сегментах $\pm 5^\circ$, за 2013–2022 гг. Выделены три главных направления перемещения воздушных масс приводного слоя атмосферы у м. Кикинеиз. Ветры вдольбереговых востоко-северо-восточных ($\sim 65^\circ$) и западо-юго-западных ($\sim 245^\circ$) румбов почти коллинеарны и параллельны ориентации хребта Главной гряды Крымских гор в регионе, а ветер северных ($\sim 355^\circ$) румбов направлен вниз по склону к морю по нормали к горному хребту.

При определенных природных условиях у ЮБК и возмущениях, вносимых Крымскими горами в поля скорости фонового ветра, периодически могут формироваться вдольбереговые потоки воздуха, и создается зона мезомасштабных колебаний скорости ветра [12].

На рис. 3, *b* представлена эмпирическая функция плотности вероятности направлений ветра, рассчитанная после удаления из исходной реализации методом цифровой фильтрации вклада инерционно-гравитационной и суточной изменчивости ветра. После фильтрации сохраняются вдольбереговые направления реверсивного перемещения воздушных масс параллельно ориентации горного хребта, но при этом кардинально трансформирован вклад ветра северных румбов. На рис. 3, *c* представлена эмпирическая функция плотности вероятности направлений ветра, рассчитанная после удаления из исходных реализаций вклада инерционно-гравитационных, суточных колебаний и крупномасштабного фонового ветра. Фоновый ветер северо-северо-восточных румбов ($\sim 25^\circ$) при значении модуля скорости 1.5–1.6 м/с рассчитан за 10-летний период мониторинга. По завершении обработки достоверно выделен вклад колебаний ветра вдольбереговых румбов, а ветер северных румбов самостоятельно не выделяется (рис. 3, *c*). В результате установлено, что в приводном слое атмосферы на удалении ~ 500 м от берега ежегодно доминируют вдольбереговые колебания прибрежного ветра различных временных масштабов в присутствии вклада местного и регионального фонового ветра.

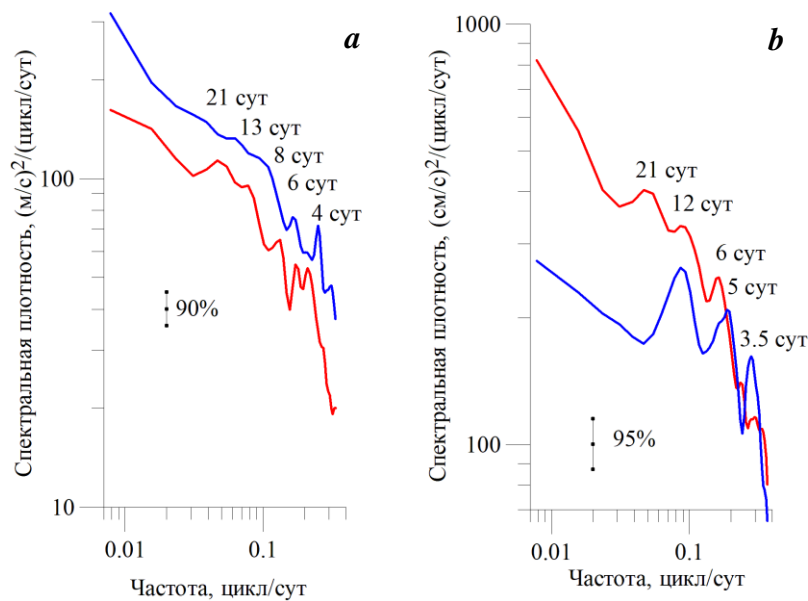


Р и с . 3 . Э м п и р и ч е с к а я ф у н к ц и я р а с п р е д е л е н и я п л о т н о с т и в е р о я т н о с т и н а п р а в л е н и й в е т р а в п р и в о д н о м с л о е а т м о с ф е р ы : *a* – п о и с х о д н ы м д а н н ы м ; *b* – п о с л е у д а л е н и я и з и с х о д н ы х д а н н ы х в к л а д а и н е р ц и о н н о - г р а в и т а ц и о н н о й и с у т о ч н о й и з м е н ч и в о с т и в e т р а ; *c* – п о с л е у д а л е н и я и з i s х o d н ы х д a n n ы х в k l a d a i n e r c i o n n o - g r a v i t a c i o n n o y , s u t o c h n o y i k r u п н о м а ш т а б н о й ф о н о в о й и з м e n ч и в o c т и v e t p a

F i g . 3 . E m p i r i c a l p r o b a b i l i t y d e n s i t y d i s t r i b u t i o n f u n c t i o n f o r w i n d d i r e c t i o n s i n t h e a t m o s p h e r e s u r f a c e l a y e r : *a* – b a s e d o n t h e i n i t i a l d a t a ; *b* – a f t e r r e m o v i n g t h e c o n t r i b u t i o n o f i n e r t i a - g r a v i t y a n d d a i l y w i n d v a r i a b i l i t y f r o m t h e i n i t i a l d a t a ; *c* – a f t e r r e m o v i n g t h e c o n t r i b u t i o n o f i n e r t i a - g r a v i t y , d a i l y a n d l a r g e - s c a l e b a c k - g r o u n d w i n d v a r i a b i l i t y f r o m t h e i n i t i a l d a t a

Для сопоставления статистических и спектральных характеристик изменчивости ветра в приводном слое атмосферы и соответствующей изменчивости прибрежного течения в верхнем деятельном слое моря использованы данные только приповерхностного горизонта 5 м. Для расчетов характеристик как ветра, так и течения за 2013–2022 гг. были сформированы по два отдельных набора среднечасовых данных за май – октябрь (полугодие I) и ноябрь – апрель (полугодие II). Следует отметить, что при численном моделировании ветрового режима Крымского региона, его сезонной изменчивости и особенностей бризовой циркуляции также используют хронологические наборы данных за указанные полугодия [10, 11].

Межсезонные особенности крупномасштабной изменчивости ветра и течения. На рис. 4 представлены полные энергетические спектры изменчивости характеристик приводного ветра (рис. 4, *a*) и приповерхностного течения (рис. 4, *b*), рассчитанные за полугодия I и II в диапазоне периодов 3–128 сут. На рис. 4, *a* в полугодия I достоверно выделены спектральные пики колебаний ветра на периодах 5–6 сут, 8, 13 и 21 сут, а в полугодия II достоверно выделен пик на периоде 4 сут и отмечена интенсификация синоптических колебаний ветра в диапазоне периодов 8–21 сут по сравнению со спектром, рассчитанным за полугодия I. На рис. 4, *b* достоверно выделены спектральные



Р и с . 4. Полные энергетические спектры длинноволновых колебаний в диапазоне периодов 3–128 сут: *a* – ветра в при-
водном слое атмосферы; *b* – течения в приповерхностном
слое моря, рассчитанные за полугодия май – октябрь и ноябрь –
апрель 2013–2022 гг. (красная и синяя линии соответственно)

Fig . 4. Full energy spectra of long-wave fluctuations in the range
of periods 3–128 days: *a* – winds in the atmosphere surface layer;
b – currents in the sea surface layer, calculated for the half-year
periods May–October and November–April 2013–2022 (red and
blue lines, respectively)

пики длинноволновых колебаний течения на периодах ~ 3.5, 6, 12 и 21 сут, рассчитанные за полугодия I, а за полугодия II – на периодах ~ 3.5, 5 и 12 сут. Эти длинноволновые движения распространяются вместе с вдольбереговым течением, оставляя берег справа.

Исследования межсезонных различий спектрального состава длинноволновых колебаний прибрежного течения возможны в рамках натуральных и численных модельных исследований длинноволновых движений, включая захваченные берегом волны⁵⁾. В работе [4] представлен обзор результатов, полученных ранее при исследованиях длинноволновых движений у ЮБК, которые обуславливают захват и аккумуляцию волновой энергии, меандрирование течений и образование мезомасштабных вихревых структур.

Как известно, захваченные берегом волны обычно генерируются колебаниями вдольберегового напряжения ветра. Такие колебания ветра, согласно рис. 4, *с*, достоверно присутствуют у ЮБК, а пространственно-временные характеристики захваченных берегом волн определяются масштабами

⁵⁾ Иванов В. А., Янковский А. Е. Длинноволновые движения в Черном море. Киев : Наукова думка, 1992. 110 с.

вынуждающих атмосферных воздействий в регионе [13]. Длинноволновые колебания течения с периодом около 6 сут в летний сезон обусловлены сгонно-нагонной циркуляцией вод Черного моря с периодичностью 5–7 сут, а колебания с периодом вблизи 12 сут ранее идентифицированы как длинные захваченные берегом волны, генерируемые удаленным ветровым воздействием [13]. Энергетические спектры в мезомасштабном и синоптическом диапазоне изменчивости, рассчитанные по синхронным данным течения и ветра, имеют близкие спектральные диапазоны интенсификации колебаний. Подробные исследования причинно-следственных статистических связей между характеристиками этих длинноволновых колебаний планируется выполнить в дальнейшем.

Межсезонные особенности инерционно-гравитационной и суточной изменчивости ветра и течения. На рис. 5 представлены полные энергетические спектры инерционно-гравитационных и суточных колебаний ветра приводного слоя атмосферы (рис. 5, *a*) и приповерхностного течения (рис. 5, *b*), рассчитанные в диапазоне периодов 6–96 ч за полугодия I и II. На рис. 5, *a* для пары спектров колебаний ветра достоверно выделены энергетические

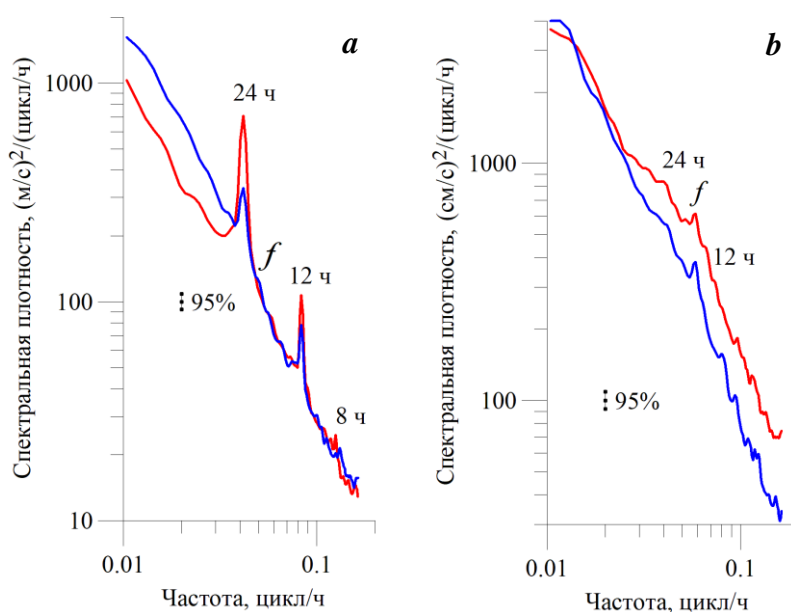


Рис. 5. Полные энергетические спектры инерционно-гравитационных и суточных колебаний в диапазоне периодов 6–96 ч: *a* – ветра в приводном слое атмосферы; *b* – течения в приповерхностном слое моря, рассчитанные за полугодия май – октябрь и ноябрь – апрель 2013–2022 гг. (красная и синяя линии соответственно)

Fig. 5. Full energy spectra of inertia-gravity and daily fluctuations in the range of periods 3–128 days: *a* – winds in the atmosphere surface layer; *b* – currents in the sea surface layer, calculated for the half-year periods May–October and November–April 2013–2022 (red and blue lines, respectively)

максимумы на периодах 12 и 24 ч и отмечены колебания на локальной инерционной частоте f и периоде 8 ч. На рис. 5, *b* для пары спектров колебаний прибрежного течения достоверно выделяются спектральные пики на локальной инерционной частоте f .

С целью оценки значимости и достоверности выделенных спектральных максимумов колебаний как ветра, так и течения в установленном порядке⁴⁾ для фактического числа степеней свободы ~ 1600 были рассчитаны соответствующие 95%-ные доверительные интервалы. Это позволило с высокой точностью оценить различия при сравнении спектральных уровней сформированных пар спектров.

Среднегодулетние амплитуды колебаний ветра на рис. 5, *a* в диапазоне периодов 36–96 ч за полугодия II превышают на $\sim 40\%$ амплитуды соответствующих колебаний за полугодия I. Далее по спектру вид и сравниваемые уровни спектров ветра в диапазоне колебаний 6–26.5 ч совпадают при различиях в значениях уровней спектральных максимумов на периодах 12 и 24 ч. Согласно результатам, полученным ранее в натуральных [6, 7] и модельных [10, 11] экспериментах, с мая по октябрь бризовая циркуляция усиливается, что и является причиной существенных межсезонных различий в интенсивности колебаний на периодах 12 и 24 ч на рис. 5, *a*.

Распределение спектральной плотности энергии течения в приповерхностном слое моря за полугодия I и II представлено на рис. 5, *b*, где в диапазоне колебаний 36–96 ч отсутствуют энергетические различия в уровнях спектров, а далее по спектру в диапазоне колебаний 6–36 ч эти различия превышают пределы 95%-ного доверительного интервала. Среднегодулетние амплитуды колебаний течения в диапазоне периодов 6–36 ч за полугодия I превышают на $\sim 25\%$ амплитуды колебаний за полугодия II. Такие различия в инерционно-гравитационном и суточном диапазоне колебаний течения возникают с мая по октябрь в верхнем деятельном слое Черного моря в условиях устойчивой термической (плотностной) стратификации вод [14]. Как известно, в этот период года в деятельном слое формируется поле интенсивных короткопериодных внутренних волн, обеспечивающих сток энергии длинноволновых колебаний течения на шельфе Черного моря. Натурные исследования динамики инерционно-гравитационных и короткопериодных внутренних волн на шельфе в верхнем деятельном слое Черного моря постоянно совершенствуются, а новые научные результаты таких исследований представлены в [15–17].

Отметим, что прибрежная акватория у ЮБК, включая материковую отмель с бухтами и заливами, является окраинной, сопряженной с сушей частью шельфовой зоны Черного моря. В настоящее время некоторые исследователи считают, что единственной статистически достоверной характеристикой режима циркуляции вод у побережья является бимодальное распределение повторяемости направления течения. Однако, согласно результатам натурных исследований МГИ [4], у м. Кикинеиз достоверно выделено мономодальное вдольбереговое течение, направленное так же, как Основное Черноморское течение. При этом в работе [5] выявлено, что при формировании обратной моды бимодального распределения направления течения у ЮБК доминирующий вклад ($\sim 80\%$) вносят колебания в инерционно-гравитационном

и суточном диапазоне, а 20 % вклада распределены в мезомасштабном диапазоне колебаний течения с периодами до 4–5 сут.

Как известно, инерционные колебания в Черном море возникают при изменении действующей силы и представляют собой круговое или эллиптическое антициклоническое вращение вектора скорости течения, которое кардинально трансформируется у побережья. Инерционные течения у берега (квазиреверсивная циркуляция вод) наблюдаются у ЮБК обычно после прекращения работы длительного вдольберегового ветра при вращении вектора инерционного течения по часовой стрелке на периодах около 17 ч при пространственных масштабах антициклонического вихря менее одного десятка километров [7]. По данным мониторинговых исследований за 2013–2022 гг., инерционные колебания течений у м. Кикинеиз регулярно возникают и существуют в виде периодических пакетов, а в работе [7] отмечено, что продолжительность существования серии таких инерционных антициклонических круговоротов обычно составляет 3–4 сут.

Представленные результаты комплексных исследований изменчивости поля ветра приводного слоя атмосферы и прибрежного течения за 2013–2022 гг. являются основой для дальнейших исследований особенности формирования бимодального распределения направлений вдольберегового течения в инерционно-гравитационном и мезомасштабном диапазоне волно-вихревых колебаний на периодах 4–5 сут.

Заключение

Особенности межсезонной изменчивости вдольбереговой циркуляции прибрежных вод и ветра у Южного берега Крыма выявлены в результате обработки и анализа материалов многолетних натурных исследований, выполняемых на ЧГПП МГИ. Уникальная возможность проведения долгосрочного (2013–2022 гг.) комплексного натурального эксперимента в акватории прибрежного экотона у ЮБК была обеспечена надежным функционированием кластеров отечественных океанологических и гидрометеорологических измерителей со стационарной океанографической платформы ЧГПП МГИ в условиях открытого моря.

Комплексные исследования выполнены по верифицированной информационной технологии инструментального мониторинга, обеспечивающей высокую точность при долгосрочных инструментальных измерениях. Результаты статистического и спектрального анализа получены при обработке массивов синхронных баз данных изменчивости характеристик прибрежного течения и ветра.

1. Установлен факт интенсивной изменчивости поля ветра в приводном слое атмосферы в течение всего годового цикла в диапазоне периодов 12 и 24 ч, 4–6 сут и 13–21 сут при доминировании вдольбереговых колебаний направления местного ветра. При этом регулярные мезомасштабные колебания ветра могут являться источником генерации цугов интенсивных короткопериодных внутренних волн у побережья.

2. Полные энергетические спектры колебаний течения и ветра в мезомасштабном и синоптическом диапазоне изменчивости имеют близкие спектральные диапазоны интенсификации колебаний. Последующее выявление

статистических причинно-следственных связей между характеристиками колебаний течения и ветра является перспективной задачей для физического понимания процесса их взаимодействия.

3. В верхнем слое моря до глубин 15 м синоптические колебания прибрежного течения на периодах ~ 12 сут имеют существенные межсезонные различия. Дальнейшие натурные и численные модельные исследования длинноволновых движений позволят выявить причины таких различий. Репрезентативные эмпирические результаты необходимы для валидации и совершенствования современных региональных численных моделей прибрежных акваторий.

4. Инерционно-гравитационные колебания прибрежного течения в диапазоне периодов 6–36 ч имеют существенные межсезонные различия. При этом дальнейшие исследования необходимо проводить и в диапазоне короткопериодных гравитационных внутренних волн, что позволит детально исследовать их вклад в формирование бимодального распределения направлений вдольбереговой циркуляции вод. При этом необходимо продолжить исследования особенностей энергетического волно-вихревого взаимодействия инерционно-гравитационных и мезомасштабных возмущений вдольберегового прибрежного течения.

Представленные результаты составляют основу для дальнейших исследований разномасштабной изменчивости циркуляции прибрежных вод у ЮБК как существенного природного фактора, влияющего на устойчивое социально-экономическое развитие региона побережья Крыма, что остается одной из приоритетных задач Морского гидрофизического института РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Кузнецов А. С., Зима В. В. Развитие наблюдательной системы Черноморского гидрофизического полигона в 2001–2015 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 4. С. 62–72. EDN PTZWNJ. doi:10.22449/2413-5577-2019-4-62-72
3. Аппаратура для мониторинга гидрометеорологических параметров на океанографической платформе в Качивели / Ю. Н. Толокнов [и др.] // Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / Под ред. В. А. Иванова, В. А. Дулова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. С. 150–153. EDN TZMZJT.
4. Кузнецов А. С. Среднеголетняя сезонная изменчивость прибрежного течения у Южного берега Крыма в 2002–2020 годах // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 2. С. 151–164. EDN VKOPIF. doi:10.22449/0233-7584-2022-2-151-164
5. 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. doi:10.29039/0233-7584-2023-2-189-204
6. 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. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-6-20

7. 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. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. Вып. 3. С. 9–52. EDN ZCNMDR.
8. 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. doi:10/31857/S0869-56524854507-510
9. Ефимов В. В., Шокуров М. В., Барабанов В. С. Физические механизмы возбуждения ветровой циркуляции внутренних морей // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38, № 2. С. 247–258.
10. Ефимов В. В., Барабанов В. С., Яровая Д. А. Мезомасштабные процессы в атмосфере Черноморского региона // Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / Под ред. В. А. Иванова, В. А. Дулова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. С. 250–271. EDN TZMZJT.
11. Ефимов В. В. Численное моделирование бризовой циркуляции над Крымским полуостровом // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 1. С. 95–106. EDN YIUXVD. doi:10.7868/S0002351517010047
12. Ефимов В. В., Комаровская О. И. Возмущения, вносимые Крымскими горами в поля скорости ветра // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 2. С. 134–146. EDN WEALEB. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-134-146
13. Иванов В. А., Янковский А. Е. Динамика вод на шельфе Крыма в летний сезон // Морской гидрофизический журнал. 1994. № 3. С. 38–56.
14. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
15. Bondur V. G., Sabinin K. D., Grebenyuk Yu. V. Characteristics of inertial oscillations according to the experimental measurements of currents on the Russian shelf of the Black Sea // Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. Vol. 53. P. 120–126. doi:10.1134/S0001433816050030
16. Химченко Е. Е., Серебряный А. Н. Внутренние волны на Кавказском и Крымском шельфах Черного моря (по летне-осенним наблюдениям 2011–2016 гг.) // Океанологические исследования. 2018. Т. 46, № 2. С. 69–87. EDN YPOJUL. doi:10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).7
17. Internal waves study on a narrow steep shelf of the Black Sea using the spatial antenna of line temperature sensors / A. Serebryany [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. Vol. 8, iss. 11. 833. doi:10.3390/jmse8110833

Поступила 01.11.2023 г.; одобрена после рецензирования 10.12.2023 г.; принята к публикации 27.12.2023 г.; опубликована 25.03.2024 г.

Об авторе:

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

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.