

Спектральные характеристики изменчивости ветра в прибрежной зоне Южного берега Крыма в 1997–2006 годах

А. С. Кузнецов

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
e-mail: kaskasev@mail.ru*

Аннотация

Целью работы является исследование спектральных характеристик изменчивости поля прибрежного ветра у Южного берега Крыма в зоне горизонтальных неоднородностей подстилающей атмосферу поверхности суши и моря для уточнения роли изменчивости прибрежного ветра в формировании особенностей циркуляции прибрежных вод. Достоверные знания об этих особенностях необходимы для экологического нормирования антропогенного воздействия на морские экосистемы в рамках управления эколого-экономическими процессами в прибрежной зоне моря. Используются архивные данные стандартных метеорологических наблюдений изменчивости ветра за 10-летний период инструментального мониторинга (1997–2006 гг.) на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне Морского гидрофизического института у м. Кикинеиз на суше и в море, а также на гидрометеорологической станции у м. Никита (г. Ялта). Для обеспечения единства многолетних измерений использована перспективная информационная технология обработки и контроля качества векторных данных, которая позволила повысить точность измеряемых характеристик ветра. Выявлены особенности спектральных характеристик изменчивости поля прибрежного ветра в суточном, мезомасштабном и сезонном диапазонах. Полученные натурные результаты сопоставлены с известными результатами численного моделирования с использованием современных моделей региональной атмосферной циркуляции с высоким пространственным и временным разрешением. Научная новизна работы заключается в получении репрезентативных эмпирических знаний при анализе материалов об особенностях изменчивости ветровых условий у побережья в зонах с горизонтальными неоднородностями свойств подстилающей атмосферу земной поверхности и сопоставлений этих результатов с существующими модельными разработками. Такие комплексные исследования позволяют получить достоверные знания о закономерностях циркуляции прибрежных вод у Южного берега Крыма с учетом воздействия местных ветров.

Ключевые слова: Южный берег Крыма, прибрежная зона, морская экосистема, мониторинг, метеопараметры, ветровые условия, гистограмма распределения, спектральная плотность

© Кузнецов А. С., 2023



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 государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме FNNN-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

Для цитирования: 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

Spectral Characteristics of Wind Variability in the Coastal Zone of the South Coast of Crimea 1997–2006

A. S. Kuznetsov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

The paper studies the spectral characteristics of the coastal wind field variability near the South coast of Crimea in the zone of horizontal inhomogeneities of the land surface underlying the atmosphere and sea to specify the role of the coastal wind variability in the formation of coastal water circulation features. Reliable knowledge of these features is necessary for ecological standardization of the anthropogenic impact on marine ecosystems as part of ecological and economic processes management in the coastal sea zone. Archived data were used from standard meteorological observations of wind variability over a 10-year period of instrumental monitoring (1997–2006) at the Black Sea hydrophysical sub-satellite testing area of Marine Hydrophysical Institute near Cape Kikineiz onshore and offshore and at the hydrometeorological station near Cape Nikita (Yalta). The advanced information technology of processing and quality control of vector data was used to ensure the unity of multi-year measurements, which allowed increasing the accuracy of measured wind characteristics. The peculiarities of spectral characteristics of the coastal wind field variability in daily, mesoscale and seasonal ranges were found out. The obtained *in situ* results were compared with the known results of numerical modelling using modern models of regional atmospheric circulation with high spatial and temporal resolution. The scientific novelty of the work is in obtaining representative empirical knowledge during the analysis of materials on the peculiarities of wind condition variability near the coast in zones with horizontal heterogeneities of the properties of the land surface underlying the atmosphere and comparing these results with the existing model developments. Such integrated studies provide reliable knowledge of the circulation patterns of coastal waters off the South coast of Crimea given the effects of local winds.

Keywords: South coast of Crimea, coastal zone, marine ecosystem, monitoring, meteorological parameters, wind conditions, distribution histogram, spectral density

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., 2023. Spectral Characteristics of Wind Variability in the Coastal Zone of the South Coast of Crimea 1997–2006. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 6–20. doi: 10.29039/2413-5577-2023-2-6-20

Введение

В настоящее время развитие природно-хозяйственных и рекреационных комплексов у южного побережья Крыма происходит за счет интенсивного освоения территории его суши и прибрежной зоны Черного моря. На основе оценок уровня антропогенных нагрузок на прибрежные зоны и экотоны Черноморского побережья Крыма в [1] отмечено, что прибрежные экосистемы Черного моря имеют тенденцию к деградации под воздействием загрязнений антропогенного происхождения, поступающих в морскую среду, что требует принятия законных ограничительных мер. Согласно [1, 2], экотонном называется зона на границе раздела двух сред, где граничные эффекты проявляются в особом режиме геохимических процессов, создающих возможность существования специфических биоценозов и экосистем в приграничных зонах. У Южного берега Крыма (ЮБК) такими зонами являются прибрежный экотон суши и прибрежный морской экотон, существующие у границы сопряжения суши и моря.

Акватория морского экотона является прибрежной оконечностью шельфовой зоны и включает прилегающую мелководную полосу открытой части моря, бухты и заливы. Зона существования прибрежного экотона моря у м. Кикинеиз ЮБК занимает прибрежную полосу, ограниченную глубинами 50–70 м на удалении до 1 км от берега. Для установления степени ущерба, наносимого прибрежной экосистеме при загрязнении этой акватории, необходимы достоверные сведения об интенсивности процессов в прибрежных фронтальных зонах и разделах [1, 2]. Циркуляция вод мелководного прибрежного участка шельфа у ЮБК имеет свои закономерности [3, 4] и отличия от динамики вод прилегающей шельфово-склоновой части моря, а также от Основного Черноморского течения (ОЧТ) [5]. Специфические особенности циркуляции прибрежных вод обусловлены географическим положением и структурой уникального природного ландшафта ЮБК, формой береговой линии и рельефа дна, а интенсификация и устойчивость циркуляции вод связаны с океанологическими и метеорологическими возмущениями.

При современном уровне потока загрязнений Черного моря [6], поступающих в морскую среду, необходимо применять экологическое нормирование антропогенных воздействий на морские экосистемы в рамках управления эколого-экономическими процессами в прибрежной зоне моря [7]. Для определения научно-обоснованных предельных норм поступающих в морскую среду потоков загрязнений, наряду с оценками их уровня и собственных возможностей ассимиляционной емкости экосистемы, необходимы достоверные знания об особенностях циркуляции прибрежных вод. На основе результатов многолетних натурных исследований прибрежных течений у ЮБК, представленных в [3, 4], выявлены закономерности циклонической циркуляции стационарного вдольберегового течения и особенности его изменчивости в гравитационно-инерционном, субинерционном и сезонном диапазонах. Экспериментальное выявление факторов, вызывающих такую интенсификацию течений, является актуальной задачей.

Известно, что интенсивность ветровой циркуляции в море зависит от ветровых условий приводного слоя атмосферы. У побережья в зоне подстилающей атмосферу поверхности (суши и моря) характеристики течения воздуха (ветра)

изменчивы в широких пределах. Из анализа опубликованных результатов исследований ветровых характеристик у ЮБК отметим следующее. По данным инструментальных измерений, изменчивость ветра у побережья формируется в результате вклада крупномасштабного поля ветра, которое трансформируется при обтекании ветром Главной гряды Крымских гор, и суперпозиции местных образований термического и орографического происхождения^{1)–4)} [8]. При этом следует особо отметить практическую ценность результатов модельных исследований, полученных в Морском гидрофизическом институте (МГИ) по данным регионального ретроспективного анализа (реанализа) на основе различных численных моделей атмосферной циркуляции, представленных в цикле работ [9–15].

Основными элементами крупномасштабной циклонической циркуляции вод Черного моря являются струйное ОЧТ и два макроциклонических круговорота в восточной и западной частях моря [5, 16]. Сезонная изменчивость крупномасштабной циркуляции вод Черного моря в существенной мере определяется действием приводного напряжения ветра, а завихренность поля ветра является основной характеристикой, определяющей генерацию ветровой циркуляции в море [9]. На сезонных временных масштабах изменчивости завихренность поля приводного модуля скорости ветра на поверхности Черного моря включает фоновую завихренность, связанную с общей крупномасштабной атмосферной циркуляцией, и региональную компоненту. Региональная завихренность, связанная с орографией и контрастом характеристик подстилающей поверхности моря и суши, кардинально влияет на формирование суммарного поля ветра приводного слоя атмосферы [13], что в результате является доминирующим фактором в формировании изменчивости гидрофизических полей Черного моря [11]. По результатам обзора материалов ранних натурных^{1)–4)} [8] и теоретических исследований [9–15] далее приводятся краткие сведения, необходимые при дальнейшем обсуждении результатов исследований спектральных характеристик изменчивости поля приземного ветра в зоне подстилающей атмосферу поверхности суши и моря.

Гидрометеорологический режим ЮБК и прилегающей к нему акватории в основном определяется макроциркуляционными процессами Средиземно-морского климатического региона, особенностями конфигурации береговой линии и геоморфологической структурой Крымского полуострова [8, 9]. Атмосферные процессы, протекающие над Черным морем, отличаются большим разнообразием форм, которые в значительной степени обусловлены особенностями барических условий и орографическими особенностями ЮБК.

¹⁾ Лощия Черного моря / Под ред. М. Н. Лапина. Ленинград : Изд-во Гидрографического Управления Военно-Морских Сил, 1954. 506 с.

²⁾ *Потанов Н. С.* Бризовая циркуляция на южном берегу Крыма // Труды Морского гидрофизического института. Москва : Изд-во АН СССР, 1956. Т. VIII. С. 98–108.

³⁾ *Чернякова А. П.* Типовые поля ветра Черного моря // Сборник работ Бассейновой секции гидрометеорологической обсерватории Черного и Азовского морей. Ленинград : Гидрометеоздат, 1965. Вып. 3. С. 78–121.

⁴⁾ *Зац В. И., Лукьяненко О. Я., Яцевич Г. В.* Гидрометеорологический режим Южного берега Крыма. Ленинград : Гидрометеоздат, 1966. 120 с.

В течение года барико-циркуляционные особенности атмосферных процессов над Черным морем имеют хорошо выраженные сезонные различия. При этом региональная завихренность поля ветра является основным фактором в формировании сезонного хода завихренности поля скорости ветра, изменяющегося от циклонического зимой до антициклонического летом [8, 9]. Как известно, ветровые условия на суше и у побережья существенно отличаются от ветровых условий в открытых районах моря [8]. Геоморфологические и орографические субрегиональные особенности района ЮБК изменяют характер региональной атмосферной циркуляции и способствуют возникновению ее местных проявлений¹⁾⁻⁴⁾ [8–10, 12–15].

Целью настоящей работы является исследование спектральных характеристик разномасштабной изменчивости прибрежного ветра на базе архивных данных, полученных за 10-летний период инструментального мониторинга с 1997 по 2006 г. у м. Кикинеиз на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне (ЧГПП) МГИ на суше и в море, а также данных метеорологической станции на м. Никита. Научная новизна работы заключается в получении достоверных эмпирических знаний на основе анализа архивных материалов по изменчивости характеристик прибрежного ветра в зонах с горизонтальными неоднородностями свойств подстилающей атмосферу земной поверхности и сопоставлений этих характеристик с существующими теоретическими разработками. Эти материалы необходимы для дальнейших исследований изменчивости спектральных характеристик поля прибрежного ветра у ЮБК и выявления их связи с особенностями циркуляции прибрежных вод [4].

Материалы и методы

В настоящей работе представлены результаты обработки и анализа архивных данных стандартных метеорологических наблюдений изменчивости ветра, выполненных на договорной основе в 1997–2006 гг. у м. Кикинеиз и на м. Никита (рис. 1). Средства контроля гидрометеорологической обстановки ЧГПП МГИ обеспечили контактный мониторинг характеристик поля ветра на полигоне у м. Кикинеиз в зоне подстилающей атмосферу поверхности суши и прибрежной зоне моря. Характеристики ветра измерялись на береговом гидрометеорологическом пункте п. Кацевели (рис. 1) с координатами 44.38° с. ш. и 33.98° в. д. на высоте ~ 40 м и на расстоянии ~ 150 м от уреза воды. Измерения характеристик ветра у м. Никита (рис. 1) выполнялись на метеорологической станции «Никитский сад», расположенной на удалении ~ 25 км к северо-востоку от м. Кикинеиз, с координатами 44.51° с. ш. и 34.24° в. д. на высоте ~ 200 м и на расстоянии ~ 550 м от уреза воды. Характеристики ветра приподнятого слоя атмосферы измерялись в Голубом заливе (рис. 1) на морском гидрометеорологическом пункте стационарной океанографической платформы [3] с координатами 44.39° с. ш. и 33.98° в. д. на высоте 18 м над уровнем моря и на удалении ~ 450 м от берега. Измерения на платформе в море представлены за 7-летний период наблюдений 1997–2003 гг. в сезоны наибольшего развития бриза с мая по октябрь.



Рис. 1. Карта-схема района исследований у Южного берега Крыма. Кружками отмечены метеостанции на суше, а звездочкой – в Голубом заливе. Линией I обозначена ориентация горного хребта у м. Кикинеиз, линией II – у м. Никита

Fig. 2. Schematic map of the studied area near the South coast of Crimea. The circles are for onshore weather stations, the star is for those in the Goluboy Gulf. Line I denotes the ridge orientation near Cape Kikineiz, line II – near Cape Nikita

Южное побережье Крымского полуострова от м. Сарыч до м. Ай-Тодор защищено Главной грядой Крымских гор, перекрывающей прямой доступ ветрам северных румбов²⁾. Южные обрывы горной гряды, как и прилегающая береговая черта у п. Кацивели, ориентированы с западо-юго-запада на востоко-северо-восток (прямая линия I на рис. 1). Участок суши между обрывами и берегом достигает ширины 4 км, а высоты гор находятся в пределах 1000–1200 м. От м. Ай-Тодор до м. Никита прибрежная полоса ЮБК защищена горным массивом с северо-востока²⁾, где склоны гор в сторону моря ориентированы с юго-запада на северо-восток (прямая линия II на рис. 1). У м. Никита полоса суши между горным массивом и береговой линией достигает ширины 8 км при высоте прилегающего горного хребта ~ 1200 м.

Инструментальные измерения характеристик поля ветра выполнены анеморумбографами М-63М. Измерители характеристик ветра работали в стандартном режиме осреднения при 8-срочной регистрации измерений за одни сутки. Каждые 3 часа регистрировались осредненные за 10-минутный интервал времени мгновенные последовательные значения модуля скорости и направления вектора ветра. Совокупность исходных хронологических последовательностей за 10-летний период исследований составила 29 216 пар компонентов 3-часовых отсчетов характеристик вектора прибрежного ветра.

Согласно паспортным данным, первичные измерительные преобразователи анеморумбографа имеют типовые метрологические характеристики при чувствительности (единице младшего разряда измерителя) для канала скорости ветра не более 0.1 м/с и канала направления ветра не более 3°. Технология измерений позволила исключить вклад сбойных значений и значимых методических погрешностей измерений, а применение далее процедуры анализа результатов статистической обработки совокупности векторных данных мониторинга характеристик ветра позволило повысить точность осредненных данных. Для обеспечения единства многолетних измерений материалы в установленном порядке прошли контроль качества данных и на их основе были вычислены векторно-осредненные 9-часовые и среднесуточные значения модуля скорости и направления ветра. Результаты статистической обработки векторно-осредненных данных с учетом анализа фактических значений текущих гистограмм распределения модуля вектора скорости и направления ветра обеспечили повышение точности измерений компонентов ветра до предельных уровней случайных погрешностей [17]. При определенных интервалах осреднения предельные случайные среднеквадратические погрешности измерений модуля скорости и направления вектора ветра снижены до 0.1–0.2 м/с и до 5° соответственно.

На базе набора исходных данных инструментальных измерений сформированы 3652 пары среднечасовых значений компонентов вектора ветра. Натурные данные далее в полном объеме использованы при статистическом и спектральном анализе. Следует отметить, что при модельных исследованиях в [10, 13, 15] для выделения вклада бриза на фоне синоптических возмущений был использован специальный метод цифровой фильтрации обработанных данных – «метод разностных композитов» в предположении аддитивности полей бризовой и синоптической циркуляции. Спектральный анализ векторных характеристик течения воздуха (ветра) в настоящей работе выполнен в рамках линейной (фильтровой) оценки энергетического спектра колебаний, подобно методике анализа набора векторных данных в [3, 4] через сглаживание периодограмм с использованием процедуры быстрого преобразования Фурье. Особенности метода спектрального анализа векторных характеристик представлены в работах^{5), 6)}. На базе этих материалов разработан программный информационный продукт, используемый в настоящей работе. Выбор параметров фильтрации векторных данных позволил достоверно исследовать энергетический вклад и спектральные особенности распределения плотности полной энергии колебаний при разномасштабной изменчивости поля прибрежного ветра. Оценки характеристик бриза получены также в предположении аддитивности полей бризовой и синоптической циркуляции.

⁵⁾ *Коняев К. В.* Спектральный анализ случайных океанологических полей. Ленинград : Гидрометеоздат, 1981. 207 с.

⁶⁾ *Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / [А. С. Блатов и др.]; под ред. Б. А. Нелепо.* Ленинград : Гидрометеоздат, 1984. 240 с.

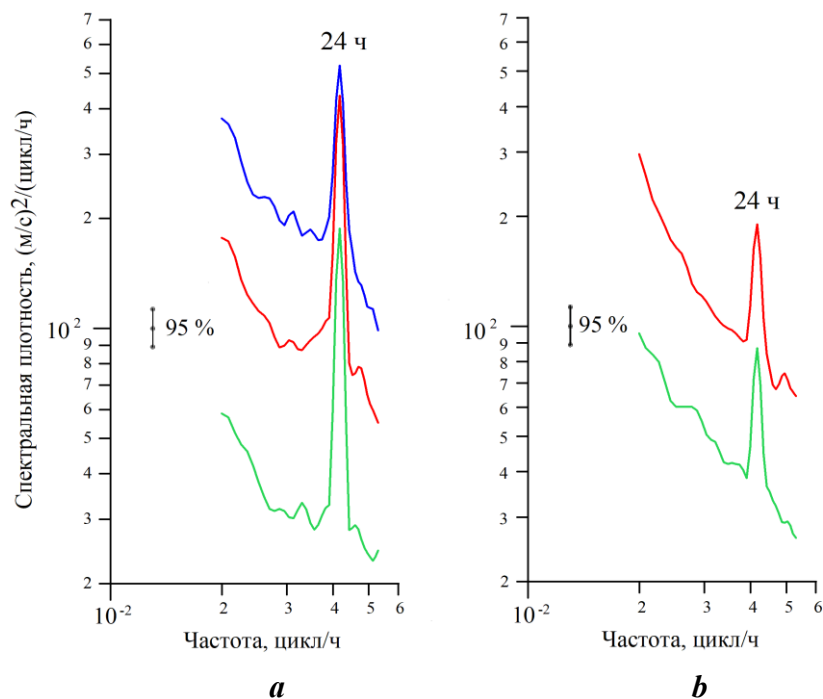
Обсуждение и результаты

Акватория Черного моря в зоне сужения континентального склона между южной оконечностью Крымского полуострова и Анатолийским побережьем поделена по меридиану 34° в. д., проходящему через территорию ЧГПП МГИ (33.984° в. д.), на восточную и западную части [12], где формируются макроциклонические круговороты течений («очки Книповича») [16]. Переходная зона между круговоротами, примыкающая к территории ЧГПП МГИ, как функционально, так и территориально ассоциируется с соединяющим «мостиком очков Книповича».

Крымские горы, горизонтальные неоднородности подстилающей поверхности и тепловые контрасты суша – море вызывают возмущения в нижней части пограничного слоя атмосферы, способствуя генерации и развитию широкого спектра мезомасштабных процессов у ЮБК. Одной из эмпирических задач, рассматриваемых в настоящей работе, является изучение особенностей изменчивости таких мезомасштабных возмущений на основе спектрального анализа натурных данных. С учетом ранее накопленных знаний, полученных на основе численного моделирования атмосферной циркуляции над Черным морем, можно обоснованно выделить особенности изменчивости характеристик прибрежного ветра.

Структура атмосферных полей в зоне прибрежного экотона суши и моря у ЮБК наиболее изменчива в весенне-летний и летне-осенний сезоны (май – октябрь) [10, 14, 15]. В это время года явно выражена суточная изменчивость атмосферных полей вследствие максимальной интенсификации бризовой циркуляции, являющейся результатом температурных контрастов между морем и сушей, связанных с суточным и сезонными циклами. Дневной бриз (морской бриз) представляет собой гравитационное течение воздуха, распространяющееся в сторону суши, а ночной бриз (континентальный бриз) имеет противоположное направление. Инструментальные исследования бризовой циркуляции у п. Качивели выполнялись с 1949 г.²⁾ комплексом аэрологических наблюдений, включая дрейферные шаропилотные исследования. В дальнейшем репрезентативным методом изучения бризовой циркуляции явилось численное моделирование с использованием региональных моделей атмосферной циркуляции с высоким пространственным и временным разрешением [9, 13–15]. Набор анализируемых в настоящей работе натурных данных об изменчивости характеристик прибрежного ветра позволяет на новом технологическом уровне возобновить контактные натурные исследования особенностей бризовой циркуляции у ЮБК с целью последующей оценки роли местных ветров в формировании особенностей прибрежной циркуляции вод.

Значительное усиление скоростей ветра в море, по сравнению с его скоростями на суше у м. Кикинеиз, инструментально регистрируется с 1983 г. На рис. 2 представлены среднеголетние за 1997–2003 гг. полные энергетические спектры колебаний прибрежного ветра у ЮБК, рассчитанные по 9-часовым векторно-осредненным данным в диапазоне периодов изменчивости поля ветра от 18 ч до 2 сут. Спектры на рис. 2, а рассчитаны по данным морского метеопункта в Голубом заливе, берегового метеопункта у м. Кикинеиз и береговой метеостанции у м. Никита в период интенсификации бризовой циркуляции (май – октябрь) и демонстрируют существенный



Р и с . 2 . Полные энергетические спектры осцилляций ветра у ЮБК в диапазоне периодов 18 ч – 2 сут: *a* – при интенсификации бризовой циркуляции и суточной изменчивости поля прибрежного ветра (май – октябрь) по данным морского метеопункта в Голубом заливе, берегового метеопункта у м. Кикинеиз и береговой метеостанции у м. Никита (синяя, красная и зеленая линии соответственно); *b* – при ослаблении суточной изменчивости поля прибрежного ветра (ноябрь – апрель) по данным берегового метеопункта у м. Кикинеиз и береговой метеостанции у м. Никита (красная и зеленая линии соответственно) при 95%-ном доверительном интервале

Fig. 2. Full energy spectra of wind oscillations near the South coast of Crimea in the period range of 18 h – 2 days: *a* – at intensification of breeze circulation and daily variability of the coastal wind field (May – October) according to data from the marine meteorological point in the Goluboy Gulf, the onshore meteorological point near Cape Kikineiz and the onshore meteorological station near Cape Nikita (blue, red and green lines, respectively); *b* – at weaker daily variability of the coastal wind field (November – April) according to the data of the onshore meteorological point near Cape Kikineiz and the onshore meteorological station at Cape Nikita (red and green lines, respectively) at the 95 % confidence interval

энергетический вклад колебаний ветра на периоде 24 ч (1 сут). Спектральные максимумы существенно превышают пределы 95%-ного доверительного интервала и являются достоверными. Среднемноголетние спектры, рассчитанные по данным берегового метеопункта у м. Кикинеиз и береговой метеостанции у м. Никита в ноябре – апреле (рис. 2, *b*), демонстрируют снижение энергетического вклада колебаний ветра на периоде 24 ч по сравнению со спектрами на рис. 2, *a*. Измерения характеристик ветра в ноябре – апреле на метеопункте в Голубом заливе у м. Кикинеиз не выполнялись.

Как известно, дневной бриз переносит в приводном слое атмосферы морской воздух в сторону берега, а ночной бриз направлен с берега в сторону моря. В результате формируется единый квазициклический процесс с периодом колебания 1 сут, где скорости дневного бриза около Крымских гор могут достигать 8 м/с, а ночного бриза около Крыма – 5 м/с [10] при характерной суммарной скорости бриза около 4–5 м/с [15]. На основе представленных полных энергетических спектров рассчитаны соответствующие среднемноголетние значения скоростей колебаний прибрежного ветра суточного периода для каждого из пунктов наблюдений. В мае – октябре среднемноголетние скорости суточных колебаний ветра в море у м. Кикинеиз имели значение 9.7 м/с, на берегу у м. Кикинеиз – 10.4 м/с, а на берегу у м. Никита – 8.0 м/с. В ноябре – апреле среднемноголетние скорости суточных колебаний ветра на берегу у м. Кикинеиз имели значение 4.2 м/с, а на берегу у м. Никита – 3.1 м/с.

В сезоны интенсификации бризовой циркуляции (рис. 2, *a*) среднемноголетние скорости изменчивости ветра суточного периода у м. Кикинеиз между морем и сушей различались незначительно, а на суше между м. Кикинеиз и м. Никита имели разницу ~ 2 м/с. В сезоны снижения интенсивности суточных колебаний ветра (рис. 2, *b*) различия на суше между м. Кикинеиз и м. Никита имели значение ~ 1 м/с. Указанные среднемноголетние сезонные скорости бриза, полученные по натурным данным у м. Никита, почти совпадают со скоростями, вычисленными по данным выполненного на основе мезомасштабной модели регионального реанализа атмосферной циркуляции для Черноморского региона [10]. Выявленные на суше у м. Кикинеиз скорости суточной изменчивости ветра в период ослабления бризовой циркуляции ветра (ноябрь – апрель) также совпадают с модельными оценками.

Однако в весенне-летние и летне-осенние сезоны (май – октябрь) при интенсификации бризовой циркуляции среднемноголетние скорости колебаний ветра с суточным периодом у м. Кикинеиз как на суше, так и в море превышают соответствующие модельные оценки характерной скорости бриза [15] почти в два раза. В связи с этим следует отметить, что в работе²⁾ по инструментальным наблюдениям выделен суточный вклад местного ночного термического ветра склонов, при котором с Крымских гор периодически стекает выхолаженный воздух. В [13] по результатам моделирования мезомасштабных особенностей атмосферной циркуляции в прибрежной части ЮБК показано, что скорости ночного бриза могут достигать 10 м/с, что связано с появлением кататического ветра, возникающего в ночное время и распространяющегося вниз по склону прилегающих гор у п. Качивели [14]. Выявленные среднемноголетние скорости колебаний ветра с суточным периодом значительно превышают типичные скорости бриза, что обусловлено добавочным

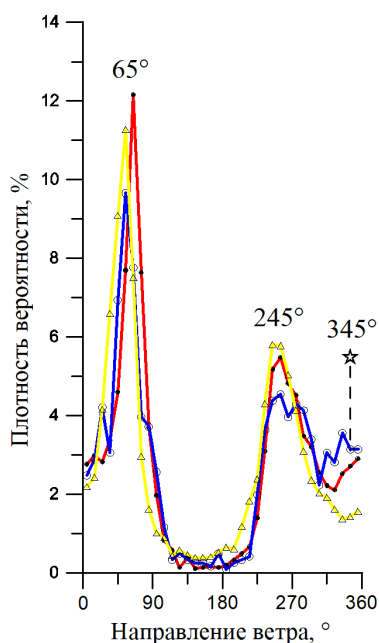
суточным вкладом локального термического ветра и орографии. Ночной кatabатический ветер вносит определенный вклад в суточные колебания суммарного ветра в п. Качивели. Эпизодически, достигая ураганной силы, он создает ситуацию природного стихийного бедствия, срывая крыши с домов и строений, ломая и вырывая с корнем многолетние деревья.

Согласно схеме прямолинейной береговой линии [15], направление бриза почти перпендикулярно береговой линии. Крымские горы с высотами у ЮБК в пределах 1000–1200 м существенно изменяют структуру бризовой циркуляции. Высота распространения морских бризов в Крыму составляет 500–1000 м [13], при этом в работе²⁾ отмечено, что верхняя граница морского бриза может достигать 1600 м. В таких случаях на сушу за Главную гряду Крымских гор проникает только верхняя часть потока. В случае, когда высокие горы блокируют распространение бриза дальше на сушу²⁾ [10, 15], у ЮБК формируется область сильных вдольбереговых бризовых течений воздуха [15]. За сутки бризовая циркуляция периодически изменяется по модулю скорости и направлению. По мере развития как дневного, так и ночного бриза действие силы Кориолиса приводит к вращению вектора поля скорости в течение суток [10]. В ходе суточного цикла развитие бриза сопровождается постепенным изменением его направления по часовой стрелке. Такая суточная динамика местного ветра вносит дополнительные искажения при натурных исследованиях характеристик поля прибрежного ветра у ЮБК в диапазоне мезомасштабной, синоптической и сезонной изменчивости, что необходимо учитывать при обработке и анализе натурных данных.

Высокие Крымские горы существенно меняют структуру регионального поля ветра у побережья^{2)–4)} [8, 9, 13, 15] и формируют у ЮБК вдольбереговую структуру прибрежного ветра, включая бризовую составляющую, как на суше, так и в ближней, сравнительно узкой прибрежной полосе моря [14]. На рис. 3 представлены гистограммы распределения повторяемости направлений вдольберегового ветра у ЮБК.

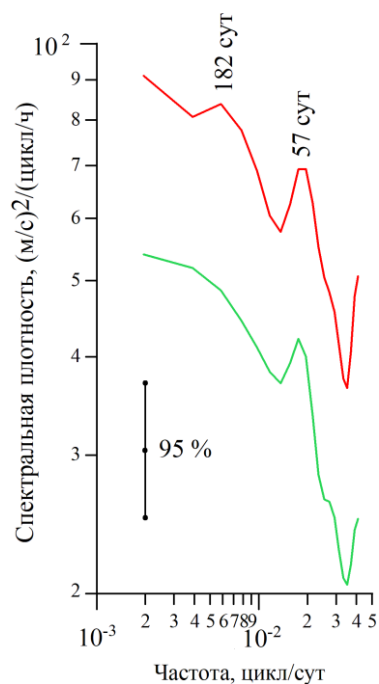
Горы у ЮБК существенно усложняют ситуацию, создавая сложную суперпозицию бризовых и горно-долинных ветров в зоне сопряжения суши и моря. С целью подавления в реализациях вклада интенсивных суточных колебаний, вызванных местными ветрами (бризы, горно-долинный и кatabатический ветер), выполнена процедура суточного векторного осреднения исходных данных. Звездочкой на рис. 3 показано максимальное значение плотности вероятности вклада местных ветров со стороны гор (от 345°), вычисленное из исходных данных морского и берегового метеопунктов у м. Кикинеиз до их суточного осреднения. У м. Никита интенсивный вклад местных ветров со стороны гор в исходных реализациях не выделен. На рис. 3 выделяются два основных почти коллинеарных направления, вдоль которых ориентирована вдольбереговая циркуляция прибрежного ветра у ЮБК.

Для анализа крупномасштабной изменчивости поля ветра у ЮБК использованы среднесуточные и среднемесячные векторно-осредненные значения модуля скорости и направления прибрежного ветра, сформированные за 10-летний период натурных наблюдений. На рис. 4 представлены средне-многолетние за 1997–2006 гг. полные энергетические спектры колебаний ветра у ЮБК в диапазоне изменчивости 24–512 сут.



Р и с . 3 . Гистограммы распределения повторяемости направлений вдольберегового ветра у ЮБК по среднесуточным векторно-осредненным многолетним данным морского метеопункта в Голубом заливе, берегового метеопункта у м. Кикинеиз и береговой метеостанции у м. Никита (синяя, красная и зеленая линии соответственно). Звездочкой показано максимальное значение плотности вероятности вклада внутрисуточного склонового ветра с суши в исходных, не осредненных данных морского и берегового метеопунктов у м. Кикинеиз

F i g . 3 . Histograms of the frequency distribution of alongshore wind directions near the South coast of Crimea based on daily vector-averaged multi-year data from the Goluboy Gulf marine meteorological station, the onshore meteorological station at Cape Kikineiz and the onshore meteorological station at Cape Nikita (blue, red and green lines, respectively). Kikineiz and the onshore meteorological station near Nikita (blue, red and green lines, respectively). The star shows the maximum probability density value of diurnal slope wind contribution from land in the raw, not averaged data of the offshore and onshore meteorological points at Cape Kikineiz



Р и с . 4 . Среднемноголетние за 1997–2006 гг. полные энергетические спектры изменчивости ветра у ЮБК в диапазоне периодов 24–512 сут по данным берегового метеопункта у м. Кикинеиз и береговой метеостанции у м. Никита (красная и зеленая линии соответственно) при 95%-ном доверительном интервале

F i g . 4 . The 1997–2006 long-term average full energy spectra of wind variability near the South coast of Crimea in the range of periods 24–512 days based on the data from the onshore meteorological point at Cape Kikineiz and onshore meteorological station Nikita (red and green lines, respectively) at 95% confidence interval

Спектры на рис. 4 демонстрируют достоверный энергетический вклад колебаний прибрежного ветра на периоде около двух месяцев (57 сут) в пунктах измерений на суше. Характер интенсивной изменчивости ветра в указанных пунктах почти идентичен, однако значения среднеемноголетних скоростей колебаний прибрежного ветра у м. Кикинеиз выше почти в 1.5 раза. Ранее были опубликованы результаты многолетних исследований изменчивости прибрежных течений у м. Кикинеиз [3], где достоверно выделены сезонные колебания течений на годовом периоде, второй и третьей годовых гармониках, а также колебания течений с периодом около двух месяцев, выявленные в наборе среднеемноголетних энергетических спектров изменчивости прибрежного течения у ЮБК (рис. 2 в [3, с. 161]). Дальнейший спектральный анализ натуральных данных, представленных в настоящей работе, позволил достоверно разделить сезонные колебания поля прибрежного ветра на годовом и полугодовом периодах при 90%-ном доверительном интервале.

В настоящей работе представлены предварительные результаты исследования спектральных характеристик изменчивости прибрежного ветра у ЮБК, полученные при анализе архивных натуральных данных. Дальнейшее развитие инструментальных синхронных исследований поля прибрежного ветра и течений на ЧГПП МГИ у ЮБК позволит получить новые репрезентативные натурные данные в рамках исследуемой проблемы.

Заключение

Новые научные результаты получены на основе обработки и анализа архивных данных стандартных метеорологических наблюдений изменчивости ветра за 10-летний период инструментального мониторинга, выполненного в 1997–2006 гг. на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне Морского гидрофизического института у м. Кикинеиз на суше и в море, а также на гидрометеорологической станции у м. Никита ЮБК. Для обеспечения единства многолетних измерений использована перспективная информационная технология обработки и контроля качества векторных данных, которая позволила повысить точность измеряемых характеристик ветра.

На основе архивных данных натурального эксперимента исследованы среднеемноголетние полные энергетические спектры колебаний поля прибрежного ветра для суточного диапазона изменчивости. Достоверно выявлена сезонная изменчивость интенсивности суточных колебаний ветра, связанная с внутригодовым изменением вклада бризовых и местных горно-долинных ветров в зоне сопряжения суши и моря. Выявлены интенсивные колебания прибрежного ветра на периодах около 57 сут, а также достоверно разделены сезонные колебания поля прибрежного ветра у ЮБК на годовом и полугодовом периодах.

Опыт работы с данными контактного мониторинга характеристик ветра позволяет на современном технологическом уровне продолжить инструментальные натурные исследования в этом направлении. Репрезентативные оценки изменчивости прибрежных ветровых условий и их вклада в формирование структуры циркуляции прибрежных вод востребованы для получения новых эмпирических знаний в рамках этой недостаточно исследованной до настоящего времени проблемы. Комплексный анализ материалов изменчивости течений и синхронных по времени данных характеристик местных

ветров позволяет получить новые научные знания о причинно-следственных связях и вкладе изменчивости ветра приводного слоя атмосферы в формирование квазистационарной структуры, режима и разномасштабной изменчивости циркуляции прибрежных вод у побережья, что остается одной из приоритетных задач ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка уровня антропогенных нагрузок на прибрежные зоны и экотоны Черноморского побережья Украины / В. И. Беляев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2001. № 1. С. 55–63.
2. *Lebedev V., Aizatulin T., Khailov K.* The living ocean. Moscow : Progress Publishers, 1989. 327 p.
3. *Кузнецов А. С.* Среднемноголетняя 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
4. *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
5. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
6. *Pokazeev K., Sovga E., Caplina T.* Pollution on the Black Sea. Observation about the ocean's pollution. Cham, Switzerland : Springer Nature Switzerland AG, 2021. 213 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-61895-7>
7. *Тимченко И. Е., Игумнова Е. М.* Управление эколого-экономическими процессами в интегральной модели прибрежной зоны моря // Морской гидрофизический журнал. 2011. № 1. С. 48–66.
8. 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.
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.* Бризовая циркуляция в Черноморском регионе // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 5. С. 23–36.
11. Сезонная и межгодовая изменчивость гидрофизических полей Черного моря, восстановленных на основе реанализа за период 1971–1993 гг. / В. В. Кныш [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 3. С. 433–446. EDN NWCJDF.
12. *Ефимов В. В., Анисимов А. Е.* Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе – численный реанализ региональной атмосферной циркуляции // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 3. С. 380–392. EDN NWCJAN.
13. *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.

14. *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.
15. *Ефимов В. В., Крупин А. В.* Бризовая циркуляция в районе Черного моря // Метеорология и гидрология. 2016. № 4. С. 18–26. EDN VSZHRL.
16. *Булгаков С. Н., Кортаев Г. К., Уайтхэд Дж. А.* Роль потоков плавучести в формировании крупномасштабной циркуляции и стратификации вод моря. Часть 1: Теория // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1996. Т. 32, № 4. С. 548–556.
17. *Кузнецов А. С.* Система оценки качества векторных данных и возможности антенных измерений течений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. Вып. 1. С. 50–57. EDN XQZIGT. doi:10.22449/2413-5577-2018-1-50-57

Поступила 17.04.2023 г.; одобрена после рецензирования 30.04.2023 г.; принята к публикации 03.05.2023 г.; опубликована 26.06.2023 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, **РИНЦ AuthorID: 860912; SPIN-код: 1838-7191; ORCID ID: 0000-0002-5690-5349; Scopus Author ID: 57198997777, kaskasev@mail.ru**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.