

Оценка характеристик сезонной изменчивости поля ветра у Южного берега Крыма по данным измерений с высокой временной дискретностью

А. С. Кузнецов *, А. В. Гармашов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: kuznetsov_as@mhi-ras.ru*

Аннотация

Целью исследования является выделение средних за 12-летний период мониторинга характеристик сезонной изменчивости поля ветра по данным измерений с высокой временной дискретностью, что обеспечило повышение точности измерителей характеристик ветра при синхронных исследованиях колебаний приводного ветра и прибрежного течения у Южного берега Крыма. Среднемноголетние характеристики прибрежного ветра в приводном слое атмосферы и их сезонная изменчивость выделены путем анализа материалов базы данных контактных измерений, выполненных в 2012–2023 гг. при проведении комплексного эксперимента со стационарной океанографической платформы в море у м. Кикинеиз. Выделенные характеристики ветра у побережья сопоставлены с известными климатическими характеристиками ветра в регионе. В сезонном диапазоне изменчивости спектральных характеристик выделены колебания ветра на периодах I–IV и VI сезонных гармоник. Энергетический пик колебаний на VI сезонной гармонике статистически достоверно выражен одновременно в спектрах ветра и прибрежного течения. На других участках спектров очевидны существенные различия в распределении энергии сезонных атмосферных и гидросферных колебаний. Синхронные временные ряды векторных характеристик изменчивости прибрежного ветра и течения обработаны в рамках идентичной информационной технологии. Во внутригодовом диапазоне изменчивости ветра выделен вклад муссонной составляющей, а также сезонные колебания прибрежного ветра, направленные вдоль склона горного хребта. Очевидно соответствие диапазона изменчивости исследуемых характеристик ветра в море у м. Кикинеиз и характеристик регионального поля ветра на суше, выделенных на метеостанциях Южного берега Крыма. Представленные результаты необходимы для комплексных исследований межгодовой изменчивости регионального поля ветра в целях оценки статистических связей с определенной изменчивостью прибрежного течения.

Ключевые слова: контактные измерения, поле ветра, сезонные колебания, энергетический спектр, Южный берег Крыма, Черное море

© Кузнецов А. С., Гармашов А. В., 2025



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 темам FNNN-2024-0016 «Исследование пространственно-временной изменчивости океанологических процессов в береговой, прибрежной и шельфовой зонах Черного моря под воздействием природных и антропогенных факторов на основе контактных измерений и математического моделирования» и FNNN-2024-0014 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, формирующих изменчивость физического состояния морской среды на различных пространственно-временных масштабах».

Для цитирования: Кузнецов А. С., Гармашов А. В. Оценка характеристик сезонной изменчивости поля ветра у Южного берега Крыма по данным измерений с высокой временной дискретностью // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 2. С. 53–66. EDN EYFFWQ.

Estimation of the Characteristics of the Wind Field Seasonal Variability Near the Southern Coast of Crimea from Measurements with High Temporal Discreteness

A. S. Kuznetsov *, A. V. Garmashov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

** e-mail: kuznetsov_as@mhi-ras.ru*

Abstract

The study is aimed to identify the average for the 12-year monitoring period characteristics of the wind field seasonal variability from measurements with high temporal discreteness. This increased the accuracy of wind characteristic meters during synchronous studies of near-water wind and coastal current variations near the Southern Coast of Crimea. The mean annual characteristics of the coastal wind in the near-water layer of the atmosphere and their seasonal variability were identified by analysing the materials of the database of *in situ* measurements made in 2012–2023 during a complex experiment from the stationary oceanographic platform offshore at Cape Kikineiz. The selected wind characteristics near the coast were compared with the known climate wind characteristics in the region. In the seasonal range of spectral characteristics variability, wind fluctuations at periods of seasonal harmonics I–IV and VI were identified. The energy peak of fluctuations at seasonal harmonic VI was statistically significant both in the wind spectra and coastal current. In the other parts of the spectra, significant differences in the energy distributions of seasonal atmospheric and hydrospheric variations were obvious. Synchronous time series of vector characteristics of coastal wind and current variability were processed using identical information technology. In the intra-annual range of wind variability, we revealed the contribution of the monsoon component as well as seasonal fluctuations of the coastal wind directed along the mountain ridge slope. The range of variability of the studied wind characteristics at sea near Cape Kikineiz was obviously consistent with the characteristics of the regional wind field on land, identified at meteorological stations of the Southern Coast of Crimea. The presented results are necessary for comprehensive studies of the interannual variability of the regional wind field in order to assess statistical relationships with certain variability of the coastal current.

Keywords: *in situ* measurements, wind field, seasonal variations, energy spectrum, Southern Coast of Crimea, Black Sea

Acknowledgments: The work was performed under state assignment of MHI RAS on topic FNNN-2024-0016 “Studies of spatial and temporal variability of oceanological processes in the coastal, near-shore and shelf zones of the Black Sea influenced by natural and anthropogenic factors on the basis of in situ measurements and numerical modelling” and FNNN-2024-0014 “Fundamental studies of interaction processes in the sea–air system that form the physical state variability of the marine environment at various spatial and temporal scales”.

For citation: Kuznetsov, A.S. and Garmashov, A.V., 2025. Estimation of the Characteristics of the Wind Field Seasonal Variability Near the Southern Coast of Crimea from Measurements with High Temporal Discreteness. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 53–66.

Введение

Экспериментальные исследования изменчивости ветра в приводном слое атмосферы и его влияния на циркуляцию вод прибрежной акватории у м. Кикинеиз Южного берега Крыма (ЮБК) начаты в 1929 г. [1–5] и продолжаются до настоящего времени [6–8]. При этом исследуется сложная совокупность вкладов разномасштабной изменчивости в структуру поля прибрежного ветра, формируемую при трансформации региональных барических условий орографией прилегающего к побережью горного массива, муссонным эффектом и местными ветрами термического происхождения.

Ранее на основе анализа экспериментальных данных выделен вклад бризовой циркуляции и склоновых ветров и представлены количественные оценки межсезонных различий спектральных характеристик суточной изменчивости ветра в прибрежной зоне ЮБК на суше и в море [6, 7]. Изменчивость ветровых условий у побережья вызывает перестройку структуры прибрежного течения [1, 4]. В случае явного доминирования вклада интенсивных гидродинамических возмущений, сформировавшихся у побережья, в квазистационарном течении у ЮБК возникает явление бимодальной модуляции направления вдольберегового потока вод [1, 5], особенности генезиса которого исследованы в [7, 8]. На основе экспериментальных данных исследован набор разномасштабных колебаний прибрежного ветра [7], формирующих поле ветра в приводном слое атмосферы.

Целью настоящей работы является исследование в прибрежной зоне у ЮБК средних за 12-летний период характеристик сезонной изменчивости поля ветра, а также выделение закономерностей и структурных особенностей в энергетических спектрах сезонных колебаний приводного ветра и прибрежного течения у м. Кикинеиз для оценки статистических связей.

Материалы и методы исследования

Контактные измерения характеристик поля ветра выполняются на стационарной океанографической платформе Черноморского гидрофизического подспутникового полигона (ЧГПП) Морского гидрофизического института (МГИ) РАН в Голубом заливе у м. Кикинеиз на удалении ~ 500 м от берега [6, 7]. Регионально-адаптированная система гидрометеорологического мониторинга ЧГПП МГИ включает аппаратный комплекс ежесекундных измерений характеристик поля ветра в море одновременно тремя комплектами измерителей,

установленными компактно на мачте океанографической платформы при высоте места ~ 18 м над уровнем моря. Используются два комплекта анеморумбомеров М-63 в составе метеокомплекса МГИ-6503 [9] и комплект измерителей модуля скорости и направления ветра ДВМ в составе комплекса КСГД [10]. Результаты измерений регистрируются на автономных накопителях информации, а при оперативном режиме работы также передаются по каналу радиосвязи с платформы на береговую рабочую станцию. Значения скорости приведены к стандартной высоте наблюдений 10 м [11] для условий логарифмического подслоя приводного ветра. Согласно результатам работы [12], значения параметра шероховатости морской поверхности у океанографической платформы определены в пределах 10^{-4} – 10^{-3} м. Коррекция скорости ветра выполнена при среднем значении параметра шероховатости морской поверхности, равном $5 \cdot 10^{-4}$ м.

По результатам инструментального мониторинга сформирована ежегодно пополняемая база данных ¹⁾ характеристик ветра в приводном слое атмосферы у м. Кикинеиз ЮБК. Исходный массив базы данных, сформированный за период 2012–2023 гг., содержит 105 192 среднечасовых значений вектора ветра, где каждое среднечасовое значение вычислено при векторном осреднении ежесекундных значений компонентов вектора ветра. Контроль качества измерений характеристик ветра осуществляется регулярно при сличении набора статистических и спектральных показателей сертифицированных первичных измерительных преобразователей, прошедших в установленном порядке метрологическую аттестацию, что при определенной избыточности информации позволило исключить из временных реализаций вклад сбойных значений и значимых систематических погрешностей измерений. Из исходного массива при векторном осреднении сформированы 4 383 пары среднесуточных компонентов вектора ветра при случайной погрешности измерений модуля скорости не более 0.1 м/с и направления ветра 3° [7].

Массивы векторных данных измерений характеристик ветра обрабатываются по методике, разработанной на базе стандартных методов математической статистики, спектрального анализа и цифровой фильтрации, включая центрирование векторных рядов. Алгоритм центрирования содержит процедуру векторного вычитания компонентов среднего вектора из текущих значений компонентов векторного ряда. Спектральный анализ изменчивости циркуляции ветра выполнен в рамках фильтровой оценки полного энергетического спектра колебаний через сглаживание периодограмм на основе программного обеспечения, разработанного в МГИ [6–8]. Для минимизации вклада искажений, возникающих при расчетах спектральных характеристик сезонной изменчивости поля ветра, в исходном массиве векторных данных методом цифровой фильтрации исключен вклад интенсивных колебаний с периодами от одних суток до трех недель. Структура колебания ветра в указанном диапазоне изменчивости исследована в работе [7].

¹⁾ 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.

Анализ структуры разномасштабной изменчивости характеристик поля ветра, представленных в работе [7], позволил оптимизировать порядок применения методики обработки при формировании соответствующих массивов для исследования сезонной изменчивости поля ветра. Для оценки средних за 12-летний период характеристик поля ветра использованы среднемесячные значения его характеристик, по которым также вычислены спектральные характеристики сезонных гармоник колебаний ветра ²⁾.

Закономерности пространственно-временной изменчивости ветровых условий исследованы на основе специальной обработки сформированных массивов данных за указанный 12-летний срок измерений. С этой целью к исходному временному ряду последовательно применяется процедура выборочной фильтрации данных. Набор параметров последовательной фильтрации (сглаживания) данных определяется выбором диапазона исследуемой изменчивости поля ветра. После выбора исследуемого диапазона изменчивости и соответствующих ему параметров фильтрации далее рассчитываются энергетический спектр и эмпирические функции плотности вероятности распределения направлений ветра, вычисленных после процедуры фильтрации данных. Например, в работе [7] исследован суточный диапазон изменчивости ветра и выбраны соответствующие ему параметры фильтрации. После исключения из исходного энергетического спектра интенсивных колебаний ветра с периодом ~ 1 сут в исходной эмпирической функции плотности вероятности распределения направлений ветра в суммарном вкладе ветра фактически исчезает направление $\sim 355^\circ$. При исключении из временного ряда вклада суточных колебаний ветра определено генеральное направление местных ветров с суточным периодом колебаний. Таким же образом последовательно исследуются другие диапазоны изменчивости прибрежного ветра, включая сезонный диапазон. При указанной обработке применена процедура последовательной фильтрации, использованная ранее в работе [13] при исследованиях крупномасштабных характеристик поля течений.

Результаты и обсуждение

В рамках использования нестандартной методики обработки векторно-осредненных рядов изменчивости ветра получены следующие результаты исследований средних характеристик ветра за 12-летний период измерений, спектральных характеристик его сезонной изменчивости, а также пространственно-временной структуры колебаний поля приводного ветра.

Средние за 12-летний период характеристики ветра. Средние характеристики северо-северо-восточного ветра ($\sim 25^\circ$) при скорости ~ 1.5 м/с выделены за период измерений 2012–2023 гг. и совпадают с оценками, полученными ранее в работе [7]. Указанные средние характеристики ветра сопоставлены с известными режимными (климатическими) характеристиками ветра в регионе. В работе [3] указано, что в холодный период года у м. Кикинеиз преобладают северо-восточные ветры. Характеристики крупномасштабной изменчивости

²⁾ Монин А. С., Каменкович В. М., Корт В. Г. Изменчивость Мирового океана. Ленинград : Гидрометеиздат, 1974. 262 с.

поля ветра ранее определялись при анализе материалов стандартных метеорологических наблюдений, архивных данных и результатов экспедиционных исследований. Выделенные оценки указанных средних характеристик ветра согласуются со значениями направления климатического поля ветра в Черноморском регионе, представленными в работе ³⁾, где отмечено преобладание на ЮБК ветров северной четверти в течение всего годового цикла. Характеристики типового поля приводного ветра вблизи северного побережья Черного моря, полученные при анализе синоптических карт ⁴⁾, а также результаты опубликованных ранее обобщений ^{5), 6), 7)} согласуются с климатическими характеристиками поля ветра на ЮБК, представленными в работе ³⁾. Результаты, полученные по нестандартной методике и в рамках стандартного подхода, традиционно используемого в метеорологии, различаются. Так, если направление среднего за 12-летний период измерений ветра соответствует румбам наибольшей повторяемости климатического ветра, то скорости ветра значительно ниже обычных стандартных оценок для региона.

Известно, что на прилегающем к побережью высокогорье, включая Бабуган-яйлу и Ай-Петри, вклад ветров северных румбов особенно значителен в холодный период года ⁵⁾. В это время на ЮБК по данным метеонаблюдений в Балаклаве, Ялте, Гурзуфе, Алуште и Судаке явно преобладают ветры северных румбов ⁵⁾. В холодный период года вклад местных ветров в суммарное поле прибрежного ветра снижается, что способствует уточнению характеристик регионального поля ветра. Результаты современных расчетов климатических и сезонных характеристик изменчивости поля ветра в Черноморском регионе, полученные на основе численного реанализа атмосферной циркуляции [14–16], демонстрируют, что у ЮБК в течение всего годового цикла выражены ветры северных румбов. Результаты разномасштабных модельных исследований циркуляции в атмосферном пограничном слое, включая местные ветры, мезомасштабные и синоптические процессы [14–18], использованы ранее при сопоставлении в работах [6, 7].

Спектральные характеристики сезонной изменчивости ветра. В настоящей работе характеристики сезонной изменчивости ветра исследуются по результатам статистического и спектрального анализа натурных данных, полученных при инструментальном мониторинге изменчивости поля ветра за 2012–2023 гг.

³⁾ Климат Украины / Под ред. Г. Ф. Прихотько, А. В. Ткаченко, В. Н. Бабиченко. Ленинград : Гидрометеиздат, 1967. 413 с.

⁴⁾ Чернякова А. П. Типовые поля ветра Черного моря // Сборник работ Бассейновой секции гидрометеорологической обсерватории Черного и Азовского морей. Ленинград : Гидрометеиздат, 1965. Вып. 3. С. 78–121.

⁵⁾ Пенюгалов А. В. Климат Крыма: опыт климатического районирования. Симферополь : Крымгосиздат, 1930. 178 с. (Материалы по водному хозяйству Крыма ; вып. 6).

⁶⁾ Зац В. И., Лукьяненко О. Я., Яцевич Г. В. Гидрометеорологический режим Южного берега Крыма. Ленинград : Гидрометеиздат, 1966. 120 с.

⁷⁾ Климат и опасные гидрометеорологические явления Крыма / Под ред. К. Т. Логвинова, М. Б. Барабаш. Ленинград : Гидрометеиздат, 1982. 318 с.

Как известно, изменчивость атмосферной циркуляции в Черноморском регионе частично связана с особенностями механизма внутригодового развития муссонной циркуляции. В холодный период года (ноябрь – апрель) скорости местных ветров у ЮБК в суточном диапазоне изменчивости существенно снижаются по сравнению с периодом интенсивной бризовой циркуляции (май – октябрь), но при этом значительно возрастает интенсивность колебаний ветра в диапазоне периодов от нескольких суток до трех недель [7]. Интенсивный вклад разномасштабных атмосферных колебаний постоянно искажает характеристики регионального поля ветра в течение всего годового цикла. Для получения достоверных оценок сезонной изменчивости ветра сформирован набор векторно-осредненных временных рядов, на основании которых последовательно исключен вклад интенсивных разномасштабных ветров.

Полный энергетический спектр сезонных колебаний ветра рассчитан по данным среднемесячного ряда. В спектре распределения плотности энергии выделены достоверные энергетические максимумы колебаний ветра на годовом периоде и сезонных гармониках. Отметим, что на определенном этапе спектральной обработки суммарный энергетический вклад интенсивных колебаний ветра на периодах III и IV сезонных гармоник сконцентрирован в виде единого спектрального пика на периоде ~ 100 сут, который показан на рис. 1, *a* красной линией.

При комплексных исследованиях на стационарной океанографической платформе ЧПП МГИ наряду с мониторингом характеристик поля ветра проводятся инструментальные измерения характеристик прибрежного течения от поверхностного до придонного слоя [7, 8]. Для сопоставления на рис. 1, *b* представлен среднегодовое полное энергетическое распределение сезонных колебаний поверхностного течения на гидрологическом горизонте 5 м. В спектре течения выделены достоверные энергетические максимумы колебаний на годовом (I) периоде, III и VI сезонных гармониках. При сопоставлении синхронно измеренных характеристик сезонных колебаний ветра и течения установлено, что спектральный пик колебаний на VI сезонной гармонике на периоде ~ 64 сут статистически достоверно выражен в спектре ветра и прибрежного течения. На других спектральных участках выявлены структурные различия в распределении энергии атмосферных и гидросферных колебаний. Спектральный пик колебаний течения вблизи II сезонной гармоники выражен слабо (рис. 1, *a*), в отличие от соответствующего пика интенсивных колебаний ветра (рис. 1, *b*). Энергетический пик колебаний поверхностного течения вблизи II сезонной гармоники слабо выражен и выделяется на участке спада энергии колебаний с основной годовой гармоникой. Результаты спектрального анализа сезонной изменчивости ветра и течения позволяют в дальнейшем оценить статистические связи, а также закономерности энергетического взаимодействия ветра и течения в прибрежной зоне моря.

Закономерности внутригодовой изменчивости средней за 12-летний период характеристики ветра. Закономерности изменчивости указанной характеристики ветра выделены при обработке среднемесячных значений компонентов поля ветра, осредненных за 12-летний период измерений. Для минимизации вклада интенсивных сезонных колебаний в диапазоне периодов III–VI сезонных гармоник выполнена процедура векторного осреднения (сглаживания)

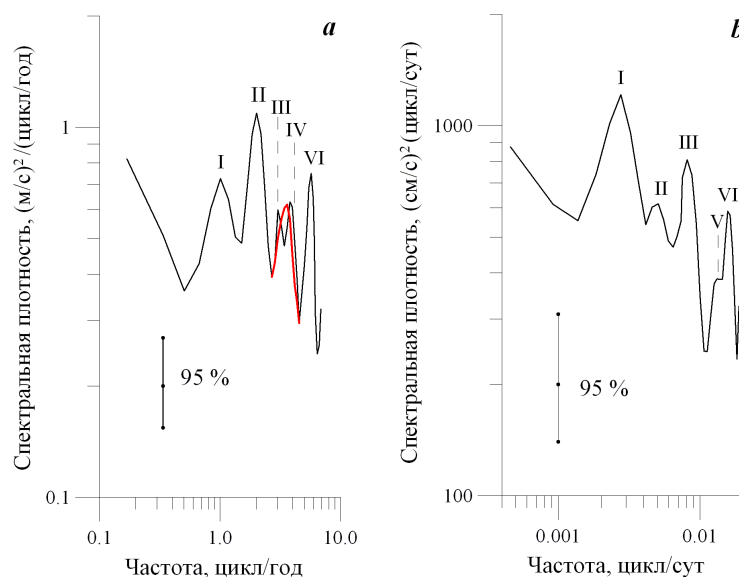
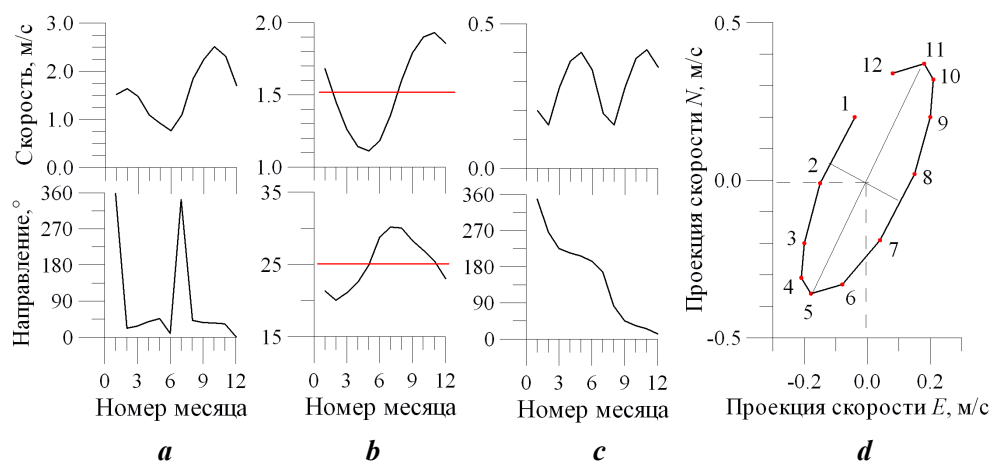


Рис. 1. Средние за 12-летний период измерений полные энергетические спектры сезонной изменчивости: *a* – ветра в приповерхностном слое атмосферы с дополнительным фрагментом спектрального пика (красная линия); *b* – течения в приповерхностном слое моря при соответствующих 95%-ных доверительных интервалах (I–VI – номер сезонной гармоника колебаний)

Fig. 1. Average for the 12-year measurement period full energy spectra of seasonal variability of: *a* – wind at the near-surface layer of atmosphere with an additional fragment of spectral peak (red line); *b* – current in the near-surface sea layer at corresponding 95% confidence intervals (I–VI are the numbers of seasonal harmonics of fluctuations)

исходной реализации, а затем процедура центрирования сглаженного средне-многолетнего ряда ежемесячных данных изменчивости ветра. Далее представлены результаты обработки, в процессе которой среднемесячные значения модуля скорости и направления ветра за каждый год последовательно векторно осреднялись помесечно за весь 12-летний цикл измерений. Сформированные таким образом исходные временные ряды среднемесячных значений вектора ветра представлены на рис. 2, *a*, где максимальные значения среднемесячного модуля скорости ветра (~ 2.5 м/с) выделены в октябре, а минимальные (~ 0.8 м/с) – в июне. Как следует из рис. 2, *a*, во внутригодовой изменчивости направления среднего ветра доминируют ветры северных румбов.

Сезонный ход модуля скорости и направления ветра представлен на рис. 2, *b* при исключении из исходной реализации вклада интенсивных колебаний ветра в диапазоне периодов III–VI сезонных гармоник. В изменчивости временного ряда модуля скорости ветра (рис. 2, *b*) выражен годовой период колебания, где среднее за 12-летний период значение модуля скорости ветра, равное ~ 1.5 м/с, изменяется в пределах ± 0.4 м/с, максимальные



Р и с . 2 . Осредненные за 12-летний период измерений временные последовательности внутригодовой изменчивости среднемесячных компонентов вектора ветра: *a* – исходного ряда; *b* – сглаженного ряда (красные линии – векторно-осредненные за 12 лет годовые значения соответствующих компонентов вектора); *c* – центрированного ряда (сезонная изменчивость скорости ветра для каждого временного ряда – *сверху*, направления – *снизу*); *d* – годограф сезонного хода центрированного вектора ветра (цифрами обозначен номер месяца)

Fig. 2. Average for the 12-year measurement period time sequences of intra-annual variability of monthly mean wind vector components: *a* – original series; *b* – smoothed series (red lines are vector-averaged for 12 years annual values of corresponding vector components); *c* – centred series (seasonal variability of wind speed for each time series – *top* and directions – *bottom*); *d* – hodograph of seasonal variability of centred wind vector (the numerals denote month number)

значения модуля скорости ветра выделены в ноябре, минимальные – в мае. При этом значение направления ($\sim 25^\circ$) северо-северо-восточного ветра изменяется в пределах $\pm 5^\circ$. Максимальные значения отклонений направления ветра к востоку выделены в июле – августе, а к западу – в январе – феврале.

Указанные временные ряды изменчивости среднемесячных вариаций модуля скорости и направления центрированного вектора ветра представлены на рис. 2, *c*. Во временном ряду изменчивости центрированных значений модуля скорости ветра (рис. 2, *c*, *сверху*) выражен вклад II сезонной гармоник колебания, где максимальные значения модуля скорости центрированного вектора ветра выявлены в мае и ноябре, а минимальные – в феврале и августе. Во временном ряду изменчивости направления центрированного вектора ветра (рис. 2, *c*, *снизу*) выделен годовой цикл разворота вектора на 360° . Закономерности месячной изменчивости центрированного вектора ветра наглядно демонстрирует годограф, построенный в правосторонней ортогональной системе координат, ориентированной на север (рис. 2, *d*). Годограф имеет форму эллипса, главная ось которого ориентирована вдоль среднемноголетнего направления ветра при левостороннем развороте модуля скорости ветра в течение годового цикла. Максимальному значению модуля скорости центрированного вектора

ветра соответствует точка 11 (ноябрь), а минимальному – точка 5 (май). В обоих случаях доминирует северо-северо-восточное направление ветра.

Актуальность и физический смысл натурных исследований энергонесущих частот сезонных колебаний определены в работе [19], где на основе многолетних дистанционных спутниковых измерений изменчивости уровня Черного моря показано, что главные спектральные максимумы осцилляций уровня моря на периодах I и II сезонных гармоник обусловлены соответствующими сезонными изменениями характеристик ветра в регионе. Многолетний массив данных эксперимента, полученный при контактном мониторинге характеристик ветра, позволяет целенаправленно продолжить статистические исследования многолетних пространственно-временных закономерностей межгодовой изменчивости ветра в прибрежной зоне моря у ЮБК.

Закономерности пространственно-временной ориентации сезонных колебаний прибрежного ветра у ЮБК. Суммарное поле ветра в регионе формируется при взаимодействии регионального ветра с локальными и местными ветрами. Временные масштабы интенсивной изменчивости суммарного поля ветра в приводном слое атмосферы у м. Кикинеиз известны по результатам спектрального анализа данных долгосрочных метеонаблюдений со стационарной океанографической платформы на Черноморском полигоне [6, 7].

На основании временного ряда данных об изменчивости направлений поля ветра у побережья достоверно исследован состав эмпирической функции плотности вероятности распределения направлений прибрежного ветра (далее – эмпирическая функция), вычисленной в угловых сегментах $\pm 5^\circ$ на базе 105 192 среднечасовых данных ¹⁾ (рис. 3, а). В исходной эмпирической функции очевиден вклад трех основных направлений ветра: востоко-северо-восточных, западо-юго-западных и северных румбов, которые имеют различия в соответствующих пиковых значениях плотности вероятности.

Для устранения искажений, вносимых квазистационарным средним за 12-летний период измерений северо-северо-восточным ветром при модуле скорости 1.5 м/с, выполнено центрирование исходного ряда. Результаты процедуры центрирования представлены на рис. 3, б, где плотность вероятности вклада ветров востоко-северо-восточных ($\sim 75^\circ$) и западо-юго-западных ($\sim 245^\circ$) румбов имеет близкие пиковые значения. Далее, следуя алгоритму обработки, исследуется вклад колебаний ветра на периодах 1–3 сут в структуру эмпирической функции. На рис. 3, в представлены результаты этого этапа обработки после цифровой фильтрации центрированного временного ряда, во время которой исключен вклад колебаний ветра на периодах от 1 до 3 сут. При этом плотность вероятности вклада ветров востоко-северо-восточных и западо-юго-западных румбов имеет близкие пиковые значения.

На заключительном этапе обработки после удаления методом цифровой фильтрации вклада интенсивных колебаний ветра на периодах от 4 до 28 сут, в составе временного ряда присутствует вклад колебаний ветра только на периодах указанных сезонных гармоник. Рассчитанная при этом итоговая эмпирическая функция представлена на рис. 3, д, где значение интеграла функции в диапазоне $75 \pm 90^\circ$ равно $\sim 49.6\%$, а в диапазоне $245^\circ \pm 90^\circ$ составляет $\sim 50.4\%$.

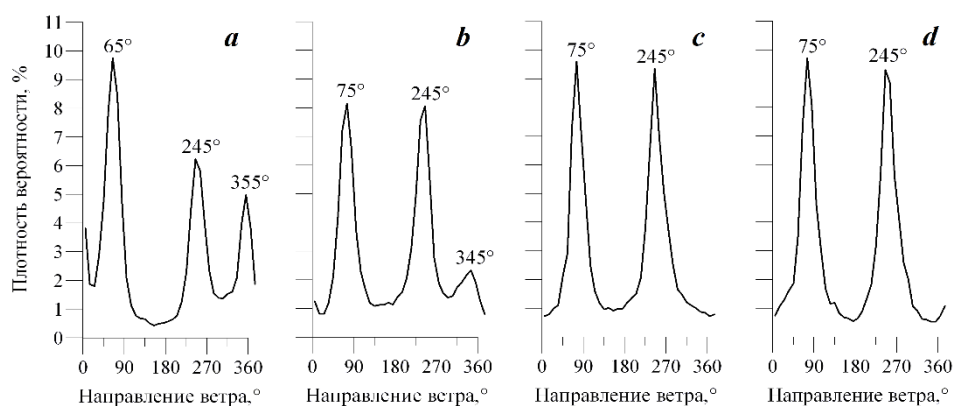


Рис. 3. Эмпирические функции плотности вероятности распределения направлений ветра в приводном слое атмосферы, вычисленные за период 2012–2023 гг.: *a* – по исходным данным; *b* – по центрированным данным; *c* – по центрированным данным при исключении вклада колебаний в диапазоне периодов до трех суток; *d* – по центрированным данным о колебаниях сезонных гармоник

Fig. 3. Empirical probability density functions of the distribution of wind directions in the near-water atmosphere layer calculated for 2012–2023: *a* – from the initial data; *b* – from centred data; *c* – from centred data when excluding the contribution of fluctuations in the range of periods up to three days; *d* – from centred data on the fluctuations of seasonal harmonics

По результатам представленной обработки выделены узконаправленные возвратно-поступательные колебания ветра востоко-северо-восточных и западо-юго-западных румбов, ориентированные вдоль южного склона прилегающей к побережью гряды Крымских гор.

Установлено, что в море у м. Кикинеиз в приводном слое атмосферы пространственно-временная структура вдольбереговых сезонных колебаний ветра существует постоянно. Подобная структура вдольберегового переноса воздушных масс в приземном слое атмосферы на суше выделена на метеостанциях Южного берега Крыма и исследована в работе [6], в которой отмечены отличия, обусловленные местными особенностями рельефа.

По результатам выполненных исследований сезонной изменчивости прибрежного ветра у ЮБК можно оценить связь энергетических максимумов сезонных колебаний ветра с определенными физическими процессами в Черноморском регионе. Существенный вклад вносит сезонная изменчивость регионального поля ветра, которая связана с сезонными изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции в Европейском регионе и особенностями механизма внутригодового развития муссонной циркуляции [4]. В работе [16] на основе численного моделирования отмечено влияние Крымских гор на ветровой режим региона и показано, что при определенных сезонных условиях возможно формирование вдольберегового ветра и временно создается мезомасштабная зона возмущения его скорости. Согласно представленным эмпирическим результатам исследований, квазистационарный вдольбереговой поток воздуха существует постоянно, изменяясь в диапазонах мезомасштабных, синоптических и

сезонных колебаний ветра. Исключение составляет диапазон суточных колебаний ветра.

Полученные результаты необходимы для исследований статистических связей межгодовых колебаний прибрежного течения Черного моря [20] с соответствующими колебаниями ветра в приводном пограничном слое атмосферы.

Заключение

Разработана и применена информационная технология долгосрочных комплексных исследований изменчивости ветровых условий и циркуляции вод в море у побережья при синхронных измерениях векторных характеристик с высокой временной дискретностью. По результатам анализа материалов базы данных инструментального мониторинга, выполненного в 2012–2023 гг. в море у м. Кикинеиз, выделены закономерности сезонной изменчивости прибрежного ветра в приводном слое атмосферы у Южного берега Крыма. Эмпирические закономерности сезонных колебаний поля ветра, выделенные в настоящей работе, позволяют сделать следующее заключение. Совокупность сезонных, синоптических и мезомасштабных колебаний прибрежного ветра в приводном слое атмосферы имеет выраженную ориентацию потока воздуха вдоль южного склона прилегающей к побережью гряды Крымских гор в течение всего года. Интенсивные местные ветры ориентированы главным образом по нормали к горному склону, прилежащему к побережью. Новые результаты исследований изменчивости ветра в приводном слое атмосферы имеют практическое значение для дальнейшего изучения вклада прибрежного ветра в формирование сезонной и межгодовой изменчивости прибрежного течения Черного моря. Подобные исследования необходимы для развития и верификации модельных прогностических систем динамики прибрежных вод и эколого-экономического мониторинга прибрежной акватории с целью устойчивого социально-экономического развития приморского региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов Р. Н., Богданова А. К.* К вопросу о морских прибрежных течениях // Труды Морского гидрофизического института. Москва : Изд-во АН СССР, 1953. Вып. 3. С. 43–68.
2. *Иванов Р. Н.* Влияние берега на направление ветрового поверхностного течения // Труды Морского гидрофизического института. Москва : Изд-во АН СССР, 1957. Т. XI. С. 84–96.
3. *Потапова Е. Н., Потапов Н. С.* Особенности циркуляции на южной оконечности Крыма // Труды Морского гидрофизического института. Москва : Изд-во АН СССР, 1959. Т. XVI. С. 29–43.
4. 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. Вып. 3. С. 9–52. EDN ZCNMDR.
5. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с. END XPERZR.
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.

7. 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.
8. 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.
9. 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 PTZNWJ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-4-62-72>
10. Аппаратура для мониторинга гидрометеорологических параметров на океанографической платформе в Кацивели / Ю. Н. Толочков [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.
11. Thomas B. R., Kent E. C., Swail V. R. Methods to homogenize wind speeds from ships and buoys // International Journal of Climatology. 2005. Vol. 25, iss. 7. P. 979–995. <https://doi.org/10.1002/joc.1176>
12. Соловьев Ю. П., Иванов В. А. Предварительные результаты измерений атмосферной турбулентности над морем // Морской гидрофизический журнал. 2007. № 3. С. 42–61.
13. Озмидов Р. В. Некоторые данные о крупномасштабных характеристиках поля горизонтальных компонент скорости в океане // Известия АН СССР. Серия геофизическая. 1964. № 11. С. 1708–1719.
14. 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.
15. 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.
16. 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. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-2-134-146>
17. Ефимов В. В., Барабанов В. С. Бризовая циркуляция в Черноморском регионе // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 5. С. 23–36.
18. 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.
19. 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>
20. Кузнецов А. С., Иващенко И. К. Среднегодовые спектральные характеристики долгопериодных колебаний прибрежного течения у Южного берега Крыма // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 1. С. 36–49. EDN KKOLDF.

Поступила 01.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 12.12.2024 г.;
принята к публикации 27.03.2025 г.; опубликована 30.06.2025 г.

Об авторах:

Кузнецов Александр Сергеевич, ведущий научный сотрудник, заведующий отделом гидрофизики шельфа, Морской гидрофизический институт РАН (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

Гармашов Антон Викторович, старший научный сотрудник отдела океанографии, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 8941-9305**, **ORCID ID: 0000-0003-4412-2483**, **Scopus Author ID: 54924806400**, garmashov@mhi-ras.ru

Заявленный вклад авторов:

Кузнецов Александр Сергеевич – формулировка цели и задачи исследований, разработка информационной технологии, организация и участие в проведении эксперимента, обработка и анализ натурных данных, обсуждение материалов статьи и результатов работы, подготовка текста статьи

Гармашов Антон Викторович – организация и участие в проведении эксперимента, обработка и анализ натурных данных, обсуждение материалов статьи и результатов работы

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.