

## Среднегодовое сезонная изменчивость прибрежного течения у Южного берега Крыма в 2002–2020 годах

А. С. Кузнецов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ kuznetsov\_as@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 10.01.2022; одобрена после рецензирования 17.01.2022;  
принята к публикации 27.01.2022

### Аннотация

*Цель.* Основной целью настоящей работы является систематизация новых научных знаний о режиме, закономерностях и особенностях сезонной циркуляции вод прибрежной акватории Черного моря в динамически активной зоне у Южного берега Крыма, полученных за последнее десятилетие по данным многолетнего натурного эксперимента.

*Методы и результаты.* Современные результаты получены при комплексной обработке и анализе натуральных данных мониторинга прибрежных течений за 2002–2020 гг. на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне Морского гидрофизического института. Инструментальные измерения выполнялись кластером автономных эйлеровых измерителей течений по верифицированной информационной технологии мониторинга со стационарной океанографической платформы в открытом море на удалении 0,5 км от берега. Материалы сформированной многолетней базы данных мониторинга течений прошли метрологический контроль качества измерений и государственную регистрацию. В прибрежной зоне исследованы характеристики вдольберегового течения западо-юго-западного направления при средней за 19 лет скорости потока 8,1 см/с, максимальной в приповерхностном слое. При распространении вихре-волновых колебаний у побережья происходит трансформация эллиптического вида орбитальной циркуляции в систему вдольбереговых возвратно-поступательных колебания вод соответствующих масштабов, коллинеарных с существующим прибрежным течением. Существование бимодального распределения повторяемости направления вдольберегового течения зависит от интенсивности вклада в циркуляцию вод вихре-волновых возмущений. Бимодальная структура течения возникает при значениях модуля орбитальных скоростей возмущения, больших модуля скорости вектора мономодального вдольберегового течения.

*Выводы.* По результатам спектрального анализа систематизирован энергетический вклад разномасштабных колебаний прибрежных вод в изменчивость стационарного вдольберегового течения у м. Кикинеиз. При анализе среднегодовое частотных спектров распределения плотности кинетической энергии колебаний вод прибрежного экотона статистически достоверно выделены интенсивные сезонные колебания течения годового периода, а также колебания вблизи второй и третьей годовых гармоник. Показано, что крупномасштабная изменчивость квазистационарного прибрежного течения определяется динамикой вод шельфово-склоновой зоны Черного моря, а на меньших масштабах подвержена влиянию локальных ветровых условий.

**Ключевые слова:** Черное море, инструментальный мониторинг течений, циркуляция прибрежных вод, сезонные колебания, спектр кинетической энергии

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № 0555-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

Для цитирования: Кузнецов А. С. Среднегодовое сезонная изменчивость прибрежного течения у Южного берега Крыма в 2002–2020 годах // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 2. С. 151–164. doi:10.22449/0233-7584-2022-2-151-164

## Mean Long-Term Seasonal Variability of the Coastal Current at the Crimea Southern Coast in 2002–2020

A. S. Kuznetsov

*Marine Hydrophysics Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

✉ kuznetsov\_as@mhi-ras.ru

### Abstract

**Purpose.** The study is aimed at systematizing a new scientific knowledge on the regime, regularities and features of seasonal water circulation in the Black Sea coastal zone, i.e. in the dynamically active area near the Southern coast of Crimea. The data for the past decade were obtained in course of a long-term *in situ* experiment.

**Methods and Results.** The presented results were obtained by means of complex processing and analyzing the data on the currents monitored at the Black Sea hydrophysical sub-satellite test site of Marine Hydrophysical Institute of RAS in 2002–2020. Instrumental measurements were performed by a cluster of the autonomous Euler current meters using a verified monitoring information technology from a stationary oceanographic platform in the deep sea at a distance 0.5 km from the coast. The information of the generated long-term currents monitoring database has been confirmed by the metrological control of measurements quality and has got state registration. In the coastal zone, parameters of the along-coastal current directed to the west-south-west were studied at the average (for 19 years) flow velocity 8.1 cm/s which was maximal in the near-surface layer. When the eddy-wave oscillations propagate near the coast, the elliptical orbital circulation is transformed into a system of the along-coastal reciprocal water oscillations of the corresponding scales which are collinear to the existing coastal current. The existence of a bimodal distribution of occurrence frequency of the along-coastal current direction depends on intensity of contribution of the eddy-wave disturbances to water circulation. The bimodal structure of a current arises at such modulus values of the perturbation orbital velocities that exceed the one of the velocity vector of the monomodal along-coastal current.

**Conclusions.** Based on the results of spectral analysis, the energy contribution of the coastal water different-scale fluctuations to variability of the stationary along-coastal current near the Cape Kikineiz was systematized. Analysis of the long-term average frequency spectra of distribution of the kinetic energy density of water oscillations in the coastal ecotone permitted to identify statistically reliably the intense seasonal current fluctuations for an annual period, as well as the fluctuations near the second and third annual harmonics. It is shown that large-scale variability of the quasi-stationary coastal current is controlled by water dynamics in the shelf-slope zone of the Black Sea, whereas on smaller scales, it is affected by influence of the local wind conditions.

**Keywords:** Black Sea, instrumental monitoring of currents, coastal water circulation, seasonal fluctuations, kinetic energy spectrum

**Acknowledgements:** The research was carried out within the framework of the state assignment of FRC MHI on theme No. 0555-2021-0005 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes which determine functioning and evolution of the Black and Azov seas coastal ecosystems”.

**For citation:** Kuznetsov, A.S., 2022. Mean Long-Term Seasonal Variability of the Coastal Current at the Crimea Southern Coast in 2002–2020. *Physical Oceanography*, 29(2), pp. 139-151. doi:10.22449/1573-160X-2022-2-139-151

### Введение

Южный берег Крыма (ЮБК) является уникальной саморазвивающейся ландшафтной структурой приморского региона. У ЮБК в зоне сопряжения суши и вод шельфа на глубинах до 70 м сосредоточен прибрежный экотон, где

наблюдаются специфические биоценозы, концентрирование и усиление разнообразия морской жизни [1]. В последние годы наряду с существенным возрастанием показателей жизнедеятельности и потребления обществом природно-ресурсного потенциала наблюдается увеличение числа природных стихийных бедствий и техногенных кризисных ситуаций, что способствует интенсивному развитию в прибрежном регионе природно-антропогенных процессов. Ливневые стоки вод и регулярные сбросы промышленно-бытовых отходов выносят с суши в прибрежную зону моря у ЮБК массу загрязнений антропогенного происхождения [2]. В таких условиях прибрежный экотон подвержен постоянной деградации. Превышения норм предельно допустимых концентраций загрязнений вод существенно снижают возможности самоочищения прибрежного экотона моря, что в итоге наносит невосполнимый ущерб всей экосистеме региона. Совокупность знаний о динамике климатических, гидрометеорологических и гидрофизических факторов<sup>1, 2</sup> [3] позволяет учитывать вклад изменчивости природной среды при решении задач устойчивого развития этого уникального приморского региона. Результаты комплексного мониторинга динамически активной природной системы позволяют оперативно оценить эволюцию состояния акватории прибрежного экотона. Своевременные управленческие решения для обеспечения мониторинга кризисных ситуаций, оценок степени рациональности хозяйственного освоения и возможностей дальнейшего устойчивого развития приморского региона невозможны без достоверных научных знаний о специфическом режиме и особенностях циркуляции вод прибрежного экотона.

Интенсивная динамика вод характерна для различных морфологических структур прибрежных зон российской части Черного моря, она активно исследуется Морским гидрофизическим институтом (МГИ) РАН и Институтом океанологии РАН на стационарных и оперативных морских полигонах в различных физико-географических условиях [4–10]. Сезонная изменчивость уровня Черного моря в основном определяется соотношением составляющих годового водного баланса [11], а сезонные колебания течений на годовом периоде и его гармониках связаны с годовым ходом солнечной радиации при сезонных изменениях состояния гидросферы, атмосферы и ветровой циркуляции [12]. В настоящее время особенности сезонных и междугодичных колебаний течений Черного моря остаются недостаточно изученными. Основной причиной такого состояния является дефицит репрезентативных данных длительных натурных измерений течений в различных физико-географических условиях на годовых и более продолжительных временных масштабах. Систематизация и получение новых научных результатов по исследованиям характеристик субинерционной, сезонной и междугодичной изменчивости региональных течений в Черном море является актуальной задачей. Согласно результатам ранних натурных экспериментов, систематизированным в монографии [12], обособленная прибрежная зона шельфа имеет очень изменчивый характер течений [13], при этом в статистических характеристиках режима прибрежных течений выражено бимодальное распределение повторяемости направления течений параллельно береговой черте<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Блатов А. С., Иванов В. А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря (на примере Южного берега Крыма) / Отв. ред. Н. А. Пантелеев. Киев : Наукова думка, 1992. 242 с.

<sup>2</sup> Изменения земных систем в Восточной Европе / Отв. ред. В. И. Лялько. Киев, 2010. 582 с.

<sup>3</sup> Зац В. И., Лукьяненко О. Я., Яцевич Г. В. Гидрометеорологический режим Южного берега Крыма. Л. : Гидрометеониздат, 1966. 120 с.

[14–21]. Бимодальное распределение в большинстве работ объясняется существованием в узкой прибрежной зоне сильной антициклонической завихренности течений, а в [18] – режимом местных ветров.

В настоящей работе систематизированы и дополнены результаты исследований годовой и среднемноголетней сезонной изменчивости структуры, режима и характеристик циркуляции вод прибрежного экотона у ЮБК, полученные за последнее десятилетие по данным многолетнего натурального эксперимента [22–25]. Результаты статистического и спектрального анализа позволили достоверно оценить режимные характеристики, спектральный состав распределения плотности кинетической энергии и вклад колебаний течения в сезонном диапазоне изменчивости.

### Материалы и методы

Исследования течений, внутреннего волнения, турбулентности, уровня и волнения морской поверхности, а также гидрометеорологических условий на постоянной основе осуществляются на стационарном Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне МГИ, расположенном в Голубом заливе у м. Кикинеиз ЮБК [8, 26]. Инструментальные измерения прибрежных течений выполняются по верифицированной информационной технологии мониторинга кластером автономных эйлеровых измерителей на гидрологических горизонтах 5, 10, 15, 20 м со свайного основания океанографической платформы в море на удалении 0,5 км от берега при глубине места 28 м [27, 28]. Автономные измерители МГИ-1308 используются в режиме векторного осреднения течений за временной интервал 1 или 5 мин при ежесекундных измерениях компонентов вектора. Вертикальная антенна измерителей с фиксированной апертурой позволила синхронно исследовать пространственную структуру и режимные характеристики сдвигового по глубине течения в присутствии вклада интенсивных волновых, вихревых и турбулентных возмущений.

Детальная съемка рельефа дна акватории полигона МГИ была выполнена в 1977 г. Последующие съемки рельефа дна по настоящее время демонстрируют неизменность форм донного рельефа [23], что наряду с консервативностью климатических факторов и многолетней устойчивой цикличностью динамики анемобарических условий региона [3] обеспечивает ежегодное единообразие природных условий измерений. Оперативный контроль метрологических характеристик, методическое и регламентное сопровождение мониторинга при соблюдении постоянства и единообразия условий и средств измерений обеспечили метрологическое единство долгосрочных измерений при достижении предельной точности измерений компонентов течений. Служба метрологии и стандартизации МГИ в стационарных лабораторных условиях обеспечила нормативную аттестацию инструментальных погрешностей первичных измерительных преобразователей. В интервалах между лабораторными поверками выполнялся контроль качества измерений по сличениям синхронных показаний кластера измерителей при методических постановках *in situ* [25, 27]. Применение процедуры комплексной обработки совокупности векторных данных измерительной антенны гарантированно исключило вклад сбойных значений, значимых методических, систематических, в том числе аддитивных, мультипликативных и других дополнительных погрешностей измерений. Высокая точность измерений векторно-осредненных данных позволила досто-

верно исследовать режимные характеристики и изменчивость прибрежного течения в диапазоне сезонных и междугодичных колебаний. Погрешность определения осредненных значений модуля скорости не превышала 0,1 см/с и направления течения  $3^\circ$  [28].

Кардинальной методической проблемой при исследованиях изменчивости режима течений на мелководье в условиях развитой динамики приповерхностного и придонного пограничных слоев является учет вклада интенсивных высокочастотных флуктуаций потока, вносимых ветровым волнением, неустойчивостью течений, турбулентностью и другими факторами с периодами колебаний от единиц до десятков секунд. Для устранения вклада таких возмущений использован штатный микропроцессор автономного измерителя, где в реальном масштабе времени проводилось накопление исходных ежесекундных измерений компонентов вектора (проекций на ортогональные оси) с их последующим осреднением и регистрацией результатов за базовый временной интервал 1 или 5 мин. Дальнейшее векторное осреднение накопленных базовых данных измерителей проводилось по завершению очередного этапа эксперимента. По результатам интеллектуальной деятельности МГИ была сформирована единая структура базы данных 19-летнего мониторинга характеристик прибрежных течений у м. Кикинеиз за 2002–2007 гг.<sup>4</sup>, 2008–2015 гг.<sup>5</sup>, 2016–2019 гг.<sup>6</sup> и 2020 г., прошедшая метрологический контроль качества измерений.

Генеральная совокупность многолетних последовательностей векторно-осредненных значений течений в полном объеме использована при статистическом и спектральном анализе. Спектральный анализ хронологических рядов течений выполнен в рамках линейной (фильтровой) оценки спектра через сглаживание периодограмм с использованием процедуры быстрого преобразования Фурье<sup>7</sup> [13]. Выбор соответствующих типов и параметров цифровой фильтрации сформированных векторных рядов исключил возможность вклада в исследуемые спектры энергии других, присутствующих, но не входящих в исследуемый спектральный диапазон интенсивных колебаний течения.

### Результаты и обсуждение

Акватория Черноморского гидрофизического подспутникового полигона МГИ расположена у ЮБК между зонами влияния квазистационарного Севастопольского и Крымского антициклонических вихревых образований [29].

---

<sup>4</sup> База данных мониторинга структуры прибрежных течений Черного моря у мыса Кикинеиз Южного берега Крыма за 2002–2007 гг. [Электронный ресурс] / А. С. Кузнецов, В. В. Зима ; ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН». Электрон. дан. Москва, 2021. № гос. регистрации № 2021621800.

<sup>5</sup> 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 [Электронный ресурс] / А. С. Кузнецов, В. В. Зима ; ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН». Электрон. дан. Москва, 2019. № гос. регистрации 2019620377.

<sup>6</sup> База данных мониторинга поля течений прибрежной зоны Черного моря у Южного берега Крыма за 2016–2019 гг. [Электронный ресурс] / А. С. Кузнецов, В. В. Зима ; ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН». Электрон. дан. Москва, 2020. № гос. регистрации 2020621445.

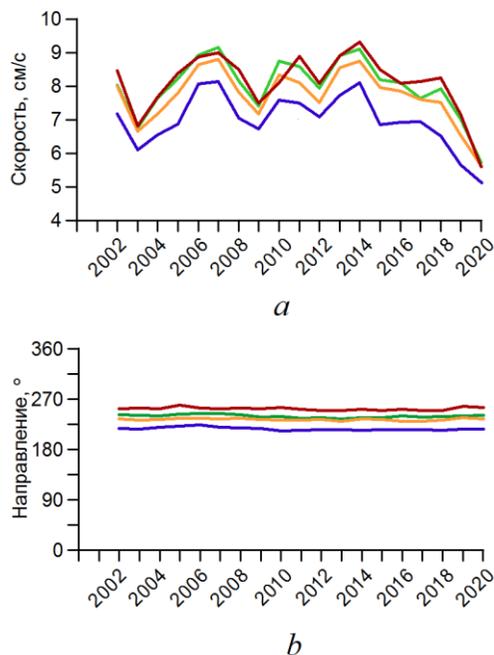
<sup>7</sup> *Коняев К. В.* Спектральный анализ случайных океанологических полей. Л. : Гидрометеодат, 1981. 207 с.

К югу от Крыма на траверзе м. Кикинеиз выражена прибрежная периферия Основного Черноморского течения (ОЧТ) с областью максимумов скорости течений циклонической направленности [12]. Эта область интенсификации ОЧТ расположена на участке сужения континентального склона в центральной части моря между Крымским п-овом и Анатолийским побережьем.

Первоочередной задачей при исследованиях динамики вод прибрежного экотона у ЮБК является систематизация новых представлений о режиме, структуре и закономерностях циркуляции вод, полученных на полигоне у м. Кикинеиз за последнее десятилетие при анализе статистических характеристик квазистационарного течения [22–25]. Ранее существование в прибрежной зоне у ЮБК мономодального течения практически не обсуждалось. В [19, 21] утверждается, что в прибрежных зонах Кавказского, Крымского и западного побережья (район м. Калиакра) Черного моря единственной статистически достоверной характеристикой режима циркуляции вод является бимодальное распределение повторяемости направления прибрежных течений, параллельных береговой черте. При этом на шельфе Северо-Кавказского побережья за 5,5 лет непрерывного эксперимента установлен факт явного преобладания, более чем в 7 раз, продолжительности северо-западного (циклонического) переноса вод по сравнению с юго-восточным переносом [21]. В [19] приведены сведения, согласно которым у побережья Кавказа большинство мезомасштабных циклонических и антициклонических вихрей перемещаются вместе с мандами в том же направлении, что и поток ОЧТ. В [30] в течение 5 сут при регистрации радиолокационных спутниковых снимков прибрежной зоны, проводившейся одновременно с ежесуточными съемками течений на разрезах вблизи Геленджика, отслежено перемещение антициклонического вихря в направлении генерального потока ОЧТ. В [31] по расчетам, выполненным на основе гидродинамической модели, при учете реального атмосферного воздействия у побережья ЮБК в полях течений преобладала циклоническая завихренность, а между береговой линией и ОЧТ формировались и развивались антициклонические мезомасштабные круговороты, которые за время своего существования (до 5 сут) перемещались по направлению движения ОЧТ.

В условиях интенсивной изменчивости и выраженного бимодального распределения повторяемости направления циркуляции прибрежных вод у ЮБК выявлены режимные характеристики мономодального течения западо-юго-западного направления. Среднегодовой поток прибрежных вод на удалении 0,5 км от берега ориентирован циклонически относительно глубокого моря подобно прибрежной периферии ОЧТ на траверзе м. Кикинеиз. На рис. 1, *a* представлены хронологические за 2002–2020 гг. реализации изменчивости среднегодового модуля скорости прибрежного течения на горизонтах 5, 10, 15, 20 м, на рис. 1, *b* – реализации соответствующих среднегодовых значений направлений течения. Осредненные модули горизонтальной компоненты скорости течения имеют максимальные значения в приповерхностном слое и изменяются в определенных пределах. Так, среднемноголетний модуль скорости течения на горизонте 5 м за 7-летний период 2002–2008 гг. имел значение 8,2 см/с [25]; за 9-летний период 2008–2016 гг. – 8,4 см/с [23]; за трехлетний период 2017–2019 гг. – 7,8 см/с [24]. Максимумы среднегодовой скорости прибрежного течения на горизонте 5 м зарегистрированы в 2006, 2007 и 2014 гг. со значениями

9,0; 9,1 и 9,4 см/с соответственно, минимумы – в 2003 и 2020 гг. со значениями 6,9 и 5,8 см/с соответственно.



**Р и с. 1.** Хронологические реализации изменчивости за 2002–2020 гг. среднегодовых значений модуля скорости (*a*) и направления (*b*) прибрежного течения на горизонтах 5, 10, 15, 20 м (красная, зеленая, оранжевая и синяя линии соответственно)

**Fig. 1.** Chronological realizations of variability (2002–2020) of the average annual values of velocity module (*a*) and direction (*b*) of the coastal current at the 5, 10, 15 and 20 m horizons (red, green, orange and blue lines, respectively)

Результаты расчета режимных характеристик среднего сдвигового по глубине течения, вычисленных из среднегодовых реализаций за 19-летний период измерений на гидрологических горизонтах 5, 10, 15, 20 м, приведены в таблице, где указаны оценки соответствующих среднеквадратических отклонений для модуля скорости ( $СКО_1$ ) и направления течения ( $СКО_2$ ), которые характеризуют диапазоны изменчивости режимных характеристик среднего течения по глубине, а также коэффициент вариации среднего течения  $K_V$  (соотношение между  $СКО_1$  и значением среднемноголетней скорости течения).

**Режимные характеристики среднего сдвигового  
по глубине прибрежного течения  
Regime characteristics of the depth-sheared mean coastal current**

Глубина, м / Depth, m	Скорость, см/с / Velocity, cm/s	$СКО_1$ , см/с / RMS <sub>1</sub> , cm/s	$K_V$	Направление, ° / Direction, deg	$СКО_2$ , ° / RMS <sub>2</sub> , deg
5	8,1	0,9	0,11	253	3
10	8,0	0,8	0,10	240	3
15	7,7	0,8	0,10	234	2
20	7,0	0,8	0,11	217	3

Среднегодовая скорость прибрежного течения на горизонте 5 м имеет значение 8,1 см/с и направление  $253^\circ$  при плавном снижении скорости к горизонту 20 м до 7,0 см/с и направлении  $217^\circ$ . Уменьшение скорости от приповерхностного к придонному слою обусловлено фрикционным эффектом, а стационарный циклонический разворот прибрежного течения к придонному слою формируется при обтекании потоком локально неоднородной структуры рельефа дна в месте измерений при глубине 28 м [23]. При этом вдольбереговое течение на каждом горизонте ориентировано вдоль соответствующей изобаты рельефа дна, подобно тенденции движения вод ОЧТ у ЮБК над свалом глубин <sup>1</sup> [13]. Коэффициент вариации  $K_V$  на всех четырех горизонтах имеет значения на порядок меньше 1. Так как вклад переменной составляющей среднегодовой вдольберегового потока вод незначителен, то вблизи м. Кикинеиз на годовых масштабах явно доминирует квазистационарное мономодальное течение.

Вдольбереговое течение подвержено воздействию различного вида инерционных и субинерционных вихре-волновых возмущений при их генерации и распространении в прибрежно-шельфовой зоне. При анализе изменчивости структуры течений у ЮБК выделена существенная трансформация эллиптического вида орбитальной циркуляции вод. Орбитальные движения вод при распространении вихре-волновых колебаний у побережья трансформируются в коллинеарную с вдольбереговым течением систему практически возвратно-поступательных колебаний соответствующих масштабов [22–25]. Подобная трансформация орбитальных колебаний вод в возвратно-поступательные движения вдоль берега ранее выделена у Северо-Кавказского побережья [21]. По результатам статистического анализа натуральных данных достоверно установлено, что бимодальная структура повторяемости направления течения у ЮБК возникает только при значениях модуля орбитальных скоростей возмущения, больших модуля скорости вектора мономодального вдольберегового течения [22, 25]. В ином случае колебания скорости вдольберегового потока за период возмущения происходят практически без изменений направления мономодального течения. Например, эмпирическая функция распределения плотности вероятности, вычисленная для горизонта 10 м за 19 лет мониторинга в угловых сегментах  $3^\circ$  по  $\sim 2$  млн. базовых пятиминутных отсчетов направления течения, демонстрирует асимметричную узконаправленную бимодальную структуру распределения повторяемости направления течения. Прямая мода циклонической направленности течения зарегистрирована в 74% случаев при максимуме в сегменте  $238\text{--}241^\circ$ , а диаметрально ей противоположная мода – в 26% случаев при максимуме в сегменте  $58\text{--}61^\circ$ . При аналогичной обработке центрированных векторных рядов течений, т. е. тех же самых реализаций, но с вычетом вклада значения среднего вектора течения, во всех случаях выделяются бимодальные распределения повторяемости направления остаточного течения, близкие к равновероятному и квазисимметричному виду [22]. Таким образом, при отсутствии среднего течения и наличии в реализациях вклада полных периодов разномасштабных волновых колебаний вод бимодальное распределение направления циркуляции прибрежных вод должно иметь равновероятный симметричный вид. Такой вид распределения получен в эксперименте на северо-восточном шельфе у Южной Озеревки в точке 3 на удалении 0,2 км от берега [19].

Как известно, в прибрежных зонах океанов и морей существуют особые типы длинноволновых движений, которые обуславливают динамику этих зон, приводя к захвату и аккумуляции волновой энергии, меандрированию течений, образованию мезомасштабных вихрей<sup>8</sup>. Генерация, распространение и диссипация длинных волн является откликом морской среды на внешние воздействия, а процесс приспособления сопровождается переходом части энергии возмущений в энергию длинных волн различной природы. Длинные волны в морях имеют линейный масштаб от десятков до сотен километров, а периоды – от минут до месяцев. Такие длинноволновые движения, как захваченные берегом волны, наиболее эффективно генерируются колебаниями вдольберегового напряжения ветра. В районе наблюдений ветер может возбуждать такие волны с пространственным масштабом порядка протяженности береговой линии. Параметры этих волн, как правило, соответствуют пространственно-временным масштабам вынуждающих атмосферных систем. Захваченные берегом волны на субинерционных частотах распространяются в циклоническом относительно глубокого моря направлении, в Северном полушарии оставляя берег справа.

В 90-е годы XX в. МГИ активно проводил комплексные экспедиционные и модельные исследования динамики субинерционных захваченных волн в прибрежной зоне ЮБК с целью определения видов и пространственно-временных характеристик волн, оценки влияния физико-географических условий района наблюдений на волновую структуру и характеристики. Представленные в монографии<sup>9</sup> и в работе [32] результаты комплексного анализа материалов этих исследований использованы при сопоставлениях характеристик квазиинерционных и субинерционных колебаний течений, выявленных по натурным данным за 2002–2020 гг. в прибрежной зоне у м. Кикинеиз. В реализациях изменчивости вдольберегового течения у ЮБК, полученных на платформе МГИ, содержится интегральная информация о разномасштабных колебаниях вод прибрежно-шельфовой зоны. По результатам спектрального анализа систематизирован энергетический вклад интенсивных вихре-волновых колебаний прибрежных вод в изменчивость вдольберегового течения. Анализ распределения дисперсии колебаний течений по частотам позволил систематизировать частотно-временную локализацию максимумов концентрации плотности кинетической энергии при вкладе интенсивных колебаний прибрежного течения у ЮБК в диапазоне инерционно-гравитационных, субинерционных и сезонных колебаний.

Генеральная совокупность из 7,9 млн. пар векторных компонентов, полученных за 19 лет на горизонтах 5, 10, 15, 20 м со стационарной платформы с базовым интервалом векторного осреднения 5 мин, позволяет комплексно исследовать особенности структуры и динамику цугов короткопериодных внутренних волн, играющих важную роль в стоке энергии длинных волн на шельфе бесприливного Черного моря [8–10]. Однако в настоящей работе результаты таких исследований не рассматриваются.

---

<sup>8</sup> Волны в пограничных областях океана / В. В. Ефимов [и др.]. Л. : Гидрометеоздат, 1985. 280 с.

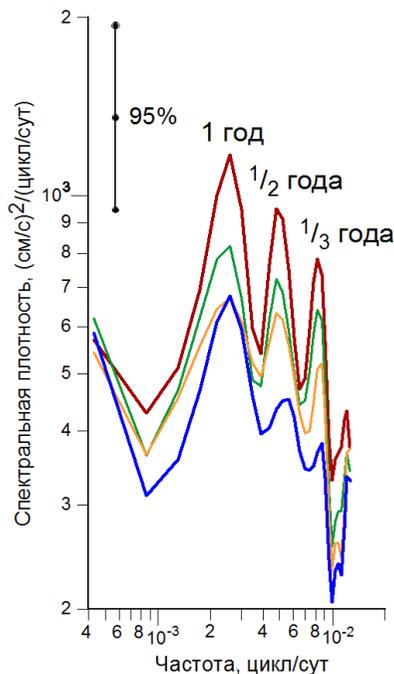
<sup>9</sup> Иванов В. А., Янковский А. Е. Длинноволновые движения в Черном море. Киев : Наукова думка, 1992. 110 с.

При анализе среднечасовых данных изменчивости течений в прибрежной зоне у м. Кикинеиз достоверно выделены интенсивные колебания локального инерционного (17,1 ч) и суточного периодов [24]. Причины генерации, существования и возможные разновидности колебаний указанных периодов изложены в монографии <sup>9</sup> и в работе [32], где отмечено, что такие колебания по своим свойствам подобны длинноволновым движениям. При дальнейшей обработке вклад колебаний течений в этом диапазоне изменчивости был удален методами цифровой фильтрации. На основе анализа среднесуточных векторно-осредненных данных выделены два достоверных отдельных спектральных пика кинетической энергии колебаний на периодах ~ 6 и 12 сут [24, 25]. В [19] приведены сведения о том, что в северо-восточной части Черного моря ранее экспериментально выделены волнообразные колебания стрежня ОЧТ с периодами ~ 6 и 12 сут, которые в отдельных случаях превращаются в большие циклонические и антициклонические меандры, в которых формируются мезомасштабные циклонические и антициклонические вихри. В [32] показано, что колебания прибрежных вод с периодом ~ 6 сут связаны со сгонно-нагонной циркуляцией вод Черного моря, имеющей у ЮБК периодичность 5–7 сут. Формирование осцилляций прибрежных вод с периодом ~ 12 сут объясняется меандрированием ОЧТ и генерацией субинерционных захваченных берегом волн, пространственно-временные характеристики которых исследованы при натурных измерениях и численном моделировании <sup>9</sup> [32]. Результаты комплексного анализа данных этих экспериментов позволили идентифицировать колебания с периодом ~ 12 сут как захваченные берегом волны с пространственным масштабом порядка длины береговой линии Черного моря. Эти захваченные волны генерируются удаленным ветровым воздействием и распространяются вдоль побережья коллинеарно с мономодальным вдольбереговым течением, оставляя берег справа. С целью дальнейшей спектральной обработки вклад колебаний прибрежного течения в субинерционном диапазоне изменчивости был устранен методами цифровой фильтрации.

Спектральный состав сезонной изменчивости вдольберегового течения был исследован при использовании линейных оценок спектра после устранения из многолетних хронологических реализаций вклада интенсивных инерционно-гравитационных и субинерционных колебаний. Спектры распределения плотности кинетической энергии, рассчитанные по среднемесячным векторно-осредненным данным, содержат статистически достоверные колебания течения на годовом периоде, а также интенсивные колебания вблизи второй и третьей годовых гармоник, выделяемые с различной достоверностью. На рис. 2 приведены результаты расчета среднемноголетних спектров сезонной изменчивости прибрежного течения на горизонтах 5, 10, 15, 20 м для колебаний в диапазоне периодов 75 сут – 6 лет с указанием размера 95%-ного доверительного интервала.

С глубиной интенсивность колебаний течения вблизи второй годовой гармоники достоверно снижается и на горизонтах 10, 15, 20 м уже не превышает значений 95%-ного доверительного интервала. На горизонте 20 м снижается интенсивность колебаний также вблизи третьей годовой гармоники, т. е. интенсивность колебаний прибрежного течения в сезонном диапазоне изменчивости затухает от приповерхностного к придонному слою. Для сопоставлений

были использованы достоверные результаты многолетнего натурального эксперимента, обеспечивающие надежное представление об энергонесущих частотах сезонной изменчивости уровня Черного моря [33]. В указанной работе представлен средний спектр колебаний уровня моря, рассчитанный по многолетним данным высокоточной альтиметрии с искусственных спутников Земли миссии *TOPEX/Poseidon*, и отмечено, что два главных максимума годового и полугодового периодов обусловлены сезонными изменениями тангенциального напряжения трения ветра. Два дополнительных максимума спектра колебаний уровня моря на периодах  $\sim 280$  и 125 дней, по-видимому, как отмечено в [33], соответствуют внутренней изменчивости циркуляции Черного моря.



**Рис. 2.** Спектры плотности кинетической энергии колебаний прибрежного течения в диапазоне периодов 75 сут – 6 лет на горизонтах 5, 10, 15, 20 м (красная, зеленая, оранжевая, синяя линии соответственно) при 95%-ном доверительном интервале

**Fig. 2.** Density spectra of the kinetic energy of the coastal current fluctuations within the range 75 days–6 years at the 5, 10, 15 and 20 m horizons (red, green, orange and blue lines, respectively) at the 95% confidential interval

В настоящей работе представлены основные сведения по исследованию особенностей разномасштабной циркуляции вод у побережья Крыма; детальный анализ совокупности приведенных результатов еще предстоит выполнить. Полученные результаты способствуют совершенствованию информационной технологии контактного мониторинга разномасштабной изменчивости прибрежного течения на стационарном Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне МГИ с целью получения новых научных знаний о динамике вод прибрежного экотона.

## Заключение

В настоящей работе обобщены результаты многолетнего за 2002–2020 гг. мониторинга разномасштабной изменчивости циркуляции вод прибрежно-шельфовой зоны Черного моря возле м. Кикинеиз (Южный берег Крыма). По детализации исследований режимных характеристик и диапазона изменчивости квазистационарного течения, охвату глубин и длительности натурального эксперимента сформированные материалы не имеют аналогов в практике отечественного и зарубежного инструментального мониторинга прибрежных течений Черного моря. На основе полученных материалов сформирована база векторных данных пространственно-временной изменчивости прибрежных течений на измерительных горизонтах 5, 10, 15, 20 м. Объем генеральной совокупности данных за 6940 сут мониторинга составил 666,24 тыс. пар среднечасовых значений компонентов вектора течения.

По результатам анализа совокупности натуральных данных у м. Кикинеиз вдоль побережья достоверно выделено квазистационарное течение западно-западного направления. Среднегодовой модуль скорости вектора моноmodalного течения имел максимальные значения в приповерхностном слое и за время мониторинга изменялся в пределах 5,8–9,4 см/с. Эллиптический вид циркуляции вод от возмущений у побережья трансформируется практически в возвратно-поступательные колебания, что способствует формированию бимодального распределения повторяемости направления вдольберегового течения. Бимодальная структура вдольберегового течения возникает только в случае доминирования модуля орбитальной скорости возмущения над модулем скорости вектора моноmodalного течения. По результатам спектрального анализа достоверно выделены интенсивные колебания квазистационарного течения в гравитационно-инерционном, субинерционном и сезонном диапазоне изменчивости. В субинерционном и сезонном диапазоне изменчивости выражена тенденция снижения интенсивности колебаний течения от приповерхностного к придонному слою.

Обеспечение высокой точности и качества данных инструментального мониторинга, выполняемого отечественными эйлеровыми измерителями течений на постоянной основе *in situ* у м. Кикинеиз (Южный берег Крыма), остается одной из приоритетных задач МГИ. Репрезентативный экспериментальный материал необходим для валидации и совершенствования современных локальных численных моделей с целью достоверного анализа и прогноза состояния и изменчивости циркуляции вод прибрежного экотона.

## 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. Pokazeev K., Sovga E., Chaplina T. Pollution in the Black Sea: Observations about the Ocean's Pollution. Cham : Springer, 2021. 213 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-61895-7>
3. 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, 2001. Вып. 3. С. 9–52.

4. *Ostrovskii A. G., Zatsepin A. G.* Intense ventilation of the Black Sea pycnocline due to vertical turbulent exchange in the Rim Current area // *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2016. Vol. 116. P. 1–13. doi:10.1016/j.dsr.2016.07.011
5. О влиянии изменчивости течения в глубоководной зоне Черного моря на динамику вод узкого северокавказского шельфа / А. Г. Зацепин [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 3. С. 16–25. doi:10.22449/0233-7584-2016-3-16-25
6. Vertical structure of currents in the upper part of the continental slope of the Black Sea in the Region of Gelendzhik / A. N. Morozov [et al.] // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. Vol. 53, iss. 6. P. 632–640. <https://doi.org/1134/S0001433817060093>
7. *Морозов А. Н.* Вертикальная структура сдвигов скорости течения в основном пикноклине Черного моря по данным натурных наблюдений 2016 года // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 6. С. 515–522. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-515-522
8. *Серебряный А. Н., Иванов В. А.* Исследование внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2013. Т. 6, № 3. С. 34–45.
9. Внутренние волны на шельфе Черного моря в районе Гераклеяского полуострова: моделирование и наблюдение / В. А. Иванов [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 4. С. 322–340. doi:10.22449/0233-7584-2019-4-322-340
10. 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
11. *Горячкин Ю. Н., Иванов В. А.* Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 210 с. URL: [http://mhi-ras.ru/assets/files/uroven\\_chernogo\\_morja\\_-\\_proshloe\\_nastojashhee\\_i\\_budushhee\\_2006.pdf](http://mhi-ras.ru/assets/files/uroven_chernogo_morja_-_proshloe_nastojashhee_i_budushhee_2006.pdf) (дата обращения: 10.03.2022).
12. *Ivanov V. A., Belokopytov V. N.* Oceanography of the Black Sea. Sevastopol : ECOSY-Gidrofizika, 2013. 210 p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/236853664\\_Ivanov\\_VA\\_Belokopytov\\_VN\\_Oceanography\\_of\\_the\\_Black\\_Sea\\_National\\_Academy\\_of\\_Sciences\\_of\\_Ukraine\\_Marine\\_Hydrophysical\\_Institute\\_Sevastopol\\_210\\_p](https://www.researchgate.net/publication/236853664_Ivanov_VA_Belokopytov_VN_Oceanography_of_the_Black_Sea_National_Academy_of_Sciences_of_Ukraine_Marine_Hydrophysical_Institute_Sevastopol_210_p). (date of access: 10.03.2022).
13. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / А. С. Блатов [и др.] ; под ред. Б. А. Нелепо. Л. : Гидрометеоиздат, 1984. 240 с. URL: [http://elib.rshu.ru/files\\_books/pdf/img-417200757.pdf](http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-417200757.pdf) (дата обращения: 11.03.2022).
14. О внутригодовой изменчивости течений на шельфе Кавказского побережья Черного моря / В. Г. Кривошея [и др.] // *Океанология*. 1980. Т. 20, № 1. С. 34–36.
15. *Овчинников И. М., Титов В. Б., Кривошея В. Г.* Новые данные о временной изменчивости течений по результатам многолетних измерений со стабилизированного буя на шельфе Черного моря // *Доклады АН СССР*. 1986. Т. 286, № 5. С. 1250–1254.
16. *Овчинников И. М., Титов В. Б.* Антициклоническая завихренность течений в прибрежной зоне Черного моря // *Доклады АН СССР*. 1990. Т. 314, № 5. С. 1236–1239.
17. *Титов В. Б.* Статистические характеристики и изменчивость течений на западном шельфе Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 1991. № 2. С. 41–47.
18. *Латун В. С.* Структура течений вблизи Южного берега Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. Вып. 3. С. 53–56.
19. Новые данные о режиме течений на шельфе северо-восточной части Черного моря / В. Г. Кривошея [и др.] // *Океанология*. 2001. Т. 41, № 3. С. 325–334.
20. *Белокопытов В. Н., Саркисов А. А., Щуров С. В.* Течения прибрежной зоны на участке Крымского полуострова от мыса Сарыч до поселка Качивели // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. Вып. 8. С. 64–68.

21. *Кривошея В. Г., Москаленко Л. В., Титов В. Б.* К вопросу о режиме течений на шельфе у Северо-Кавказского побережья Черного моря // *Океанология*. 2004. Т. 44, № 3. С. 358–363.
22. *Кузнецов А. С., Иванов В. А., Зима В. В.* Особенности мезомасштабной динамики вод у Южного побережья Крыма в 2008–2016 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2017. Вып. 1. С. 32–39.
23. *Ivanov V. A., Kuznetsov A. S., Morozov A. N.* Monitoring Coastal Water Circulation along the South Coast of Crimea // *Doklady Earth Sciences*. 2019. Vol. 485, iss. 2. P. 405–408. doi:10.1134/S1028334X19040044
24. *Кузнецов А. С., Зима В. В., Щербаченко С. В.* Изменчивость характеристик прибрежного течения у Южного берега Крыма в 2017–2019 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 3. С. 5–16. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-5-16
25. *Кузнецов А. С.* Структура бимодальности направления прибрежного течения у Южного берега Крыма в 2002–2008 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 4. С. 78–88. doi:10.22449/2413-5577-2020-4-78-88
26. Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / Под ред. В. А. Иванова, В. А. Дулова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. 526 с.
27. *Кузнецов А. С., Иванов В. А., Зима В. В.* Особенности динамики течений у Южного берега Крыма и перспективы использования информационной технологии полигонных исследований // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь, 2014. Вып. 28. С. 42–50.
28. *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. doi:10.22449/2413-5577-2018-1-50-57
29. Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data / G. Korotaev [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003. Vol. 108, iss. C4. 3122. doi:10.1029/2002JC001508
30. *Серебряный А. Н., Лаврова О. Ю.* Антициклонический вихрь на шельфе северо-восточной части Черного моря: совместный анализ космических снимков и данных акустического зондирования толщи моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2008. Т. 5, № 2. С. 206–215.
31. *Demyshev S. G., Evstigneeva N. A.* Modeling Meso- and Sub-Mesoscale Circulation Along the Eastern Crimean Coast Using Numerical Calculations // *Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physics*. 2016. Vol. 52, iss. 5. P. 560–569. doi:10.1134/S0001433816050042
32. *Иванов В. А., Янковский А. Е.* Динамика вод на шельфе Крыма в летний сезон // *Морской гидрофизический журнал*. 1994. № 3. С. 38–56.
33. *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>

*Об авторе:*

**Кузнецов Александр Сергеевич**, ведущий научный сотрудник, заведующий отделом гидрофизики шельфа, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **РИНЦ AuthorID: 860912, SPIN-код: 1838-7191, ORCID ID: 0000-0002-5690-5349, Scopus Author ID: 57198997777**, [kuznetsov\\_as@mhi-ras.ru](mailto:kuznetsov_as@mhi-ras.ru)