


## Особенности формирования вдольбереговой циркуляции вод прибрежного экотона у южного побережья Крыма

А. С. Кузнецов , И. К. Иващенко

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*  
 kuznetsov\_as@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 02.11.2022; одобрена после рецензирования 22.12.2022;  
принята к публикации 16.01.2023.

### *Аннотация*

**Цель.** Целью настоящей работы является расширение знаний об особенностях формирования режимных характеристик, вертикальной структуры и межгодовой изменчивости циркуляции вод прибрежного экотона у южного побережья Крыма, а также характеристик, условий и продолжительности существования бимодальной структуры направлений прибрежного течения.

**Методы и результаты.** Новые научные результаты получены с учетом систематизации и анализа опубликованных результатов по исследуемой проблеме. При решении поставленных задач использованы данные мониторинга изменчивости вертикальной структуры прибрежного течения за 2002–2021 гг., полученные с применением отечественных измерителей течений, установленных на стационарной океанографической платформе Черноморского гидрофизического подспутникового полигона Морского гидрофизического института. Материалы векторной базы течений, прошедшие государственную регистрацию, обработаны по методике, разработанной на основе стандартных методов цифровой фильтрации и математической статистики. Установлено, что у побережья Черного моря существуют два различных режима циркуляции вод – режим стационарного мономодального вдольберегового течения и режим бимодальной модуляции направления суммарного вдольберегового потока интенсивными гидродинамическими возмущениями. В формирование обратной моды бимодальной структуры у м. Кикинеиз на всех горизонтах вклад до 98% вносят колебания с периодами до 3 сут, 2% – колебания с периодами 3–4 сут. Значительное снижение среднегодовой скорости мономодального течения меняет условия существования бимодальной структуры в приповерхностном слое, где период колебаний, формирующих обратную моду, в 2020 г. увеличился до 5 сут.

**Выводы.** Полученные результаты расширяют наши знания об особенностях режима циркуляции прибрежных вод, условий и характеристик явления бимодальной структуры прибрежного течения, в формировании которой у м. Кикинеиз существенный вклад до 91% вносят колебания с периодами до 2 сут. Продемонстрированы перспективы дальнейшего развития технологии исследований и возможности анализа количественных оценок изменчивости прибрежного течения, включая межгодовой диапазон.

**Ключевые слова:** Черное море, прибрежная зона, Южный берег Крыма, циркуляция вод, бимодальное направление течений, эмпирическая функция распределения, спектральная плотность


**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., 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

© Кузнецов А. С., Иващенко И. К., 2023

## Features of Forming the Alongcoastal Circulation of the Coastal Ecotone Waters nearby the Southern Coast of Crimea

A. S. Kuznetsov , I. K. Ivashchenko

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

### Abstract

**Purpose.** The study is aimed at expanding the notions on the features of forming the mode characteristics, vertical structure and interannual variability of the coastal ecotone water circulation nearby the Crimea Southern coast, as well as on the characteristics, conditions and lifetime of bimodal structure of the coastal current directions.

**Methods and Results.** New scientific results were obtained with the regard for systematizing and analyzing the already published results on the problem under study. The preset tasks were solved using the monitoring data on variability of the coastal current vertical structure for 2002–2021 obtained through a set of domestic current meters installed at the stationary oceanographic platform of the Black Sea hydrophysical sub-satellite polygon of Marine Hydrophysical Institute. The materials on the currents' vector base which had passed state registration were processed according to the technique developed on the basis of the standard methods of digital filtering and mathematical statistics. It was found that nearby the Black Sea coast, there existed two different modes of water circulation: the stationary monomodal alongcoastal current and the bimodal modulation of the direction of total alongcoastal flow induced by the intense hydrodynamic disturbances. At all the horizons near Cape Kikineiz, the reverse mode of bimodal structure was formed mostly due to the contribution of fluctuations with the periods up to 3 days, which constituted 98%, whereas the contribution of those with the periods 3–4 days was 2%. A significant decrease in the annual average velocity of a monomodal current changed the conditions for a bimodal structure existence in the near-surface layer where the period of oscillations forming a reverse mode, had increased in 2020 to 5 days.

**Conclusions.** The results obtained expand our notions on the features of the coastal water circulation mode, and on the conditions and characteristics of the coastal current bimodal structure formed near Cape Kikineiz mostly due to a significant contribution (to 91%) of the fluctuations with the periods up to 2 days. The prospect for further development both of the research techniques and the possibility of analyzing quantitative estimates of the coastal current variability including the interannual range are demonstrated.

**Keywords:** Black Sea, coastal zone, Southern coast of Crimea, water circulation, bimodal current direction, empirical distribution function, spectral density

**Acknowledgements:** The study was carried out within the framework of the state task of the FRC MHI on theme FNNN-2021-0005 “Complex interdisciplinary research of oceanological processes which determine functioning and evolution of ecosystems in the coastal zones of the Black and Azov seas”.

**For citation:** Kuznetsov, A.S. and Ivashchenko, I.K., 2023. Features of Forming the Alongcoastal Circulation of the Coastal Ecotone Waters nearby the Southern Coast of Crimea. *Physical Oceanography*, 30(2), pp. 171-185. doi:10.29039/1573-160X-2023-2-171-185

### Введение

Результаты исследований Морского гидрофизического института (МГИ) РАН по оценке влияния динамики вод прибрежно-шельфовой зоны на функционирование и эволюцию морских экосистем Черного моря способствуют развитию перспективного научного направления, сформированного как экологическая экономика прибрежной зоны [1]. Цель и основные направления таких исследований природного комплекса были сформулированы в работе [2]. В состав экосистемы шельфа входят экосистемы прибрежного экотона [3], которые

сосредоточены в граничной зоне сопряжения суши и моря, включая мелководную прибрежную полосу открытой части моря, заливы, бухты, лиманы и эстуарии. Каждый участок этой прибрежной зоны является отдельным природно-хозяйственным комплексом вследствие особенностей локальной динамики вод, уровня и видов загрязнений с различными скоростями накопления, ассимиляции и деструкции загрязняющих веществ в морской среде. Обеспечение оптимальных условий существования и развития этой социальной эколого-экономической системы возможно только при рациональном освоении комплекса морских природных ресурсов. Исследования термогидродинамики вод и создание адаптивных моделей управления балансом потребления и воспроизводства природных ресурсов в эколого-экономических системах прибрежного экотона необходимы для построения интегральной модели управления природоохранной деятельностью приморского региона с целью обеспечения его устойчивого экономического развития [1].

В [3] приведены оценки уровней антропогенных нагрузок на побережье Крыма и показано, что все экосистемы Черноморского побережья подвержены деградации под воздействием загрязняющих веществ, поступающих в морскую среду. При этом отмечено, что для установления степени ущерба, нанесенного прибрежной экосистеме, наряду с оценкой уровня антропогенных нагрузок и способности экосистемы к самоочищению необходимы сведения о переносе и рассеивании загрязнителей в условиях интенсификации динамики вод на мелководье и процессов обмена на границе с дном. Современный уровень загрязнения вод Черного моря [4] подтверждает актуальность и необходимость лимитирования поступающих в морскую среду потоков загрязнений, т. е. введения экологического нормирования антропогенного воздействия на морскую экосистему. Как отмечено в [5], объективно существующим свойством функционирования нормальной экосистемы в морской среде является преобладающее значение биотической компоненты в аспекте разрушения и депонирования загрязняющих веществ, что характеризует резервные возможности экосистемы, определяемые с помощью понятия ассимиляционной емкости. Величина ассимиляционной емкости зависит от многих природных и антропогенных факторов, при этом в [5] для практических оценок рекомендованы три основных процесса природного самоочищения: гидродинамические процессы, микробиологическое окисление и биоседиментация, т. е. динамика вод, наряду с поступлением, переносом и рассеиванием загрязнителей, непосредственно влияет на ассимиляционные возможности самой экосистемы.

Контактные и дистанционные исследования динамики прибрежных вод у побережья Крыма ведутся МГИ при создании локальных моделей прибрежного экотона. В настоящее время исследования характеристик динамики прибрежных вод наиболее точно и достоверно обеспечивают контактные методы и средства, где МГИ имеет фундаментальный научный задел и многолетний практический опыт работ [6]. При решении проблемы экологического нормирования в эколого-экономических системах прибрежного экотона контактный мониторинг динамики прибрежных вод является базовым звеном при оценке влияния изменений природно-климатических и антропогенных факторов на устойчивость гидролого-гидрохимической структуры вод и способность прибрежных экосистем к самоочищению.

Специфические особенности циркуляции вод у побережья зависят от географического положения, формы береговой линии и рельефа дна, локальных гидрометеорологических и гидрофизических условий в приграничной зоне сопряжения суши и моря. Течения узкой мелководной прибрежной полосы имеют иные закономерности и особенности циркуляции по сравнению с течениями шельфово-склоновой части моря. Актуальность исследований динамики вод у побережья, наряду с проблемами экологической экономики прибрежной зоны, обусловлена потребностями прибрежной навигации и рыболовства, развитием марикультуры, гидротехнического строительства и сферы рекреационных услуг.

Целью настоящей работы является развитие научных представлений об особенностях формирования режимных характеристик, вертикальной структуры и межгодовой изменчивости циркуляции вод прибрежного экотона у ЮБК, а также характеристик, условий и продолжительности явления бимодальной структуры направлений прибрежного течения. Научная новизна работы заключается в выявлении уникальных достоверных эмпирических знаний о динамике прибрежных вод в районе Южного берега Крыма (ЮБК) на основе материалов многолетнего инструментального мониторинга прибрежных течений.

### Материалы и методы

Выполнен обзор публикаций по исследуемой проблеме и систематизированы результаты натурных исследований региональных особенностей циркуляции прибрежных вод, полученные ранее в различных районах Черного моря. Основные закономерности этой циркуляции рассматриваются в цикле работ<sup>1-8</sup> [7–25]. По результатам экспедиционных исследований у западного побережья опубликованы работы<sup>5,6</sup> [10, 11], у северного побережья – работы<sup>1-7</sup> [7, 10, 12, 14, 15, 18, 20, 24, 25], у северо-восточного побережья – работы<sup>5-7</sup> [8–11, 13, 16, 17, 19, 21–23], у восточного побережья – работы<sup>5,6,8</sup>. Северное побережье Черного моря, включая м. Херсонес, м. Фиолент, м. Айя и Южный берег Крыма,

<sup>1</sup> Иванов Р. Н., Богданова А. К. К вопросу о морских прибрежных течениях // Труды Морского гидрофизического института. М. : Изд-во АН СССР, 1953. Вып. 3. С 43–68.

<sup>2</sup> Иванов Р. Н. Влияние берега на направление ветрового поверхностного течения // Труды Морского гидрофизического института. М. : Изд-во АН СССР, 1957. Т. XI. С. 84–96.

<sup>3</sup> Богданова А. К. Сгонно-нагонные течения в прибрежной полосе у приглубокого относительно прямолинейного берега // Труды Севастопольской биологической станции. М. : Изд-во АН СССР, 1959. Т. XII. С 421–455.

<sup>4</sup> Зац В. И., Лукьяненко О. Я., Яцевич Г. В. Гидрометеорологический режим Южного берега Крыма. Л. : Гидрометеорологическое издательство, 1966. 120 с.

<sup>5</sup> Поверхностные течения Черного моря / О. Н. Богатко [и др.] // Комплексные исследования Черного моря. Севастополь : МГИ АН УССР, 1979. С. 25–33.

<sup>6</sup> Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / [А. С. Блатов, Н. П. Булгаков, В. А. Иванов и др.]; под ред. Б. А. Нелепо. Л. : Гидрометеоздат, 1984. 240 с. URL: [http://elibrary.rshu.ru/files\\_books/pdf/img-417200757.pdf](http://elibrary.rshu.ru/files_books/pdf/img-417200757.pdf) (дата обращения: 11.02.2023).

<sup>7</sup> Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря (на примере Южного берега Крыма) / [А. С. Блатов, В. А. Иванов]; Отв. ред. Н. А. Пантелеев. Киев : Наукова думка, 1992. 242 с.

<sup>8</sup> Антонов Л. В. Течения в Черном море у Батума // Записки по гидрографии. С-Петербург: Изд-во Главного гидрографического управления, 1913. Вып. XXXVI. С. 259–266.

далее обозначим как южное побережье Крыма, акватория которого исторически исследуется Морским гидрофизическим институтом РАН. Прибрежная акватория северокавказского шельфа исследуется Институтом океанологии им. П. П. Ширшова РАН и его Южным отделением. Результаты указанных исследований, полученные по репрезентативным натурным данным, используются далее при анализе.

С 1948 г. на морском полигоне у м. Кикинеиз в течение трехлетнего цикла измерений набором лагранжевых и эйлеровых измерителей течений МГИ проводился комплексный эксперимент по исследованию циркуляции вод у побережья открытой части Черного моря<sup>1</sup>. Выделены основные региональные закономерности и факторы, формирующие течения в районе побережья ЮБК. На расстояниях до 2 км от берега и глубинах до 70 м достоверно выявлено бимодальное распределение повторяемости направлений вдольберегового потока вод. Изменение направления поверхностного течения происходит очень быстро при смене направления вдольберегового ветра<sup>1</sup>. Скорости установившегося вдольберегового течения медленно уменьшаются от поверхности ко дну, сохраняя свое направление, связанное с направлением преобладающих ветров. Компоненты этого течения по нормали к берегу чрезвычайно малы и неустойчивы.

Представленные выводы подтверждены результатами дальнейших исследований МГИ у м. Кикинеиз (ЮБК): в [12] даны количественные оценки влияния формы береговой линии, поля ветра и гидрологической структуры на динамику прибрежных вод. При анализе материалов базы океанографических данных МГИ за период 1980–1994 гг. для прибрежной акватории от м. Сарыч до м. Кикинеиз также выделена бимодальная структура в направлениях вдольберегового потока преимущественно циклонической ориентации, подобно направлению Основного Черноморского течения (ОЧТ) [18]. Существенные научные результаты по динамике крупномасштабных захваченных берегом волн, влияющих на циркуляцию прибрежных вод, получены МГИ при проведении локального динамического эксперимента у ЮБК [14, 15]. На базе материалов многолетнего мониторинга течений у м. Кикинеиз в [7, 25] получены экспериментальные оценки характеристик сдвигового по глубине мономодального прибрежного течения циклонической направленности.

Южное отделение Института океанологии с 1955 г. занимается исследованиями прибрежных течений в северо-восточной части Черного моря с помощью заякоренных автономных буйковых станций (АБС) [16]. С 1976 г. долгосрочные ежечасные измерения течений выполнялись со стабилизированного буя на шельфе в районе Геленджика на удалении 5 км от берега при глубине 70 м на горизонте 10 м в течение 3 лет, на горизонте 25 м – течение 5,5 лет, на горизонте 60 м – в течение 1,6 года [9]. Результаты анализа этих исследований приведены в цикле работ [8–11, 13], результаты исследований пространственно-временной изменчивости течений на шельфе северо-восточной части Черного моря за 1997–2001 гг. – в [16, 17, 19].

Основные региональные закономерности и факторы, формирующие течения у северокавказского побережья и у ЮБК, практически идентичны, что подтверждают следующие выводы. Течение в прибрежной зоне у северо-восточ-

ного побережья Черного моря имеет характер возвратно-поступательных движений, ориентированных вдоль генерального направления береговой черты в районе исследований. Характерной чертой режима прибрежных течений является ярко выраженный бимодальный тип распределения вероятностей их направлений [8–11, 13, 16, 17, 19]. Бимодальный характер направлений течения, обусловленный направлением преобладающих ветров и положением береговой линии [8, 9], меняется быстро и почти реверсивно. В [10, 13, 16, 17] отмечено, что доминирующий вклад в циркуляцию вод у северо-восточного побережья Черного моря вносят прибрежные антициклонические вихри, а в [21] показано, что на узком северокавказском шельфе существуют цепочки как антициклонических, так и циклонических субмезомасштабных вихрей. По поводу существования у северокавказского побережья мономодального вдольберегового течения в [9, 11] отмечается, что поступательное прибрежное течение приобретает характер циклонических возвратно-поступательных движений с бимодальным типом распределения вероятностей направления.

В работе<sup>9</sup> указано, что у побережья существуют зоны разнообразных прибрежных круговоротов, которые наиболее отчетливо выражены в заливах и бухтах. При этом у сравнительно прямолинейных берегов течения направлены так же, как и в зоне ОЧТ. Выделение характеристик мономодального течения на мелководье у побережья осложнено рядом объективных причин, в том числе интенсивным гидродинамическим вкладом возмущений приповерхностного и придонного пограничных слоев [25]. В работе [9] отмечено, что кинетическая энергия среднего движения течения на порядок меньше кинетической энергии его пульсаций. В [16] показано, что в узкой приурезовой полосе на мелководье повторяемость течений двух противоположных направлений близка к равновероятной при очень малых значениях среднего переноса вод. Возможность исследований малых остаточных течений, как правило, ограничена методическими и инструментальными погрешностями измерителей, особенно значимыми для АБС. С целью получения достоверных характеристик малых остаточных течений с учетом вклада интенсивных возмущений в МГИ разработана и используется информационная технология мониторинга течений кластером отечественных эйлеровых измерителей [24, 25].

Наблюдения осуществляются на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне (ЧГПП) МГИ, который является регионально-адаптированной системой контактного мониторинга характеристик природной среды в граничной зоне сопряжения суши и моря у ЮБК, расположенной у сравнительно прямолинейного участка берега [6, 7]. Инструментальные измерения характеристик течений прибрежного экотона выполняются кластером измерителей течений со свайного основания стационарной океанографической платформы полигона в Голубом заливе у м. Кикинеиз на удалении ~ 0,5 км от берега с ноября 2001 г. по настоящее время [7, 25]. Измерители течений на гидрологических горизонтах 5, 10, 15, 20 и 25 м при глубине места 28 м регистрируют векторно-осредненные за временной интервал 5 мин ежесекундные отсчеты значений проекций вектора. За 20-летний период мониторинга (2002–2021 гг.) из исходных 5-минутных реализаций для каждого измерительного

<sup>9</sup> Лоция Черного моря / Под ред. М. Н. Лапина. Л. : Изд-во Гидрографического управления Военно-Морских сил. 1954. 506 с.

горизонта сформированы базовые ряды течений, состоящие из 175 320 пар среднечасовых отсчетов компонентов вектора. Оперативный технологический контроль качества измерений обеспечивает соблюдение метрологического единства при долгосрочных измерениях характеристик прибрежных течений и достижение предельной точности измерений осредненных компонентов вектора течения. Погрешность измерений значений модуля скорости составляет 0,1 см/с, направления течения  $3^\circ$  [24].

Режим циркуляции прибрежных вод Черного моря статистически достоверно характеризуется явлением бимодального распределения повторяемости направлений, при котором вдольбереговое течение имеет два наиболее вероятных направления в диаметрально противоположных угловых секторах. Для Черного моря основная мода течения имеет циклоническую относительно глубокого моря ориентацию, а обратная мода – диаметрально противоположное направление течения. Для различных районов и участков прибрежной акватории соотношения вклада между модами различны. В работе [20] представлен обзор и обобщение материалов по различным бимодальным структурам течений, выявленным у побережья Черного моря. Существование бимодальной структуры у побережья в одних случаях объясняется воздействием локальных ветровых условий, а в ряде других – гидродинамическим вкладом различных антициклонических вихревых образований, которые имеют различные временные масштабы существования. Отметим, что эти исследования выполнялись при различных физико-географических, геоморфологических, гидрометеорологических и гидрологических условиях. Для аргументированного обсуждения этой проблемы и получения новых количественных результатов в МГИ разработана методика обработки и анализа данных, позволяющая на основе методов математической статистики оценить характеристики, условия и продолжительность существования явлений бимодальной структуры прибрежного течения при различных природных условиях.

Функции распределения плотности вероятности (гистограммы) модуля скорости и направления течения содержат необходимый статистический материал для количественных оценок вклада основной и обратной мод колебаний в структуру прибрежного течения. Структура стационарного бимодального распределения повторяемости компонентов прибрежного течения позволяет последовательно сформировать необходимый набор гистограмм для поэтапного расчета интегральных показателей, характеризующих динамику вклада периодических колебаний в формирование бимодального распределения. Каждый набор гистограмм распределения направлений течения рассчитывался в угловых сегментах  $3^\circ$ , модуля скорости – в интервалах 1 см/с из хронологических рядов, полученных при заданных временных интервалах (периодах) векторного осреднения, например по 5-минутным либо среднечасовым отсчетам. По результату суммирования текущих значений вероятностей гистограммы в угловом секторе  $\pm 90^\circ$  от максимального значения вероятности направления обратной моды вычисляется значение показателя интегральной вероятности вклада обратной моды для конкретного временного периода осреднения. Показатели интегральной вероятности, рассчитанные по гистограммам из 5-минутных и среднечасовых реализаций, могут существенно отличаться. Согласно алгоритму почасового осреднения данных, из временного

ряда исключаются колебания с периодами до 60 мин, наличие которых может вносить свой статистический вклад в указанный интегральный показатель.

Оригинальная методика обработки натуральных данных разработана на основе комбинированного применения стандартных методов цифровой фильтрации и математической статистики. Обработка начинается с операций расчета первичных гистограмм и исходных показателей интегральной вероятности вклада обратной моды в бимодальную структуру направлений прибрежного течения. Далее следует процедура векторного осреднения исходных реализаций, т. е. исключения заданного временного периода колебаний (выборочная фильтрация) по алгоритму скользящего среднего при выборе шага с начальным параметром осреднения 1 ч. Затем выполняется расчет гистограмм этих осредненных рядов и вычисление текущего показателя интегральной вероятности вклада обратной моды для каждого горизонта. Процедура последовательной фильтрации данных ряда выполняется при пошаговом увеличении периода осреднения и постоянном сохранении базового количества среднечасовых отсчетов ряда. В результате выполнения последовательных операций поэтапно снижается значение показателя интегральной вероятности вклада обратной моды и на завершающем шаге осреднения после статистической обработки итоговое значение показателя становится тождественно равным нулю. Отсутствие интегрального вклада обратной моды колебаний является достоверным признаком существования в итоговой осредненной временной реализации только мономодального течения и его колебаний.

Далее для каждого гидрологического горизонта из последовательных наборов пошагово вычисленных статистических характеристик формируются итоговые функции показателя распределения интегральной вероятности вклада обратной моды колебаний, спадающие до нулевых значений в диапазоне выделенных временных периодов (частот) колебаний. После выполнения операций нормировки и последующего дифференцирования эти функции преобразуются в гистограммы распределения нормированной плотности интегральной вероятности вклада обратной моды колебаний. Анализ результатов, полученных по оригинальной методике, позволяет количественно оценить роль изменчивости режимных характеристик мономодального прибрежного течения в формировании условий возникновения и продолжительности существования явления бимодальной структуры направлений течения у м. Кикинеиз.

### **Результаты и обсуждение**

Черноморский гидрофизический подспутниковый полигон МГИ расположен на относительно прямолинейном участке берега северного побережья Черного моря в прибрежной зоне у м. Кикинеиз<sup>4</sup>. Голубой залив, где находится стационарная океанографическая платформа с кластером измерителей течений, имеет плавное очертание береговой линии и относительно неглубоко вдается в сушу [12]. Топография дна исследуемой акватории полигона в направлении открытого моря по нормали к берегу характеризуется относительно узкой полосой шельфа и быстрым нарастанием глубин на материковом склоне. На границе шельфа и материкового склона выделяется полоса повышенного горизонтального градиента скорости струйного ОЧТ, где происходит



слабое опускание вод, обусловленное поперечной винтообразной циркуляцией ОЧТ. По указанному признаку ОЧТ отделяют от течений прибрежно-шельфовой зоны.

У приглубого берега выделяют три обособленные зоны [12]: зона основной струи ОЧТ; течение на шельфе и течение в прибрежной полосе. Зона основной струи ОЧТ находится на материковом склоне, где в стрежне течение имеет мономодальную вероятностную гистограмму, отражающую преимущественно однонаправленный циклонический перенос вод, а скорость течения модулируется орбитальными скоростями разномасштабных вихревых, волновых и других гидродинамических возмущений<sup>5, 6</sup> [10, 13, 16, 17, 20]. Течение в шельфовой зоне часто рассматривается как периферия ОЧТ, где в сторону берега повторяемость течения основной моды уменьшается и происходит трансформация эллиптического вида орбитальной вдольбереговой циркуляции вод. В вероятностных гистограммах направления течения проявляется бимодальный характер распределения с изменяющимися соотношениями вклада между модами<sup>6, 7</sup> [13–17, 20].

Предметом настоящих исследований являются особенности формирования циркуляции вод в прибрежной полосе у берега шириной до 0,5 км, т. е. в мелководной акватории прибрежного экотона у ЮБК. Во всех публикациях по проблеме исследований констатируется, что в прибрежной зоне вдольбереговые течения имеют характер возвратно-поступательных движений, а режим циркуляции вод статистически достоверно характеризуется бимодальным распределением повторяемости направлений. Возможность существования у побережья стационарного мономодального течения в большинстве публикаций не обсуждалась. По результатам анализа материалов многолетнего мониторинга течений в районе ЧГПП у северного побережья Черного моря впервые в практике натурного эксперимента был достоверно выявлен факт существования и определены количественные режимные характеристики стационарного мономодального сдвигового по глубине прибрежного течения [7, 25]. При возмущениях течения волновые и вихревые орбитальные движения вод у побережья трансформируются в систему возвратно-поступательных вдольбереговых колебаний, практически коллинеарных с мономодальным течением.

При анализе результатов статистической и спектральной обработки установлено, что у южного побережья Крыма существуют два режима циркуляции вод – режим стационарного мономодального вдольберегового течения и режим бимодальной модуляции направления суммарного вдольберегового потока интенсивными гидродинамическими возмущениями. При мономодальном режиме модуль скорости течения доминирует над модулем орбитальной скорости коллинеарного гидродинамического возмущения и возникают периодические колебания только скорости суммарного вдольберегового потока вод без инверсии его направления. Бимодальная структура суммарного вдольберегового потока возникает и существует в ситуациях, когда модуль орбитальной скорости коллинеарного колебания в противофазе превышает модуль скорости мономодального течения. В этом случае формируются различные бимодальные структуры с инверсными колебаниями как направления, так и скорости суммарного вдольберегового потока.

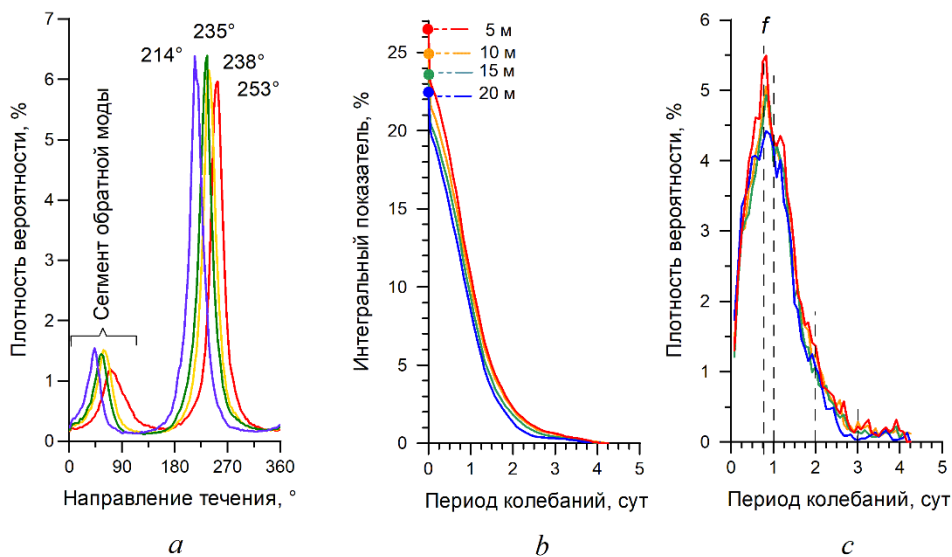
Для оценки тенденции в межгодовой изменчивости прибрежной циркуляции вод выполнен расчет среднегодовых и среднемноголетней характеристик вертикальной структуры сдвигового по глубине мономодального прибрежного течения. Результаты расчета средних за 20-летний период мониторинга (2002–2021 гг.) и среднегодовых за 2020 и 2021 гг. значений модуля скорости и направления течения на гидрологических горизонтах 5, 10, 15, 20 м приведены в таблице. Значения среднемноголетних режимных характеристик мономодального прибрежного течения на всех горизонтах за 20-летний период не изменились по сравнению с предыдущим периодом оценки [25]. Значения среднегодовой скорости течения на всех горизонтах по отношению к среднемноголетней скорости только в 2020 г. аномально снизились на 30%. Среднеквадратические отклонения среднегодовых значений скоростей от среднемноголетних на всех горизонтах за предыдущие 18 лет и последующий 2021 г. не превышали 10%. Достоверный факт аномального снижения среднегодовой скорости течения далее использован при оценке роли и изменении показателя вклада межгодовой изменчивости в формирование бимодальной структуры направлений прибрежной циркуляции вод.

**Изменчивость режимных характеристик сдвигового по глубине  
мономодального прибрежного течения**  
**Variability of mode characteristics of the depth-sheared  
monomodal coastal current**

Глубина, м / Depth, m	Скорость, см/с / Velocity, cm/s	Направле- ние, ° / Direction, °	Скорость, см/с / Velocity, cm/s	Направле- ние, ° / Direction, °	Скорость, см/с / Velocity, cm/s	Направле- ние, ° / Direction, °
	2002–2021		2020		2021	
5	8,1	253	5,7	255	8,3	262
10	8,0	240	5,8	241	8,2	248
15	7,7	234	5,7	235	7,8	236
20	7,0	217	5,2	217	7,0	215

Для оценки энергетических характеристик временной изменчивости колебаний прибрежного течения на горизонтах 5, 10, 15, 20 м рассчитаны спектры распределения плотности кинетической энергии. Достоверно выделены интенсивные колебания прибрежного течения в инерционно-гравитационном (возле локального инерционного 17,1 ч и суточного периодов), субинерционном (на периодах ~ 6 и 12 сут) и сезонном диапазонах изменчивости. Результаты выполненных спектральных расчетов подобны опубликованным в [25]. Спектральные особенности распределений плотности кинетической энергии в гравитационном диапазоне колебаний 10 мин – 1 ч подобны особенностям энергетических спектров вертикальных смещений термоклина при короткопериодном внутреннем волнении в прибрежной зоне ЮБК [23]. Однако результаты исследований изменчивости короткопериодных колебаний прибрежных течений в настоящей работе не рассматриваются.

Для решения поставленных задач на начальном этапе обработки выполнены расчеты гистограмм и исходных показателей интегральной вероятности вклада обратной моды (далее – интегральный показатель) на каждом горизонте. На рис. 1, *a* показаны эмпирические функции распределения плотности вероятности повторяемости направлений вдольбереговой циркуляции вод, рассчитанные по ~ 2 млн. пар исходных векторно-осредненных за временной интервал 5 мин компонентов вектора течения в угловых сегментах 3° для каждого измерительного горизонта. Здесь же обозначен анализируемый диапазон обратной моды колебаний с диаметрально противоположными направлениями по отношению к направлениям колебаний основной моды. Рассчитанные исходные интегральные показатели имеют максимальное значение 26,5% на горизонте 5 м, которое устойчиво снижается к горизонту 20 м до 22,5%.



**Рис. 1.** Эмпирические функции: *a* – плотности вероятности направлений вдольбереговой циркуляции вод; *b* – обеспеченности вклада обратной моды колебаний; *c* – нормированной плотности вероятности вклада обратной моды на горизонтах 5, 10, 15, 20 м (красная, оранжевая, зеленая, синяя линии соответственно); *f* – локальная инерционная частота

**Fig. 1.** Empirical functions of: *a* – the probability density of the alongcoastal water circulation directions; *b* – the probability of exceeding the contribution of the reverse oscillation mode; *c* – the normalized density of probability of the of reverse oscillation mode contribution at the horizons 5, 10, 15, and 20 m (red, orange, green and blue lines, respectively); *f* is the local inertial frequency

На рис. 1, *b* значения исходных интегральных показателей для каждого горизонта обозначены соответствующими кружками. Эти значения являются исходными и используются при нормировке последующих текущих значений интегрального показателя для оценки их относительных изменений.

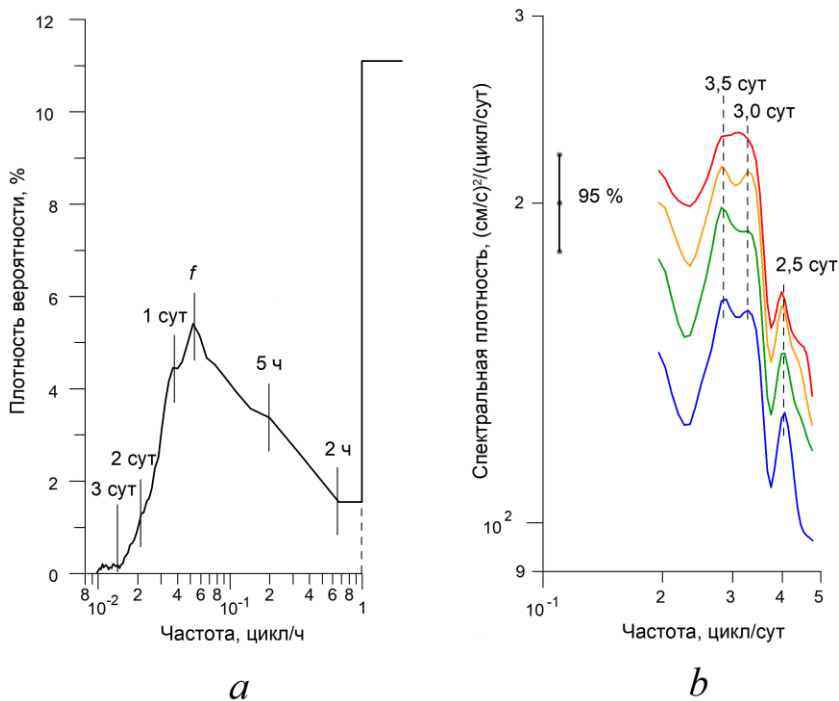
По созданной методике последовательно обработаны данные векторной базы среднечасовых рядов течений, прошедшие государственную регистрацию [25]. Для расчета гистограмм и текущих интегральных показателей вклада обратной моды использованы реализации из 175 320 пар среднечасовых отсче-

тов компонентов вектора течения, а также необходимые при осреднении дополнительные данные. Значения интегральных показателей среднечасовых данных, полученных при осреднении из 5-минутных рядов, снизились до 23,5% на горизонте 5 м и до 20,5% на горизонте 20 м. В результате фильтрации относительное снижение на ~ 11,5% нормированного интегрального показателя на горизонте 5 м обусловлено частичным устранением вклада обратной моды при соответствующем возрастании вклада основной моды.

Пошагово выполнены операции выборочной фильтрации векторных рядов при последовательном увеличении параметра фильтра на 1 ч, при соответствующих расчетах гистограмм и текущих интегральных показателей. По завершению обработки были сформированы итоговые функции распределения показателя интегральной вероятности вклада обратной моды колебаний для каждого горизонта. Для обработки и анализа использованы два набора реализаций: первый сформирован без данных аномального 2020 г., второй – с полным набором данных. На рис. 1, *b* показаны гистограммы эволюции распределения интегрального показателя на горизонтах 5, 10, 15, 20 м для первого набора реализаций. Вклад обратной моды колебаний в результате фильтрации был полностью устранен во временных реализациях практически одновременно на всех горизонтах при завершающем периоде осреднения 4,25 сут (102 ч).

Для выявления особенностей распределения интегрального показателя на различных горизонтах проведена нормировка гистограмм на максимальное исходное значение показателя для горизонта 5 м и вычислены первые разности среднечасовых реализаций. В результате для каждого горизонта были сформированы гистограммы распределения нормированной плотности интегральной вероятности вклада обратной моды колебаний в формирование бимодальной структуры направлений течения (рис. 1, *c*). Значения нормированной плотности интегральной вероятности в диапазоне колебаний 5 мин – 1 ч на начальном шаге обработки, например для горизонта 5 м, достигали ~ 11,5%, на рис. 1, *c* они не приведены, поскольку совпадают с соответствующей осью графика плотности вероятности. Интегральный вклад этого диапазона колебаний показан на рис. 2, *a*. Распределения на рис. 1, *c* демонстрируют особенности вклада колебаний прибрежного течения в диапазоне периодов 1 ч – 5 сут. Для первого набора реализаций верхний предел этого диапазона на всех горизонтах ограничен периодом 4,25 сут. Очевидно, что доминирующий вклад в обратную моду вносят колебания с периодами до 2 сут при максимуме вклада колебаний в диапазоне инерционного и суточного периодов и снижении интенсивности колебаний с глубиной.

Для количественной оценки вклада этих колебаний выполнена нормировка гистограмм распределения интегрального показателя на его максимальные исходные значения для каждого горизонта. Сформированные гистограммы распределения нормированной плотности интегральной вероятности вклада обратной моды имеют близкие значения и осреднены в слое 5–20 м. На рис. 2, *a* показана осредненная эмпирическая функция распределения нормированной плотности вклада обратной моды колебаний в диапазоне периодов 1 ч – 5 сут.



**Р и с. 2.** Осредненная в слое 5–20 м функция распределения нормированной плотности интегральной вероятности вклада обратной моды колебаний (*a*) и спектры распределения плотности кинетической энергии колебаний прибрежного течения в диапазоне периодов 2–5 сут на горизонтах 5, 10, 15, 20 м (красная, оранжевая, зеленая, синяя линии соответственно) при 95%-ном доверительном интервале (*b*)

**Fig. 2.** Function of the normalized density distribution of integral probability of the reverse oscillation mode contribution (averaged over the 5–20 m layer) (*a*) and the spectra of distribution of the kinetic energy density of the coastal current oscillations within the range of periods from 2 to 5 days at the horizons 5, 10, 15, and 20 m (red, orange, green, and blue lines, respectively) at the 95% confidence interval (*b*)

На рис. 2, *a* за пределом основного диапазона показан осредненный в слое 5–20 м уровень нормированной плотности интегральной вероятности вклада колебаний гравитационного диапазона 5 мин – 1 ч, соответствующий ~ 11%.

Согласно анализу результатов, полученных по расчетам для первого набора реализаций, в формирование обратной моды колебаний у м. Кикинеиз количественный вклад вносят колебания течения в следующих временных диапазонах изменчивости: 5 мин – 1 ч при вкладе ~ 11%; 1 ч – 2 сут при вкладе ~ 80%; 2–3 сут при вкладе ~ 7%; 3–4 сут при вкладе ~ 2%. Суммарный вклад до 91% в формирование обратной моды вносят колебания прибрежного течения на периодах до 2 сут и 9% – на периодах 2–4 сут.

Результаты обработки второго набора реализаций для горизонтов 10, 15, 20 м совпадают с результатами обработки первого. Достоверные различия выделены только в приповерхностном слое на горизонте 5 м, где завершающий период обработки увеличился до 5 сут (122 ч). Суммарный вклад до 91% в формирование обратной моды сосредоточен в колебаниях с периодами до 2 сут, а 9% вклада рассредоточены в диапазоне периодов 2–5 сут.

Таким образом, существенные межгодовые отличия в среднегодовых режимных характеристиках мономодального течения могут оказывать влияние на структуру характеристик формирования и продолжительность существования явления бимодальной структуры направлений циркуляции прибрежных вод.

Согласно функции распределения (рис. 2, *a*), существенный вклад в формирование бимодальной структуры вносят колебания инерционно-гравитационного диапазона изменчивости циркуляции прибрежных вод. Исследования колебаний прибрежно-шельфовых вод у ЮБК в этом диапазоне изменчивости, включая колебания суточного, локального инерционного периодов и короткопериодного внутреннего волнения, постоянно совершенствуются<sup>5-7</sup> [6, 12, 20, 22, 23] в связи с кардинальной ролью этих колебаний в динамике вод бесприливного Черного моря. При этом для акватории у ЮБК также необходимо учитывать вклад захваченных волн, генерируемых локальными ветрами с периодом ~ 26,5 ч [15], а также сейш [12].

В [10, 13, 16, 17] показано, что на шельфе северо-восточной части Черного моря в бимодальный режим течения у побережья существенный вклад вносят мезомасштабные антициклонические вихри продолжительностью 2–7 сут. В [21] отмечено, что на северокавказском шельфе существуют цепочки не только антициклонических, но и циклонических субмезомасштабных вихрей. Согласно распределению (рис. 2, *a*), в формирование бимодального режима прибрежного течения у м. Кикинеиз также вносят вклад колебания в диапазоне периодов 2–5 сут. При этом вклад колебаний с периодами до 2 сут на порядок выше, чем с периодами 2–5 сут.

Для получения дополнительных сведений об особенностях изменчивости течения у южного побережья Крыма в диапазоне периодов 2–5 сут выполнен расчет среднесезонных спектров распределения плотности кинетической энергии колебаний (рис. 2, *b*). На всех горизонтах измерений спектральные максимумы колебаний прибрежного течения в диапазоне периодов 3,0–3,5 сут достоверно превышают 95%-ный доверительный интервал при спаде колебаний вблизи периодов ~ 4,3 сут. Согласно материалам выполненного обзора публикаций<sup>5</sup> [12], в районе ЮБК также следует учитывать достоверный факт серийной генерации инерционных колебаний при продолжительности существования каждой серии инерционных круговоротов в течение 3–4 сут.

В настоящей работе приведены материалы, позволяющие расширить научные представления об особенностях формирования вдольбереговой циркуляции вод прибрежного экотона у южного побережья Крыма и сущности явления бимодальной структуры направлений прибрежного течения. При этом необходимо продолжить дальнейшие исследования динамики вод прибрежной акватории у ЮБК как необходимого элемента для формирования и развития региональной структуры эколого-экономического мониторинга прибрежного экотона [1].

### **Заключение**

Разработана и использована на практике оригинальная методика обработки и анализа натурных данных на основе комбинированного применения стандартных методов цифровой фильтрации и математической статистики при исследованиях особенностей формирования циркуляции вод прибрежного экотона у южного побережья Крыма. Результаты расчетов по разработанной

методике и данным 20-летнего мониторинга изменчивости мономодального прибрежного течения у м. Кикинеиз за период 2002–2021 гг. позволили количественно оценить вклад интенсивных колебаний течения в формирование явления бимодальной структуры прибрежной циркуляции вод.

Новые научные результаты получены на основе обработки и анализа полного набора натуральных данных с учетом систематизации ранее опубликованных результатов по исследуемой проблеме. Показано, что в зависимости от гидродинамических условий у южного побережья Крыма существуют два режима циркуляции прибрежных вод – режим мономодального вдольберегового течения и режим бимодальной модуляции направления вдольберегового потока при интенсивных гидродинамических возмущениях. Бимодальная структура суммарного вдольберегового потока вод возникает и существует в ситуациях, когда модуль орбитальной скорости коллинеарного колебания в противофазе превышает модуль скорости мономодального течения. В этом случае формируются различные бимодальные структуры с инверсными колебаниями как направления, так и скорости потока. При формировании обратной моды бимодальной структуры у м. Кикинеиз на всех горизонтах выделен доминирующий вклад колебаний в инерционно-гравитационном диапазоне изменчивости.

Продемонстрированы перспективы развития исследований циркуляции прибрежных вод как существенного природного фактора, влияющего на социально-экономическое развитие региона южного побережья Крыма при формировании структуры эколого-экономического мониторинга вод прибрежного экотона.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимченко И. Е., Иващенко И. К., Игумнова Е. М. Управление эколого-экономическими процессами накопления и ассимиляции загрязнений в прибрежной морской среде // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 1. С. 72–88. doi:10.22449/0233-7584-2017-1-72-88
2. Технология исследования динамики прибрежных вод как элемент кризисного мониторинга природной среды / А. С. Кузнецов [и др.] // Материалы научных мероприятий, приуроченных к 15-летию Южного научного центра Российской академии наук (13–16 декабря 2017, г. Ростов-на-Дону). Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2017. С. 120–122.
3. 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.
4. Pokazeev K., Soyga E., Chaplina T. Pollution in the Black Sea: Observation about the Ocean's Pollution. Cham, Switzerland : Springer Nature, 2021. 227 p. (Springer Oceanography series).
5. Израэль Ю. А., Цибань А. В. Об ассимиляционной емкости Мирового океана // Доклады Академии наук СССР. 1983. Т. 272, № 3. С. 702–705.
6. Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / Под ред. В. А. Иванова, В. А. Дулова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. 526 с.
7. Иванов В. А., Кузнецов А. С., Морозов А. Н. Мониторинг циркуляции прибрежных вод у Южного берега Крыма // Доклады Академии наук. 2019. Т. 485, № 4. С. 507–510. doi:10.31857/S0869-56524854507-510
8. О внутрigoдовой изменчивости течений на шельфе Кавказского побережья Черного моря / В. Г. Кривошея [и др.] // Океанология. 1980. Т. XX, вып. 1. С. 34–39.
9. Овчинников И. М., Титов В. Б., Кривошея В. Г. Новые данные о временной изменчивости течений по результатам многолетних измерений со стабилизированного буя на шельфе Черного моря // Доклады Академии наук СССР. 1986. Т. 286, № 5. С. 1250–1254.

10. *Овчинников И. М., Титов В. Б.* Антициклоническая завихренность течений в прибрежной зоне Черного моря // Доклады Академии наук СССР. 1990. Т. 314, № 5. С. 1236–1239.
11. *Титов В. Б.* Статистические характеристики и изменчивость течений на западном шельфе Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 1991. № 2. С. 41–47.
12. Особенности течений у приглубого берега / С. Г. Богуславский [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 1991. № 5. С. 27–34.
13. *Титов В. Б.* О роли вихрей в формировании режима течений на шельфе Черного моря и в экологии прибрежной зоны // Океанология. 1992. Т. 32, вып. 1. С. 39–47.
14. *Иванов В. А., Янковский А. Е.* Локальный динамический эксперимент в шельфовой зоне Южного берега Крыма // Океанология. 1993. Т. 33, № 1. С. 49–56.
15. *Иванов В. А., Янковский А. Е.* Динамика вод на шельфе Крыма в летний сезон // Морской гидрофизический журнал. 1994. № 3. С. 38–56.
16. New data on the current regime on the shelf of the northeastern Black Sea / V. G. Krivosheya [et al.] // Oceanology. 2001. Vol. 41. P. 307–316.
17. *Титов В. Б., Кривошея В. Г., Москаленко Л. В.* Режим течений в Российском секторе Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Отв. ред. А. Г. Зацепин, М. В. Флинт. М.: Наука, 2002. С. 48–55.
18. *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. 2003. Вып. 8. С. 64–68.
19. *Krivosheya V. G., Moskalenko L. V., Titov V. B.* On the current regime over the shelf near the North Caucasian coast of the Black Sea // Oceanology. 2004. Vol. 44. P. 331–336.
20. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
21. 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.
22. *Bondur V. G., Sabinin K. D., Grebenyuk Yu. V.* Characteristics of inertial oscillations according to the experimental measurements of currents on the Russian shelf of the Black Sea. // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. Vol. 53. P. 120–126. doi:10.1134/S0001433816050030
23. *Химченко Е. Е., Серебряный А. Н.* Внутренние волны на Кавказском и Крымском шельфах Черного моря (по летне-осенним наблюдениям 2011–2016 гг.) // Океанологические исследования. 2018. Т. 46, № 2. С. 69–87. doi:10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).7
24. *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
25. *Кузнецов А. С.* Среднеголетняя сезонная изменчивость прибрежного течения у Южного берега Крыма в 2002–2020 годах // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 2. С. 151–164. doi:10.22449/0233-7584-2022-2-151-164

*Об авторах:*

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

**Ивашенко Игорь Кондратьевич**, ответственный секретарь редакционной коллегии, старший научный сотрудник, отдел гидрофизики шельфа, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат экономических наук, **AuthorID: 941046 SPIN-код: 7626-4616**, journal@mhi-ras.ru