

УДК 551.465

## МОНИТОРИНГ ЦИРКУЛЯЦИИ ПРИБРЕЖНЫХ ВОД У ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА

Академик РАН В. А. Иванов\*, А. С. Кузнецов, А. Н. Морозов

Поступило 05.07.2018 г.

Представлены результаты комплексного мониторинга динамики вод за 2008–2016 гг. в прибрежной зоне у южного берега Крыма. Установлен режим и особенности циркуляции прибрежных вод. По результатам спектрального анализа девятилетнего набора векторных рядов динамики выделен интенсивный вклад низкочастотных колебаний прибрежных течений на сезонном и синоптическом масштабах. При колебаниях вод в прибрежной зоне доминирует вдольбереговая структура возвратно-поступательных струйных течений, вызванных динамикой вод на шельфе и материковом склоне.

*Ключевые слова:* прибрежная зона, циркуляция вод, вектор течения, спектр кинетической энергии.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524854507-510>

Интенсивное освоение биологических, минерально-сырьевых, энергетических, рекреационных морских природных ресурсов при активной эксплуатации транспортного и коммуникационного потенциала прибрежной зоны Чёрного моря способствует росту техногенных и антропогенных нагрузок на прибрежный экотон Крыма. Данные мониторинга динамики прибрежных вод в условиях сброса промышленно-сточных вод непосредственно в прибрежной зоне позволяют оперативно оценить степень риска загрязнений акватории при кризисном мониторинге ситуации. В шельфово-склоновой и прибрежной зонах Чёрного моря на фоне диссипации энергии разномасштабных колебаний Основного черноморского течения (ОЧТ) формируются специфические интенсивные синоптические, суб-, мезо- и мелкомасштабные вихре-волновые и другие движения вод. Такая динамика вод типична для узкой шельфовой зоны российской части Чёрного моря и активно исследуется институтами РАН на стационарных морских полигонах в различных природных условиях (например, [1–4]). Совокупность океанографических, гидрометеорологических, орографических и других природных факторов влияет на динамику вод в прибрежной зоне. Исследования в различных физико-географических условиях позволяют повысить степень обобщённости новых знаний о динамике прибрежных вод.

В [5] дана современная классификация пространственно-временных масштабов изменчивости природных процессов в Чёрном море и определена

концепция развития инструментального мониторинга с целью детализации характеристик разномасштабных природных процессов при высоком разрешении и точности измерений. Использование современных измерительных комплексов и применение новых геоинформационных технологий [5, 6] позволило детализировать, упорядочить и систематизировать вклад разномасштабных природных процессов при проведении комплексных полигонных исследований в прибрежной зоне у южного берега Крыма (ЮБК). Мониторинг динамики прибрежных вод, гидрометеорологических условий и уровня поверхности моря выполнен в течение 2008–2016 гг. Характеристики прибрежных течений регистрировались антенным набором векторно-осредняющих эйлеровых измерителей течений [2] на стационарной океанографической платформе (СОП) Черноморского гидрофизического полигона РАН у м. Кикинейз. Исследования позволили с высокой точностью исследовать режим прибрежной циркуляции вод и изменчивость течений. Для детализации характеристик в 2014–2016 гг. выполнены серии регулярных судовых съёмки акваторий на тестовых мелкомасштабных полигонах у м. Кикинейз и Гераклеийского п-ва. При исследованиях структуры океанографических полей использовали комплекс попутных гидрофизических измерений (КГПИ) [5], набор современных гидрологических зондов (STD) и акустических доплеровских профилометров течений (ADCP) [6], что обеспечило получение синхронных вертикальных профилей горизонтальных компонент вектора скорости течений и гидрологических STD-характеристик. Данные ADCP-измерений на ходу судна в сочетании данными попутных КГПИ-измерений и спутниковыми изображениями

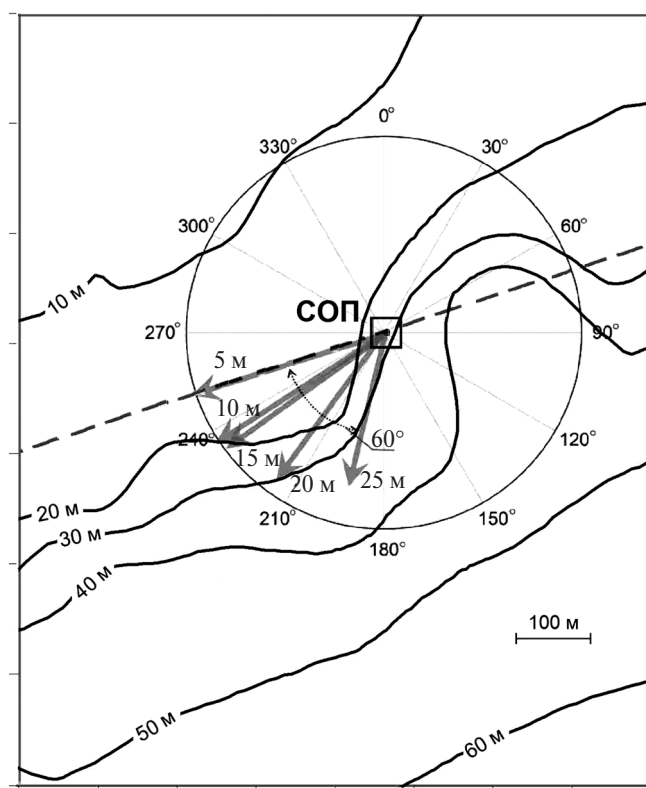
*Морской гидрофизический институт  
Российской Академии наук, Севастополь  
\*E-mail: vaivanov@inbox.ru*

морской поверхности позволили провести детальные исследования пространственных масштабов изменчивости.

Выполнен совместный анализ натуральных данных, полученных у ЮБК при мониторинге прибрежной зоны [7]. Движение черноморских вод в ОЧТ при общей циклонической направленности относительно глубокого моря над материковым склоном ориентировано вдоль изобат рельефа дна при наибольших скоростях течения вблизи крутых участков склона (например, [1]). В прибрежной зоне у ЮБК вдольбереговое течение согласовано по направлению с ОЧТ. При анализе распределения характеристик прибрежных течений, осреднённых за девятилетний период, установлен факт циклонического разворота направления вектора среднего течения от приповерхностного к придонному слою. При этом суммарный сдвиг вектора течения влево по потоку достигает значений  $60^\circ$  на вертикальной базе 20 м. Изменение направления и модуля скорости вектора среднегодового прибрежного течения по глубине схематически показано в плане на рис. 1 в виде разворота вектора, нормированного на максимальное

значение модуля скорости. Максимум модуля скорости среднего за девятилетний период течения находится в приповерхностном слое и имеет величину  $8,5 \text{ см/с}$  при максимальной изменчивости среднегодовых значений в пределах  $\pm 1,2 \text{ см/с}$ . На рис. 1 изображено пространственное расположение изобат 10–60 м по результатам съёмки рельефа дна акватории полигона, выполненной у м. Кикинейз в 1977 г. Последующие съёмки рельефа дна акватории по настоящее время демонстрируют неизменность форм донного рельефа в районе СОП (например, [7]). На рис. 1 прерывистой линией показано генеральное направление доминирующих вдольбереговых ветров, регистрируемых в море на СОП при удалении 500 м от берега. Это направление соответствует ориентации береговой линии в районе исследований. Локальные ветры слабо влияют на изменчивость вертикальной структуры прибрежного течения на глубинах 5–25 м. Движение прибрежных вод на материковой отмели, как и в случае движения вод в ОЧТ над материковым склоном, устойчиво ориентировано вдоль изобат рельефа дна. В приповерхностном слое на горизонте 5 м течение направлено на запад — юго-запад вдоль берега (прерывистая линия на рис. 1). Как следует из рис. 1, на глубинах 20–30 м в районе СОП изобаты существенно меняют направление по отношению к ориентации береговой линии. В этом слое происходит интенсивный циклонический разворот направления прибрежного течения от приповерхностного к придонному слою при угловом сдвиге в  $40^\circ$  на вертикальной базе 10 м. В придонном слое на горизонте 25 м чётко выражено влияние рельефа дна на ориентацию придонного потока, который направлен вдоль соответствующей изобаты склона.

Существенная изменчивость характеристик устойчивой вертикальной структуры среднего прибрежного течения, в том числе её кратковременное разрушение, возникает под воздействием интенсивных гидродинамических образований глубокого моря. Спектральный анализ полного набора векторных рядов динамики прибрежных течений позволил систематизировать внешние возмущающие факторы по масштабам воздействия. Выделен ряд интенсивных статистически достоверных колебаний плотности кинетической энергии течений. На масштабе внутригодовой изменчивости доминируют два энергонасыщенных пика колебаний течений с периодами 90 и 180 сут при среднеквадратических значениях модуля скорости  $\sim 30,0 \text{ см/с}$ . Также зарегистрированы существенные сезонные изменения в вертикальном распределении среднемесячного модуля скорости вектора течения. Из анализа динамики



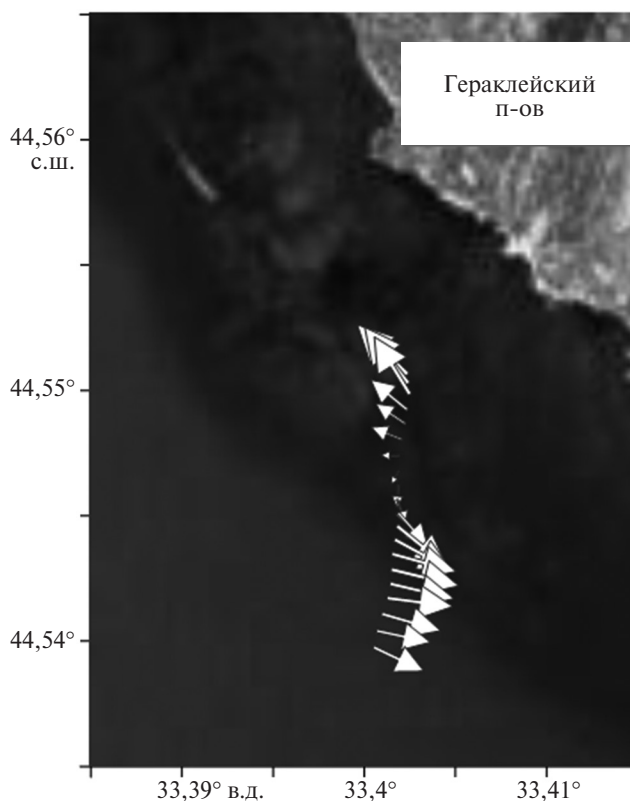
**Рис. 1.** Распределение модуля скорости и направления нормированного вектора среднегодового прибрежного течения по глубине в плане на фоне пространственного расположения изобат 10–60 м рельефа дна и направления вдольбереговых ветров (штриховая линия) в районе СОП.

распределения изотак скоростей прибрежного течения по глубине выделены два основных сезонных типа распределений — зимний и летний. При зимних гидрологических условиях в перемешанном квазиоднородном слое прибрежных вод среднемесячный модуль скорости течения имеет максимум в водной толще при незначительных (до 5%), изменениях по глубине. В летний сезон среднемесячный нормированный модуль скорости течения имеет максимум в приповерхностном слое и уменьшается с глубиной в придонном слое до значений 0,3 от максимума. Изменения в распределении модуля скорости течения по глубине для летнего сезона обусловлены динамикой прибрежных вод в условиях сформировавшегося сезонного пикноклина и устойчивой вертикальной плотностной стратификации. При явлении апвеллинга в прибрежной зоне происходит кратковременное разрушение циркуляции вод летнего типа. В переходные весенний и осенний сезоны происходит перестройка между двумя указанными основными типами сезонных распределений скоростей прибрежного течения.

На синоптическом масштабе в спектральной области локализованы два достоверных спектральных максимума кинетической энергии колебаний с периодами 11,5 и 5,5 сут. Выделенные колебания возникают вследствие регулярных возмущений стационарного режима циркуляции вод. Один из факторов, формирующих специфические осцилляции прибрежных вод, — субинерционные захваченные берегом волны, исследуемые в специальных натурных, например [8], и в численных экспериментах [9]. Результаты комплексного анализа данных натурного и модельного экспериментов, представленные в [8], позволяют идентифицировать колебания с периодами ~11 сут как захваченные берегом волны с пространственным масштабом порядка длины береговой линии Чёрного моря, которые генерируются удалённым ветровым воздействием. Колебания вод с периодом ~6 сут связаны со сгонно-нагонной циркуляцией, имеющей у ЮБК периодичность 5–7 сут [8].

Выполнены оценки степени воздействия распространяющихся в регионе гидродинамических образований на изменение вдольберегового режима циркуляции прибрежных вод. Из исходной генеральной совокупности центрированных векторных рядов динамики прибрежных течений были рассчитаны эмпирические функции распределения плотности вероятности характеристик колебаний течений. В распределении направлений существуют два узконаправленных пика, сдвинутых между собой

по фазе на 180°, т.е. в регионе в течение всего периода наблюдений доминируют коллинеарные движения прибрежных вод. Этот факт и данные спектрального анализа свидетельствуют о том, что основные вихре-волновые орбитальные движения вод от внешних возмущений трансформируются в прибрежной зоне практически в динамическую систему регулярно чередующихся квазиколлинеарных возвратно-поступательных струйных течений. Ось этих реверсивных колебаний совершает соответствующий циклонический разворот вместе с вектором среднего течения. Смена направления струйного вдольберегового течения на диаметрально противоположное — характерная форма пространственно-временной изменчивости прибрежных течений у ЮБК. На рис. 2 приведены результаты ADCP-измерений изменчивости характеристик прибрежного течения, полученные 10.09.2015 г. с борта судна в дрейфе на тестовом мелкомасштабном полигоне у Гераклеийского п-ва, где в векторном виде отображена ситуация пространственно-временной изменчивости направления вдольберегового течения на противоположное при скоростях до 20 см/с на дистанции 1 км в течение 1 ч.



**Рис. 2.** Пространственно-временная изменчивость направления вдольберегового течения по данным ADCP-измерений, выполненных 10.09.2015 г. с борта судна в дрейфе.

В заключение можно отметить, что представленные в работе результаты получены в комплексе с результатами исследований изменчивости мелкомасштабной структуры прибрежных течений, оценок взаимосвязи характеристик инерционных колебаний, внутренних гравитационных волн и турбулентности на стационарной океанографической платформе [7], а также динамики прибрежных вод в зонах активного сброса и перемешивания промышленно-сточных вод [6] на тестовых полигонах в судовых экспедициях. Пространственно-временная полнота натурных данных инструментального мониторинга во многом определяет точность гидродинамического анализа и прогноза морских явлений при создании перспективных информационно-аналитических баз знаний. Новые экспериментальные материалы необходимы для валидации и совершенствования современных численных моделей, поэтому инструментальный мониторинг динамики прибрежных вод у ЮБК, осуществляемый Морским гидрофизическим институтом РАН, остаётся одной из наших приоритетных задач.

**Источники финансирования.** Работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 0827–2014–0010 “Фундаментальная океанология” и № 0827–2014–0011 “Оперативная океанография”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Чёрного моря (на примере южного берега Крыма). Киев: Наук. думка, 1992. 242 с.
2. Кузнецов А.С., Иванов В.А., Зима В.В. В сб.: Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь, 2014. В. 28. С. 42–50.
3. Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др. // Изв. РАН. ФАО. 2014. Т. 50. № 1. С. 16–29.
4. Морозов А.Н., Зацепин А.Г., Куклев С.Б. и др. // Изв. РАН. ФАО. 2017. Т. 53. № 6. С. 718–727.
5. Иванов В.А. // Изв. РАН. ФАО. 2014. Т. 50. № 1. С. 30–40.
6. Морозов А.Н., Иванов В.А., Шутов С. и др. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. Севастополь, 2017. В. 1. С. 23–31.
7. Иванов В.А., Дулов В.А. Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне. Севастополь: МПЦ “ЭКОСИ — Гидрофизика”, 2014. 526 с.
8. Иванов В.А., Янковский А.Е. // Морской гидрофиз. журн. 1994. № 3. С. 38–56.
9. Иванов В.А., Багаев А.В. // Изв. РАН. ФАО. 2014. Т. 50. № 6. С. 733–743.

## MONITORING THE CIRCULATION OF COASTAL WATERS OFF THE SOUTHERN COAST OF CRIMEA

Academician of the RAS V. A. Ivanov, A. S. Kuznetsov, A. N. Morozov

*Federal State Budget Scientific Institution Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russian Federation*

Presented July 5, 2018

The paper presents the results of integrated monitoring of water dynamics in the coastal zone off the Southern coast of the Crimea for 2008–2016. The regime and features of circulation of coastal waters were determined. An intensive contribution of low-frequency oscillations of coastal currents at the seasonal and synoptic scales was identified based on the results of spectral analysis of a nine-year set of vector dynamics series. For water fluctuations in the coastal zone, the alongshore structure of reciprocating jet streams caused by water dynamics at the shelf and continental slope dominates.

*Keywords:* coastal zone, water circulation, current vector, kinetic energy spectrum.