

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-159-167
УДК 551.465+551.501.8

В.В. Горбацкий, Н.Н. Шпилев , Е.С. Лебедева
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

КОНТРОЛЬ ТЕЧЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРИБРЕЖНЫХ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Объект и цель научной работы. Представлен сравнительный анализ спутниковых картин формирования вихревых структур на морской поверхности, «визуализированных» переносом поверхностно-активных веществ течениями, и характеристик синхронно измеренных векторов скоростей течений береговым доплеровским коротковолновым радиолокатором в юго-восточной части Черного моря. Задачей исследований является оценка возможности выполнения оперативного контроля динамического состояния прибрежной морской акватории с помощью совместного использования данных спутниковых наблюдений, радиолокационного зондирования поля течений, данных о ветровых условиях и данных численного моделирования циркуляции водных масс в рассматриваемой акватории.

Материалы и методы. Рассматриваются данные наблюдений морской поверхности в прибрежной акватории Черного моря оптическими системами спутников Sentinel 1 и 2, данные измерений береговым доплеровским коротковолновым радиолокатором Sea Sonde в прибрежной акватории Черного моря. Для интерпретации полученных данных использованы сведения о ежесуточной изменчивости спутниковых оптических картин морской поверхности, обеспеченных преимущественно спутниками MODIS и Sentinel [9, 10], и ветровых условиях в районе исследований по данным реанализа NCEP/NCAR [11, 12]. Проведено сопоставление картин вихревых структур, наблюдавшихся на морской поверхности по спутниковым данным и полученных с помощью радиолокационного зондирования. С помощью программного пакета COHERENS, разработанного в Бельгийском институте естественных наук, выполнено численное моделирование циркуляции водных масс, индуцированной ветровым воздействием в рассматриваемой акватории.

Основные результаты. По спутниковым данным установлена возможность возникновения крупномасштабных вихревых структур на морской поверхности в прибрежной акватории юго-восточной части Черного моря в окрестности сильной изменчивости береговой линии, которые развиваются в процессе переноса вдоль протяженной береговой линии вихревых структур, возникающих локально в областях изменчивости донного рельефа, неровностей береговой линии и в районах стоков рек. Перенос вихревых систем сопровождается увеличением их размеров и возникновением протяженных (десятки км) струй, что характерно, в частности, для распространения волн Россби. Показана возможность оперативной оценки картины циркуляции водных масс на поверхности акватории с использованием измерений течений с помощью одноточечного доплеровского коротковолнового (КВ) радиолокатора, демонстрирующих процесс формирования вихревых структур, соответствующих наблюдаемым на спутниковых картинах. При этом радиолокационные измерения течений имеют по сравнению со спутниковыми наблюдениями существенное преимущество непрерывного многодневного зондирования участка поверхности с высоким разрешением по времени: 1 ч. Численное моделирование прибрежной циркуляции вод под действием ветра показывает существенную роль параметров ветра в процессе формирования крупных вихревых структур в области прибрежной мелководной части шельфа.

Заключение. Выполненные исследования показывают, что достоинства спутниковых оптических наблюдений динамического состояния морской поверхности – большая площадь наблюдаемой акватории, обнаружение выраженных крупномасштабных гидродинамических структур – ограничиваются значительными интервалами прохождения спутников через выбранный район и возможностью таких наблюдений только в отсутствие облачности. Привлечение дополнительных данных регулярного спутникового мониторинга характеристик морской поверхности акватории и данных о ветровых условиях с общедоступных интернет-сайтов позволяет получать более детальную картину фактического динамического состояния морской поверхности и его развития. Комплексное применение подспутниковых наземных радиолокационных измерений параметров течений на морской поверхности и применение численного моделирования процессов развития течений с учетом ветровых условий, батиметрических особенностей акватории и особенностей береговой линии позволяет прогнозировать возникновение и параметры гидродинамических явлений, существенных для оценки состояния прибрежной акватории.

Ключевые слова: спутниковое наблюдение, доплеровский коротковолновый радиолокатор, измерение скорости течений, численное моделирование.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Горбацкий В.В., Шпилев Н.Н., Лебедева Е.С. Контроль течений на поверхности прибрежных морских акваторий дистанционными методами. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 1(399): 159–167.

For citations: Gorbatsky V., Shpilev N., Lebedeva Ye. Sea currents monitoring in the coastal areas by the remote observation methods. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 1(399): 159–167 (in Russian).

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-159-167
UDC 551.465+551.501.8

V. Gorbatsky, N. Shpilev^{ID}, Ye. Lebedeva
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

SEA CURRENTS MONITORING IN THE COASTAL AREAS BY THE REMOTE OBSERVATION METHODS

Object and purpose of research. The compare analysis carried out on the vortices structure optical satellite pictures observation of the sea surface and the velocities field obtained by the ground HF Doppler radar. The purpose of this research is estimation of the possibility on fast monitoring feasibility assessment for the changes in littoral waters dynamics through joint application of satellite surveillance, radar probing of sea currents, wind data and numerical simulation of water circulation in the area under investigation.

Materials and methods. The Sea surface observation data obtained by the satellites Sentinel 1 and 2 and by the coastal Doppler HF radar Sea Sonde in the South-east Black Sea area are analyzing. The additional data on the satellite observation of this area and on the wind condition is used from LANCE processing system [9, 10] and reanalysis NCEP/NCAR [11, 12]. The comparative analysis is carried out on the large vertical structures (LVS) establishing in the research coastal area. The numerical modeling of the water mass circulation in this area is carried out by the software package COHERENS (Belgian Institute of Natural Science) to investigate the role of the wind conditions at LVS appearance in the research area.

Main results. The LVS in the vicinity of Sea coast line could be generated, as satellites observations demonstrated, by the vortices arrived along the coast line from the east-south direction in accordance with the Black Sea general circulation flow. Such vortices could be induced by the bottom roughness, rivers discharges and another local sources. Another LVS source could be connected with the wind impact in some affordable direction as demonstrated by the numerical modeling of the coastal water circulation. The continuous currents measurements at the Sea surface by Doppler HF coastal Radar supply the valuable data for further details on the space –time variation of LVS parameters and operational forecast of the hydrology regime in the aquatic areas. The operative numerical modelling of the wind impact to the surface currents structures formation provides the efficient estimation of the local large vorticity structure appearance in the research area.

Conclusion. Satellite radar and optical observation provide the large scale control on the Sea surface dynamics conditions, but that is limited by relatively long interval between satellite tracks over the region of interest and do not acquire optical data at the cloud cover. The additional data could be operative obtain from the open internet resource in satellite optical, radar and meteorological data (LANCE, NCEP/NCAR), to get the more details development of the Sea surface dynamics. Sub-satellite Sea currents measurements by HF Doppler radar are useful for the reliable interpretation of satellite pictures and for the proper forecast of the aquatic area dynamics. Operative numerical modelling of the Sea coastal water circulation in accordance with variable meteo data combining with dynamic processes remote measurements could be efficient for the forecast of the environment parameters variation due the water mass transfer. In general the presented results demonstrates the combined application possibilities of the satellite observations, coastal Doppler radar measurements, internet data and operative numerical modelling for operational oceanographic and ecological monitoring of Sea coastal areas with heavy pollution load.

Keywords: Satellite observation, HF Doppler radar, Sea currents measurements and numerical modelling.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Характеристики поля течений в прибрежных морских акваториях, их сезонная изменчивость и краткосрочная трансформация под действием ветровых условий, например явления апвеллинга и даунвеллинга, оказывают существенное влияние на экологическое состояние водных масс, определяемое, в частности, гидрологическими параметрами и переносом физико-химических примесей. В этой связи проводится систематический контроль (мониторинг) динамического состояния водных масс в морских акваториях, имеющих высокие риски наруше-

ния экологического состояния вследствие техногенных загрязнений и переноса природных примесей неоднородностей.

Традиционные методы мониторинга изменчивости течений и процессов переноса примесей в прибрежных морских акваториях основываются на получении соответствующих данных в совокупности контрольных точек в акватории, где расположены стационарные измерительные системы, и на данных периодических измерений с борта специализированных судов. Такие методы в типичных случаях значительной изменчивости гидродинамических процессов в акваториях со сложным донным рельефом, с существенной неровностью береговой

линии, значительной изменчивостью ветрового режима не обеспечивают необходимую информативность получаемых данных для решения задач контроля экологического состояния акватории.

В последние годы значительное распространение получили дистанционные методы регистрации течений, волн и примесных неоднородностей на морской поверхности с использованием радиолокационных систем измерения, располагаемых на береговой линии, и радиолокационных и оптических систем на спутниковых носителях. В спутниковых системах применяются радиолокационные измерители сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона с рабочей частотой 5–10 ГГц, в наземных системах дистанционного наблюдения морской поверхности используются СВЧ-радиолокаторы и коротковолновые доплеровские радиолокационные комплексы с рабочей частотой 3–40 МГц.

Радиолокационные системы СВЧ-диапазона, размещаемые на спутниковых носителях, позволяют определять контрастные области радиолокационного отражения морской поверхностью, обусловленные гидродинамическими процессами трансформации волн и переносом примесей, в частности поверхностно-активных веществ, природного и техногенного происхождения.

На спутниковых носителях также располагаются оптические регистраторы неоднородностей морской поверхности видимого диапазона (солнечное отражение в совокупности спектральных полос) и инфракрасного диапазона (температура морской поверхности), «визуализирующие» структуру течений.

Радиолокационные СВЧ измерительные средства и регистраторы оптического диапазона, размещаемые на спутниках, обеспечивают большую площадь зондирования морской поверхности (сотни кв. км) и сравнительно высокое пространственное разрешение (до 5 м). В то же время значительные интервалы времени между прохождениями спутника над выбранной акваторией, наличие непреодолимой для оптических систем видимого диапазона облачности ограничивают информативность получаемых спутниковых данных для решения задач экологического мониторинга.

Указанное ограничение возможностей площадных спутниковых наблюдений может быть преодолено в части определения параметров течений и волн на морской поверхности путем использования береговых доплеровских коротковолновых радиолокаторов, которые могут круглогодично непрерывно, с часовым и менее интервалом измерения обеспечивать получение данных о течениях

и волнах на морской поверхности на дальностях от берега до 100 км и более.

В настоящей работе представлены результаты синхронных измерений скоростей течений на морской поверхности одноточечным доплеровским коротковолновым радиолокатором Sea Sonde, размещенным в точке береговой линии юго-восточного Черноморского побережья, и спутниковых наблюдений радиолокационными СВЧ и оптическими (в видимом диапазоне) системами участка морской поверхности, включающего точку положения радиолокатора. Из обработанного массива данных за осенне-летний период 2018 г. выбраны два эпизода, когда на морской поверхности оптическими измерителями спутника Sentinel 2A наблюдалось формирование выраженных вихревых структур.

Методы исследований

Research methods

В настоящей работе рассматривается возможность повышения информативности дистанционных методов мониторинга морских акваторий, в частности дистанционной регистрации гидрофизических явлений, на морской поверхности, на основе комплексного использования следующих данных:

- анализ данных радиолокационных и оптических наблюдений, выполнявшихся в период 2016–2018 гг. спутниками Sentinel 1A, 1B, 2A с помощью СВЧ-радиолокатора и оптических измерителей солнечного отражения морской поверхности в акватории Черного моря, прилегающей к участку береговой линии от Новороссийска до Сочи, как следует из рис. 1;

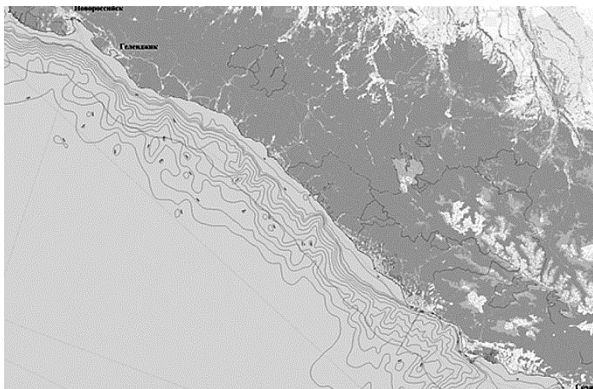


Рис. 1. Область спутниковых наблюдений
Fig. 1. Area of satellite surveillance

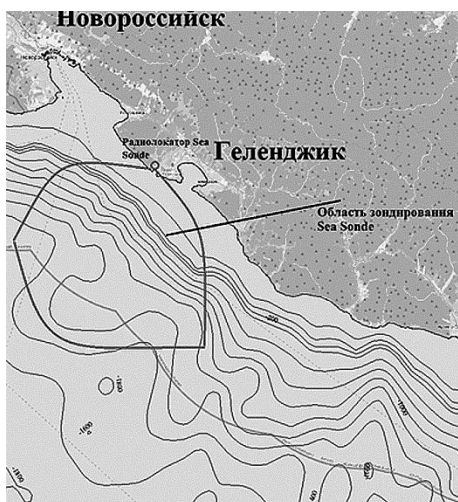


Рис. 2. Область наземного радиолокационного зондирования

Fig. 2. Area of shore radar probing

- сопоставление характерных спутниковых картин радиолокационного и оптического контраста на морской поверхности, содержащих элементы вихревых и струйных течений, с данными измерений береговым доплеровским коротковолновым радиолокатором Sea Sonde, с учетом данных, представленных в исследуемой акватории с суточным интервалом системой LANCE (Land, Atmosphere Near real-time Capability for Earth observing system) для спутника MODIS Aqua [9, 10] (параметр цветности воды) и реанализом NCEP/NCAR [11, 12] (характеристики ветра).

В северной части этой акватории расположен исследовательский полигон Южного отделения института океанологии РАН, на котором располагалась радиолокационная доплеровская система Sea Sonde (рис. 3). Указанная прибрежная акватория отличается протяженным (около 150 км) сравнительно прямолинейным участком береговой линии, который в северной части заканчивается выраженным неоднородным участком береговой линии, включающим Новороссийскую бухту.

Многолетние исследования указанного района Черного моря, выполнявшиеся Институтом океанологии РАН [2–4], другими научными учреждениями, позволили установить, в частности, параметры таких характерных гидрофизических явлений в рассматриваемой акватории, как формирование мезомасштабных вихревых структур,

струйные течения изменчивой направленности, апвеллинг и даунвеллинг водных масс под действием ветра определенного направления и интенсивности. Представленные исследования продолжают изучение этой акватории с использованием новых методов и средств.

На рис. 2 показано положение точки установки доплеровского радиолокатора Sea Sonde и область зондирования течений на морской поверхности, охватывающие участок прибрежной акватории площадью 20×20 км в окрестности Геленджикской бухты. Рабочая частота радиолокатора составляет 25 МГц, интервалы измерений поля радиальных компонент скоростей течений – 1 час. По данным радиальных компонент по специальной методике, описанной ниже, выполнялся расчет полных векторов скоростей течений. Проводились сравнительные исследования (например, в работе [6]) параметров скоростей течений, определяемых с использованием односточечного КВ-радиолокатора и акустическим доплеровским профилографом течений, устанавливаемым на дне, и с борта маневрирующего судна. Показано, что с определенными ограничениями возможно получение удовлетворительных данных о полных векторах скоростей течений с использованием односточечного доплеровского КВ-радиолокатора.

Данные спутниковых наблюдений морской поверхности

Satellite surveillance data for sea surface

На рис. 3 (см. вклейку) представлены картины выраженных крупномасштабных вихревых структур, зарегистрированных оптической системой измерения уровня солнечного отражения от морской поверхности со спутника Sentinel 2A 13 и 18 сентября 2018 г. в окрестностях г. Геленджика.

Вследствие больших (2–4 дня) интервалов между прохождением спутника Sentinel 2A через рассматриваемый район представленные единичные картины зарегистрированных вихревых структур не позволяют установить историю их формирования и развития.

Дополнительную информацию о развитии представленных вихревых структур дают ежесуточные картины контраста интенсивности параметра true color (уровня отраженного солнечного света) на морской поверхности в рассматриваемом районе, представленные системой LANCE [9, 10]. Такие картины получены на основе синтеза данных с различ-

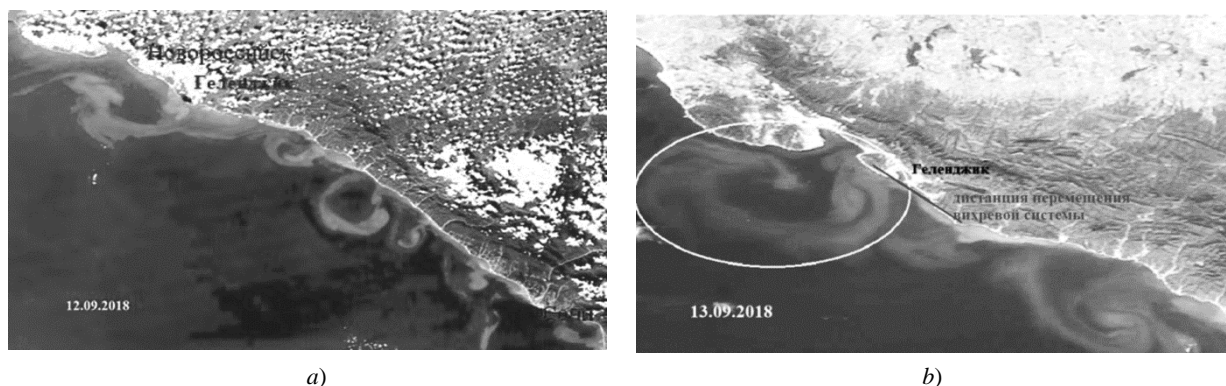


Рис. 4. Картины перемещения вихревой структуры (см. рис. 3) в период с 12 (а) по 13 сентября (b) 2018 г.
Fig. 4. Transfer patterns of the turbulence shown in Fig. 3 on September, 12 (a) and Sept., 13 (b)

ных спутников, проходивших через рассматриваемый район в указанный выше период. Дальнейшим ограничением непрерывности спутниковых оптических наблюдений состояния морской поверхности является облачное состояние атмосферы, непреодолимое для видимых оптических измерений.

На рис. 4 показан пример спутниковой картины прибрежных вихревых структур, полученной с использованием LANCE, на участке от Новороссийска до Сочи.

На рис. 4 показана изменчивость положения вихревых структур за период 24 часа (12–13 сентября 2018 г.), когда состояние облачности позволило наблюдать оптическую картину контраста на морской поверхности. На рис. 5 (см. вклейку) представлена изменчивость вихревых структур за 4-суточный период измерений с 17 по 20 сентября 2018 г. с суточным интервалом.

Вихревые структуры на рис. 5 обозначены белым кружком и индексом. В обоих представленных

случаях наблюдается перемещение вихревых структур вдоль береговой линии в северном направлении со скоростью около 0,2 м/с. Направление переноса контрастных областей соответствует генеральному направлению – круговому черноморскому течению (КЧТ) и его скорости. Величина скорости переноса, очевидно, включает локальные значения скоростей КЧТ в рассматриваемый период. При этом расстояние между структурами сохраняется за время наблюдения, что может свидетельствовать о волновом характере распространения вихревых структур. Следует отметить существенное развитие вихревых структур в процессе их движения вдоль берега с выбросом интенсивной струи, опережающей распространение основного вихря. Такая изменчивость может быть связана с прохождением вихревой системы над неровностями дна и вдоль неровностей береговой линии.

На рис. 6 показаны картины ветрового режима по данным реанализа NCEP/NCAR [11, 12] в рас-

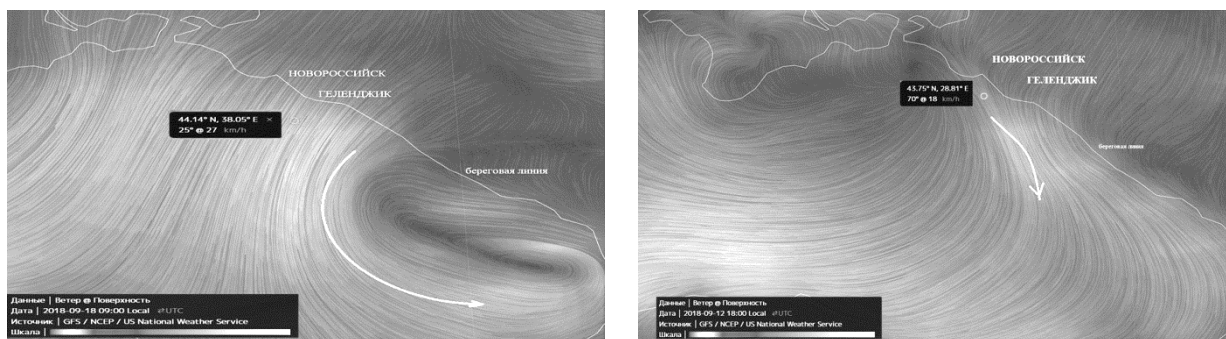


Рис. 6. Направление и скорости ветра (по данным реанализа NCEP/NCAR) в рассматриваемый период распространения вихревых структур – 12 и 18 сентября 2018 г.

Fig. 6. Wind direction and speeds (as per the results of NCEP/NCAR re-analysis) over the investigated period of turbulence propagation

смагриваемой прибрежной области Черного моря в период наблюдения указанных вихревых структур 13 и 18 сентября 2018 г.

Структура ветрового поля 18 сентября 2018 г. (рис. 6) указывает на существование циклонического образования в южной части рассматриваемой акватории, которое может способствовать возникновению вихревых течений, наблюдаемых на спутниковых снимках.

Данные радиолокационного зондирования течений доплеровским КВ-радиолокатором Sea Sonde

Results of current probing by *Sea Sonde* shortwave Doppler radar

В период возникновения рассмотренных выше вихревых структур на морской поверхности, полученных по данным спутниковых наблюдений, проводились непрерывные ежечасные измерения параметров течений в этой же прибрежной зоне доплеровским коротковолновым радиолокатором *Sea Sonde*. На основе этих данных могут выполняться количественные оценки параметров переноса примесей и структуры поля завихренности в контролируемой морской акватории, наблюдаемых на картинах спутниковых оптических и радиолокационных измерений морской поверхности.

Одноточечный КВ доплеровский радиолокатор позволяет получить исходные данные о течениях в виде картины радиальных компонент скоростей течений относительно точки его положения на береговой линии.

Существуют методики обработки указанных данных для получения приближенной картины пространственных векторов скоростей течений [7]. Применяемая в настоящей работе методика обработки массива радиальных скоростей течений позволяет проводить оценку погрешности расчета пространственных векторов скоростей по площади радиолокационного зондирования и с учетом однородности получаемой исходно картины радиальных компонент скоростей. Указанная методика была проверена в ходе специальных сравнительных измерений течений [6] одноточечным доплеровским радиолокатором *Sea Sonde* и донным акустическим доплеровским профилографом течений и показала удовлетворительное соответствие данных, полученных указанными измерительными средствами.

На рис. 7 показаны примеры картин векторов скоростей течений, измеренных системой *Sea Sonde* в период наблюдений вихревой структуры, наблюдавшейся 13 сентября 2018 г. (рис. 3*b*).

Отмечается формирование вихревой структуры в окрестности Геленджикского залива. Этот процесс соответствует картине вихревого образования на спутниковой картине, показанной на рис. 3*a*. На рис. 8 (см. вклейку) показан, с использованием данных о поле течений, пример визуализации процесса формирования вихревой структуры, проявляющейся в изменчивости условной начальной концентрации примеси на участке морской поверхности.

Рис. 8 показывает соответствие положения и общей конфигурации оптического контраста на рис. 3*b* картине развития условной концентрации под действием поля течений.

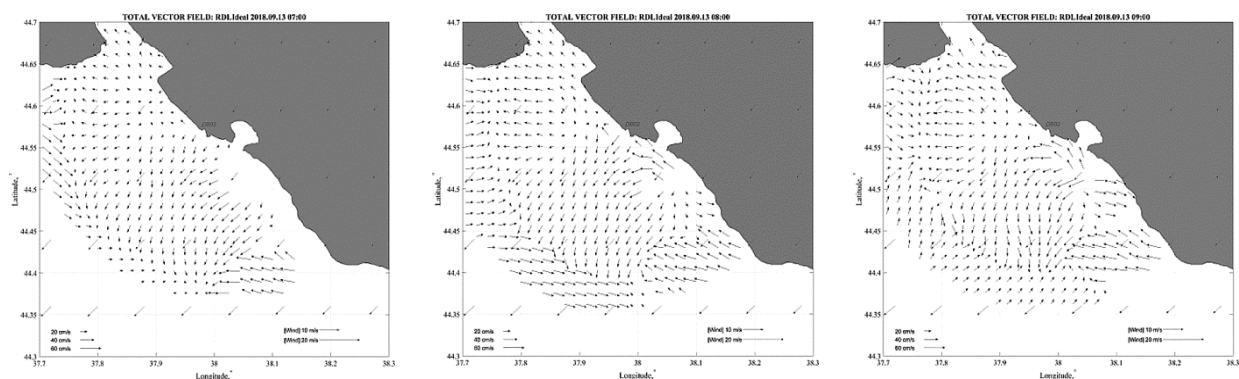


Рис. 7. Изменчивость поля векторов скоростей течений в период 07:00–09:00 13 сентября 2018 г. по данным измерений радиолокатором *Sea Sonde*

Fig. 7. Variability of current velocity field over the period of 07.00 – 09.00 hrs, September 13, 2018, as per *Sea Sonde* probing data

Представленные на рис. 7 картины изменчивости поля полных векторов скоростей течений позволяют установить пространственно-временную изменчивость областей завихренности. На рис. 9 (см. вклейку) показан пример оценки изменчивости количественного параметра вихревых течений 18 мая 2018 г., наблюдавшихся на спутниковой картине радиолокационного контраста по данным спутника Sentinel 1B (рис. 3b).

Рис. 9 демонстрирует на фоне высокой изменчивости величин и направлений течений быструю изменчивость положения и интенсивности областей завихренности в исследуемой акватории, что следует учитывать, в частности, в численном моделировании процессов переноса примеси в таких условиях.

Непрерывное продолжительное радиолокационное зондирование поля течений на морской поверхности позволяет дополнить данные применяемого в настоящее время контроля динамики водных масс в прибрежной морской акватории с использованием сравнительно редких судовых измерений и точечных непрерывных измерений на донных или буйковых станциях.

На рис. 10 показана картина мгновенных векторов скоростей течений вдоль траектории движения судна-носителя профилографа течений [7] совместно с траекториями движения водных масс в заданных точках акватории, полученных по данным радиолокационного зондирования течений за 5-часовой период.

Отмечается смена направления течений в южной части обследуемой акватории, которая не обнаруживается на траекторных измерениях мгновенных значений векторов скоростей.

Численное моделирование течений

Numerical simulation of currents

С целью оценки влияния параметров ветра на процессы возникновения представленных выше вихревых структур на поверхности рассматриваемой акватории Черного моря с использованием программного пакета COHERENS [8] выполнено моделирование развития течений на морской поверхности в рассматриваемой акватории Черного моря при различных направлениях, скоростях и продолжительности ветрового воздействия. Пакет COHERENS разработан в Бельгийском институте естественных наук для комплексного численного исследования гидродинамических процессов и эко-

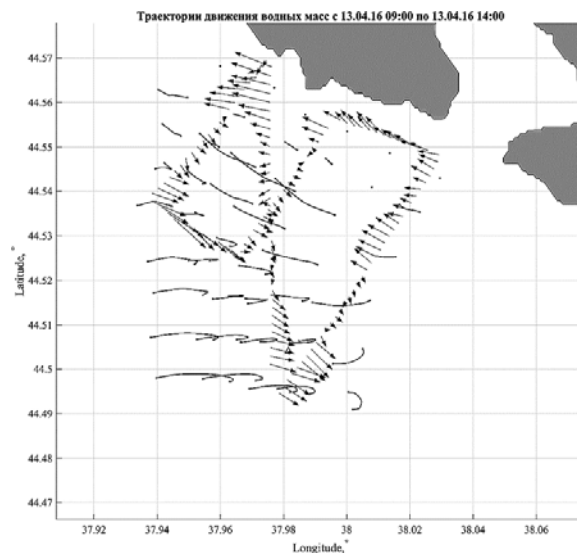


Рис. 10. Векторы скоростей течений вдоль траектории буксировки акустического доплеровского профилографа течений и траектории переноса водных масс по данным радиолокационных измерений течений

Fig. 10. Current speed vectors along the towing path of acoustic Doppler current profiler and water transfer paths as per radar probing data for currents

логических параметров в прибрежных морских акваториях и свободно доступен на интернет-сайте для использования.

На рис. 11 (см. вклейку) представлены картины векторов скоростей течений и областей их локальных максимальных значений на морской поверхности при направлениях ветра четырех основных румбов при скорости ветра 10 м/с, действующего в течение 9 ч.

Расчеты показывают формирование значимых течений (около 0,2 м/с) в прибрежной зоне до изобат около 150–200 м, как следует из батиметрической карты акватории, показанной на рис. 12 (см. вклейку).

Влияние западного ветра создает благоприятные условия для формирования интенсивных течений в районе Новороссийской бухты, которые могут являться источником наблюдаемых спутниковыми системами вихревых структур. Ветер южного и северного направления не вызывает интенсивных прибрежных течений по данным расчетов.

Расчеты показывают, что при скоростях ветра меньших 10 м/с значимое развитие скоростей течений прекращается после 5–6-часового воз-

действия и не достигает высоких значений, указанных выше.

Полученные расчетные данные показывают целесообразность оперативного численного моделирования динамического состояния акватории, дополняющего данные радиолокационных измерений течений и позволяющего повысить оперативность и надежность прогнозирования процессов формирования крупномасштабных вихревых элементов циркуляции прибрежных вод.

Заключение

Conclusion

Представленный анализ методов дистанционного мониторинга динамического состояния прибрежных морских акваторий, существенного для формирования экологического состояния водных масс и донных осадков, позволяет сделать следующие выводы:

- спутниковые данные обеспечивают большой охват площади исследуемой акватории, позволяют выделять характерные виды гидродинамических процессов на морской поверхности, но обладают ограничениями непрерывной продолжительности наблюдений и ограничены возможностью регистрации данных в оптическом диапазоне только в отсутствие облачности;
- привлечение дополнительных данных спутникового мониторинга заданной акватории с общедоступных интернет-ресурсов (LANCER, NCEP/NCAR) позволяет получать более детальную картину развития динамического состояния морской поверхности;
- применение подспутниковых наземных радиолокационных измерений параметров течений на морской поверхности существенно повышает достоверность интерпретации спутниковых снимков и увеличивает надежность прогнозирования наблюдаемых гидродинамических процессов;
- применение численного моделирования процессов развития течений с учетом батиметрических особенностей акватории и особенностей береговой линии позволяет совместно с данными дистанционных измерений прогнозировать возникновение и параметры существенных для экологического состояния прибрежной акватории явлений переноса водных масс.

В целом представленный анализ показывает возможность комплексного использования данных спутникового и наземного дистанционного изме-

рения характеристик морской поверхности, данных о текущих региональных метеорологических параметрах, имеющихся в свободном доступе в интернет-ресурсах, и данных оперативного численного моделирования для целей оперативного океанографического и экологического мониторинга локальных прибрежных акваторий с высокой техногенной нагрузкой.

Список использованной литературы

1. Изучение гидрофизических процессов на шельфе и верхней части континентального склона Черного моря с использованием традиционных и новых методов наблюдений / *А.Г. Зацепин, А.О. Корж, В.В. Кременецкий* [и др.] // *Океанология*. 2008. Т. 48, № 4. С. 510–519.
2. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря / *А.Г. Зацепин, В.В. Кременецкий, А.Г. Островский* [и др.] // *Известия Российской Академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 1. С. 16–29. DOI: 10.7868/S0002351513060163.
3. Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга и даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море / *А.Г. Зацепин, К.Л. Сильвестрова, С.Б. Куклев* [и др.] // *Океанология*. 2016. Т. 56, № 2. С. 203–214. DOI: 10.7868/S0030157416020222.
4. Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы / *А.Г. Зацепин, А.А. Кондрашов, А.О. Корж* [и др.] // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 4. С. 592–605.
5. Сравнение характеристик течений, измеренных КВ и СВЧ радиолокаторами на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море, с данными ADCP и дрейфтеров / *А.Г. Зацепин, В.В. Горбачук, С.А. Мысленков* [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14, № 7. С. 250–266. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-250-266.
6. *Kampf J.* Lee effects of localized upwelling in a shelf-break canyon // *Continental Shelf Research*. 2012. Vol. 42. P. 78–88. DOI: 10.1016/j.csr.2012.05.005.
7. Применение доплеровского КВ-радиолокатора для исследования пространственной структуры течений в Черном море / *В.В. Горбачук, К.Д. Сабинин, В.А. Телегин, А.Г. Зацепин, С.Б. Куклев* // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 3. С. 63–73. DOI: 10.22449/0233-7584-2017-3-63-73.
8. COHERENS: A Coupled Hydrodynamical-Ecological Model for Regional and Shelf Seas: Vers. 2.6: user documentation / Ed. *P. Luyten*; Royal Belgian Institute of Natural Sciences. Brussels, 2016. 1554 p.

9. Land, Atmosphere Near real-time Capability for EOS (LANCE) // NASA Earthdata : [site]. Washington, 2021. URL: <https://earthdata.nasa.gov/lance> (Accessed: 02.12.2021).
10. State of the Oceans (SOTO) // Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) : [site]. Pasadena, 2021. URL: <https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/soto> (Accessed: 02.12.2021).
11. NCEP: National Centers for Environmental Prediction // National Weather Service : [site]. Maryland, 2021. URL: <https://www.weather.gov/ncep/> (Accessed: 02.12.2021).
12. The WorldWind Explorer // WorldWind Earth : [site]. Ventura, 2021. URL: <https://worldwind.earth/explorer> (Accessed: 02.12.2021).

References

1. A. Zatsepin, A. Korzh, V. Kremenetskii et al. Studies of the hydrophysical processes over the shelf and upper part of the continental slope of the Black sea with the use of traditional and new observation techniques // *Oceanology*, 2008, Vol. 48, No. 4, pp. 466–475.
2. A. Zatsepin, V. Kremenetsky, A. Ostrovskii et al. Subsatellite Polygon for Studying Hydrophysical Processes in the Black Sea Shelf–Slope Zone // *Russian Academy of Sciences. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014, Vol. 50, No. 1, pp. 13–25.
3. A. Zatsepin, K. Silvestrova, S. Kuklev et al. Observations of a cycle of intense coastal upwelling and downwelling at the research site of the Shirshov Institute of Oceanology in the Black Sea // *Oceanology*, 2016, Vol. 56, No. 2, pp. 188–199.
4. A. Zatsepin, A. Kondrashov, A. Korzh et al. // Submesoscale eddies at the Caucasus Black Sea shelf and the mechanisms of their generation // *Oceanology*, 2011, Vol. 51, pp. 554–567.
5. A. Zatsepin, V. Gorbatsky, V. Myslenkov et al. Comparison of coastal currents measured by HF and X-band radars with ADCP and drifter data at the IO RAS hydrophysical test site in the Black Sea // *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2017, Vol. 14, No. 7, pp. 250–266 (in Russian).
6. Kampf J. Lee effects of localized upwelling in a shelf-break canyon // *Continental Shelf Research* 2012. Vol. 42. P. 78–88. DOI: 10.1016/j.csr.2012.05.005.
7. V. Gorbatsky, K. Sabinin, V. Telegin, A. Zatsepin, S. Kuklev. Application of shortwave Doppler radar for research of 3D current structures in the Black Sea // *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal* (Marine Hydrophysical Journal), 2017, No. 3, pp. 63–73 (in Russian).
8. COHERENS: A Coupled Hydrodynamical-Ecological Model for Regional and Shelf Seas: Vers. 2.6: user

documentation / Ed. P. Luyten; Royal Belgian Institute of Natural Sciences. Brussels, 2016. 1554 p.

9. Land, Atmosphere Near real-time Capability for EOS (LANCE) [Electronic resource] // NASA Earthdata : [site]. Washington, 2021. URL: <https://earthdata.nasa.gov/lance> (accessed: 02.12.2021).
10. State of the Oceans (SOTO) [Electronic resource] // Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) : [site]. Pasadena, 2021. URL: <https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/soto> (accessed: 02.12.2021).
11. NCEP: National Centers for Environmental Prediction [Electronic resource] // National Weather Service : [site]. Maryland, 2021. URL: <https://www.weather.gov/ncep/> (accessed: 02.12.2021).
12. The WorldWind Explorer [Electronic resource] // WorldWind Earth : [site]. Ventura, 2021. URL: <https://worldwind.earth/explorer> (accessed: 02.12.2021).

Сведения об авторах

Горбачкий Владимир Витальевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-46-14. E-mail: v.gorbatskiy@gmail.com.

Шпилев Николай Николаевич, ведущий ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-46-14. E-mail: shadeoff@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-3638-3253>.

Лебедева Евгения Сергеевна, инженер 2-й категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-46-14. E-mail: jane708@mail.ru.

About the authors

Vladimir V. Gorbatsky, Cand. Sci. (Eng), Lead Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-46-14. E-mail: v.gorbatskiy@gmail.com.

Nikolay N. Shpilev, Lead Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-46-14. E-mail: shadeoff@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-3638-3253>.

Evgeniya S. Lebedeva, 2nd Category Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-46-14. E-mail: jane708@mail.ru.

Поступила / Received: 01.12.21

Принята в печать / Accepted: 15.03.22

© Горбачкий В.В., Шпилев Н.Н., Лебедева Е.С., 2022

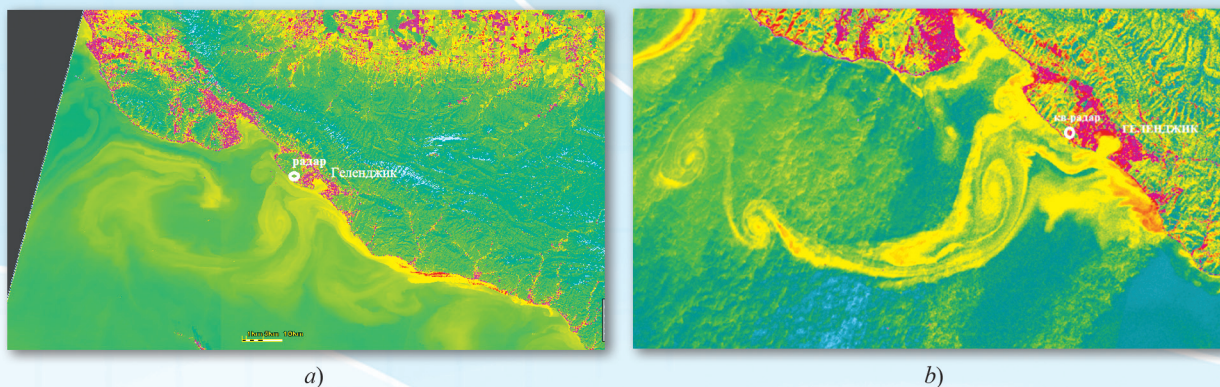


Рис. 3. Примеры спутниковых изображений морской поверхности в оптическом диапазоне, содержащих крупномасштабные вихревые структуры: а) 13 сентября 2018 г.; б) 18 сентября 2018 г.

Fig. 3. Examples of optical satellite images for sea surface with major turbulence: а) September 13, 2018; б) September 18, 2018

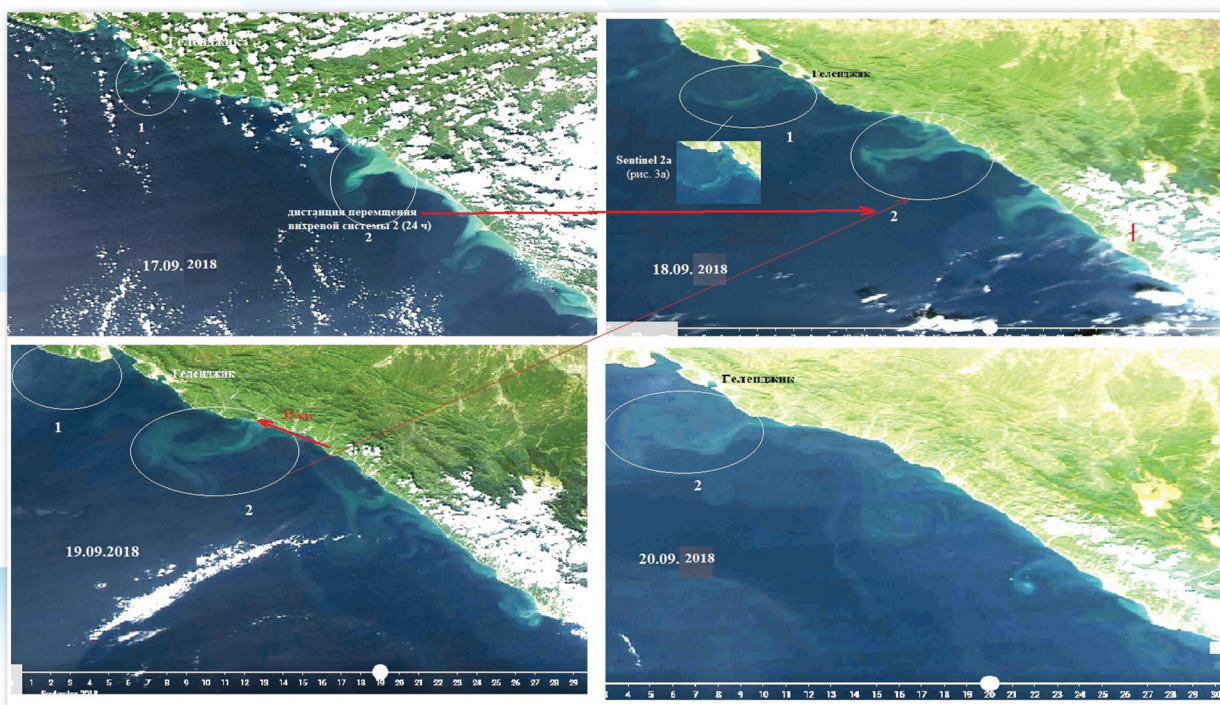


Рис. 5. Картины перемещения вихревой структуры в период с 17 по 20 сентября 2018 г.

Fig. 5. Turbulence transfer patterns over the period of September, 17–20

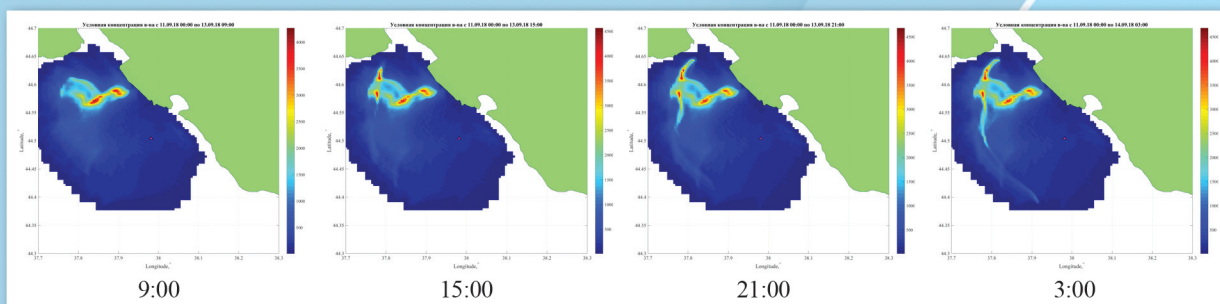


Рис. 8. Моделирование развития условной начальной концентрации под действием течений, измеренных 13 сентября 2018 г.

Fig. 8. Simulation of conditional initial concentration development under effect of currents measured on September 13, 2018

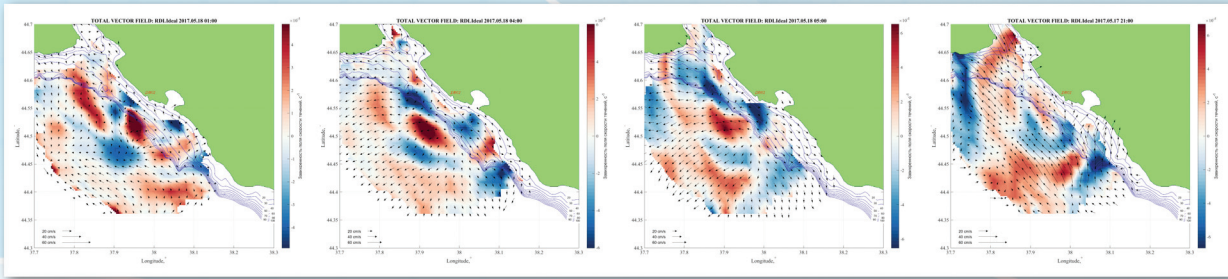


Рис. 9. Развитие областей завихренности 18 мая 2018 г.
Fig. 9. Development of turbulent areas on May 18, 2018

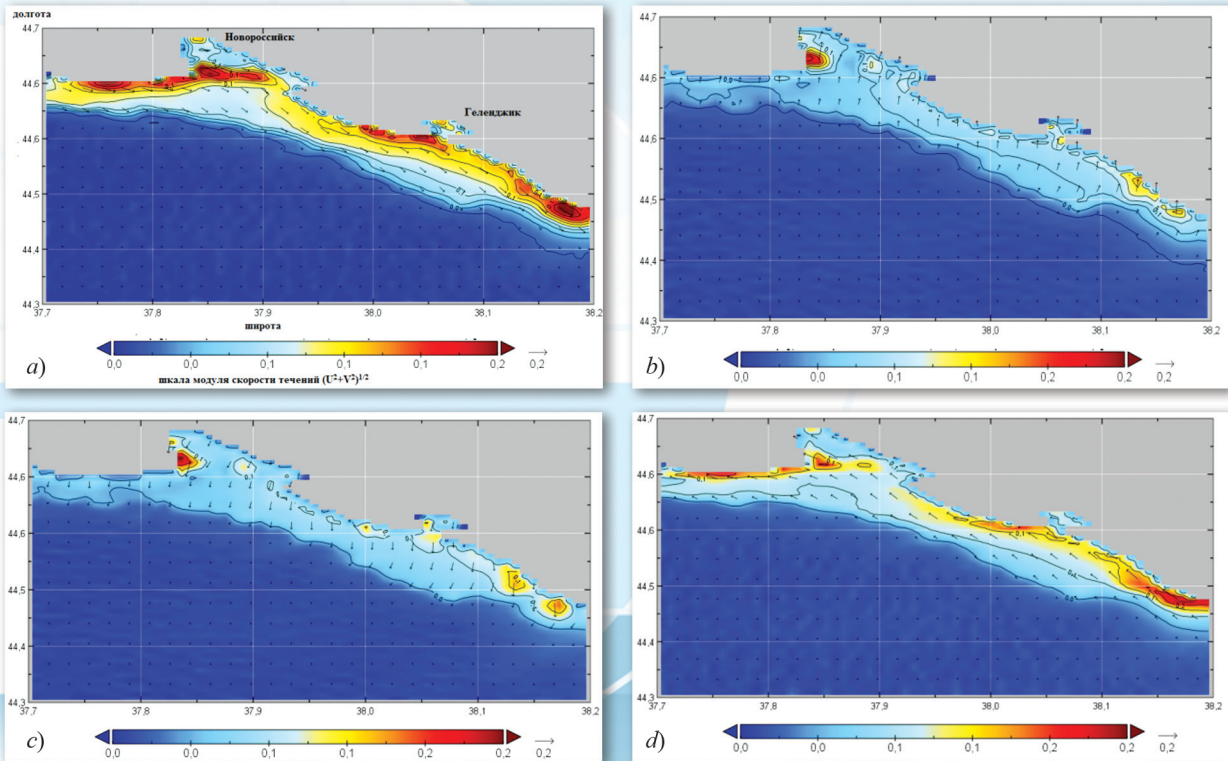


Рис. 11. Картина векторов скоростей течений и областей высоких значений модуля скорости в рассматриваемой акватории после воздействия ветра со скоростью 10 м/с за период 9 ч: а) западный ветер, б) южный ветер, с) северный ветер, д) восточный ветер

Fig. 11. Current speed vectors and high-speed zones in the investigated water area after the effect of 10 m/s wind over the period of 9 hours: a) westerly wind; b) southerly wind; c) northerly wind; d) easterly wind

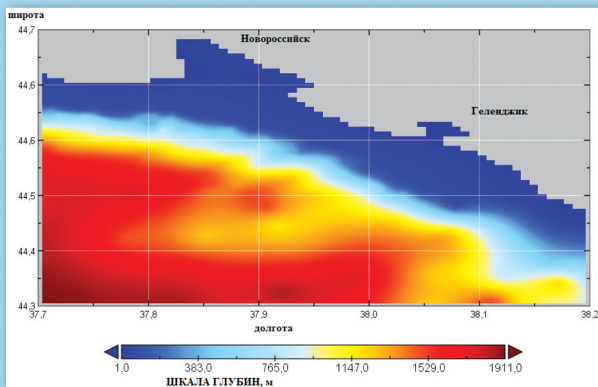


Рис. 12. Батиметрическая карта исследуемой акватории
Fig. 12. Bathymetric map of the investigated water area