
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА
У ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРЫМА
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛЬНЫХ ВЕТРОВ РАЗЛИЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ

© 2019 г. А. А. Алескерова*, А. А. Кубряков, Ю. Н. Горячкин,
С. В. Станичный, А. В. Гармашов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: annete08@mail.ru*

Поступила в редакцию 30.11.2018 г.

В работе по спутниковым данным среднего и высокого разрешения исследуются механизмы образования и распространения взвешенного вещества (ВВ) у Западного берега Крыма при воздействии сильных ветров различных направлений. Было отмечено, что максимальные значения концентрации ВВ принимает при ветрах южного направления, достигая значений 200 мг/л. Зона высоких концентрации ВВ расположена в районе Западного шельфа Крыма и ограничена изобатой 50 м. Волновое воздействие при южном ветре способствует взмучиванию донных осадков и разрушению глинистых клифов на Западном берегу Крыма. После шторма возникает северное вдольбереговое течение, которое переносит ВВ на север. При северо-восточных ветрах наиболее высокие концентрации ВВ отмечаются не у берега, а в мористой части шельфа между изобатами 30 и 50 м. Вероятно, что такие ветра взмучивают донные осадки на мелководье, которые затем отгоняются от побережья по действием ветрового сгона. На их замену проходят чистые холодные воды из более глубоких слоев, которые наблюдаются у побережья. Особенностью действия северных и северо-западных штормов является образование вдольберегового струйного течения вдоль западного побережья. Течение возникает на фронтальной зоне апвеллинга. Поток переносит ВВ на юг в глубоководную часть моря. Концентрация ВВ в этом случае также значительно ниже, чем при воздействии южных ветров, однако может достигать величины 3 мг/л.

Ключевые слова: взвешенное вещество, концентрация взвешенного вещества, MODIS, взмучивание вод, шторма, апвеллинг, Landsat

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019274-88>

ВВЕДЕНИЕ

Динамика взвешенного вещества (ВВ) в прибрежной зоне Западного Крыма (от м. Херсонес до м. Тарханкут) до настоящего времени является малоизученной, в связи с небольшим количеством натурных данных. Однако нет сомнений, что ветро-волновое воздействие является основным фактором, влияющим на концентрацию и пространственное распределение ВВ. Оно же задает направление вдольбереговых потоков наносов, и связанные с ними процессы динамики береговой зоны (Горячкин и др. 2009; Горячкин, Иванов, 2010; Горячкин, Долотов, 2011; Долотов, Долотов, 2017). Штормы приводят к интенсификации разрушения глинистых клифов (клиф — обрыв или крутой уступ коренных пород на берегу моря, образовавшийся в результате абразии), слагающих до половины береговой линии. Следствием штормов является взмучивание донных наносов, представленных песками и илами в мелководном Каламитском заливе и соседних акваториях.

Эти процессы оказывают существенное влияние на перераспределение ВВ в береговой зоне и его перенос в глубоководную часть Черного моря. Оценки скорости течений и потока наносов в исследуемом районе ранее были получены в (Горячкин 2009; Удовик, Горячкин, 2013). Было показано, что в Каламитском заливе вдольбереговой транспорт наносов преимущественно направлен на север, что связано с интенсивными волновыми течениями, возникающими под действием южных и юго-западных ветров, вместе с тем значительна роль межгодовой и сезонной изменчивости. Большое влияние на процессы в береговой зоне оказывают и особенности конфигурации берега. Например, в (Горячкин, Долотов, 2009) было показано, что участки с отступающим берегом расположены у мысов, а с нарастающим — в вогнутостях берега, т.е. идет естественный процесс выравнивания берега.

Образующееся в результате разрушения клифов и взмучивания донных наносов ВВ является хорошим индикатором динамики вод, позволяющим

отслеживать их спутниковыми оптическими измерениями (Кременчуцкий и др., 2015). Спутниковые данные ранее позволили получить большое количество информации о вихревой динамике в Черном море, ее роли в горизонтальном обмене веществом, влиянии на термические характеристики бассейна (Sur et al., 1996; Ginzburg et al., 2000, 2002; Oguz et al., 2002; Zatsepin et al., 2003; Shapiro et al., 2010; Karimova, 2012; Kubryakov et al., 2016, 2018; etc). Однако вышеперечисленные исследования в основном были посвящены изучению крупномасштабных и синоптических процессов во всем Черном море.

Прибрежные процессы характеризуются гораздо меньшими масштабами и временем жизни, а их изучение требует детальных натурных исследований, что является дорогостоящим и не всегда возможным (в период штормов) мероприятием. Поэтому на сегодня наиболее доступный метод изучения прибрежных процессов — анализ спутниковых данных.

Изучение региональных особенностей распределения температуры поверхности моря и оптических свойств в прибрежной зоне по многолетним измерениям MODIS проводилось в районе Керченского пролива (Щербак и др. 2007; Алескерова и др., 2017), восточного побережья моря (Mityagina et al., 2010; Костяной и др., 2010; Lavrova et al., 2015). В связи с появившимися в свободном доступе в недавнее время данными высокого разрешения, появилась возможность исследовать динамические процессы в прибрежной зоне и на сравнительно малых пространственных масштабах (от десятков метров). Например, на их основе были продемонстрированы особенности субмезомасштабных процессов вблизи устья Дуная (Lavrova et al., 2017), на Кавказском побережье (Lavrova et al., 2016). В районе Западного побережья Крыма спутниковые данные использовались в (Горячкин и др., 2009; Kosyan et al., 2012; Станичный, Станичная, 2015) для оценки изменений береговой линии по многолетним измерениям. В (Дулов и др., 2015) были показаны примеры выделения внутренних волн, загрязнений и субмезомасштабных вихрей в прибрежной зоне Севастополя (Бондур и др., 2006; 2012).

Целью данной работы является получение представлений о распределении ВВ в прибрежной зоне Западного Крыма при воздействии сильных ветров различных направлений.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

В работе использовались данные сканеров MODIS/Aqua за период 2003–2016 гг.

с пространственным разрешением 1 км и временным разрешением 1 сутки (Level-2). Данные получены в отделе дистанционных методов исследования Морского гидрофизического института (<http://dvs.net.ru>) и из архива <http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>. Для определения концентрации ВВ применялся региональный алгоритм, основанный на комбинации спектральной яркости на различных длинах волн по данным MODIS (Кременчуцкий и др., 2014). Используемый алгоритм был калиброван на основе измерений, которые проводились как в водах открытого моря, так и в прибрежных водах с большими концентрациями взвеси (Завьялов и др., 2014).

Также использовались данные о яркости восходящего излучения со спутников Landsat-4,-5,-7,-8 за период 1985–2015 гг. (<http://glovis.usgs.gov>). Измерительная аппаратура ИСЗ Landsat-7 и -8 имеет пространственное разрешение 15–30 м для видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов, 100 м — для дальнего ИК-диапазона. Интервал повторяемости съемки 16 суток. Прибор TIRS спутника Landsat-8 делает измерения в двух каналах в дальнем ИК-диапазоне, что позволяет провести атмосферную коррекцию измерений и восстановить реальную SST. Такой алгоритм для Черного моря был разработан на основе сопоставления с калиброванными данными сканера MODIS (Aleskerova et al., 2016).

В работе используются данные о скорости ветра, полученные по измерениям спутникового скаттерометра QuikSCAT с 1999 по 2009 гг., которые позволяют получить информацию о ветровом режиме непосредственно над морем и данные реанализа Era-Interim (Dee et al., 2011). В работе (Гармашов и др., 2016) было показано, что измерения скаттерометров обладают наибольшей точностью по сравнению с данными современных реанализов. По этим данным была проанализирована изменчивость скорости ветра за 2001–2009 гг. в центре западного шельфа Крыма (координаты 45.0° N, 33.2° E). Пространственное разрешение данных QuikSCAT 1/8°, а данных реанализа 0.75°.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ветровой режим

В районе Западного Крыма характеристики ветра изучались в ряде работ (Горячкин, Репетин, 2009; Ильин и др., 2012), в которых было показано, что преобладающее для региона направление штормовых ветров — северо-восточное. Существенно меньше повторяемость ветров от южного, юго-западного и западного направлений (Горячкин, Репетин, 2009). Эти выводы базировались

на анализе рядов, полученных на МГ (морских гидрометеостанциях) Херсонесский маяк, Тарханкутский маяк и Евпатория. Вместе с тем, данные этих станций, в силу их географического положения могут быть искажены, т.к. они расположены на выдающихся в море мысах (мысовой эффект), а последняя, кроме этого, в городской черте. Поэтому дополнительно использовались данные QuikSCAT для ветров со скоростью 8 м/с и более. Их анализ показал, что суммарная доля ветров южного направления, которые являются наиболее волноопасными для Западного побережья Крыма в 1999–2009 гг., составляла 30%. Примерно столько же отмечено и для ветров от северо-восточного направления. Реже зафиксированы западные (12%) и восточные (11%) ветры.

Сильные ветры от северо-восточного направления преобладают с августа по апрель. Наиболее часто сильные ветры от северо-востока наблюдаются в октябре и декабре-январе. Летом с мая по июль, повторяемость штормов от всех направлений снижается. В осенне-зимний период с ноября по март растет повторяемость штормов от западных, южных и юго-западных направлений. В марте и ноябре отмечается увеличение повторяемости сильных юго-восточных ветров. Реже всего в данном районе встречаются сильные ветры от северо-западного направления. В теплый период года наиболее часты шторма от южных, юго-восточных, восточных и западных направлений.

Источники ВВ

В (Алескерова и др., 2017) нами отмечалось, что основной источник повышенных концентраций ВВ в прибрежной зоне российского сектора Черного моря связан с разрушением глинистых клифов в Каркинитском и Каламитском заливах и Керченском проливе.

Клифы в Западном Крыму сложены континентальными неогеновыми отложениями, представленными желтовато-бурыми и красно-бурыми глинами с прослоями и линзами галечниковых конгломератов и песчаников. Высота берегового склона от 1 до 25 м, в районе с. Берегового — до 32 м, между долинами Качи и Бельбека — до 50 м. Конкретно в Каламитском заливе, наибольшее поступление ВВ в море дают участки берега, где пляжи или отсутствуют, или их ширина небольшая. В этом случае энергия волнения не гасится на пляже, а расходуется на разрушение глинистых клифов.

Во время штормов в основании клифа образуются волноприбойные ниши, углубление которых приводят к обрушению и отступанию клифа. Наиболее быстро в период штормов ВВ поступают

в море в районе между оз. Кызыл-Яр и пгт. Николаевка (центральная часть побережья Каламитского залива). Средняя скорость отступления клифа составила здесь в 1972–2014 гг. около 1 м/год (Горячкин, 2015), что позволяет оценить поступление ВВ в зависимости от высоты клифа величиной 10–20 м³/год с погонного метра. В целом, общее количество материала, образующегося за счет разрушения клифов, оценивается величиной около 1.1 млн. м³/год (Шуйский, Выхованец, 2006). Из них 80% (900 000 м³) составляют фракции размером меньше 0.1 мм, которые и образуют ВВ в море. Остальные 20% пополняют пляжи и подводный береговой склон. Нам эта величина представляется несколько завышенной, поскольку расчеты исходили из максимальных величин разрушения клифов. При общей протяженности глинистых клифов около 55 км, это соответствует максимальной оценке, сделанной нами выше. Однако, средняя высота клифов около 10 м, что снижает оценку, сделанную в (Шуйский, 2005) почти в два раза.

На остальных участках с глинистым клифом и относительно широким пляжем, т.е. к югу от указанного участка, основной механизм поступления ВВ — отмывание грунта, оказавшегося на пляже, в результате обвальных и оползневых процессов. В этом случае иногда достаточно и небольшого волнения, поскольку в период активизации оползня в приурезовой зоне образуется вал выпирания, объем которого может исчисляться сотнями и даже тысячами кубометров грунта. На Западном побережье Крыма такая зона расположена между пос. Кача и г. Севастополем. Последний такой пример на этом участке — образование вала выпирания в период активизации Учкеевского оползня в августе 2018 г.

Вторым по значимости источником является разрушение активного бенча — глинистой, конгломератовой или песчаной поверхности прибрежного дна. Продукт его переработки дает примерно 600 000 м³/год фракции размером меньше 0.1 мм (Шуйский, Выхованец, 2006).

Подчиненное значение имеет поступление ВВ из рек и временных водотоков, в первом приближении оно меньше на порядок, чем поступление из-за разрушения клифов. Судя по нашим наблюдениям, даже в катастрофические паводки область распространения мутных речных вод затрагивает область максимум до одного километра от берега. Зарегулирование рек водохранилищами привело к тому, что в настоящее время сколько-нибудь значащий твердый сток имеет только р. Бельбек. Он оценивается величиной 30 000 тонн/год (Горячкин, 2015). У р. Альма и р. Кача он

существенно меньше, а р. Западный Булганак в настоящее время существует только на картах.

Наконец определенное количество вещества поступает с песчаных пляжей в море в период сильных ветров северных направлений (эоловые процессы). Эти ветры преобладают в холодный период. Величина этого поступления до настоящего времени не известна. Вместе с тем на Сакской пересыпи экспериментально определено, что на не задернованном песчаном пляже при скорости ветра около 15 м/с через сечение в один погонный метр, переносится примерно 50 кг песка в час (Выхова-нец, 2003).

Необходимо отметить, что в придонном слое Каламитского залива нами при погружениях неоднократно наблюдался наиллок (илистый осадок, состоящий из мельчайших частиц минеральных веществ). Толщина этого слоя обычно составляет до 10–15 см. Даже при незначительном волнении, вызываемом, например, бризовыми ветрами, морская вода в прибрежной полосе довольно быстро приобретает желтоватый оттенок.

Среднегодовое распределение ВВ

На рис. 1 показано среднегодовое распределение концентрации ВВ, полученное по данным MODIS/Aqua в 2003–2015 гг. Из него видно, что максимальные концентрации (от 10 до 20 мг/л) наблюдаются в мелководной части Каламитского залива, с глубинами менее 20 м. К югу от м. Лукулл до Севастопольской бухты и к северо-западу от м. Евпаторийский до оз. Донузлав в прибрежной зоне (3–4 км от берега) воды в сравнении с открытым морем также в среднем характеризуются повышенными значениями концентрации ВВ (2–5 мг/л). Прямые измерения концентрации ВВ турбидиметрическим зондом, выполненные в октябре 2008 г. в Каламитском заливе показали, что в отсутствие значимого волнения концентрация взвешенного вещества на поверхности моря составляет от 0.4 мг/л в открытом море до 0.8 мг/л в зоне, непосредственно примыкающей к берегу (1 км). При этом в придонном слое, в первой зоне концентрация возрастает до 0.8, во второй до 1.2 мг/л. На среднегодовое распределение большое влияние оказывают отдельные, эпизодические события — шторма, которые резко увеличивают концентрацию ВВ. Даже после прекращения их действия в течение нескольких дней сохраняются повышенные концентрации, что позволяет проследить динамику вод.

На рис. 2а, б, в представлены карты распределения концентрации ВВ, построенные для штормовых ветров различных направлений. Для построения этих карт по данным Eca-Interim были

выбраны все ситуации, в которых скорость ветра для различных направлений в центре Каламитского залива ($\varphi = 45.0^\circ$ с.ш., $\lambda = 33.5^\circ$ в.д.) превышала 8 м/с. Концентрация ВВ за выбранные даты и последующие 7 дней осреднялись, после чего рассчитывались средние значения для каждого направления.

Пространственное распределение концентрации ВВ при ветрах южных направлений (рис. 2а) достаточно хорошо совпадает со средней картой концентрации ВВ. Это направление наиболее эффективно для поступления в море и поддержания высоких концентраций ВВ, что связано с максимальной для Каламитского залива длины разгона волн (от 350 до 550 км). Кроме этого, повторяемость штормов от этого направления в исследуемый период была максимальной. Концентрации ВВ очень высоки и достигают 200 мг/л, что и дает основной вклад в среднее распределение, показанное на рис. 1. При ветрах этого направления воздействие на береговую зону максимально и поступление ВВ идет из большинства выше перечисленных источников.

Распределение концентрации ВВ для восточных ветров (рис. 2б) показывает, что основная область взмучивания не выходит за пределы Каламитского залива. Величины концентрации ВВ, по сравнению с предыдущим случаем более чем на порядок меньше (1–5 мг/л). Такое распределение вполне объяснимо, поскольку ветер с берега не приводит к разрушению берегов. Из-за малого разгона значимое волнение (более 10 дм) может наблюдаться только на некотором расстоянии от берега (при скорости ветра 10 м/с — 5–8 км, в зависимости от продолжительности действия ветра). Ввиду этого, по-видимому, основной источник ВВ — это взмучивание водной толщи в западной части Каламитского залива. Не исключено, что они поступают и с придонным компенсационным течением, направленными к берегу, поскольку восточные ветры сгоняют воду от берега и понижают уровень моря (более подробно см. в (Горячкин, 2018)).

При действии западных ветров (в большинстве случаев это северо-западные ветра) к области взмученных вод в Каламитском заливе (с концентрациями 2–8 мг/л) добавляется аналогичная область вокруг Гераклеийского полуострова (рис. 2в). Однако здесь концентрация ВВ относительно невелика (2 мг/л). Разрыв между этими двумя областями наводит на мысль, что они, возможно, динамически не связаны и имеют разные источники. Эту мысль подкрепляет тот факт, что в отличие от легко разрушаемых клифов в Каламитском заливе (вследствие отсутствия или малой

ширины пляжей), в районе между м. Маргопуло и г. Севастополь пляжи имеют большую ширину, а часть их представлена пляжами без клифа (устье Качи и Бельбека). Одним из источников могут банки западнее м. Константиновский и м. Коса Северная.

Распределение ВВ при различных синоптических ситуациях

Приведем конкретные примеры распределения концентраций ВВ при действии штормов от различных направлений.

Южные ветры. На рис. 3а, б представлен пример распределения концентрации ВВ до действия штормового юго-западного ветра (2 октября 2003 г.) и после (6 октября 2003 г.). Заметно, что концентрация в первом случае не превышала 0.3–0.4 мг/л в области, непосредственно примыкающей к берегу, а в открытом море составляла 0.2 мг/л (рис. 3а). После воздействия штормового юго-западного ветра (в максимуме до 12 м/с), значения концентрации ВВ значительно возросли. Повышенные концентрации ВВ (> 1 мг/л) видны в прибрежной области всего Западного побережья от м. Херсонес до м. Урет, при этом наибольшие наблюдаются в прибрежной полосе от м. Евпаторийский до м. Лукулл, где в максимуме они достигают очень высоких значения (до 100 мг/л). Фоновые значения в окружающих водах по-прежнему составляют около 0.2 мг/л. Анализ других случаев при воздействии юго-западных ветров показывает примерно сходный характер распределения концентрации ВВ с описанными выше.

Зона повышенных концентраций ВВ достигается в районе Каламитского залива, где они наблюдаются на расстоянии до 20 км от берега по

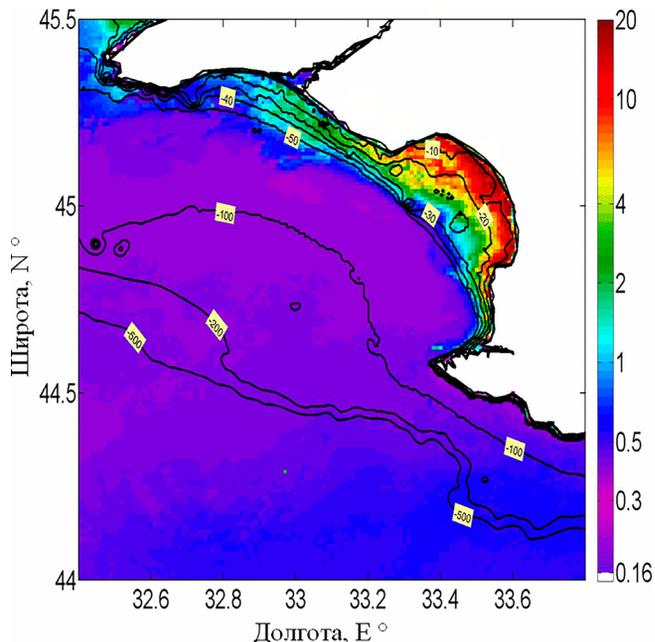


Рис. 1. Средняя концентрация ВВ у побережья Западного Крыма (2003 – 2015 гг.) по данным MODIS/Aqua.

линии изобаты в 50 м. В районе м. Лукулл оно уменьшается до 8 км, северо-западнее м. Евпаторийский составляет 5–10 км. Расчеты показывают, что в Каламитском заливе юго-западные штормы (азимут луча 225°) повторяемость 1 раз в 25 лет могут генерировать волны с характерной высотой 4.8 м и средней длиной до 160 м (Горячкин, Фомин, 2010). У южных штормов (азимут луча 180°) из-за меньшего разгона соответствующие величины составляют 3.7 и 125 м. Другими словами, при штормах редкой повторяемости воздействие ветрового волнения может проникать до глубин 60–80 м.

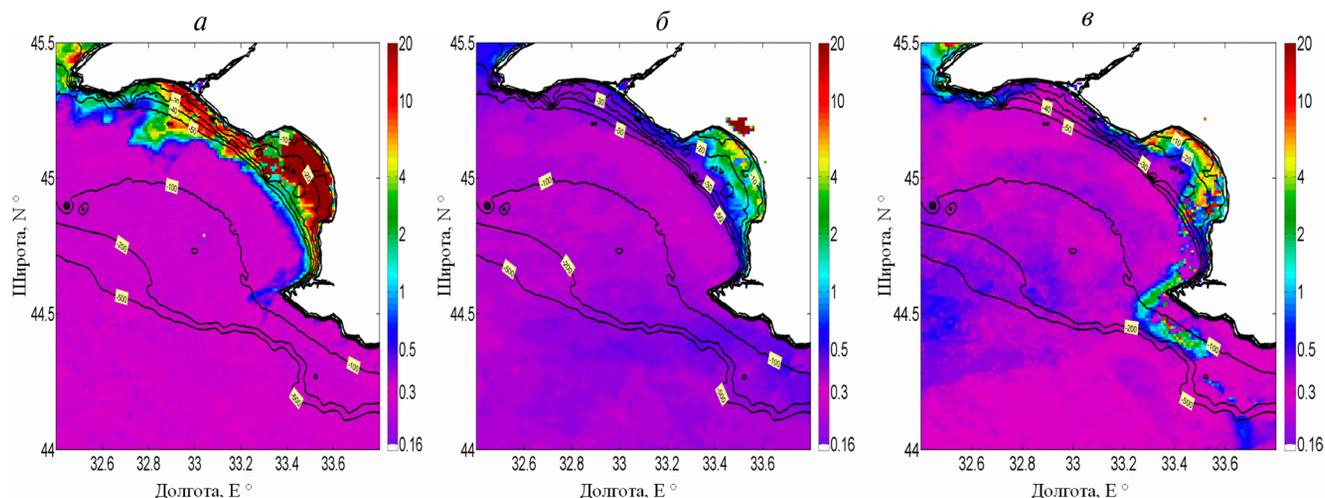


Рис. 2. Средние значения концентрации ВВ у побережья Западного Крыма (2003 – 2015 гг.) по данным MODIS/Aqua в период действия штормовых а — южных ветров; б — восточных ветров; в — западных ветров.

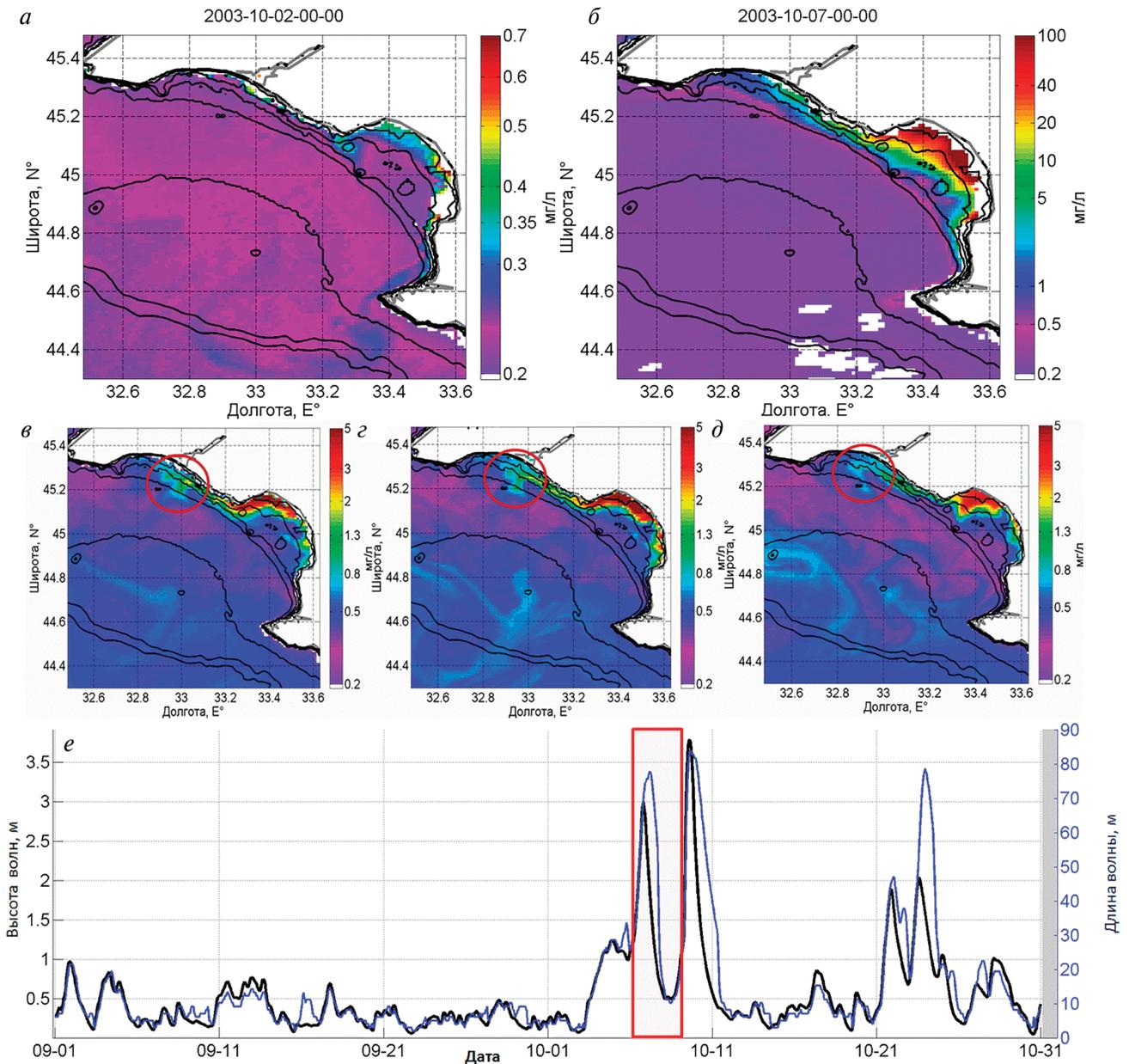


Рис. 3. Величины концентрации ВВ по данным MODIS-Aqua за *a* — 2 октября 2003 г.; *б* — 7 октября 2003 г.; *в* — 3 апреля 2009 г.; *г* — 4 апреля 2009 г.; *д* — 6 апреля 2009 г.; *е* — график длины и высоты волн, рассчитанные по модели SWAN. Черными линиями нанесены изобаты.

Таким образом, ветры южных направлений способствуют значительному разгону волн, приходящих на побережье Крыма из южной части Черного моря. Когда глубина примерно соответствует половине длине волны, начинается процесс рефракции волн, волновые движения достигают дна и способны вызвать взмучивание осадков.

Для случая на рис. 3б были рассчитаны волновые характеристики по широко применяемой модели SWAN (SWAN user manual, 2014; Харитонов, Фомин, 2011) на сетке 246×160 , покрывающей Азово-Черноморский бассейн с шагом ~ 4.5 км. На

входе в модель задавались скорость ветра на стандартной высоте 10 м с дискретностью 1 час из массива реанализа MERRA (Rienecker et al., 2011). На рис. 3е представлен график изменчивости длин и высот волн для точки в центре Каламитского залива за период с 1 сентября по 31 октября 2003 г. В основном в этом районе высота волны не превышает 1 м, а длина волны — 20 м. Резкое изменение характеристик отмечено 6, 9 и 23 октября при воздействии штормовых юго-восточных ветров. Для рассматриваемого нами случая, 6 октября длины волн достигали 70 м, а их высота 3.4 м.

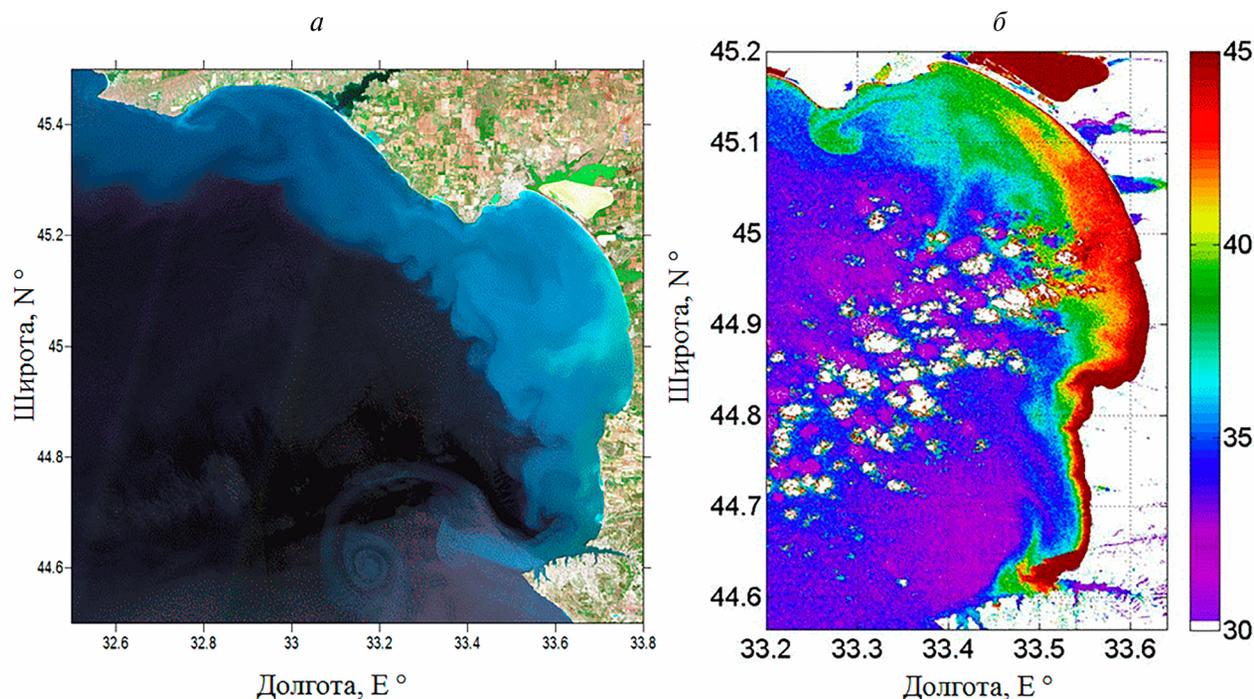


Рис. 4. *а* – RGB-композиция, построенная по измерениям спутника Sentinel-2 за 27 апреля 2017 г., после действия шторма 25 апреля 2017 г.; *б* – яркость излучения 16 февраля 2002 г., Landsat-7, 0.45–0.515 мкм после действия шторма 13 февраля 2002 г.

Последовательные спутниковые снимки MODIS позволяют по данным о перемещении трассеров оценить скорости течения. На снимках MODIS за 2–4, 6 апреля 2009 года (рис. 3г, д, е) наблюдается воздействие интенсивного юго-восточного ветра, скорость которого 29–30 марта составляла до 8 м/с. Повышенные значения ВВ (>1 мг/л) отмечаются от м. Лукулл до м. Урет. Как и в предыдущих примерах, наиболее мутные воды находятся в Каламитском заливе (концентрация ВВ >5 мг/л). На северной периферии взмученных вод наблюдается циклоническая завихренность поверхностных вод. Анализ последовательных снимков позволил оценить скорость смещения этого образования в пространстве величиной ~ 7 см/с.

Анализ всего массива данных MODIS показал, что максимальные значения концентрации ВВ (более 100 мг/л) наблюдаются после воздействия штормового волнения, вызванного юго-западными и южными ветрами. В течение рассматриваемого периода такие концентрации были отмечены 07.10.2003 г., 25.11.2008 г., 17.04.2011 г. и 09.09.2015 г., что соответствуют датам, когда наблюдались юго-западные штормовые ветра. Очевидно, что они наиболее эффективны для образования значительного волнения, приводящего к разрушению глинистых клифов, взмучиванию донных осадков и т.п.

Образование зон с высокими концентрациями ВВ, кроме этого позволяет идентифицировать

различные динамические структуры поверхностных вод, а при наличии последовательных снимков и отслеживать их дальнейшую эволюцию. Так, например, у м. Евпаторийский неоднократно отмечалось образование прибрежного круговорота циклонической завихренности, с горизонтальными размерами около 4 км (рис. 4б). Его образование можно связать с обтеканием мыса вдольбереговым потоком, направленным с востока на запад. Ранее было показано теоретически и экспериментально, что такой поток образуется именно при юго-западных ветрах (Горячкин, Фомин, 2013).

На спутниковом снимке с высоким пространственным разрешением по данным Sentinel-2 (рис. 4а) после действия юго-восточного ветра со скоростью до 10 м/с, как и в предыдущих случаях, видно, что основная область взмучивания сосредоточена в Каламитском заливе до глубин 50 м. Характер распределения концентраций ВВ, по-видимому, отражает особенности динамики вод. Так на снимке хорошо заметны волнообразные возмущения в зоне контакта мутных и прозрачных вод, следы вихреобразования и другие мезомасштабные особенности у мысов Херсонес, Евпаторийский, Урет.

Северо-восточные ветры. На рис. 5 представлен пример эволюции распределения концентрации ВВ после воздействия северо-восточного ветра со скоростью 10 м/с, который действовал в течение 3 дней с 7 по 10 ноября 2008 г. (рис. 5а, в). В первый

день повышенные значения концентрации ВВ наблюдались в Каламитском заливе и северо-западнее его (от м. Евпаторийского до м. Урет). При этом вблизи берега концентрация ВВ соответствовала фоновым значениям (около 0.3 мг/л), а увеличение отмечалось на значительном удалении от берега (~ 6 км). На следующий день концентрации ВВ между изобатами 30 и 50 м возросли до 0.5–0.7 мг/л. В то же время, вблизи берега, от Каламитского залива до м. Урет протягивается полоса относительно чистых вод (0.2–0.3 мг/л), что близко к фоновым значениям в глубоководной части моря. Область вод с повышенными концентрациями ВВ в последующие дни распространялась вдоль побережья в северо-западном направлении. Скорость ее перемещения по последовательным снимкам MODIS можно оценить величиной ~ 16 см/с. Концентрация ВВ возрастала с 7 по 9 ноября от значений 0.7 до 1.5 мг/л, а затем после ослабления ветра 11 ноября уменьшилась до 0.8 мг/л (рис. 5з).

Выше мы уже приводили возможный механизм возникновения полосы взмученных вод на некотором расстоянии от берега, связанный с недостаточной длиной разгона для образования значимых высот волн. Дополнительным фактором, который может влиять на поддержании низких концентраций ВВ непосредственно у берега может быть подток относительно прозрачных, холодных придонных вод (компенсационное течение). Он может возникнуть из-за возникновения вертикальной циркуляции вод, как следствие понижения уровня моря при сильных ветрах от берега. Косвенно наличие такого механизма подтверждается анализом спутниковых карт поверхностной температуры моря, на которых хорошо заметна полоса пониженных значений температуры воды вдоль берега (рис. 5б). Отметим, что концентрация ВВ в море при северо-восточных штормах почти на два порядка меньше, чем при южных, что связано с отсутствием разрушительного волнового воздействия на берега. Образование зон с повышенными значениями ВВ при этих ветрах сравнительно редко наблюдается южнее м. Лукулл, что связано с рельефом прилегающей суши. Данные гидрометеостанций Евпатория и Севастополь показывают существенно меньшие скорости северо-восточных ветров на последней.

Северо-западные ветры. При действии штормовых северо-западных ветров у западного побережья Крыма нередко возникает экмановский апвеллинг. При этом в верхнем слое поток направлен от берега, в нижнем в сторону берега. Как правило, очаг возникновения апвеллинга наблюдается у м. Тарханкут. После его возникновения холодные воды в результате адвекции на поверхности начинают распространяться вдоль берега на юго-восток. В результате

у берега возникает область с низкими значениями температуры и концентрации ВВ. Иногда она может охватывать всю прибрежную полосу от м. Тарханкут до м. Херсонес. В то же время воды с повышенными концентрациями ВВ оттесняются в сторону открытого моря, где в результате осаждения донные наносы, взвешенные в морской воде в прибрежной зоне, превращаются в донные осадки. Отметим, что нередко при этих ветрах волновое воздействие на глинистые клифы создает полосу взмученных вод непосредственно у берега.

На рис. 6 изображены последствия действия северо-западного штормового ветра со скоростью 10 м/с, который наблюдался 17–18 сентября 2007 г. На карте яркостной температуры, полученной по данным Landsat-5, хорошо видны две области холодных вод. Первая расположена к югу м. Тарханкут, вторая — к востоку и западу от м. Херсонес. Температура поверхности моря в области апвеллинга составляет около 15 °С, а в окружающих водах до 22 °С. Низким температурам соответствуют воды с малыми концентрациями ВВ (рис. 6а). К западу от этих областей концентрации существенно возрастают.

К северу и югу от м. Лукулл непосредственно у берега заметны области с повышенными концентрациями ВВ. Несколько меньшие концентрации отмечаются в ядре вихря, расположенного у м. Лукулл. 17 сентября они составляли до 25 мг/л, а на следующий день уменьшились до 2–3 мг/л. При этом значения концентрации ВВ в окружающих водах в этот период составляли 0.2–0.3 мг/л.

На рис. 7 представлены снимки Landsat-7 за 14 августа 2003 г. и MODIS за 15 и 17 августа 2003 г. 12 августа в этом регионе наблюдался северо-западный ветер со скоростью 10 м/с. На снимке спутника Landsat-7 (рис. 7а) как и предыдущем случае, наблюдается полоса мутных вод вдоль побережья от Каламитского залива до Севастополя. Юго-западнее м. Херсонес наблюдается полоса вод с повышенными концентрациями ВВ длиной около 16 км. Значения концентрации ВВ вдоль берега Каламитского залива, от Евпаторийской до Севастопольской бухты 15 сентября составляют 1–3 мг/л, через 2 дня — 0.5–1 мг/л, т.е. они относительно небольшие.

При этом по карте яркостной температуры, построенной по данным Landsat-7 (канал 6), видно, что данная полоса образуется в результате распространения мутных вод вдоль фронта апвеллинга (рис. 7б). На последующем снимке MODIS за 15 августа наблюдается дальнейшее распространение мутных вод виде полосы, протягивающейся от м. Херсонес на 30 км (рис. 7в). На ее конце видны следы субмезомасштабного круговорота, со значением концентрации ВВ в ядре около

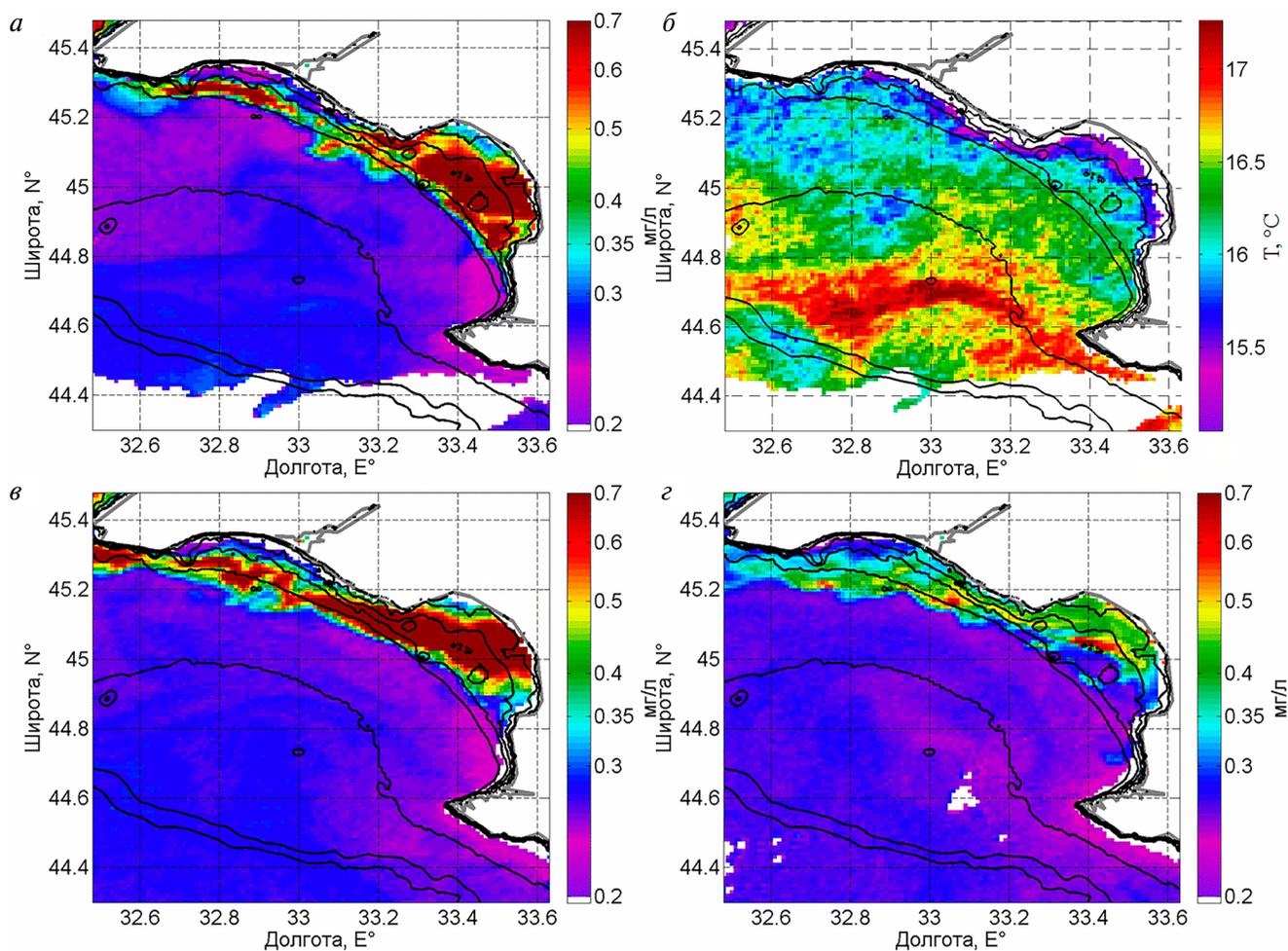


Рис. 5. *a, в, г* — концентрация ВВ по данным MODIS/Aqua за 8, 9 и 11 ноября 2008 г. соответственно; *б* — температура поверхности моря по данным MODIS/Aqua за 8 ноября 2008 г.

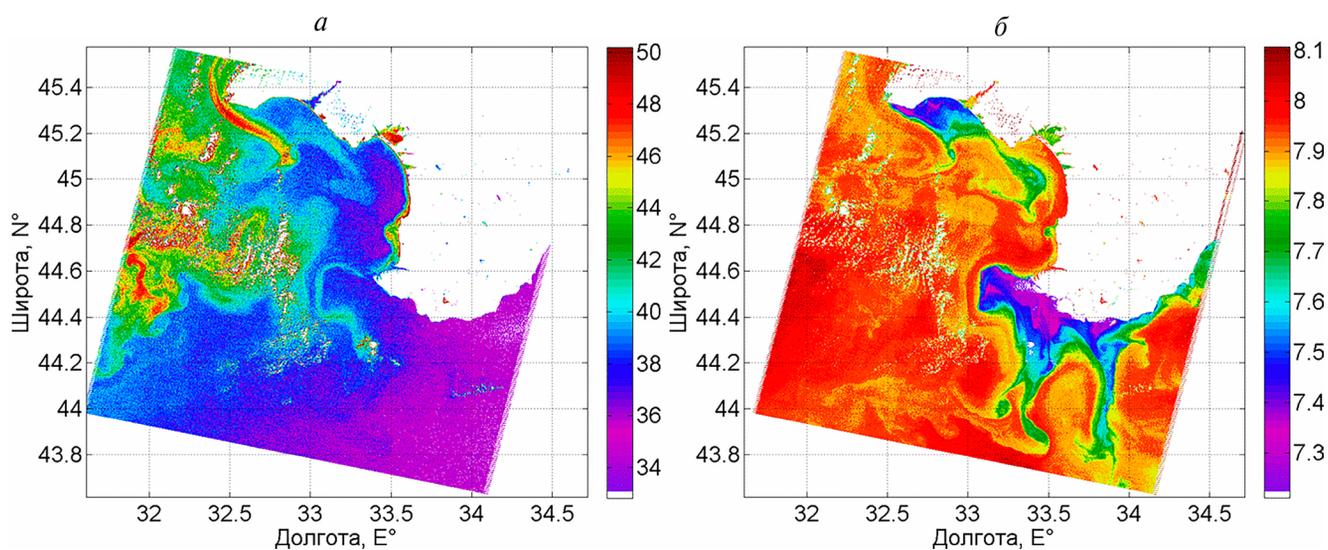


Рис. 6. *a* — яркость излучения на $\lambda = 0.45-0.52 \mu\text{m}$, Landsat-5; *б* — яркостная температура в 6 канале, $\lambda = 0.52-0.6 \mu\text{m}$ за 18 сентября 2007 г.

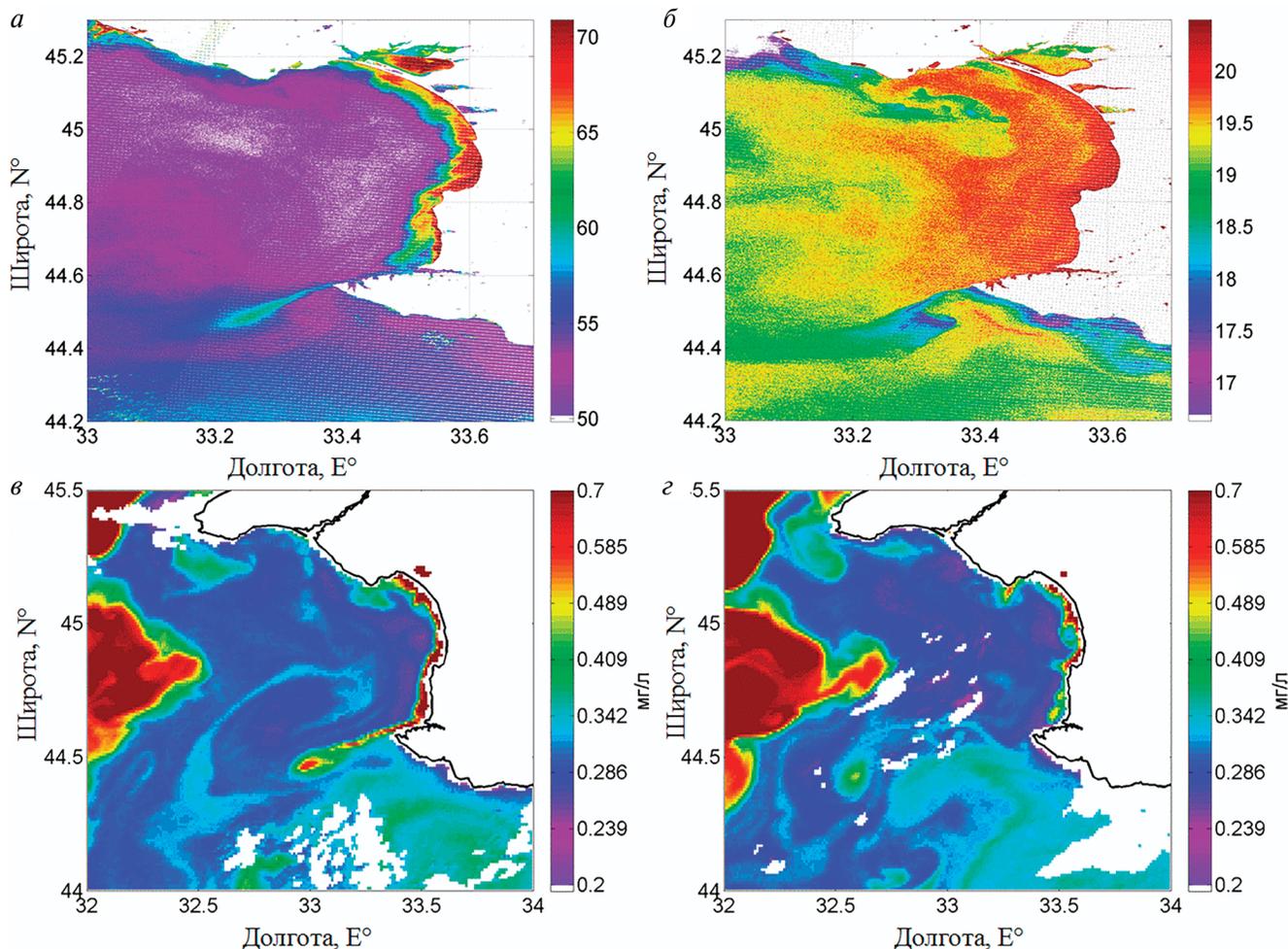


Рис. 7. *a* – яркость излучения на $\lambda = 0.45-0.515$ μm , Landsat-7 за 14 августа 2003 г.; *б* – яркостная температура Landsat-5, $\lambda = 0.52-0.6$ μm за 14 августа 2003 г.; *в*, *г* – концентрация ВВ по данным MODIS/Aqua за 15 и 17 августа 2003 г. соответственно.

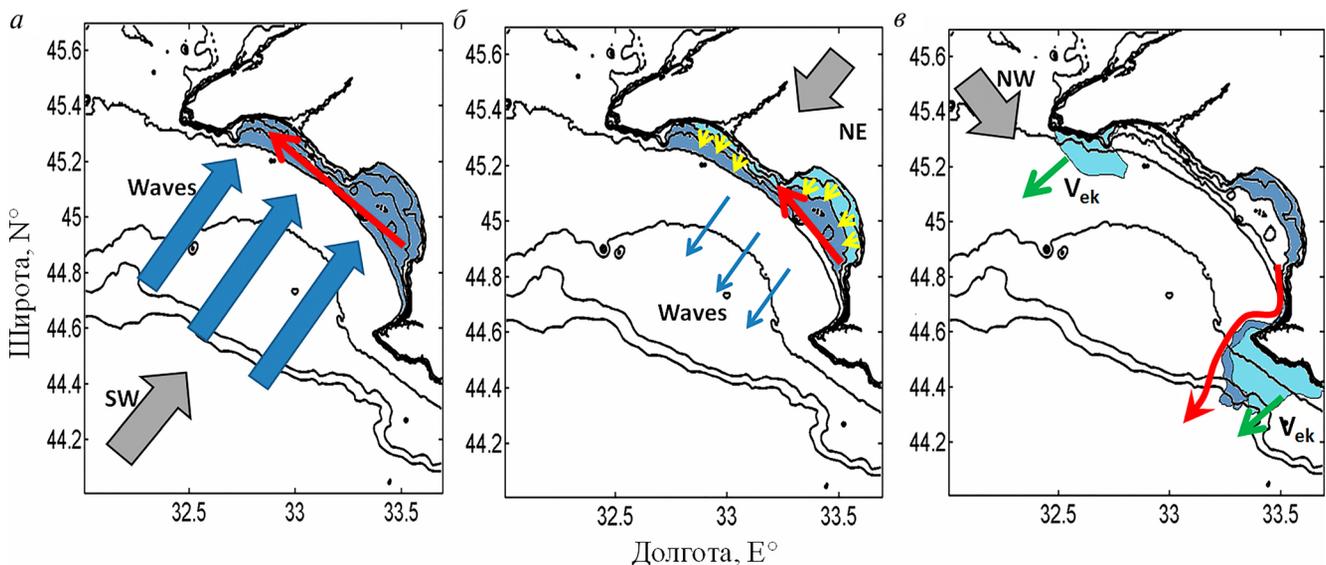


Рис. 8. Схемы образования и распространения ВВ: *a* – при юго-западном ветре; *б* – при северо-восточном ветре; *в* – при северо-западном ветре (обозначения: серая стрелка – направление ветра, синяя – направление волны, красная – направление течения, зеленая – направление экмановской скорости; голубая область – зона ветрового стона, апвеллинга, синяя область – взмученные воды).

0.6 мг/л. На снимке от 17 августа это образование уже видно в виде вихря, изолированного от полосы мутных вод. Грубо скорость его смещения в западном направлении можно определить величиной ~ 19 см/с. Концентрация ВВ внутри этого образования составляет около 0.5 мг/л, т.е. в два раза выше окружающих вод. Перемещение вихрей из прибрежных районов в области глубоководных является важным механизмом поступления берегового вещества в открытое море и осадкообразования на дне Черного моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведено исследование влияния штормовых ветров различных направлений на образование и динамику ВВ в прибрежной зоне Западного Крыма. Штормовое волновое воздействие оказывает определяющее влияние на его пространственное распределение. Различные механизмы имеют доминирующее значения при ветрах различных направлений. К ним можно отнести волновое воздействие на берега, взмучивание придонных осадков, ветровое турбулентное перемешивание, циркуляцию вод при ветровом и экмановском апвеллинге, вихреобразование и т.д. На рис. 8 изображены схемы действия таких механизмов.

Южные, юго-западные ветры (рис. 8а) разгоняют интенсивные ветровые волны, которые вызывают значительное разрушение берегов, особенно с глинистыми клифами, и взмучивание донных наносов. При этом области с повышенными концентрациями ВВ достигают изобаты 50 м и распространяются на обширные акватории от м. Урет до Севастопольской бухты. Значения концентрации ВВ при таких ветрах максимально и может достигать до 200 мг/л.

При северо-восточных ветрах (рис. 8б) область взмученных вод локализуется на некотором расстоянии от берега из-за малого разгона для образования значимых высот волн. Дополнительным фактором, который может влиять на поддержание низких концентраций ВВ непосредственно у берега может быть подток относительно прозрачных придонных вод. Из-за отсутствия интенсивного воздействия волн на берег значения концентрации ВВ в этом случае на два порядка ниже, чем для южных ветров.

Особенностью действия северных и северо-западных штормов (рис. 8в) является образование вдольберегового струйного течения вдоль западного побережья. Течение возникает на фронтальной зоне апвеллинга, образуящегося при таких ветрах южнее м. Тарханкут и м. Херсонес. Поток

переносит ВВ на юг от Каламитского залива и м. Лукулл в глубоководную часть моря. Концентрация ВВ в этом случае также значительно ниже, чем при воздействии южных ветров, однако может достигать величины 3 мг/л.

В заключение необходимо сказать, что детальное исследование этих механизмов и их влияние на образование и перенос взвешенного вещества представляет собой важную фундаментальную задачу, которую невозможно решить без развития инструментальных методов наблюдения.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Получение и обработка данных проведены в рамках гранта РФФИ 17–05–41102 РГО_а; изучение влияние вихрей на распространение взвеси поддержано грантом РФФИ 19-05-00479_А; анализ источников ВВ и количественных характеристик их поступления в рамках государственного задания по темам 0827–2018–0004 и 0827–2018–0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В.* Распространение взвешенного вещества под влиянием штормовых ветров у западного побережья Крыма по оптическим данным высокого разрешения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 1. С. 63-71.
- Алескерова А.А., Кубряков А.А., Горячкин Ю.Н., Станичный С.В.* Распространение вод из Керченского пролива в Черное море // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. №. 6 (198). С. 53-64.
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Исследования полей течений и загрязнений прибрежных вод на Геленджикском шельфе Черного моря с использованием космических данных // *Исследование Земли из космоса*. 2012. №. 4. С. 3-3.
- Бондур В.Г., Килер Р.Н., Старченков С.А., Рыбакова Н.И.* Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий с использованием многоспектральных космических изображений высокого разрешения // *Исследование Земли из космоса*. 2006. №. 6. С. 42-49.
- Вихованець Г.В.* Вплив відносних довготермінових коливань рівня моря на еолові процеси на морському березі // *Вісник Одеського національного університету*. 2003. С. 22-30.
- Гармашов А.В., Кубряков А.А., Станичный С.В., Толокнов Ю.Н., Коровушкин А.И.* Сопоставление скорости ветра над Черным морем по спутниковым и метеорологическим данным // *Известия РАН*. 2016. Т. 52. №. 3. С. 351-360.
- Горячкин Ю.Н.* Придонные течения в Каламитском заливе // *Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу*. 2008. № 17. С. 258–264.

- Горячкин Ю.Н. (ред.). Современное состояние береговой зоны Крыма // Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2015. 252 с.
- Горячкин Ю.Н. Апвеллинг у берегов Западного Крыма // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34. № 5. С. 399–411.
- Горячкин Ю.Н., Долотов В. В. Изменения береговой линии аккумулятивных берегов Западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2011. № 1 (25). С. 8–18.
- Горячкин Ю.Н., Иванов В.А. Современное состояние черноморских берегов Крыма // Доповіді Національної академії наук України. 2010. № 10. С. 87–92.
- Горячкин Ю.Н., Репетин Л.Н. Штормовой ветро-волновой режим у Черноморського побережжя Криму // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2009. № 19. С. 56–69.
- Горячкин Ю.Н., Фомин В.В. Характеристики волновых течений в Каламитском заливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2010. № 23. С. 159–165.
- Горячкин Ю.Н., Фомин В.В. Динамика наносов в Евпаторийской бухте, Черное море // Вісник Одеського національного університету. Серія: Географічні та геологічні науки. 2013. № 18 Вип. 2. С. 46–53.
- Горячкин Ю.Н., Харитонов Л.В., Долотов В.В. Изменчивость береговой линии северо-западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2009. № 20. С. 18–26.
- Долотов В.В., Долотов А.В. Перспективы интернет-реализации информационных систем океанографического характера // ИнтерКарто/ИнтерГИС. 2017. Т. 23. № 2. С. 182–192.
- Дулов В.А., Юровская М.В., Козлов И.Е. Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения // Морской гидрофизический журнал. 2015. №6 (186). С. 43–60.
- Завьялов П.О., Маккавеев П.Н., Коновалов Б.В., Осадчиев А.А. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // Океанология. 2014. Т.54. №3. С.293–308.
- Ильин Ю.П., Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н., Горячкин Ю.Н., Дьяков Н.Н., Кубряков А.А., Станичный С.В. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2: Черное море // Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». 2012.
- Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Мелкомасштабные вихри Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 248–259.
- Кременчуцкий Д.А., Кубряков А.А., Завьялов П.О., Коновалов Б.В., Станичный С.В., Алескерова А.А. Определенные концентрации взвешенного вещества в Черном море по данным спутника MODIS // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2014. № 29. С. 1–9.
- Станичная Р.Р., Станичный С.В., Горячкин Ю.Н. Методика анализа изменчивости береговой линии по спутниковым данным // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. №1. С. 22–29.
- Удовик В.Ф., Горячкин Ю.Н. Межгодовая изменчивость вдоль берегового потока наносов в береговой зоне Западного Крыма // Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфа. 2013. № 27. С. 363–368.
- Харитонов Л.В., Фомин В.В. Численное моделирование ветрового волнения у западного побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2011. Вып. 25. Т. 1. С. 26–37.
- Шуйский Ю.Д. Основные закономерности морфологии и динамики западного берега Крымского полуострова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2005. Вып. 13. С. 62–72.
- Шуйский Ю.Д., Выхованец Г.В. Карта средней скорости абразии и аккумуляции. 1960–1994 гг. // Атлас охраны природы Черного и Азовского морей. 2006. С. 44.
- Шербак С.С., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Возможности спутникового дистанционного зондирования для изучения влияния атмосферных процессов на формирование течений в Керченском проливе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. №1(4). С. 376–383.
- Aleskerova A.A., Kubryakov A.A., Stanichny S.V. A two-channel method for retrieval of the Black Sea surface temperature from Landsat-8 measurements // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. V. 52. № 9. С. 1155–1161. DOI: 10.1134/S0001433816090048
- Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C. M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., Holm E. V., Isaksen I., Kallberg P., Kohler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J. N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2011. Vol. 137. P. 553–597.
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Krivosheya V.G., Nezlin N.P., Soloviev D. M., Stanichny S.V., Yakubenko V.G. Mesoscale eddies and related processes in the northeastern Black Sea // Journal of Marine Systems. 2002. №32 (1–3). P. 71–90.
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Soloviev D.M. et al. Remotely sensed coastal/deep-basin water exchange processes in the Black Sea surface layer // Satellites, Oceanography and Society, Ed. D. Halpern, Elsevier Oceanography Series. 2000. № 63. P. 273–287.

- Karimova S.S.* Statistical Analysis of Submesoscale Eddies in the Baltic, Black and Caspian Seas Using Satellite SAR Images // *Earth Observation and Remote Sensing*. 2012. № 3. P. 31–47.
- Kosyan R.D., Goryachkin Y.N., Krylenko V.V., Dolotov V.V., Krylenko M.V., Godin E.A.* Crimea and Caucasus accumulative coasts dynamics estimation using satellite pictures // *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2012. V. 12. №. 5. P. 385–390.
- Kubryakov A.A., Bagaev A.V., Stanichny S.V., Belokopytov V.N.* Thermohaline structure, transport and evolution of the Black Sea eddies from hydrological and satellite data // *Progress in Oceanography*. 2018. № 167. P. 44–63.
- Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G.* Interannual variability of Danube water propagation during the summer from 1992 to 2015 and its influence on the Black Sea ecosystem // *Journal of Marine Systems*, Available online 16 November 2017, ISSN 0924-7963, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.11.001>.
- Lavrova O., Mityagina M.* Satellite Survey of Internal Waves in the Black and Caspian Seas // *Remote Sensing*. 2017. V. 9. №. 9. P. 892.
- Lavrova O.Y., Soloviev D.M., Mityagina M.I., Strochkov A.Y., Bocharova T.Y.* Revealing the influence of various factors on concentration and spatial distribution of suspended matter based on remote sensing data // *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2015* (Vol. 9638, p. 96380D). International Society for Optic and Photonics.
- Lavrova, O.Y., Soloviev D.M., Strochkov M.A., Bocharova T.Y., Kashnitsky A.V.* River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data // *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*. International Society for Optic and Photonics. 2016. V. 9999. P. 99990G.
- Mityagina M.I., Lavrova O.Y., Karimova S.S.* Multi-sensor survey of seasonal variability in coastal eddy and internal wave signatures in the north-eastern Black Sea // *International Journal of Remote Sensing*. 2010. № 31(17-18). P. 4779–4790.
- Oguz T., Deshpande A.G., Malanotte-Rizzoli P.* The role of mesoscale processes controlling biological variability in the Black Sea coastal waters: inferences from SeaWiFS-derived surface chlorophyll field // *Continental Shelf Research*. 2002. V. 22. №. 10. P. 1477–1492.
- Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R., Todling R., Bacmeister J., Liu E., Bosilovich M.G., Schubert S.D., Takacs L., Kim G.-K., Bloom S., Chen J., Collins D., Conaty A., da Silva A. et al.* MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. // *J. Climate*. 2011. № 24. P. 3624–3648
- Shapiro G.I., Stanichny S.V., Stanychna R.R.* Anatomy of shelf-deep sea exchanges by a mesoscale eddy in the North West Black Sea as derived from remotely sensed data // *Remote Sensing of Environment*. 2010. 114, P. 867–875.
- Sur C., Betz H., Schloss P.* Localization of the serotonin transporter in rat spinal cord // *European Journal of Neuroscience*. 1996. V. 8. №. 12. P. 2753–2757.
- SWAN user manual. SWAN Cycle III version 40.91. Delft University of Technology. 2014. P. 123. Technical documentation.
- Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Kremenetskiy V.V., Krivosheya V.G., Stanichny S.V., Poulain P.M.* Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing. // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003. V. 108. №. C8. P. 3246. doi:10.1029/2002JC001390

Distribution of Suspended Matter off the Western Coast of the Crimea under Impact of the Strong Winds of Various Directions

A. A. Aleskerova, A. A. Kubryakov, Yu. N. Goryachkin, S. V. Stanichny, A. V. Garmashov

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

The mechanisms of formation and distribution of total suspended matter (tsm) off the West Coast of Crimea under the influence of strong winds of various directions were investigated on the base of satellite data of medium and high resolution. The maximum tsm reaching the values of 200 mg / l was is observed during strong southern winds. In this case, the zone of high tsm is located at the western shelf of the Crimea limited by a 50 m isobath. The wave impact on resuspension of bottom sediments and the erosion of clay cliffs located on the west coast of Crimea lead to the formation of a large amount of tsm. After the storm, a northern alongshore current transfers tsm to the north. During northeast winds, the highest tsm are observed not near the coast, but in the seaward part of the shelf between 30 and 50 m isobaths. It is likely that turbulent mixing during such winds resuspense bottom sediments in shallow areas, which are further transported from the coast due to the offshore winds. The wind surge in this case leads to the formation of a band of clean cold water near the coast. A specific feature of the action of the northern and northwestern storms is the formation of a longshore jet stream along the western coast. The current occurs at the front of the upwelling zone. The stream transports the suspended matter offshore southward. The concentration of the suspended matter in this case is also much lower than when exposed to the southern winds, but it can reach a value of 3 mg/l.

Keywords: suspended matter, suspended matter concentration, MODIS, water turbidity, storm, upwelling, Landsat

REFERENCES

- Aleskerova A.A., Kubryakov A.A., Goryachkin Yu.N., Stanichny S.V.* Rasprostranenie vod iz Kerchenskogo proliva v Chernoe more [Spread of water from the Kerch Strait to the Black Sea] // *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*. 2017. № 6 (198). S. 53–64. (in Russian).
- Aleskerova A.A., Kubryakov A.A., Stanichny S.V.* A two-channel method for retrieval of the Black Sea surface temperature from Landsat-8 measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. № 9. P. 1155–1161. DOI: 10.1134/S0001433816090048
- Aleskerova A.A., Kubryakov A.A., Stanichny S.V.* Rasprostranenie vzveshennogo veshchestva pod vliyaniem shtormovykh vetrov u zapadnogo poberezhya Kryma po opticheskim dannym vysokogo razresheniya [Distribution of suspended matter under the influence of storm winds off the western coast of Crimea on the basis of high-resolution optical data] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2015. T. 12. № 1. S. 63–71. (in Russian).
- Bondur V.G., Kiler R.N., Starchenkov S.A., Rybakova N.I.* Monitoring zagryazneniy pribrezhnykh akvatoriy s ispolzovaniem mnogospektralnykh kosmicheskikh izobrazheniy vysokogo razresheniya [Monitoring of pollution of coastal waters using multi-spectral high-resolution space images] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2006. № 6. S. 42–49. (in Russian).
- Bondur V.G., Vorobyev V.E., Grebenyuk Yu.V., Sabinin K.D., Serebryanyi A.N.* Issledovaniya poley techeniy i zagryazneniy pribrezhnykh vod na Gelendzhikskom shelfe Chernogo morya s ispolzovaniem kosmicheskikh dannykh [Studies of fields of flows and pollution of coastal waters on the Gelendzhik shelf of the Black Sea using space data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2012. № 4. S. 3–3. (in Russian).
- Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechold P., Beljaars A. C. M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., Holm E. V., Isaksen L., Kallberg P., Kohler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J. N., Vitart F.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2011. Vol. 137. P. 553–597.
- Dolotov V.V., Dolotov A.V.* Perspektivy internet-realizatsii informatsionnykh system okeanograficheskogo kharaktera [Prospects for Internet implementation of oceanographic information systems] // *InterKarto/InterGIS*. 2017. T. 23. № 2. S. 182–192. (in Russian).
- Dulov V.A., Yurovskaya M.V., Kozlov I.E.* Pribrezhnaya zona Sevastopolya na sputnikovyykh snimkakh vysokogo razresheniya [The coastal zone of Sevastopol on high-resolution satellite images] // *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*. 2015. №6 (186). S. 43–60. (in Russian).
- Garmashov A.V., Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Toloknov Yu.N., Korovushkin A.I.* Sopostavlenie skorosti vetra nad Chernym morem po sputnikovym i meteorologicheskim dannym [Comparison of wind speed over the Black Sea using satellite and meteorological data] // *Izv. RAN*. 2016. T. 52. № 3. S. 351–360. (in Russian).
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Krivosheya V.G., Nezlin N.P., Solovie D. M., Stanichny S.V., Yakubenko V.G.* Mesoscale eddies and related processes in the northeastern Black Sea. // *Journal of Marine Systems*. 2002. №32 (1-3). P. 71–90.
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Soloviev D.M. et al.* Remotely sensed coastal/deep-basin water exchange processes in the Black Sea surface layer // *Satellites, Oceanography and Society*, Ed. D. Halpern, Elsevier Oceanography Series. 2000. № 63. P. 273–287.
- Goryachkin Yu.N.* Apvelling u beregov Zapadnogo Kryma [Upwelling beside the coast of Western Crimea] // *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*. 2018. T. 34. № 5. S. 399–411 (in Russian).
- Goryachkin Yu.N.* Pridonnye techeniya v Kalamitskom zalive [Bottom flows in the Kalamitsky Bay] // *Ekologichna bezpeka pribrezhnoy ta shelfovoy zon ta kompleksne vykorystannya resursiv shelfu*. 2008. № 17. S. 258–264. (in Russian).
- Goryachkin Yu.N.* (ed.). *Sovremennoe sostoyanie beregovoy zony Kryma* [The current state of the coastal zone of Crimea] // Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2015. 252 s. (in Russian).
- Goryachkin Yu.N., Dolotov V.V.* Izmeneniya beregovoy linii akkumulyativnykh beregov Zapadnogo Kryma [Changes in the coastline of the accumulative coast of the Western Crimea] // *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zon i kompleksnoe ispolzovanie resursov shelfa*. 2011. № 1 (25). S. 8–18 (in Russian).
- Goryachkin Yu.N., Fomin V.V.* Dinamika nanosov v Evpatoriyskoy bukhte, Chernoe more [The dynamics of sediment in the Bay of Evpatoria, the Black Sea] // [Visnyk Odeskogo natsionalnogo universytetu. Seriya: Geografichni ta geologichni nauki]. 2013. № 18, Vyp. 2. S. 46–53. (in Russian).
- Goryachkin Yu.N., Fomin V.V.* Kharakteristiki volnovykh techeniy v Kalamitskom zalive [Characteristics of wave flows in the Kalamitsky Bay] // *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zon morya*. 2010. № 23. S. 159–165. (in Russian).
- Goryachkin Yu.N., Ivanov V.A.* Sovremennoe sostoyanie chernomorskikh beregov Kryma [The current state of the Black Sea coast of Crimea] // *Dopovidi Natsionalnoy akademii nauk Ukrainy*. 2010. № 10. S. 87–92. (in Russian).
- Goryachkin Yu.N., Kharitonova L.V., Dolotov V.V.* Izmenchivost beregovoy linii severo-zapadnogo Kryma [Variability of the coastline of the north-western Crimea] // *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zon morya*. 2009. № 20. S. 18–26. (in Russian).
- Goryachkin Yu.N., Repetin L.N.* Shtormovoy vetro-volnovoy rezhim u Chernomorskogo poberezhya Kryma [Storm wind-wave regime beside the Black Sea coast of Crimea] // *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zon morya*. 2009. № 19. S. 56–69. (in Russian).
- Ilyin Yu.P., Repetin L.N., Belokopytov V.N., Goryachkin Yu.N., Dyakov N.N., Kubryakov A.A., Stanichny S.V.* Gidrometeorologicheskie usloviya morey Ukrainy. T. 2. Chernoe more [Hydro-meteorological conditions of the seas of Ukraine. V. 2: Black Sea] // Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika. 2012. (in Russian).
- Karimova S.S.* Statistical Analysis of Submesoscale Eddies in the Baltic, Black and Caspian Seas Using Satellite SAR Images // *Earth Observation and Remote Sensing*. 2012. № 3. P. 31–47.
- Kharitonov L.V., Fomin V.V.* Chislennoe modelirovanie vetrovogo volneniya u zapadnogo poberezhya Kryma [Numerical

- simulation of wind waves off the western coast of Crimea] // *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zon i kompleksnoe ispolzovanie resursov shelfa*. 2011. Vyp. 25. T. 1. S. 26–37. (in Russian).
- Kostyanov A.G., Ginzburg A.I., Sheremet N.A., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I.* Melkomashtabnye vikhri Chernogo morya [Small-scale eddies of the Black Sea] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2010. T. 7. №. 1. S. 248–259. (in Russian).
- Kosyan R.D., Goryachkin Y.N., Krylenko V.V., Dolotov V.V., Krylenko M.V., Godin E.A.* Crimea and Caucasus accumulative coasts dynamics estimation using satellite pictures // *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2012. V. 12. №. 5. P. 385–390.
- Kremenchutskiy D.A., Kubryakov A.A., Zavyalov P.O., Konovalov B.V., Stanichny S.V., Aleskerova A.A.* Opredelenie kontsentratsii vzheshennogo veshchestva v Chernom more po dannym sputnika MODIS Determining the concentration of suspended matter in the Black Sea using MODIS satellite data // *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zon i kompleksnoe ispolzovanie resursov shelfa*. 2014. № 29. S. 1–9. (in Russian).
- Kubryakov A.A., Bagaev A.V., Stanichny S.V., Belokopytov V.N.* Thermohaline structure, transport and evolution of the Black Sea eddies from hydrological and satellite data. // *Progress in Oceanography*. 2018. № 167. P. 44–63.
- Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G.* Interannual variability of Danube water propagation during the summer from 1992 to 2015 and its influence on the Black Sea ecosystem // *Journal of Marine Systems*, Available online 16 November 2017, ISSN 0924-7963, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.11.001>.
- Lavrova O., Mityagina M.* Satellite Survey of Internal Waves in the Black and Caspian Seas // *Remote Sensing*. 2017. V. 9. №. 9. P. 892.
- Lavrova O.Y., Soloviev D.M., Mityagina M.I., Strochkov A.Y., Bocharova T.Y.* Revealing the influence of various factors on concentration and spatial distribution of suspended matter based on remote sensing data // *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2015* (Vol. 9638, p. 96380D). International Society for Optic and Photonics.
- Lavrova, O.Y., Soloviev D.M., Strochkov M.A., Bocharova T.Y., Kashnitsky A.V.* River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data // *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*. International Society for Optic and Photonics. 2016. V. 9999. P. 99990G.
- Mityagina M.I., Lavrova O.Y., Karimova S.S.* Multi-sensor survey of seasonal variability in coastal eddy and internal wave signatures in the north-eastern Black Sea // *International Journal of Remote Sensing*. 2010. № 31(17–18). P. 4779–4790.
- Oguz T., Deshpande A.G., Malanotte-Rizzoli P.* The role of meso-scale processes controlling biological variability in the Black Sea coastal waters: inferences from SeaWiFS-derived surface chlorophyll field // *Continental Shelf Research*. 2002. V. 22. №. 10. P. 1477–1492.
- Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R., Todling R., Bacmeister J., Liu E., Bosilovich M.G., Schubert S.D., Takacs L., Kim G.-K., Bloom S., Chen J., Collins D., Conaty A., da Silva A. et al.* MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. // *J. Climate*. 2011. № 24. P. 3624–3648
- Shapiro G.I., Stanichny S.V., Stanychna R.R.* Anatomy of shelf-deep sea exchanges by a mesoscale eddy in the North West Black Sea as derived from remotely sensed data // *Remote Sensing of Environment*. 2010. 114, P. 867–875.
- Shcherbak S.S., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I.* Vozmozhnosti sputnikovogo distantsionnogo zondirovaniya dlya izucheniya vliyaniya atmosfernnykh protsessov na formirovanie techeniy v Kerchenskom prolive [Possibilities of satellite remote sensing to study the effect of atmospheric processes on the formation of currents in the Kerch Strait] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2007. № 1(4). S. 376–383. (in Russian).
- Shuyskiy Yu.D.* Osnovnye zakonomernosti morfologii i dinamiki zapadnogo berega Krymskogo poluostrova [The main patterns of morphology and dynamics of the western coast of the Crimean peninsula] // *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zon i kompleksnoe ispolzovanie resursov shelfa*. 2005. Vyp. 13. S. 62–72. (in Russian).
- Shuyskiy Yu.D., Vykhovanets G.V.* Karta sredney skorosti abrazii i akkumulyatsii [Map of the average rate of abrasion and accumulation]. 1960–1994 rr. // *Atlas okhrany prirody Chernogo i Azovskogo morey*. 2006. S. 44. (in Russian).
- Stanichnaya R.R., Stanichny S.V., Goryachkin Yu.N.* Metodika analiza izmenchivosti beregovoy linii po sputnikovym dannym [Methods for analyzing coastal variability using satellite data] // *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zon morya*. 2016. № 1. S. 22–29. (in Russian).
- Sur C., Betz H., Schloss P.* Localization of the serotonin transporter in rat spinal cord // *European Journal of Neuroscience*. 1996. V. 8. № 12. P. 2753–2757.
- SWAN user manual. SWAN Cycle III version 40.91. Delft University of Technology. 2014. P. 123. Technical documentation
- Udovik V.F., Goryachkin Yu.N.* Mezhgodovaya izmenchivost vdol beregovogo potoka nanosov v beregovozi zone Zapadnogo Kryma [Interannual variability along the coastal sediment flow in the coastal zone of the Western Crimea] // *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zon i kompleksnoe ispolzovanie resursov shelfa*. 2013. № 27. S. 363–368. (in Russian).
- Vykhovanets G.V.* Vplyv vidnosnikh dovgotermynovykh kolyvan rivnya morya na eolovi protsesi na morskomu berezi [Influence of relative long-term vibrations of sea level on the eolian processes on the seashore] // *Visnyk Odeskogo natsionalnogo universitetu*. 2003. S. 22–30.
- Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianov A.G., Kremenetskiy V.V., Krivosheya V.G., Stanichny S.V., Poulain P.M.* Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing. // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003. V. 108. № C8. P. 3246. doi:10.1029/2002JC001390
- Zavyalov P.O., Makkaveev P.N., Konovalov B.V., Osadchiv A.A.* Gidrofizicheskie i gidrokhimicheskie kharakteristiki morskikh akvatoriy u ustey malykh rek rossiyskogo poberezhya Chernogo morya [Hydrophysical and hydrochemical characteristics of sea areas at the mouths of small rivers of the Russian Black Sea coast] // *Okeanologiya*. 2014. T. 54. № 3. S. 293–308. (in Russian).