

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ПРОЯВЛЕНИЕ АПВЕЛЛИНГОВ В ЧЕРНОМ МОРЕ В ДАННЫХ МУЛЬТИСЕНСОРНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2023 г. Д. В. Хлебников^{a, *}, А. Ю. Иванов^{a, b}, М. А. Евдошенко^a, С. К. Клименко^a

^aИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

^bНаучно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

*E-mail: dx@ocean.ru

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

Приведены результаты исследования апвеллингов в Черном море, а именно: в северо-восточной части моря, у Тендровской косы/западного побережья Крыма, а также у побережья Турции. Они основаны на использовании данных дистанционного зондирования Земли, в частности данных сканеров цвета (MODIS, VIIRS, OLCI-a и OLCI-b), радиометров инфракрасного диапазона (TIRS и AVHRR), а также радиолокационных изображений (РЛИ), полученных радиолокаторами с синтезированной апертурой. Комплексный подход с использованием практически только данных дистанционного зондирования позволяет достаточно полно охарактеризовать наблюдаемые апвеллинги в Черном море. В активной фазе апвеллинг помимо температуры поверхности моря (ТПМ) обычно отображается как в поле концентрации хлорофилла-*a* (chl-*a*), так и в поле шероховатости морской поверхности. В наших случаях продолжительность апвеллингов варьировала от 6 до 10 сут, перепады ТПМ в зоне апвеллингов составляли до 8°C, концентрации chl-*a* превышали в 5–6 раз фоновые значения, составляющие 0.5–0.7 мг/м³. Максимальные аномалии ТПМ до 8°C наблюдались у турецкого побережья. В результате анализа выявлена однозначная взаимосвязь между областями пониженной ТПМ в зоне апвеллинга, шероховатостью морской поверхности и концентрацией chl-*a*. Показано, что в случае использования полного набора данных дистанционного зондирования наблюдения, мониторинг и исследование апвеллинга не представляет принципиальных затруднений.

Ключевые слова: Черное море, апвеллинг, дистанционное зондирование, мультисенсорный подход температура поверхности моря, цвет моря, радиолокационные изображения

DOI: 10.31857/S0205961423060052, **EDN:** DGLNED

ВВЕДЕНИЕ

В океанологии подъем глубинных холодных вод к поверхности моря/океана называют апвеллингом (Fischer, Green, 2013). Наиболее часто апвеллинги наблюдаются у западных границ материков, где более холодные и богатые биогенами воды перемещаются из глубин океана к поверхности, замещая более тёплые поверхностные воды. Апвеллинги могут встречаться практически в любом районе Мирового океана. Различают как минимум три основных типа: прибрежный апвеллинг; крупномасштабный ветровой апвеллинг в открытом океане; апвеллинг, связанный с топографией морского дна, а также и ряд других. Апвеллинг (восходящий поток морской воды) и даунвеллинг (нисходящий поток) являются типичными эпизодическими явлениями в некоторых внутренних морях, включая Черное море.

Как показывают исследования, из-за специфики физико-географических особенностей побережья Черного моря и преобладающих ветров,

у северо-западного, северо-восточного и южного берегов моря, апвеллинг проявляется достаточно часто. Как правило, для возникновения апвеллинга необходим устойчивый, т.н. апвеллинговый ветер, дующий вдоль берега (Горячкин, 2018; Станичная, Станичный, 2021). Холодная вода из-под сезонного термоклина в период его существования поднимается, достигая поверхности, где она заменяет хорошо перемешанный, значительно более теплый верхний слой и создает обширные холодные пятна. При возникновении апвеллинга понижение температуры воды составляет от 3–4 до 10–11°C. Типичные временные масштабы апвеллинга варьируют от нескольких дней до недель. Как правило, в Черном море апвеллинг длится от 2–3 до 5–6 сут и даже более, после чего температура воды повышается до стандартных сезонных значений. Степень интенсивности апвеллинга можно оценить с использованием внутреннего радиуса Россби (Fischer, Green, 2013), который для Черного моря составляет около 20 км (Павлушин и др., 2019). В теплое время

года, когда поверхность моря прогрета, апвеллинг наблюдается в спутниковых и подспутниковых данных как локальная область пониженной температуры воды.

В общем случае развитие апвеллинга происходит в две фазы: 1) активная фаза, когда прогретый поверхностный слой вод сдвигается ветром и замещается водными массами с глубины, и 2) фаза релаксации, когда ветер стихает, но на поверхности моря продолжает сохраняться сильный градиент температуры или плотности. Во время второй фазы часто формируются т.н. филаменты — струи, направленные в открытое море, образующие мелкомасштабные вихревые структуры, скорее всего, в результате бароклинной неустойчивости фронта (границы раздела теплых/холодных вод).

Изучению апвеллинга в Черном море и причин его возникновения методами дистанционного зондирования посвящено большое количество работ. По-видимому, впервые к проблеме изучения апвеллинга с помощью данных дистанционного зондирования в России обратилась И.А. Бычкова (см.: Бычкова и др. 1985, 1988; Бычкова, Викторов, 1987). Проявления апвеллингов изучались главным образом в поле ТПМ (Гинзбург и др., 1997; Горячкин, 2018;), а затем и по данным космической радиолокации — на радиолокационных изображениях (РЛИ) (Hsu et al., 1995; Clemente-Colón, Yan, 1999, 2000; Kozlov et al., 2011). В настоящее время в связи с возможностью использования разнообразной спутниковой аппаратуры: сканеров цвета, инфракрасных (ИК) радиометров, спектрорадиометров и радиолокаторов, исследования апвеллингов проводится с использованием мультисенсорного подхода (Lin et al., 2002; Li et al., 2009; Гурова, Иванов, 2011; Gurova et al., 2015; Lehmann et al., 2012).

Работы по изучению апвеллингов на Балтике, в том числе с использованием численного моделирования показали, что модели достоверно воспроизводят особенности поля ТПМ и ряд других особенностей явления не только на поверхности, но и в верхнем слое моря (Kowalewski, Ostrowski, 2005; Lehmann, Myrberg, 2008; Голенко, 2010; Myrberg et al., 2010). В последнее время в этом направлении активно изучаются и черноморские апвеллинги (Полонский, Музылева, 2016; Зацепин и др., 2016; Сильвестрова и др., 2017).

В целом мультиспектральные и мультидатчиковые (мультисенсорные) спутниковые данные — ценный материал для исследования апвеллингов. Они, в общем случае, позволяют увидеть развитие и пространственные масштабы явления, его структуру и определить контрасты температур. По данным дистанционного зондирования, главным образом по ИК-снимкам установлено, что прибрежный апвеллинг — это мезомасштабное явление со временем жизни от дней до недель.

В процессе развития апвеллинга холодные воды распространяются на десятки километров в открытое море, образуя струи и пятна холодной воды, которые нередко попадают в орбиту вихрей или грибовидных структур или формируют изолированные холодные “линзы” (Станичная, Станичный, 2021).

В настоящей статье на основе анализа только данных ДЗЗ предпринята попытка уточнить особенности динамики апвеллингов, время от времени возникающих в Черном море, а также определить их основные характеристики.

СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ: МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Спутниковые данные дают уникальную возможность изучения процессов развития и трансформации апвеллинга путем исследования полей ТПМ, так как апвеллинг легко идентифицируется по характерным температурным контрастам (ΔT). В связи с этим основными материалами для анализа апвеллингов в прибрежных частях Черного моря послужили спутниковые данные дистанционного зондирования, полученные квазисинхронно. Учитывая физико-географические особенности Черного моря, мы выбрали три района для исследований, где апвеллинги проявились наиболее ярко: первый район примыкает к северо-восточному побережью моря и расположен между Анапой и Туапсе; второй — к побережью Западного Крыма и Тендровской косе, а третий находится у побережья Турции, где интенсивный апвеллинг возникает достаточно часто. Эти проявления апвеллингов в Черном море отобразились практически во всех данных ДЗЗ во всех диапазонах электромагнитного спектра, что происходит не так часто. Наиболее интересными являются случаи, происшедшие в июле 2018 г. и июле–августе 2020 г.

Используемые для анализа данные включали снимки и изображения, а также готовые продукты (поля ТПМ и концентрации хлорофилла-*a* фитопланктона (chl_{or}-*a*) за 2018 и 2020 гг. Большинство этих данных с пространственным разрешением 1 км доступно на сайте МГИ РАН (http://dvs.net.ru/mp/index_ru.shtml). Кроме этого, привлекались, обрабатывались и анализировались данные ИК-радиометра TIRS, установленного на американском ИСЗ Landsat-8 (ТПМ), мультиспектрального прибора MSI на европейском ИСЗ Sentinel-2, а также данные chl_{or}-*a* европейского спутника Sentinel-3 и радиолокационные данные европейских ИСЗ Sentinel-1A и Sentinel-1B, полученные квазисинхронно. Все данные брались из открытых источников.

Кратко остановимся на основных характеристиках датчиков ДЗЗ, данные которых были ис-

пользованы для изучения апвеллингов дистанционными методами.

1) Сканирующий радиометр AVHRR/3 (Advanced Very High Resolution Radiometer) с 6 спектральными каналами, установленный на ИСЗ серий NOAA и MetOp; он позволяет определять ТПМ с пространственным разрешением 1 км, шириной полосы обзора в 2900 км и периодичностью съемки 1–2 раза в сутки в зависимости от широты места.

2) Двухканальный ИК-радиометр TIRS (Thermal Infrared Sensor) на ИСЗ Landsat-8 позволяет получать “тепловые” изображения морской поверхности с разрешением по температуре ~ 0.7 – 1.0°C и пространственным разрешением ~ 100 м (в каналах 10.6 и 11.19 мкм). (Vanhellemont, 2020). Его ширина полосы обзора составляет 185 км, период повторной съемки – один раз в 16 сут. Для восстановления ТПО используется стандартный алгоритм (Landsat-8 Data Users Handbook, 2019), например, встроенный в программу “ScanEx Image Processor®”.

3) Сканирующий спектрометрический OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) видимого диапазона на спутниках Sentinel-3A и Sentinel-3B предназначен для мониторинга океана, суши и криосферы. Данные OLCI с пространственным разрешением 300 м и шириной полосы обзора 1270 км привлекались для восстановления полей chlor-a.

4) Спектрометрический MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, на ИСЗ Aqua, и радиометр VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) на спутнике Suomi NPP, оба с разрешением 1 км и шириной полосы обзора 2300 и 3000 км соответственно, позволяют получать информацию о ТПМ и chlor-a.

5) Мультиспектральный прибор MSI (Multi-Spectral Instrument) на ИСЗ Sentinel-2A и Sentinel-2B позволяет получать оптические снимки в отраженном и рассеянном цвете с разрешением от 10 до 60 м с шириной полосы обзора 290 м.

6) Радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) на ИСЗ Sentinel-1A и Sentinel-1B (С-диапазон, длина волны 5.3 см). Наиболее востребованными для мониторинга морей оказались режимы радиолокационной съемки Interferometric Wide Swath и Extra Wide Swath (их РЛИ имеют пространственное разрешение 10 и 40 м, а ширина полосы обзора 240 и 400 км соответственно), повторяемость съемки один раз в 1–3 дня.

Дополнительно привлекались данные о гидрометеорологических условиях (ГМУ), в частности, о скорости и направлении ветра. Это были как срочные метеорологические измерения из открытых источников (в частности, веб-сервиса “Расписание погоды” <https://gp5.ru>), так и поля модельного ветра, визуализируемые в интернете

(проект Earth, Visualization of Global Weather Conditions: <https://earth.nullschool.net>), а также данные реанализа GFS/NCER, загружаемые на геоportal. Для удобства анализа все данные ДЗЗ в виде снимков, изображений и карт были размещены на черноморском геоportale ГК “СКАНЭКС”, работающем под управлением веб-ГИС приложения “Геомиксер” (<http://geomixer.ru>).

ЧЕРНОМОРСКИЕ АПВЕЛЛИНГИ В ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Ежедневные снимки из космоса в ИК-диапазоне дают практически полную, информацию об апвеллинге, его эволюции и динамике. Кратко рассмотрим ниже особенности черноморских апвеллингов на основе анализа снимков из космоса.

Апвеллинг в прибрежной зоне Анапа–Туапсе 3–12 июля 2018. Характерным примером явления апвеллинга в северо-восточной части Черного моря является событие, произошедшее в начале июля 2018 г. Благодаря воздействию устойчивых северо-западных ветров, скорость которых достигала 6–8 м/с, наблюдалось резкое понижение температуры поверхностного слоя воды на 7–8°C. Апвеллинг у северо-восточного побережья Черного моря образовался в период со 2.07 на 3.07.2020 и в итоге охватил протяженную прибрежную зону от Туапсе до Анапы. Уже с 12:00 UTC 2 июля 2018 г. вдоль этой прибрежной зоны начали преобладать сначала западные, а потом и северо-западные ветры. Примерно такие же ветры сохранялись в течение 3 июля. Возникли условия для формирования прибрежного апвеллинга. Под действием этих ГМУ 4–6 июля апвеллинг достиг своего максимума, а потом стал ослабевать, разбившись на два фрагмента: анапский и туапсинский (рис. 1).

Этот апвеллинг сопровождался значительным понижением ТПМ; по данным Краснодарского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды 6 июля 2018 г. температура воды у Туапсе упала до 16°C , а у Новороссийска – до 13°C ($\Delta T \sim 7$ – 8°C). Съемка с TIRS пришлось на 9.07, т.е. на время, когда апвеллинг находился в стадии релаксации; по данным радиометра понижение ТПМ у Анапы составило $4,1^\circ\text{C}$ при температуре воды в окружающем море 22°C . Этот апвеллинг сопровождался повышением концентрации chlor-a почти в 2 раза, до 1.0 – 1.5 мг/м³ при фоновых значениях в открытом море 0.5 – 0.8 мг/м³, причем области повышенных концентраций в районе Анапы совпали с областями апвеллинга.

Отметим и то, что Основное Черноморское течение (ОЧТ), двигаясь в этом месте с юго-востока на северо-запад, приводило к активному формированию прибрежных антициклонических вихрей в шельфовой зоне. Из-за близости ОЧТ ап-

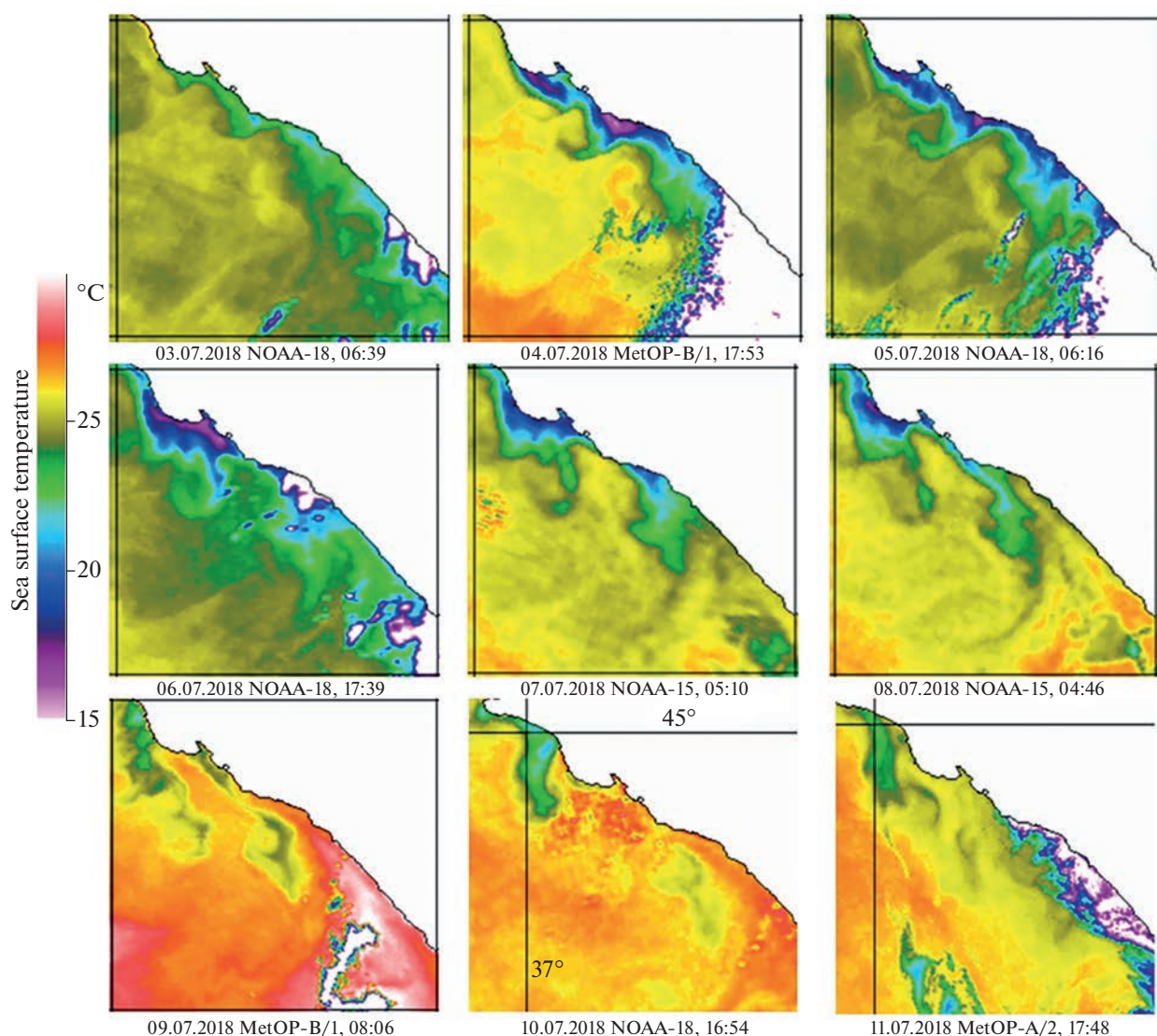


Рис. 1. Развитие апвеллинга в прибрежной зоне Анапа-Геленджик с 3 по 12 июля 2018 г. (по данным ИК-радиометров AVHRR).

веллинг у северо-восточного побережья моря сразу формировался в виде филаментов или струй, имеющих антициклоническую закрутку. Под воздействием этих факторов поднятая на поверхность холодная вода, захватывалась антициклоническими вихрями, сопряженными с ОЧТ, и выносилась на юго-восток в открытое море, в направлении, противоположном течению, что хорошо видно из рис. 1.

В итоге, апвеллинг у побережья Анапа-Геленджик был наиболее выражен 4–8 июля, что наблюдается в поле ТПМ (рис. 1). Следы апвеллинга в открытом море прослеживались вплоть до 11.07.2018, и 12 июля апвеллинг исчез окончательно.

Апвеллинг у Тендровской косы и побережья Западного Крыма 7–12 июля 2020. Этот достаточно обширный и длительный апвеллинг случился в период 7–12 июля 2020 г. сразу в трех местах – его проявления наблюдались у Тендровской косы (благодаря орографии береговой черты и глубине моря, этот район считается одним из самых активных по количеству и длительности апвеллингов (Станичная, Станичный, 2021), у побережья Западного Крыма от м. Тарханкут до г. Евпатория и частично у побережья Южного Крыма. Он был спровоцирован устойчивым северо-западным ветром 5–8 м/с (до 10–12 м/с), который дул в период с вечера 7.07 по 9.07.2020 практически параллельно побережью. В итоге с 8 по 11 июля у Тендровской косы и у западного побережья Крыма сформировались три хорошо различимые зо-

ны апвеллинга, видимые в поле ТПМ (рис. 2). 12 июля вследствие изменения направления ветра четкие проявления апвеллинга стали исчезать (рис. 2).

На снимках у Тендровской косы можно наблюдать довольно сложную форму апвеллинга с рядом филаментов, которые переносят холодные воды на значительное расстояние от берега. Однако этот апвеллинг не достиг максимального развития с аномально низкими значениями ТПМ и достаточно быстро ослаб.

ОЧТ, обычно направленное у южного побережья Крыма с востока на запад, по-видимому, ослабло настолько, что не образовало характерной серии антициклонических вихрей, которые в обычном состоянии приводят к выносу “линз” холодной воды на запад от побережья Крыма. В нашем случае под воздействием факторов среды поднятая на поверхность холодная вода выносилась на юго-восток в открытое море, в направлении, противоположном течению, возможно, под действием циклонической завихренности. Причем, как видно на рис. 3, достаточно обширная область, сформировалась к югу от п-ова Крым; она отобразилась в данных всех датчиков ДЗЗ. Следы этого апвеллинга на снимках из космоса прослеживались вплоть до 11.07.2018.

Съемка ИК-радиометра TIRS зарегистрировала промежуточную фазу развития апвеллинга. По данным радиометра, понижение ТПМ у Тендровской косы составило 2.8°C , в прибрежной зоне м. Тарханкут – Евпатория – 4.5°C и около 4.1°C к югу от южного берега Крыма при ТПМ в окружающем море $20\text{--}21^{\circ}\text{C}$. Апвеллинг у Тендровской косы сопровождался повышением концентрации $\text{chl}a$ у берега до $4\text{--}8\text{ мг/м}^3$, у побережья Западного и Южного Крыма до $1.4\text{--}1.5\text{ мг/м}^3$ (при максимальных значениях в $3\text{--}4\text{ мг/м}^3$) на фоне концентрации $\text{chl}a$ в открытом море в $0.5\text{--}0.7\text{ мг/м}^3$.

Интересно сравнить данные различных систем ДЗЗ, полученные над обширной “линзой” холодной воды апвеллинга в открытом море (рис. 3). Эта апвеллинговая область хорошо видна, как в поле ТПМ (рис. 3, а), так и в поле $\text{chl}a$ (рис. 3, в). На РЛИ она отобразилась темным тоном с многочисленными линейными сликами в центре и на периферии (рис. 3, б). Появление обширной темной РЛ-сигнатуры на этом РЛИ можно было бы объяснить пространственной неоднородностью восточного ветра, обтекающего юго-западную гористую оконечность п-ов Крым. Однако пространственное совпадение структур на рис. 3, а, 3, в указывает на их взаимосвязь и в итоге на дополнительную трансформацию поля ветра (его ослабление) над обширной областью холодной воды. В целом, похожая сигнатура отобразилась и на оптическом снимке в отраженном свете (рис. 3, в), полученном примерно 7 ч позже. Эта серия сним-

ков еще раз подтверждает тот факт, что апвеллинг, вызывая изменения характеристик поверхности и верхнего слоя моря, проявляется как в поле температуры поверхности моря, так и в полях шероховатости и концентрации $\text{chl}a$, причем границы этих полей достаточно хорошо совпадают.

Заметим также, что почти одновременно образовался апвеллинг у побережья Турции, который также отобразился в данных ДЗЗ. Кроме того, благодаря развитию похожих ГМУ в период 13–14 июля апвеллинги у Тендровской косы и побережья Западного Крыма в период 13–14 июля возобновились.

Апвеллинги в прибрежной зоне Турции. Апвеллинг у побережья Турции (район побережья между гг. Зонгулдак (Zonguldak) и Инеболу (İnebolu)) при определенных ГМУ возникает у побережья между городами Зонгулдак и Инеболу достаточно часто и считается квазистационарным (Станичная, Станичный, 2021), т.е. может ослабевать и усиливаться вновь. Восточный/северо-восточный ветер для побережья Турции, особенно у этого участка побережья, является апвеллинговым, здесь и развивается соответствующее явление. Для развития апвеллинга у турецкого побережья необходим достаточно устойчивый ветер со скоростью более $5\text{--}6\text{ м/с}$.

Такая ситуация сложилась в июле и августе 2020 г. Первое из событий произошло в конце первой декады июля; оно было обусловлено усилением воздушного потока на периферии антициклона над центральной Европой. Развитие апвеллинга в данном районе отобразилось на серии карт ТПМ (рис. 4). Благоприятная ситуация сложилась еще вечером 8 июля, именно тогда апвеллинг проявился в виде узкой прибрежной полосы холодной воды. Этот апвеллинг достиг максимальной силы 10 и 11 июля, а затем 12 июля циклон ослабел, и апвеллинг стал релаксировать (рис. 4). В стадии релаксации тело апвеллинга разбилось на ряд струй (обычно $2\text{--}3$), направленных в открытое море, которые затем частично перекрылись теплой водой. Проявления этого апвеллинга наблюдались в поле ТПМ вплоть до 20 чисел июля.

Съемка TIRS произошла тогда, когда апвеллинг начал релаксировать; по данным радиометра перепад температур ΔT составил около 8°C , минимальное значение в ядре было 14.8°C , значение ТПМ в окружающей воде было 22.4°C (рис. 7). По данным со сканера OLCI концентрация $\text{chl}a$ в ядре апвеллинга местами повышалась до 6 мг/м^3 при средней концентрации $\text{chl}a$ мористее апвеллинга в $0.5\text{--}0.8\text{ мг/м}^3$.

Повторно, примерно в этом же месте апвеллинг случился в первой декаде августа 2020 г.; его развитие спровоцировал мощный, достаточно

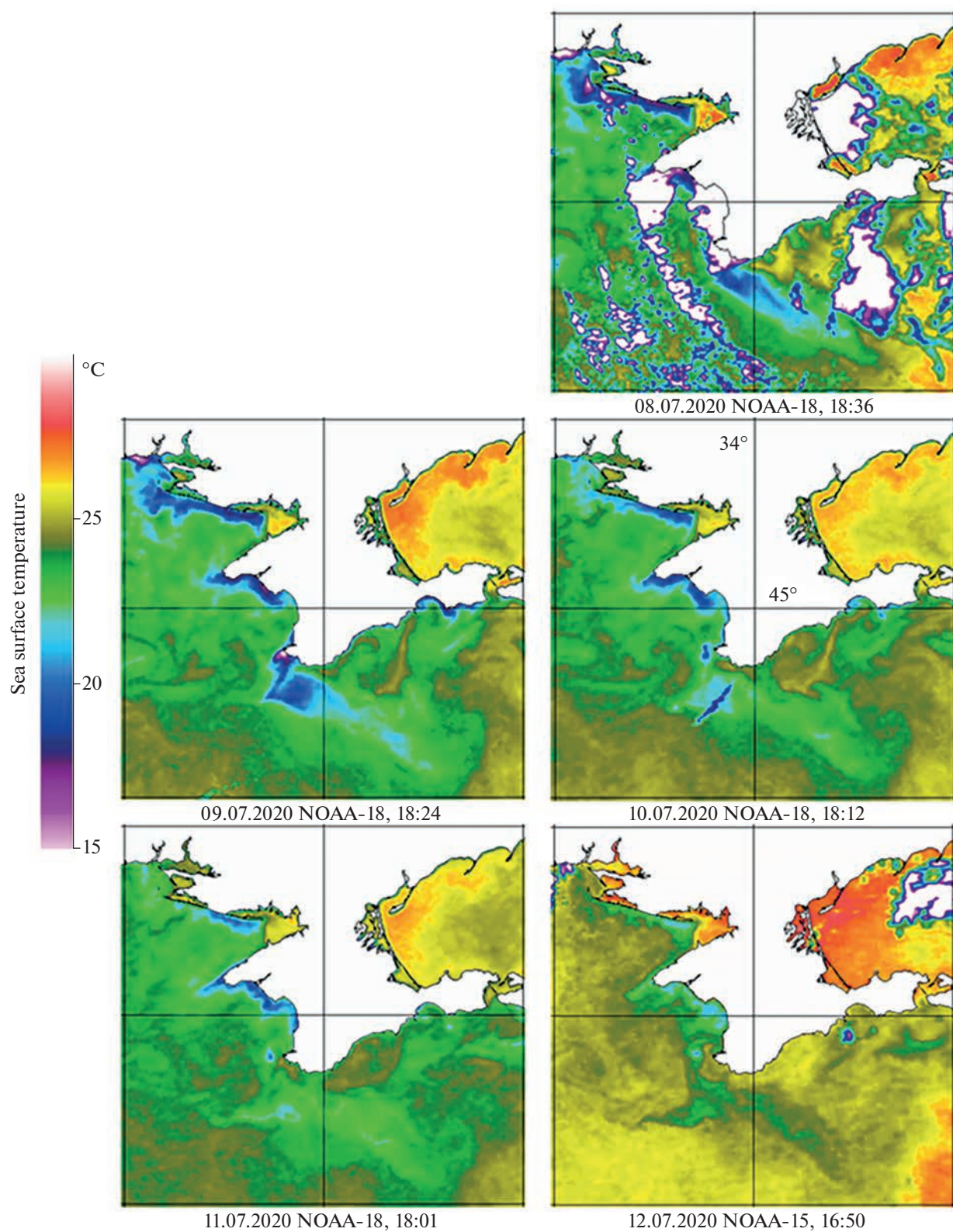


Рис. 2. Развитие апвеллинга в прибрежных зонах Тендровской косы и Западного Крыма с 8 по 12 июля 2020 г. (по данным ИК радиометров AVHRR).

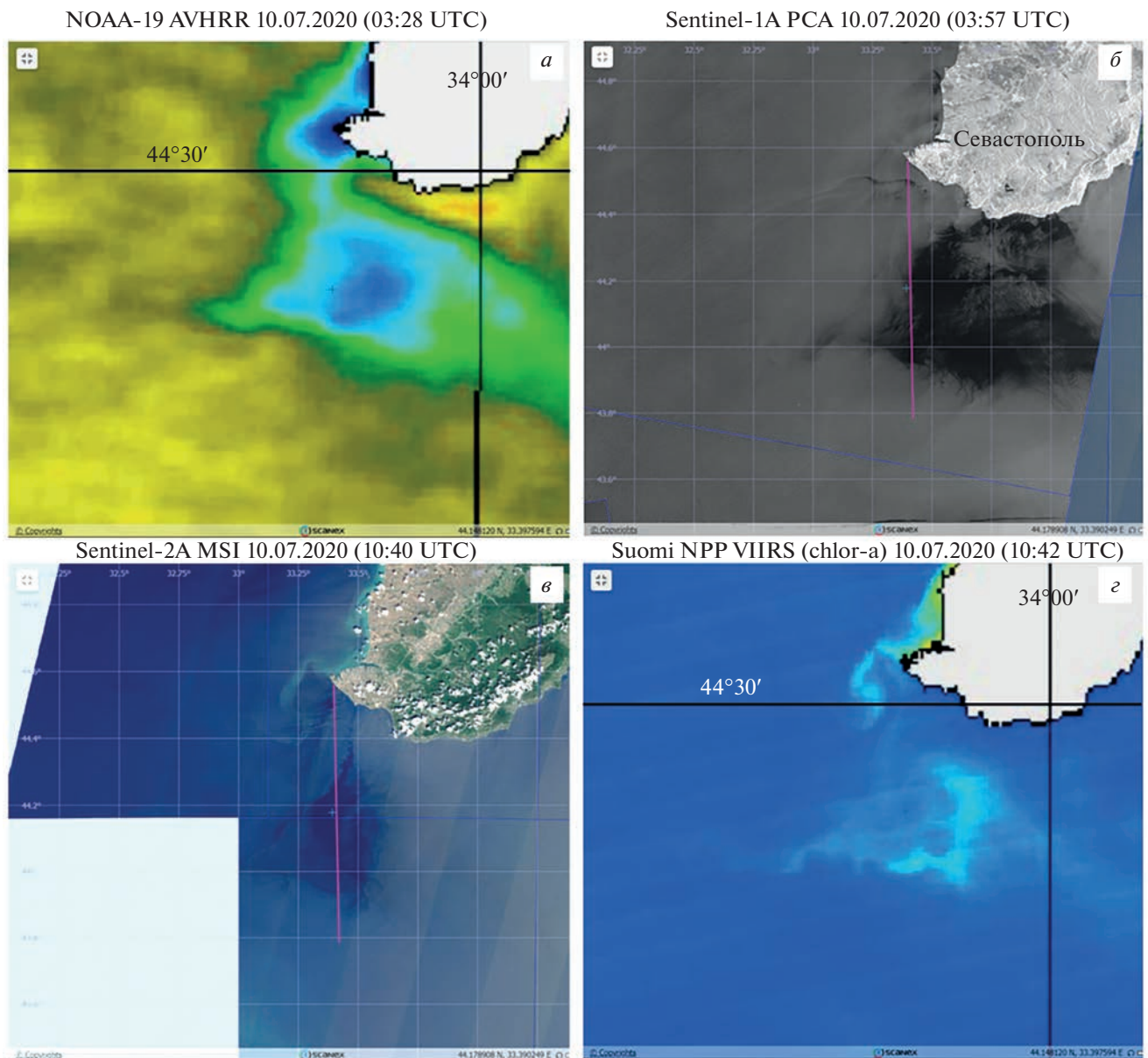


Рис. 3. Квазисинхронное мультисателлитное спутниковое наблюдение вод апвеллинга, вовлекаемых в открытое море, к югу от побережья Крыма. Апвеллинг проявляется в полях ТПМ (а), шероховатости морской поверхности (б), отраженного света (в) и хлорофилла (г) (сиреневой линией показан разрез на рис. 7).

устойчивый северо-восточный перенос воздуха, развившийся над Черным морем. Еще вечером 2 августа вследствие движения воздушных масс на периферии антициклона, находившегося в западной части моря, вдоль прибрежной зоны Турции стал дуть северо-восточный ветер со скоростью 4–6 м/с. Таким образом, появились условия для повторного возникновения здесь апвеллинга, который хорошо виден в полях ТПМ, начиная с 4.08.2020 (рис. 5). При сохранении подобных ГМУ апвеллинг продолжал развиваться у побережья и отобразился в поле ТПМ (рис. 5). Через не-

которое время апвеллинг в итоге разделился на несколько частей и постепенно утратил силу.

Съемка ИК-радиометра TIRS произошла во время развития апвеллинга, по его данным ΔT составляла также, как и в предыдущем случае, около 8°C ; минимальное значение в ядре было 14.6°C , в окружающей воде около 22.5°C (рис. 7).

Зона апвеллинга вблизи турецкого побережья характеризовались незначительным повышением концентрации chl-a, составляющей $1.7\text{--}2.2\text{ мг/м}^3$ (при максимуме в $3\text{--}6\text{ мг/м}^3$) при фоновой концентрации в $0.5\text{--}0.8\text{ мг/м}^3$.

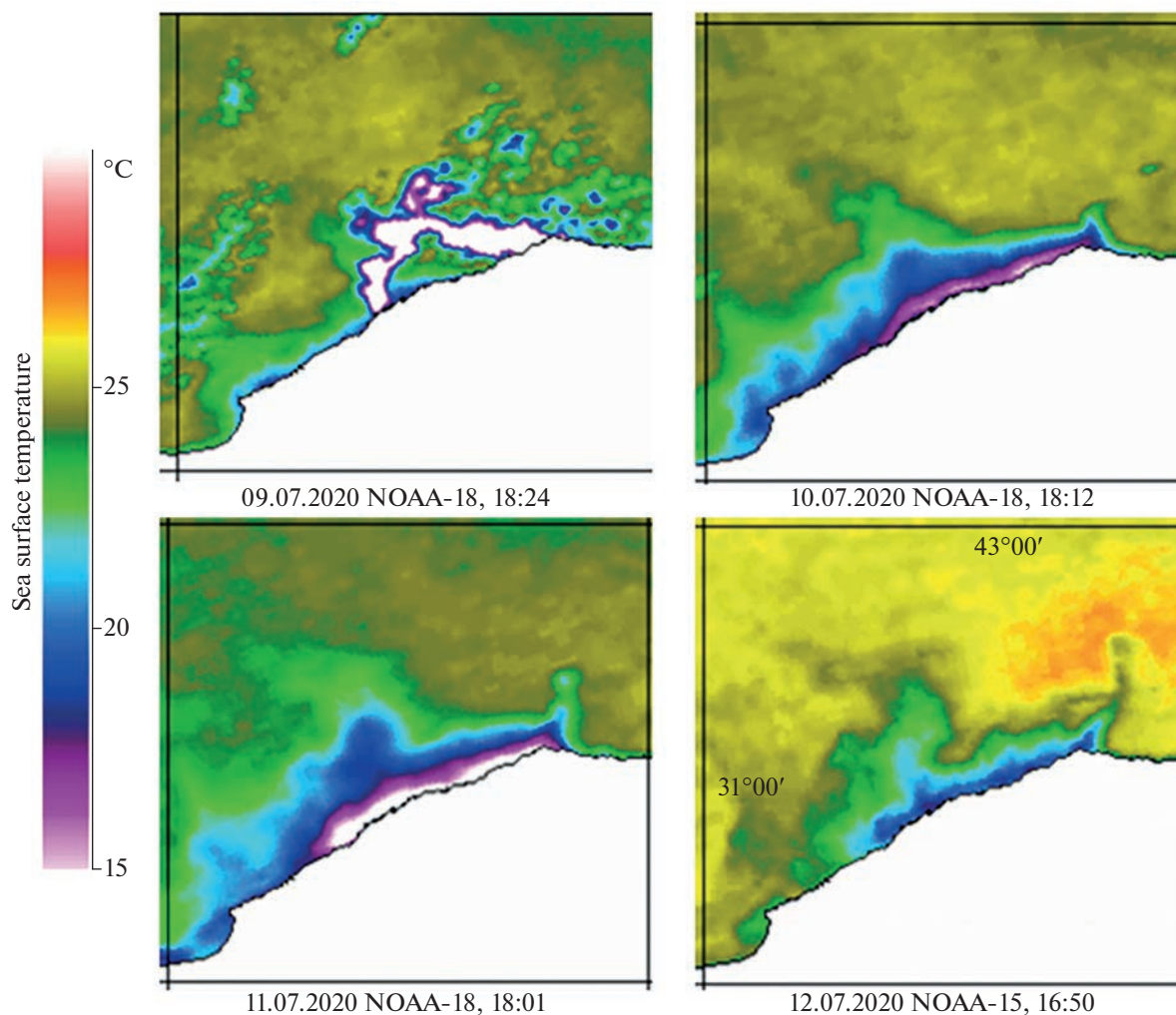


Рис. 4. Апвеллинг у побережья Турции с 9 июля по 12 июля 2020 г. (по данным ИК-радиометров AVHRR).

В табл. 1 приведена вся информация об рассматриваемых апвеллингах, которая была получена путем анализа данных дистанционного зондирования.

ОБСУЖДЕНИЕ. ОСОБЕННОСТИ ОТОБРАЖЕНИЯ АПВЕЛЛИНГОВ В РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРА

В инфракрасном диапазоне излучение является функцией температуры поверхности моря, на чем основана спутниковая ИК-радиометрия, позволяющая определить количественные характеристики теплового излучения морской поверхности. Данные ИК-диапазона остаются одним из главных дистанционных индикаторов появления прибрежного апвеллинга. В поле поверхностной температуры апвеллинги проявляются однозначно благодаря большим контрастам ТПМ, в Черном море они могут достигать более 10°C . Раз-

ность между ТПМ в апвеллинге и окружающей воде используется для оценки интенсивности явления. По данным ИК-радиометра TIRS были рассчитаны ΔT для всех случаев наблюдения (рис. 7). Наибольшие ΔT наблюдались в турецких апвеллингах (до 8°C) и $2.8\text{--}4.7^{\circ}\text{C}$ в крымских апвеллингах.

На рис. 6, а–б, д (слева) приведены примеры карт ТПМ, полученные по данным TIRS. Апвеллинги на них отображаются вполне детально: видны как общее поле ТПМ, так и его отдельные структурные элементы, а именно струи. В открытом море на их концах образуются микровихри: у Тендровской косы и побережья Турции – циклонические, а у восточного побережья – антициклонические.

В микроволновом диапазоне (радиолокация) зоны апвеллинга часто выглядят как обширные темные области пониженного отраженного сигнала (или низких значений удельной эффектив-

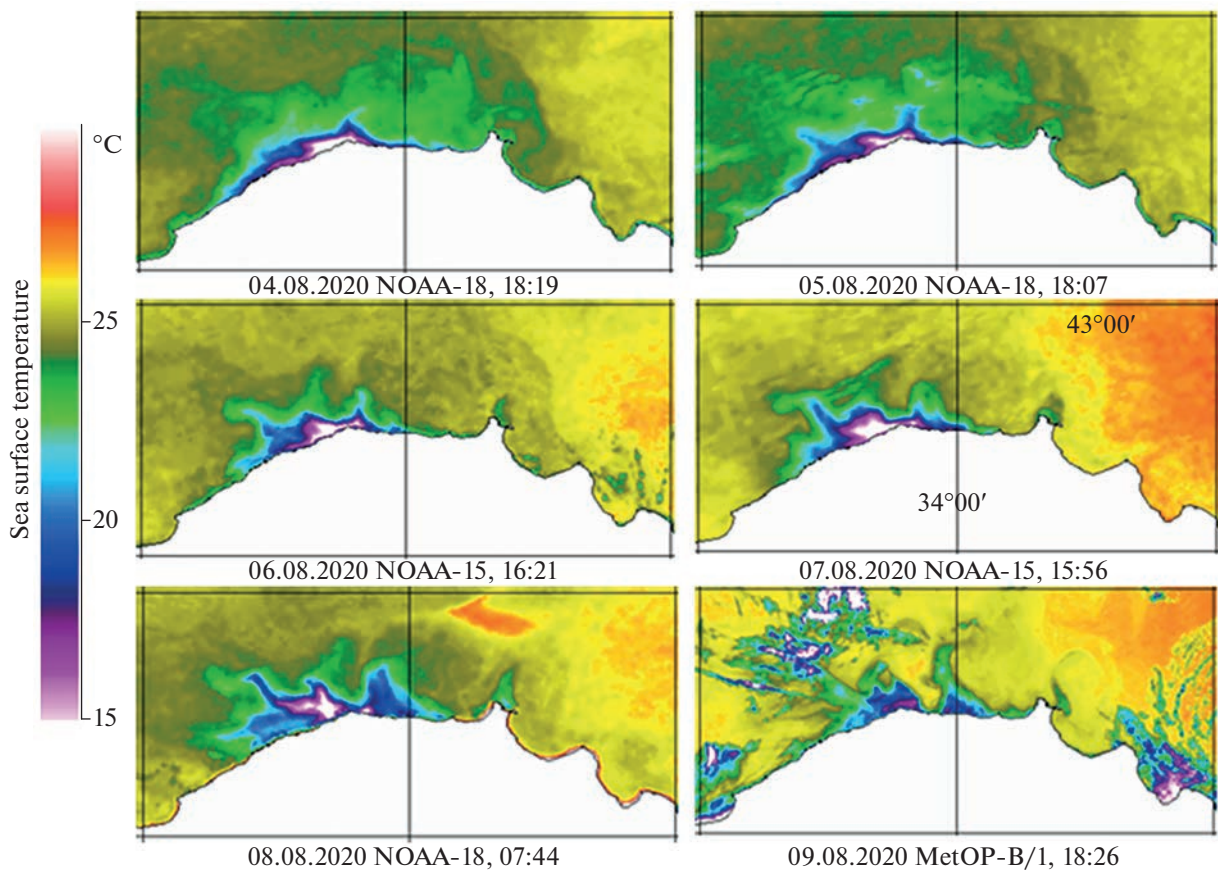


Рис. 5. Развитие апвеллинга в прибрежной зоне моря у побережья Турции с 4 по 9 августа 2020 г. (по ИК-радиометров AVHRR).

ной площади рассеяния –УЭПР) – это области выглаживания ветровой ряби (Hsu et al., 1995; Clemente-Colón, Yan, 1999, 2000; Kozlov et al., 2011; Гурова, Иванов, 2011). В большинстве случаев однозначный механизм, отвечающий за формирование поверхностных проявлений, для каждого конкретного РЛИ установить сложно. Однако, в общем случае при интерпретации данных радиолокации необходимо учитывать комбинацию трех факторов, обуславливающих: 1) увеличение вязкости и поверхностного натяжения на границе раздела вода–воздух в области холодной воды, 2) локальную трансформацию атмосферного погранслоя (АПС) над обширными областями апвеллинга, и 3) биологическую активность в зонах апвеллинга, приводящую к образованию биогенных пленок, сформированных поверхностно-активными веществами, образующимися в результате жизнедеятельности фитопланктона и подавляющими гравитационно-капиллярные волны (ГКВ).

На рис. 6 приведены поля ТПМ и фрагменты РЛИ, полученные квазисинхронно. Их совместный анализ показывает, что апвеллинг, однозначно проявляющийся в поле ТПМ, так или иначе, проявляется и в радиолокационных дан-

ных. В общем случае на рисунке выделяются три вида РЛ-сигнатур, а именно: 1) обширные темные области при слабом ветре, дующем со скоростью 2–3–4 м/с; 2) отдельные темные пятна в местах с максимальными градиентами ТПМ при ветре от умеренного до свежего скорости 4–6 м/с, и 3) слабовыраженные сигнатуры (серый тон) при сильном ветре (скорость 6–8 м/с и более). Однако биологический фактор в виде биогенных пленок оказывает воздействие на стадии релаксации апвеллинга, после того, как успевает развиваться и эволюционировать фитопланктон, и только при ветре не более 4 м/с.

В ряде случаев на РЛИ в виде темных пятен видны только струи апвеллингов или их некоторые части (например, у Тендровской косы или Анапы–Геленджика – рис. 5, а–5, в). У побережья Турции апвеллинги из-за сильного ветра на РЛИ проявляются плохо, однако, тем не менее, их контуры все еще различимы; в этих случаях механизм отображения явно не является биологическим (рис. 6, д, 6, е).

Биогенные пленки (в виде узких линейных сликов) видны только на периферии апвеллин-

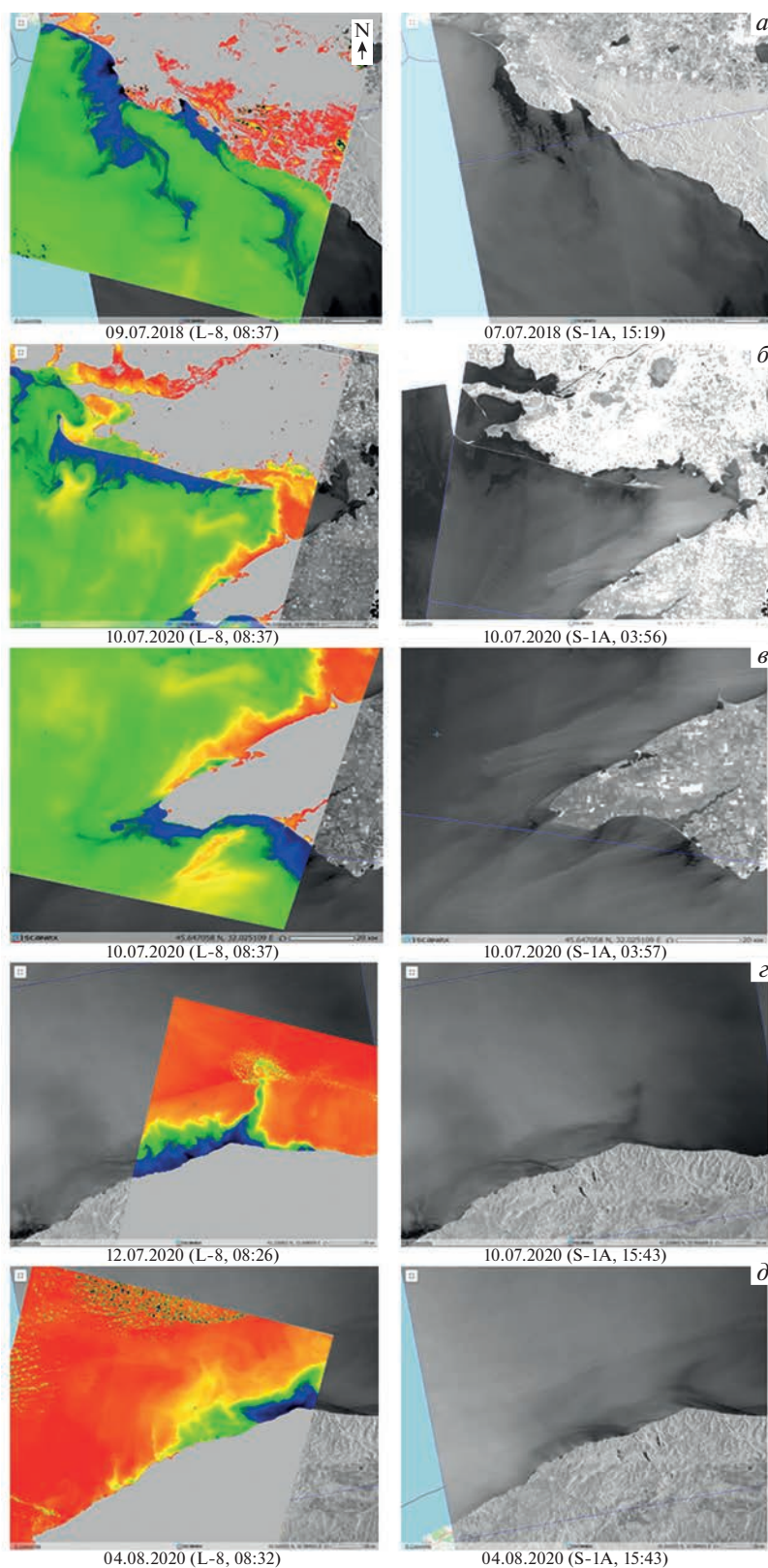


Рис. 6. Поля температуры, полученные по данным радиометров TIRS на ИСЗ Landsat-8 (L-8) (слева), и фрагменты квазисинхронных РЛИ, полученные PCA Sentinel-1A (S-1A) (справа); а – у побережья Анапа-Геленджик, б – у Тендровской косы, в – у побережья Крыма м. Тарханкут-Евпатория, г, д – у побережья Турции в середине июля и начале августа 2020.

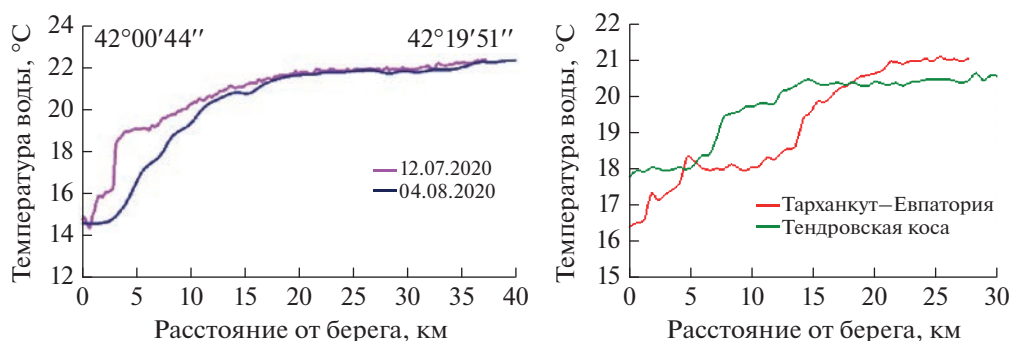


Рис. 7. Температурные разрезы (ТПО по данным радиометра TIRS) через апвеллинги у турецкого побережья перпендикулярно ему (слева) и у Тендровской косы и западного побережья Крыма 10.07.2020 (справа).

гов, которые находятся в стадии ослабления или исчезновения (рис. 6, а и 6, з). На РЛИ, полученных на ранних стадиях или при более сильном ветре, биогенные пленки не наблюдаются (рис. 6, а и 6, з). Это позволяет заключить, что биогенный фактор не так активно участвует в формировании сигнатур апвеллингов на ранних стадиях.

В итоге, как показано, апвеллинги создают хорошо различимые сигнатуры в поле шероховатости морской поверхности, и при всей их неоднозначности их можно использовать для дополнительной характеристики явления. Например, в случае облачной погоды их можно использовать для определения границ апвеллинга.

В оптическом диапазоне апвеллинги и их проявления можно обнаружить как в поле отраженного поверхностью моря солнечного света, так и

в исходящем из водной толщи излучении, например, на длине волны 551 нм, или в поле концентрации $\text{chl}a$ -а в верхнем слое моря. В этом случае в поле отраженного солнечного света при наличии на поверхности моря гравитационно-капиллярные волн, отражение от шероховатой (взволнованной) поверхности моря даст яркую область на снимке, а в случае выглаженной поверхности — темную область. Причем, в данных радиолокации наблюдается тот же самый эффект (рис. 6, 8).

На рис. 9 приведены примеры карт распределения концентрации $\text{chl}a$ -а по данным спектро-радиометров MODIS и OLCI. Оказалось, что в черноморских апвеллингах средние значения $\text{chl}a$ -а не превышают значений 2–6 мг/м^3 (рис. 9; табл. 1), что на фоне средних фоновых значений в 0.5–0.8 мг/м^3 не является существенно значи-

Таблица 1. Основные характеристики черноморских апвеллингов по данным дистанционного зондирования (с использованием данных AVHRR, MODIS, OLCI, MSI и PCA на ИСЗ NOAA, MetOP, Landsat-8, Aqua, Suomi NPP, Sentinel-1, -2, -3)

Дата/место	Продолжительность (по данным ДЗЗ), дни	Сред. поперечный масштаб, км	Сред. горизонт. (вдольбереговой) масштаб, км	Общая площадь, км^2	Макс. ΔT , °C	Сред. (макс.) $\text{chl}a$ -а мг/м^3	Примечание
9.07.2018 (Анапа—Геленджик)	10	16 6.5	69 34	1790 310	4.1	1.2 (1.5)	Стоит из 2-х частей-струй
10.07.2020 Тендровская коса	6	6.3	122	1120	2.7	4.1 (8.0)	Обширные проявления в трех местах: Тендровская коса, шельф Западного и Южного Крыма
м. Тарханкут—Евпатория	>10	8.4	73	~415	4.5	1.4 (3.0)	
ЮЗ Крым		22	46	~4800	~4	1.5 (4.0)	
12.07.2020 (Зонгулдак—Инеболу, Турция)	около 6	13	135	1600	7.9	2.2 (3.0)	
4.08.2020 (Зонгулдак—Инеболу, Турция)	7	7.5	148	1430	8	1.7 (3.0)	

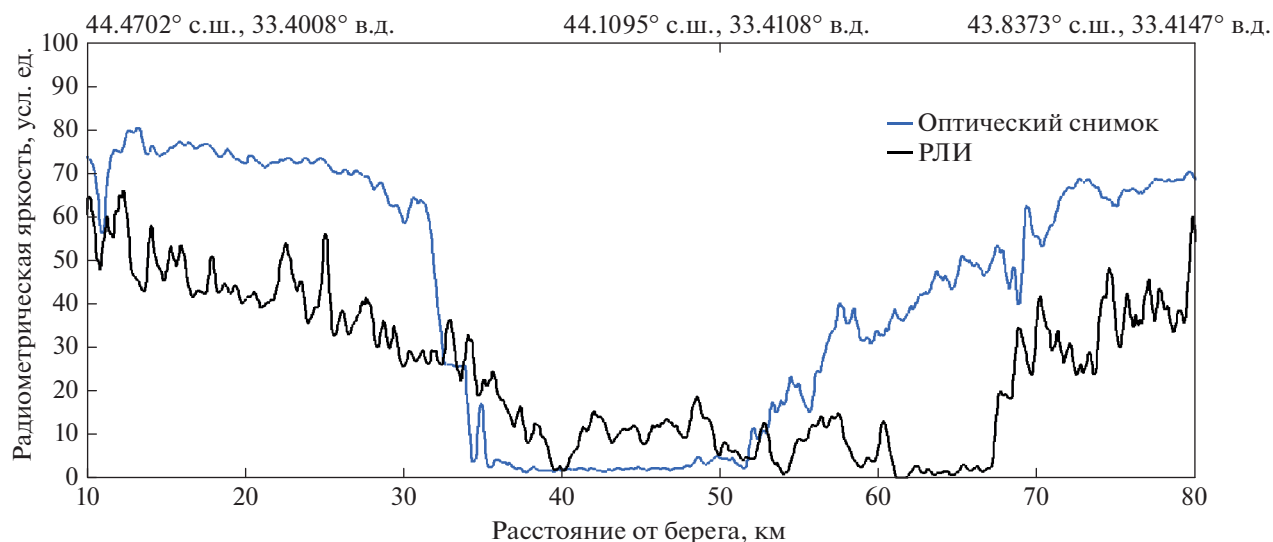


Рис. 8. Радиометрическая яркость на разрезах через области пониженного радиолокационного и оптического сигнала (темные зоны) на радиолокационном изображении Sentinel-1 (03:57 UTC) и оптическом снимке Sentinel-2 (композитный снимок 0.655, 0.560 и 0.490 мкм; 10:40 UTC) от 10.07.2020, показанных на рис. 3

мым. Океанские апвеллинги характеризуются более высокими значениями chl_{og} -а — так, в 2020 г. в Канарском апвеллинге значения chl_{og} -а достигали 10–20 мг/м³, в Бенгуэльском — 15–30 мг/м³, Калифорнийском — 10–15 мг/м³, Перуанском — 20–30, иногда более 60 мг/м³. С другой стороны, распределение хлорофилла в зонах черноморского апвеллинга часто неоднородно, что может обуславливаться локальной динамикой в теле апвеллинга.

Таким образом, сравнение инфракрасных, оптических и радиолокационных данных показало, что апвеллинги, однозначно отображаясь в поле температуры, создают также свои специфические сигнатуры в поле яркости восходящего излучения и, в частности, в поле chl_{og} -а. Последние позволяют получить дополнительную информацию и таким образом более полно характеризовать апвеллинги с океанологической точки зрения.

Наблюдению, мониторингу и исследованию апвеллингов, периодически возникающих в Черном море, посвящено много работ (Гинзбург и др. (1997), Джиганшин и др. (2010), Горячкина (2018) и др.). Однако, проблема отображения апвеллингов в данных микроволнового дистанционного зондирования окончательно не решена. Давно замечено, что данные натурных измерений и лабораторных исследований свидетельствуют, что с изменением температуры приповерхностного слоя моря шероховатость границы раздела вода-воздух меняется (Запезалов, 2001). Этот эффект неоднократно обсуждался в работах (Ролль, 1968; Воронин и др., 1985; Бортковский, 1997); он обусловлен действием нескольких факторов, опреде-

ляющих передачу энергии от воздушного потока к волнам, а также физическими свойствами морской воды. С изменением стратификации атмосферного пограничного слоя меняется форма профиля скорости ветра, и соответственно изменяется поток импульса от ветра к волнам. (Например, установлено, что при переходе от неустойчивой стратификации, к слабонеустойчивой, а затем — к устойчивой, уменьшается интенсивность турбулентных пульсаций, и в итоге уменьшается скорость ветра у поверхности.) (Friehe et al., 1991) В итоге, в условиях неустойчивой стратификации АПС происходит рост шероховатости морской поверхности, и, напротив, увеличение устойчивости погранслоя ведет к уменьшению её шероховатости.

Среди физических параметров, зависящих от ТПМ и влияющих на развитие ветровых волн, является кинематическая вязкость и поверхностное натяжение (Ролль, 1968). Кинематическая вязкость существенно зависит от температуры; с понижением температуры она растет и значительно изменяется при изменении температуры на десяток градусов (см. Попов и др. (1979)). Поверхностное натяжение также увеличивается с понижением температуры, однако, считается, что это не оказывает заметного влияния на генерацию ГКВ, и этим можно пренебречь. Тем не менее, увеличение кинематической вязкости и поверхностного натяжения в условиях холодной воды на поверхности приводит, во-первых, к увеличению ветрового порога, при котором начинают генерироваться первоначальные ветровые волны, а, во-вторых, к более быстрому затуханию генерированных ветром ГКВ.

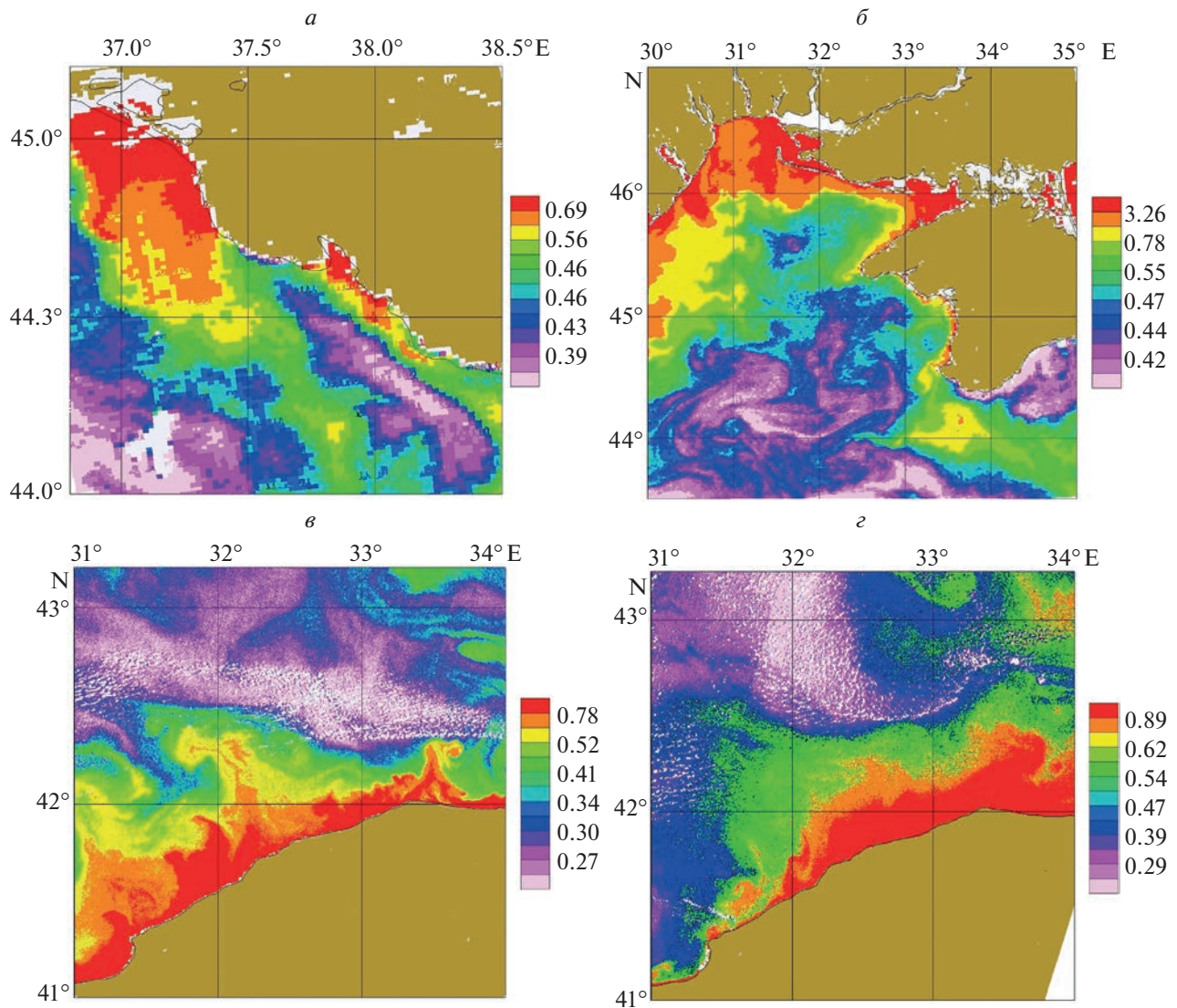


Рис. 9. Распределения chl-a, восстановленные по данным спектрорадиометра MODIS (вверху) и OLCI (внизу) для трех областей развития апвеллинга в его максимальной фазе; *а* – у северо-восточного побережья, *б* – у Тендровской косы и Западного Крыма, *в*, *з* – у турецкого побережья

В итоге, понижение температуры верхнего слоя моря и, соответственно, ТПМ при небольших скоростях устойчивого ветра (2–4 м/с) приводит к уменьшению шероховатости морской поверхности, что неоднократно наблюдалось в данных радиолокационного зондирования (Hsu et al., 1995; Clemente-Colón, Yan, 1999, 2000; Kozlov et al., 2011; Гурова, Иванов, 2011). Также давно замечено, что зоны подъема к поверхности холодных глубинных вод, проявляются на РЛИ как области пониженного рассеяния РЛ-сигнала (Fu, Holt, 1982); типичные примеры – апвеллинги у северо-восточной оконечности о. Тайвань (Hsu et al., 1995) и в Северной Атлантике (Иванов, Литовченко, 1999). Подобный вид на РЛИ нередко имеют холодные части фронтальных зон, кото-

рые часто наблюдаются в виде областей пониженной шероховатости. Подобный эффект также наблюдается в прибрежных морях над холодными выносами крупных рек (Иванов и др., 2018). Таким образом, данные радиолокационного зондирования указывают на то, что в зоне с сильно пониженной ТПМ спектральная плотность ветровых ГКВ волн существенно изменяется в сторону уменьшения, благодаря чему на РЛИ появляются темные области и пятна в зоне апвеллинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Анализ проявлений прибрежных апвеллингов в Черном море в данных дистанционного зондирования позволил определить их основные океа-

нографические характеристики и особенности отображения в данных ДЗЗ. Черноморские апвеллинги возникают при устойчивых вдольбереговых (апвеллинговых) ветрах: для западного побережья Крыма и северо-восточного побережья моря — северо-западных, а для побережья Турции — северо-восточных. Развитие апвеллинга происходит в две фазы: 1) активной, когда апвеллинговый ветер сильный, и холодная вода в итоге выходит поверхность, и 2) фазе релаксации, когда ветер стихает, но на поверхности моря продолжают сохраняться значительные области холодной воды. Во время второй фазы формируются филаменты — струи, направленные в открытое море, часто трансформирующиеся в вихревые и грибовидные структуры и даже в отдельные холодноводные линзы открытого моря.

Апвеллинги отображаются в оптическом, инфракрасном и микроволновом диапазонах, создавая свои характерные сигнатуры в данных дистанционного зондирования. Ежедневные снимки из космоса в инфракрасном диапазоне дают практически полную информацию о масштабах, эволюции и динамике апвеллингов. Кроме того, апвеллинги проявляются в поле хлорофилла благодаря развитию планктонных организмов в благоприятной среде, а также отображаются в поле шероховатости морской поверхности на РЛИ в виде обширных темных (сликовых) областей.

Количественные характеристики апвеллингов, такие как перепады ТМП и значения концентрации хлорофилла, были получены с использованием сенсоров среднего разрешения (таких как ИК-радиометры TIRS на спутниках Landsat и спектрометрические OLCI на Sentinel-3). Показано, что в черноморских апвеллингах ТМП достигают океанских аналогов с $\Delta T \geq 8^\circ\text{C}$, однако значения концентрации $\text{chl}a$ в них не превышают 2–4 мг/м³.

Совместный анализ данных радиолокации с данными о ТПМ указывает на то, что самым вероятным механизмом отображения апвеллингов на РЛИ (обширные темные пятна) является влияние низкой температуры воды на границу раздела вода–воздух и последующая трансформация атмосферного пограничного слоя над областями холодной воды, что локально приводит к уменьшению скорости ветра. Сигнатуры апвеллинга на РЛИ существенно зависят от скорости приповерхностного ветра: при слабых ветрах — это обширные темные области выглаживания, при умеренных — отдельные темные пятна в местах самых низких значений ТПМ, а при больших скоростях ветра — сигнатуры, лишь визуализирующие границы апвеллинга. Не следует, однако, исключать пространственную неоднородность поля ветра, которая может приводить к появлению подобных

сигнатур, особенно у побережий с гористым рельефом.

Биологический фактор — появление биогенных пленок как результат развития и эволюции фитопланктона в зонах апвеллинга и подавление ими мелкомасштабных ветровых волн (пленочное выглаживание ряби) — по-видимому, начинает влиять только на стадии релаксации апвеллинга, после того как успевает развиться и эволюционировать фитопланктон.

Таким образом, мультисенсорный подход с использованием всех доступных спутниковых данных ДЗЗ позволяет практически полностью охарактеризовать апвеллинги как океанологическое явление и показывает, что спутниковый мониторинг — один из наиболее эффективных методов их исследования. Он также является мощным средством для исследования других процессов и явлений подобного масштаба, происходящих в прибрежной зоне морей, в том числе при отсутствии контактных измерений. В настоящее время этот подход в океанологии становится наиболее продуктивным.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования России (тема № FMWE-2021-0001).

БЛАГОДАРНОСТИ

Права копирайта на оригинальные данные спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B принадлежат Европейскому космическому агентству (ESA). Авторы благодарят МГИ РАН и ГК «СКАНЭКС» за возможность использования ресурсов Морского портала МГИ и геопорталов, созданных на базе веб-ГИС приложения «Геомиксер».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бортковский Р.С. О влиянии температуры воды на состояние поверхности океана и на процессы переноса // Изв. АН СССР. ФАО. 1997. Т. 33. № 2. С. 266–273.
- Бычкова И.А., Викторов С.В. Выявление и систематизация апвеллингов Балтийского моря на основе спутниковых данных // Океанология. 1987. Т. 27. № 2. С. 218–223.
- Бычкова И.А., Викторов С.В., Виноградов В.В. Использование спутниковых данных для изучения апвеллинга и фронтогенеза в Балтийском море // Исслед. Земли из космоса. 1985. № 2. С. 12–19.
- Бычкова И.А., Викторов С.В., Шумахер Д.А. О связи крупномасштабной атмосферной циркуляции и процессов возникновения прибрежного апвеллинга в Балтийском море // Метеорология и гидрология. 1988. № 10. С. 91–98.
- Воронин А.М., Лазарев А.А., Показеев К.В., Шелковников Н.К. Влияние разности температур воды и воздуха на гене-

- рацию ветровых волн // Вестн. МГУ. Сер. 3: Физика, Астрономия. 1985. Т. 26. № 6. С. 75–79.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Прибрежный апвеллинг в северо-западной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 6. С. 66–72.
- Голенко М.Н. Исследование пространственной термохалинной и динамической структуры прибрежного апвеллинга на примере юго-восточной части Балтийского моря. Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. физ.-мат. наук. Калининград, 2010.
- Горячкин Ю.Н. Апвеллинг у берегов Западного Крыма // Морской гидрофиз. журн. 2018. Т. 34. № 5. С. 399–411.
- Гурова Е.С., Иванов А.Ю. Особенности проявления гидродинамических структур в юго-восточной части Балтийского моря по данным спектрорадиометров MODIS и космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 4. С. 41–54.
- Джиганшин Г.Ф., Полонский А.Б., Музылева М.А. Апвеллинг в северо-западной части Черного моря в конце летнего сезона и его причины // Морской гидрофиз. журн. 2010. № 4. С. 45–57.
- Запечалов А.С. Наблюдения шероховатости морской поверхности в период апвеллинга // Морской гидрофиз. журн. 2001. № 2. С. 36–43.
- Зацепин А.Г., Сильвестрова К.П., Куклев С.Б., Пиотух В.Б., Подымов О.И. Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга и даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 203–214.
- Иванов А.Ю., Литовченко К.Ц. Океанологические результаты полета КА “Алмаз-1” // Зарубежная радиоэлектроника. 1999. № 2. С. 18–28.
- Иванов А.Ю., Хлебников Д.В., Коновалов Б.В., Евтушенко Н.В., Терлеева Н.В. Особенности отображения выносов рек в Черном море в данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 191–202.
- Павлушин А.А., Шапиро Н.Б., Михайлова Э.Н. Захваченные волны и меандрирование Основного Черноморского течения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. Вып. 4. С. 14–21. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-4-14-21>
- Полонский А.Б., Музылева М.А. Современная пространственно-временная изменчивость апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма // Изв. РАН. Сер. географ. 2016. № 4. С. 96–108.
- Попов Н.И., Федоров К.Н., Орлов В.М. Морская вода. Справочное руководство. М.: Наука, 1979. 328 с.
- Роль Г.У. Физика атмосферных процессов над морем. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 398 с.
- Сильвестрова К.П., Зацепин А.Г., Мысленков С.А. Прибрежные апвеллинги в Геленджикском районе Черного моря: связь с ветровым воздействием и течением // Океанология. 2017. Т. 57. № 4. С. 521–530.
- Станичная Р.Р., Станичный С.В. Апвеллинги Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 195–207.
- Clemente-Colón P., Yan X.-H. Observations of east coast upwelling conditions in synthetic aperture radar imagery // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1999. 37(5). P. 2239–2248. <https://doi.org/10.1109/36.789620>
- Clemente-Colón P., Yan X.-H. Low backscatter features in SAR imagery // JHU APL Tech. Digest. 2000. 21(1). P. 116–121.
- Fischer W.E., Green A.B. (Eds.). Upwelling: Mechanisms, Ecological Effects and Treats to Biodiversity. Nova Science Publ. Inc., N.Y. 2013.
- Friehe C.A., Shaw W.J., Rogers D.P. et al. Air-sea fluxes and surface layer turbulence around a sea surface temperature front // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 8593–8609.
- Fu L.L., Holt B. SEASAT Views Ocean and Sea Ice with Synthetic Aperture Radar. NASA/JPL Publication, 1982. 81–120.
- Gurova E., Lehmann A., Ivanov A. Upwelling dynamics in the Baltic Sea studied by a combined SAR/infrared satellite data and circulation model analysis // Oceanologia. 2013. 55(3). P. 687–707. <https://doi.org/10.5697/oc.55-3.687>
- Hsu M.K., Mitnik L.M., Liu C.T. Upwelling area northeast of Taiwan on ERS-1 SAR images // Acta Oceanogr. Taiwan. 1995. 34(3). P. 27–38.
- Kowalewski M., Ostrowski M. Coastal up- and downwelling in the southern Baltic // Oceanologia. 2005. 47(4). P. 454–475.
- Kozlov I.E., Kudryavtsev V.N., Johannessen J.A. et al. ASAR imaging for coastal upwelling in the Baltic Sea // Adv. Space Res. 2011. 50(8). P. 1125–1137. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.08>
- Landsat 8 Data Users Handbook. Ver.5. 2019 (<https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>).
- Lehmann A., Myrberg K. Upwelling in the Baltic Sea – A review // J. Marine Syst. (Suppl.). 2008. 74. P. S3–S12. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.02.010>
- Lehmann A., Myrberg K., Hoflich K. A statistical approach to coastal upwelling in the Baltic Sea based on the analysis of satellite data for 1990–2009 // Oceanologia. 2012. 54(3). P. 369–393.
- Li X.M., Li X.F., He M.X. Coastal upwelling observed by multi-satellite sensors // Science in China. Ser. D. 2009. 52(7). P. 1030–1038. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0088-x>
- Lin I.-I., Wen L.-S., Liu K.-K., Tsai W.-T., Liu A.-K. Evidence and quantification of the correlation between radar backscatter and ocean colour supported by simultaneously acquired in situ sea truth // Geophys. Res. Lett. 2002. 29(10). <https://doi.org/10.1029/2001GL014039>
- Myrberg K., Andrejev O., Lehmann A. Dynamics of successive upwelling events in the Baltic Sea – a numerical case study // Oceanologia. 2010. 52(1). P. 77–99.
- Vanhellemont Q. Automated water surface temperature retrieval from Landsat 8/TIRS // Remote Sens. Environ. 2020. V. 237. 111518.
- Zheng Q., Yan X.-H., Huang N.E., Klemas V., Pan J. The effects of water temperature on radar scattering from the water surface: an X-band laboratory study // Global Atmos. Ocean Sys. 1997. 5. P. 273–294.

Manifestations of Upwellings in the Black Sea in Multisensor Remote Sensing Data

D. V. Khlebnikov¹, A. Yu. Ivanov^{1, 2}, M. A. Evdoshenko¹, and S. K. Klimenko¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

The paper presents the results of a study of upwelling in the Black Sea in three marine areas: in the northeastern part of the sea, near the Tendrovskaya Spit and the Western Crimea, and off the coast of Turkey. They are based on the use of multi-sensor remote sensing data, namely ocean color scanners (MODIS, VIIRS, OLCI-a and OLCI-b), infrared radiometers (TIRS and AVHRR), as well as synthetic aperture radar (SAR) images acquired by spaceborne SARs. An integrated approach using practically only remote sensing data makes it possible to quite fully characterize the observed upwellings in the sea. In the active phase, upwelling, in addition to sea surface temperature (SST), is usually displayed both in the phytoplankton chlorophyll-a concentration (chl-a) and in the sea surface roughness on the SAR images. In the analyzed cases, the duration of upwellings varied from 6 to 10 days, the SST differences in the upwelling zone were up to 8°C, and the concentrations of chl-a were 5–6 times higher than the background values of 0.5–0.7 mg/m³. The maximum SST anomalies, which are about 8°C, were observed off the Turkish coast. As a result of the analysis, a dynamic relationship was revealed between the areas of low SST in the upwelling zone (compared to the sea waters surrounding this zone), sea surface roughness and chl-a concentration. It is shown that in the case of using the full set of available remote sensing data, the observation, monitoring and study of upwelling does not present any fundamental difficulties.

Keywords: Black Sea, upwelling, remote sensing, multisensor approach, sea surface temperature, ocean color, SAR images

REFERENCES

- Bortkovskiy R.S.* O vliyaniy temperatury vody na sostoyaniye poverkhnosti okeana i na protsessy perenosa // *Izv. AN SSSR. FAO.* 1997. V. 33. № 2. P. 266–273. (In Russian).
- Bychkova I.A., Viktorov S.V.* Vyyavleniye i sistematizatsiya apvellinov Baltiyskogo morya na osnove sputnikovyykh dannykh // *Okeanologiya.* 1987. V. 27. № 2. P. 218–223. (In Russian).
- Bychkova I.A., Viktorov S.V., Vinogradov V.V.* Ispol'zovaniye sputnikovyykh dannykh dlya izucheniya apvellinga i frontogeneza v Baltiyskom more // *Issled. Zemli iz kosmosa.* 1985. № 2. P. 12–19. (In Russian).
- Bychkova I.A., Viktorov S.V., Shumakher D.A.* O svyazi krupnomasshtabnoy atmosferynoy tsirkulyatsii i protsessov vozniknoveniya pribrezhnogo apvellinga v Baltiyskom more // *Meteorologiya i gidrologiya.* 1988. № 10. P. 91–98. (In Russian).
- Voronin A.M., Lazarev A.A., Pokazeyev K.V., Shelkovnikov N.K.* Vliyaniye raznosti temperatur vody i vozdukha na generatsiyu vetrovykh voln // *Vestn. MGU. Ser. 3: Fizika, Astronomiya.* 1985. V. 26. № 6. P. 75–79. (In Russian).
- Ginzburg A.I., Kostyanov A.G., Solov'yev D.M., Stanichnyy S.V.* Pribrezhnyy apvellin v severo-zapadnoy chasti Chernogo morya // *Issled. Zemli iz kosmosa.* 1997. № 6. V. 66–72. (In Russian).
- Golenko M.N.* Issledovaniye prostranstvennoy termokhalinnoy i dinamicheskoy struktury pribrezhnogo apvellinga na primere yugo-vostochnoy chasti Baltiyskogo morya. Avtoref. dis. na soiskaniye uch. st. kand. fiz.-mat. nauk. Kaliningrad, 2010. (In Russian).
- Goryachkin Y.N.* Apvellin u beregov Zapadnogo Kryma // *Morskoy gidrofiz. zhurn.* 2018. V. 34. № 5. P. 399–411. (In Russian).
- Gurova E.S., Ivanov A.Y.* Osobennosti proyavleniya gidrodinamicheskikh struktur v yugo-vostochnoy chasti Baltiyskogo morya po dannym spektrometrov MODIS i kosmicheskoy radiolokatsii // *Issled. Zemli iz kosmosa.* 2011. № 4. P. 41–54. (In Russian).
- Dzhiganshin G.F., Polonskiy A.B., Muzyleva M.A.* Apvellin v severo-zapadnoy chasti Chernogo morya v kontse letnego sezona i yego prichiny // *Morskoy gidrofiz. zhurn.* 2010. № 4. V. 45–57. (In Russian).
- Zapevalov A.S.* Nablyudeniya sherokhovatosti morskoy poverkhnosti v period apvellinga // *Morskoy gidrofiz. zhurn.* 2001. № 2. P. 36–43.
- Zatsepin A.G., Silvestova K.P., Kuklev S.B., Piotukh V.B., Podymov O.I.* Nablyudeniye tsikla intensivnogo pribrezhnogo apvellinga i daunvellinga na gidrofizicheskoy poligone IO RAN v Chernom more // *Okeanologiya.* 2016. V. 56. № 2. P. 203–214. (In Russian).
- Ivanov A.Y., Litovchenko K.T.S.* Okeanologicheskiye rezul'taty poleta KA "Almaz-1" // *Zarubezhnaya radioelektronika.* 1999. № 2. P. 18–28. (In Russian).
- Ivanov A.Y., Khlebnikov D.V., Kononov B.V., Yevtushenko N.V., Terleyeva N.V.* Osobennosti otobrazheniya vynosov rek v Chernom more v dannykh distantsionnogo zondirovaniya // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2018. V. 15. № 5. P. 191–202. (In Russian).
- Pavlushin A.A., Shapiro N.B., Mikhaylova E.N.* Zakhvachennyye volny i meandrirovaniye Osnovnogo Chernomorskogo techeniya // *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon morya.* 2019. Vyp. 4. P. 14–21. (In Russian).
- <http://dx.doi.org/10.22449/2413-5577-2019-4-14-21>.
- Polonskiy A.B., Muzyleva M.A.* Sovremennaya prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' apvellinga v severo-zapadnoy chasti Chernogo morya i u poberezh'ya Kryma // *Izv. RAN. Ser. geograf.* 2016. № 4. P. 96–108. (In Russian).

- Popov N.I., Fedorov K.N., Orlov V.M. Morskaya voda. Spravochnoye rukovodstvo. M.: Nauka, 1979. 328 p. (In Russian).
- Roll' G.U. Fizika atmosferykh protsessov nad morem. L.: Gidrometeoizdat, 1968. 398 P. (In Russian).
- Sil'vestrova K.P., Zatsepin A.G., Myslenkov S.A. Pribrezhnyye apvellingi v Gelendzhiskom rayone Chernogo morya: svyaz' s vetrovym vozdeystviyem i techeniyem // Okeanologiya. 2017. V. 57. № 4. P. 521–530. (In Russian).
- Stanichnaya R.R., Stanichnyy S.V. Apvellingi Chernogo morya // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2021. V. 18. № 4. P. 195–207. (In Russian).
- Clemente-Colón P., Yan X.H. Observations of east coast upwelling conditions in synthetic aperture radar imagery // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1999. 37(5). P. 2239–2248.
<http://dx.doi.org/10.1109/36.789620>.
- Clemente-Colón P., Yan X.-H. Low backscatter features in SAR imagery // JHU APL Tech. Digest. 2000. 21(1). P. 116–121.
- Fischer W.E., Green A.B. (Eds.). Upwelling: Mechanisms, Ecological Effects and Treats to Biodiversity. Nova Science Publ. Inc., N.Y. 2013.
- Friehe C.A., Shaw W.J., Rogers D.P., et al. Air-sea fluxes and surface layer turbulence around a sea surface temperature front // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 8593–8609.
- Fu L.L., Holt B. SEASAT Views Ocean and Sea Ice with Synthetic Aperture Radar. NASA/JPL Publication, 1982. 81–120.
- Gurova E., Lehmann A., Ivanov A. Upwelling dynamics in the Baltic Sea studied by a combined SAR/infrared satellite data and circulation model analysis // Oceanologia. 2013. 55(3). P. 687–707.
<http://dx.doi.org/10.5697/oc.55-3.687>
- Hsu M.K., Mitnik L.M., Liu C.T. Upwelling area northeast of Taiwan on ERS-1 SAR images // Acta Oceanogr. Taiwan. 1995. 34(3). P. 27–38.
- Kowalewski M., Ostrowski M. Coastal up- and downwelling in the southern Baltic // Oceanologia. 2005. 47(4). P. 454–475.
- Kozlov I.E., Kudryavtsev V.N., Johannessen J.A. et al. ASAR imaging for coastal upwelling in the Baltic Sea // Adv. Space Res. 2011. 50(8). P. 1125–1137.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2011.08>.
- Landsat 8 Data Users Handbook. Ver.5. 2019 (<https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>).
- Lehmann A., Myrberg K. Upwelling in the Baltic Sea – A review // J. Marine Syst. (Suppl.). 2008. 74. P. S3–S12.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.02.010>.
- Lehmann A., Myrberg K., Hoflich K. A statistical approach to coastal upwelling in the Baltic Sea based on the analysis of satellite data for 1990–2009 // Oceanologia. 2012. 54(3). P. 369–393.
- Li X.M., Li X.F., He M.X. Coastal upwelling observed by multi-satellite sensors // Science in China // Sci. China. Ser. D. 2009. 52(7). P. 1030–1038.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11430-009-0088-x>.
- Lin I.-I., Wen L.-S., Liu K.-K., Tsai W.-T., Liu A.-K. Evidence and quantification of the correlation between radar backscatter and ocean colour supported by simultaneously acquired in situ sea truth // Geophys. Res. Lett. 2002. 29(10).
<http://dx.doi.org/10.1029/2001GL014039>.
- Myrberg K., Andrejev O., Lehmann A. Dynamics of successive upwelling events in the Baltic Sea – a numerical case study // Oceanologia. 2010. 52(1). P. 77–99.
- Vanhellemont Q. Automated water surface temperature retrieval from Landsat 8/TIRS // Remote Sens. Environ. 2020. V. 237. 111518.
- Zheng Q., Yan X.-H., Huang N.E., Klemas V., Pan J. The effects of water temperature on radar scattering from the water surface: an X-band laboratory study // Global Atmos. Ocean Sys. 1997. 5. P. 273–294.