

Д.В. Хлебников, А.Ю. Иванов, М.И. Жукова, С.К. Клименко

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

dx@ocean.ru

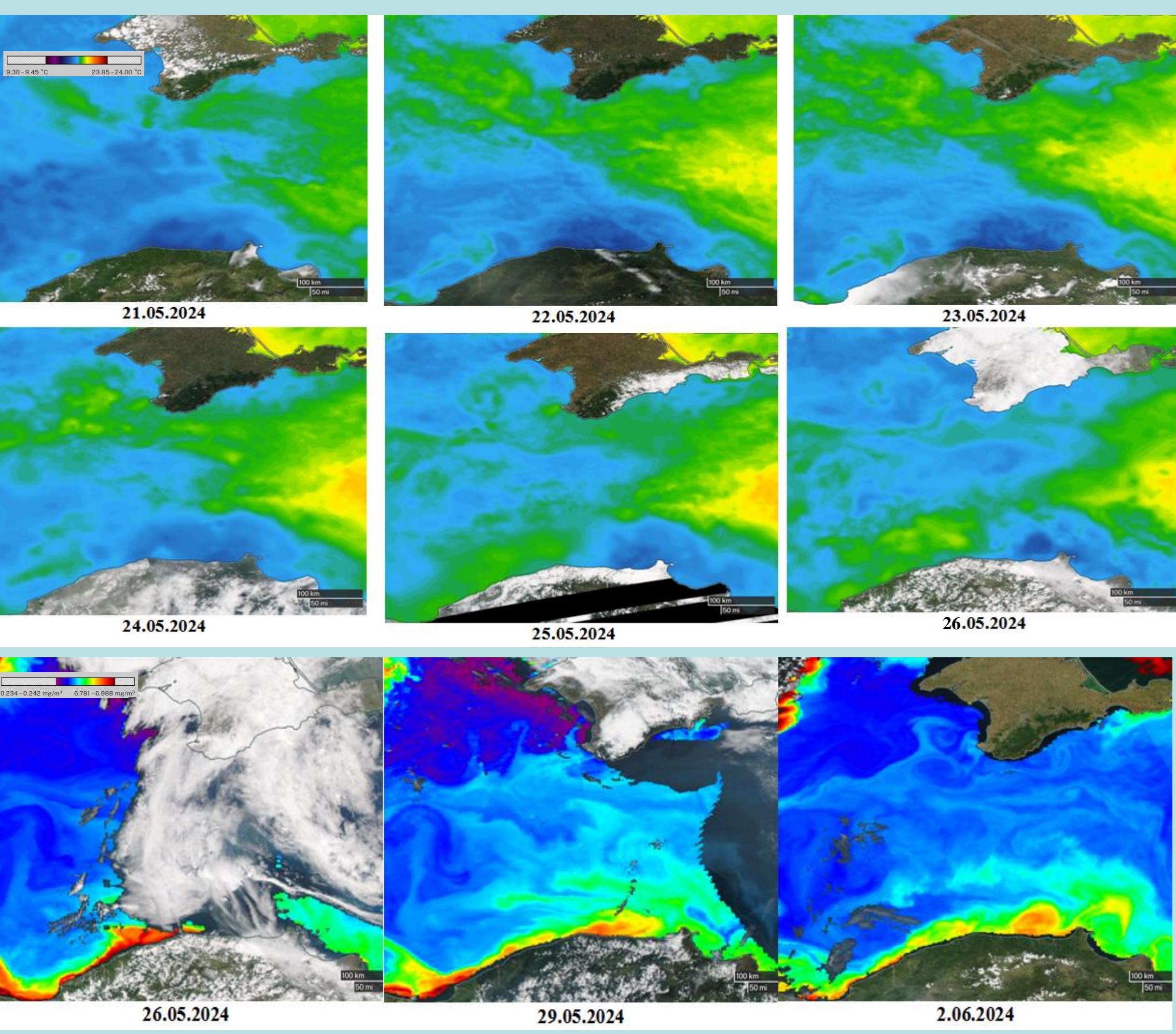


Рис. 1. Развитие апвеллинга в Черном море в прибрежной зоне Турции с 21 мая по 2 июня 2024 г. в поле TPM (по данным ИК-радиометров, вверху) и в поле хлорофилла-а (по данным спектрорадиометра MODIS на ИСЗ Aqua, внизу)

С помощью данных ДЗЗ исследованы квазисинхронные апвеллинги в Черном и Каспийском морях и их эволюция. Для анализа использовались данные оптических, ИК-радиометрических и радиолокационных спутников, с целью сопоставления их основных характеристик, выявления сходства и различий. Для подспутниковой верификации привлекались данные о температуре моря и ветре, находящиеся в открытом доступе. Проанализированные ряды спутниковых наблюдений удобны для понимания и определения масштабов апвеллингов и их динамики, а также для уточнения механизмов образования их сигнатур в оптических, ИК и радиолокационных данных. Показано, что современный мультисенсорный подход позволяет получать ключевые характеристики морских апвеллингов, полностью охарактеризовать их как океанологическое явление и сравнить апвеллинги в разных морях между собой.

В рамках мультидатчикающего подхода для анализа использовались снимки и изображения, а также продукты на их основе (поля температуры поверхности моря (ТПМ) и концентрации хлорофилла-а фитопланктона (chlor_a)), полученные в 2024 г. в ИК- и оптическом диапазонах радиометрами AVHRR на спутниках NOAA-19/20/21, спектрорадиометрами MODIS Aqua и VIIRS Suomi NPP. Большинство этих данных находится в открытом доступе на специализированных порталах ЕСИМО, NASA, NOAA и ESA. Кроме этого, дополнительно привлекались доступные квазисинхронные данные ИК-радиометра TIRS на ИСЗ Landsat-8/9 (ТПМ) и мультиспектрального инструмента MSI на ИСЗ Sentinel-2, а также радиолокационные изображения европейских спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B.

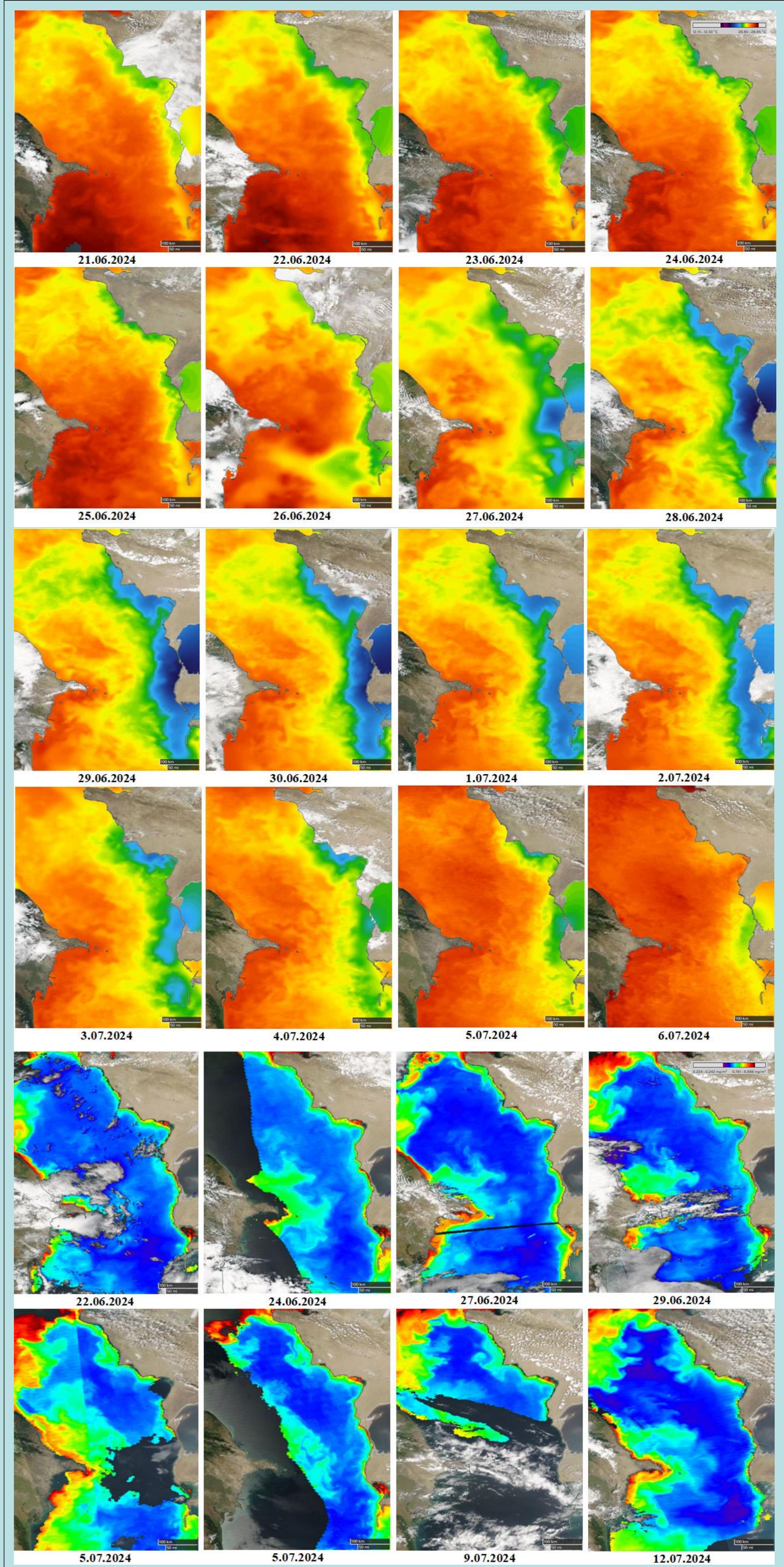


Рис. 2. Эволюция апвеллинга в Каспийском море у восточного побережья в период с 21 июня по 12 июля 2024 г. в поле TPM (по данным ИК-радиометров, вверху) и в поле хлорофилла-а (по данным спектрорадиометра MODIS на ИСЗ Aqua, внизу)

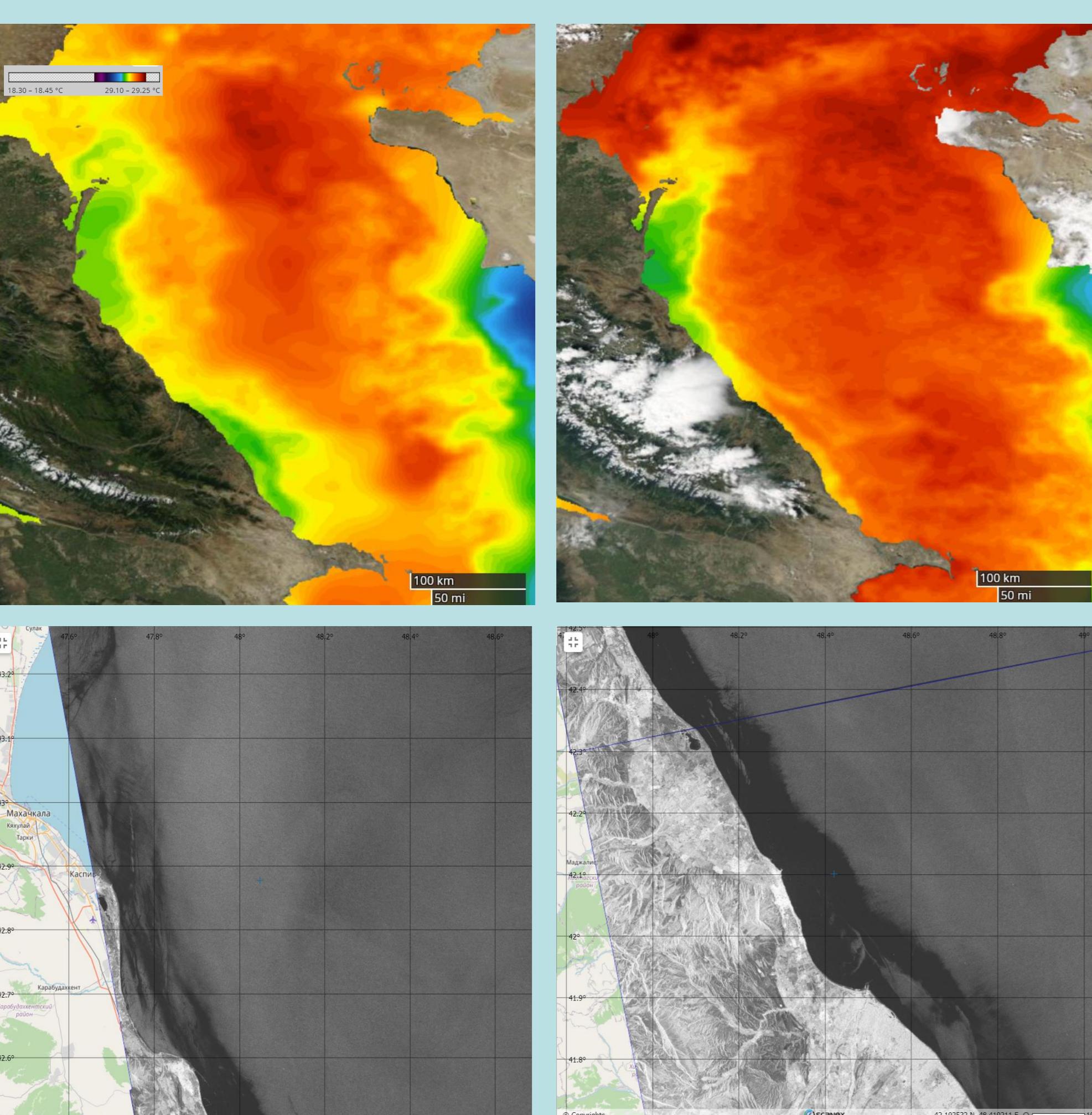


Рис. 3. Отображение западно-каспийского апвеллинга в поле TPM 30.07 и 4.08.2024 (по данным ИК-радиометров, вверху) и в поле шероховатости морской поверхности 3.08.2024 (по данным PCA Sentinel-1A, внизу)

Учитывая физико-географические особенности Черного и Каспийского морей, для исследований были выбраны три района, где апвеллинги проявлялись наиболее ярко и часто: один в Черном море у побережья Турции, второй и третий у западного и восточного побережий Каспия соответственно. Эти апвеллинги отображаются практически во всех данных ДЗЗ и всех диапазонах электромагнитного спектра, т.е. даже в данных космической радиолокации [1,2]. Наиболее интересными являются события, случившиеся в конце мая - начале июня, в конце июня - начале июля и в начале августа 2024 г. (рис. 1, 2, 3).

Апвеллинги в Черном и Каспийском морях возникают при устойчивых апвеллинговых вдольбереговых ветрах: у Турции при северо-восточных [1, 2], в Каспийском море – при юго-восточных и северных/северо-западных [3]. Серии снимков из космоса в ИК- и оптическом диапазонах, тем более ежедневные, дают практически полную информацию об масштабах, динамике и эволюции этих апвеллингов. На рис. 1-3 показана динамика развития апвеллингов на последовательности карт TPM и chlor_a по данным ИК-радиометров AVHRR и спектрорадиометров MODIS. Тем не менее, в благоприятных ГМУ (ветер от слабого до умеренного, слабое волнение) апвеллинги отображаются и в поле шероховатости морской поверхности на РПИ (рис. 3, внизу), и в поле chlor_a, причем в первом случае в виде обширных склерических (темных) областей (рис. 3, внизу), а во втором – благодаря развитию планктонных организмов в благоприятной апвеллинговой среде (рис. 1, 2).

На основе анализа массива данных ДЗЗ установлено, что развитие апвеллингов в этих двух морях происходит в две фазы: 1) активной, когда ветер сильный и холодная вода в итоге выходит на 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 структуры и отдельные линзы. Всё это прекрасно наблюдается в данных ДЗЗ (рис. 1-3). Количественно апвеллинги могут быть охарактеризованы с помощью данных ДЗЗ более высокоразрешающих сенсоров, таких как радиометр TIRS (на ИСЗ Landsat-8/9) и спектрорадиометр OLCI (Sentinel-3) – см. табл. Из таблицы также видно, что черноморские и каспийские апвеллинги достигают характеристик океанских аналогов с максимальными ΔT до 8-10°C, однако значения chlor_a в них не превышают 2-4 mg/m³.

Сравнение динамики и проявлений апвеллингов в данных ДЗЗ в 2-х морях наглядно показало, что: 1) они имеют один и тот же экмановский механизм генерации, 2) характерные пространственные масштабы также похожи; из этого ряда выбивается только восточно-каспийский апвеллинг, часто имеющий вдольбереговую протяженность 300-500 км и более, 3) появление черноморских и западно-каспийских апвеллингов коррелирует с синоптическими циклами, т.е. происходит эпизодически, в то время как, восточно-каспийский апвеллинг, ослабляясь или усиливаясь, может стационарно существовать до 3 месяцев, 4) только для восточно-каспийского апвеллинга характерен периодический распад на 2-3 крупных фрагмента, приуроченных к побережью Каспийского моря от г.Форт Шевченко до о.Огурчинский, 5) контрасты TPM в них также похожи, в зависимости от интенсивности – от 2-3° до 8-10°C, 6) интенсивные цветения фитопланктона не возникают, хотя его развитие и соответствующее увеличение концентраций chlor_a происходит с задержкой по времени, и в общем случае может охватить всю зону апвеллинга; однако в восточно-каспийском апвеллинге значения chlor_a крайне малы (с chlor_a близкими к показателям невозмущенных прибрежных вод восточного Каспия; рис. 2 внизу) [3].

Таблица. Характеристики апвеллингов, полученные по данным ДЗЗ

апвеллинг	продолжительность, дни	поперечный масштаб, км	сред. горизонт. (вдольбереговой) масштаб, км	общая площадь, км²	макс. ΔT °C	сред. (макс.) chlor_a mg/m³	примечание
Черноморский (у побережья Турции)	6-7	7-15	130-150	1400-1600	7-8	~2 (4)	
Западно-каспийский	6-8	15-17	до 200	1000-3000	2-4	~2 (3)	может состоять из двух областей
Восточно-каспийский	до 60-90	до 20-30	300-500	до 15 000 и более	8-10	1-2 (в очень узкой прибрежной полосе)	временно разбивается на 2-3 апвеллинговых области

- Хлебников Д.В., Иванов А.Ю., Евдошенко М.А., Клименко С.К. Проявление апвеллингов в Черном море в данных мультисенсорного дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2023. № 6. С. 35-51.
- Khlebnikov D.V., Ivanov A.Yu., Evdoshenko M.A., Klimenko S.K. Manifestations of upwellings in the Black Sea in multisensor remote sensing data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2023. V. 59. № 10. P. 1435-1449.
- Хлебников Д.В., Иванов А.Ю., Евдошенко М.А., Клименко С.К. Исследование пространственно-временной изменчивости биооптических и температурных полей в зоне апвеллинга у восточного побережья Каспийского моря по данным дистанционного зондирования // Тр. XII Всерос. конф. с международным участием «Современные проблемы оптики естественных вод» (ОНВ'2023). СПб, 2023.
- 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.
- 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.
- 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.
- Архипкин В.С. Особенности структуры и динамики прибрежного апвеллинга в Каспийском море // Каспийское море. Структура и динамика вод - М: Наука, 1990.

Заключение: На основе анализа спутниковых данных показано, что апвеллинги в Черном море и у западного берега Каспийского моря имеют синоптический и локальный характер с продолжительностью не больше 5-7 дней и площадями в тысячи кв. км. В то время как, апвеллинг у восточного побережья Каспия носит сезонный и региональный (мезомакромасштабный) характер, т.е. практически наблюдается в течение всего лета, простираясь более чем на 500 км и охватывая площади до 15 тыс. км² и более, что полностью подтвердило выводы [7]. Мультидатчикающий подход, как неоднократно было показано [1-4], позволяет практически полностью охарактеризовать наблюдаемые апвеллинги с океанографической точки зрения (табл.).

Апвеллинги в Черном и Каспийском морях отображаются во всех данных ДЗЗ – оптических, инфракрасных и микроволновых, создавая свои характерные сигнатурные. Практически ежедневные TPM- и chlor_a- продукты на основе данных ДЗЗ позволяют наглядно увидеть и исследовать эволюцию апвеллингов во времени и пространстве в этих морях. Более того, в настоящее время спутниковый мониторинг является один из наиболее эффективных методов исследования из космоса этих и др. подобных явлений (выносы рек, фронтальные зоны, мощные вихри), которые приводят к значительным вариациям TPM [5, 6]. Помимо этого, он является мощным средством для исследования процессов и явлений подобного масштаба, в том числе при традиционном отсутствии контактных измерений, что в итоге позволяет разработать методы их наблюдения и мониторинга.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и образования России (тема FMWE-2024-0015). Авторы благодарны ГК «СКАНЭКС» за возможность использования ресурсов геопорталов, созданных на основе веб-ГИС приложения «Геомиксер».