

С помощью находящихся в открытом доступе данных дистанционного зондирования в оптическом, инфракрасном и микроволновом диапазонах, а также подспутниковых данных о скорости и направлении ветра, были исследованы апвеллинги в трех районах Черного моря. Проанализированы ряды спутниковых наблюдений с целью изучения динамики апвеллингов и определения их масштабов, а также для уточнения механизмов образования сигнатур апвеллингов на поверхности моря. Показано, что мультисенсорный подход позволяет практически полностью охарактеризовать апвеллинг как океанологическое явление.

В рамках мультисенсорного подхода для анализа использовались изображения и данные о температуре поверхности моря (ТПМ), концентрации хлорофилла-а фитопланктона (chl<sub>a</sub>) и шероховатости морской поверхности на радиолокационных изображениях – РЛИ. Данные о ТПМ были получены в инфракрасном (ИК) диапазоне с помощью радиометров AVHRR, установленных на спутниках NOAA-15, -18, -19, MetOp-A и MetOp-B (пространственное разрешение 1 км), и ИК-радиометра TIRS на спутнике Landsat-8 (100 м). В оптическом диапазоне данные о chl<sub>a</sub> получены спектрорадиометрами MODIS и VIIRS на спутниках Aqua и Suomi NPP (1 км), а также спектрорадиометром OLCI на спутниках Sentinel-3A и Sentinel-3B (300 м). Радиолокационные изображения были получены радиолокаторами с синтезированной апертурой спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B (10 м). Ряд этих данных и готовых продуктов доступен на портале МГИ РАН ([http://dvs.net.ru/mp/index\\_ru.shtml](http://dvs.net.ru/mp/index_ru.shtml)).

Учитывая физико-географические особенности Черного моря, для исследований были выбраны три района, где апвеллинг проявился наиболее ярко и часто [1]: первый у северо-восточного побережья между Анапой и Туапсе; второй – у побережья Тендровской косы и западного побережья Крыма, а третий – у побережья Турции. Наиболее ярко выраженными являются апвеллинги, произошедшие в июле 2018 г. и июле-августе 2020 г.

Апвеллинги в Черном море возникают при устойчивых апвеллинговых вдольбереговых ветрах: для западного побережья Крыма и северо-восточного побережья моря – северо-западных, а для побережья Турции – северо-восточных [1]. Ежедневные снимки из космоса в ИК-диапазоне дают практически полную информацию о масштабах, эволюции и динамике апвеллингов. На рис. 1-3 показано развитие апвеллингов в Черном море по данным ИК-радиометров AVHRR. Апвеллинги также отображаются в поле шероховатости морской поверхности на РЛИ в виде обширных темных областей (рис. 4, 5). Они проявляются и в поле chl<sub>a</sub> благодаря развитию планктонных организмов в благоприятной среде (рис. 7).

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 структуры и отдельные линзы (рис. 1–5). Количественные характеристики апвеллингов были получены с помощью высокоразрешающих сенсоров, таких как радиометр TIRS и спектрорадиометры OLCI – см. рис. 5-7 и табл. 1. Из таблицы видно, что черноморские апвеллинги достигают океанских аналогов с  $\Delta T \geq 8^\circ \text{C}$ , однако значения chl<sub>a</sub> в них не превышают 2-4 мг/м<sup>3</sup>.

Установлено, что на начальных стадиях развития апвеллинга, когда на поверхности моря создаются максимальные контрасты ТПМ, решающим фактором является трансформация атмосферного погранслоя (АПС). Сигнатуры апвеллинга на РЛИ существенно зависят от скорости приповерхностного ветра. При скорости в 2-4 м/с – это обширные темные области выглаживания, при более сильном ветре (5-6 м/с) – это отдельные темные пятна (в местах максимально низких значений ТПМ), а при больших скоростях ветра – сигнатуры, лишь визуализирующие границы апвеллинга (рис. 5). Биологический фактор начинает влиять только на стадии релаксации апвеллинга, после того как успевает развиться и эволюционировать фитопланктон (рис. 7). Всё это позволяет заключить, что РЛ-сигнатуры апвеллингов не однозначны для интерпретации, однако полезны в тех случаях, когда ИК-данные не доступны из-за облачности.

**Выводы и Заключение:** Апвеллинги отображаются в данных дистанционного зондирования в оптическом, инфракрасном и микроволновом диапазонах, создавая свои характерные сигнатуры. Мультисенсорный подход позволяет практически полностью охарактеризовать наблюдаемые апвеллинги 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 [2]. Среди механизмов отображения апвеллинга («гидрологический», «атмосферный» и «биологический» [3-6]) для Черного моря основными являются первые два.

Решающим фактором модуляции (выглаживания) мелкомасштабных ветровых волн, что приводит к образованию обширных темных пятен на РЛИ, является резкий контраст температур, который, во-первых, приводит к трансформации АПС над обширными областями холодной воды, а, во-вторых, к затруднениям с генерацией ветровой ряби на холодной воде. Биологический (пленочный) механизм, часто привлекаемый для интерпретации/объяснения темных сигнатур апвеллинга в данных дистанционного зондирования, в Черном море не играет столь существенной роли.

место	продолжительность (по данным ДЗЗ), дни	сред. поперечный масштаб, км	сред. горизонт. (вдольбереговой) масштаб, км	общая площадь, км <sup>2</sup>	макс. $\Delta T^\circ \text{C}$	сред. (макс.) chl <sub>a</sub> мг/м <sup>3</sup>
Анапа – Геленджик	10	16 6.5	69 34	1790 310	4,1	1,2 (1,5)
Тендровская коса м.Тарханкут	6 >10	6,3 8,4	122 73	1120 ~415	2,7 4,5	4,1 (8,0) 1,4 (3,0)
Евпатория ЮЗ Крым		22	46	~4800	~4	1,5 (4,0)
(Зонгулдак – Инеболу, Турция) (июль)	около 6	13	135	1600	7,9	2,2 (3,0)
(Зонгулдак – Инеболу, Турция) (август)	7	7,5	148	1430	8	1,7 (3,0)

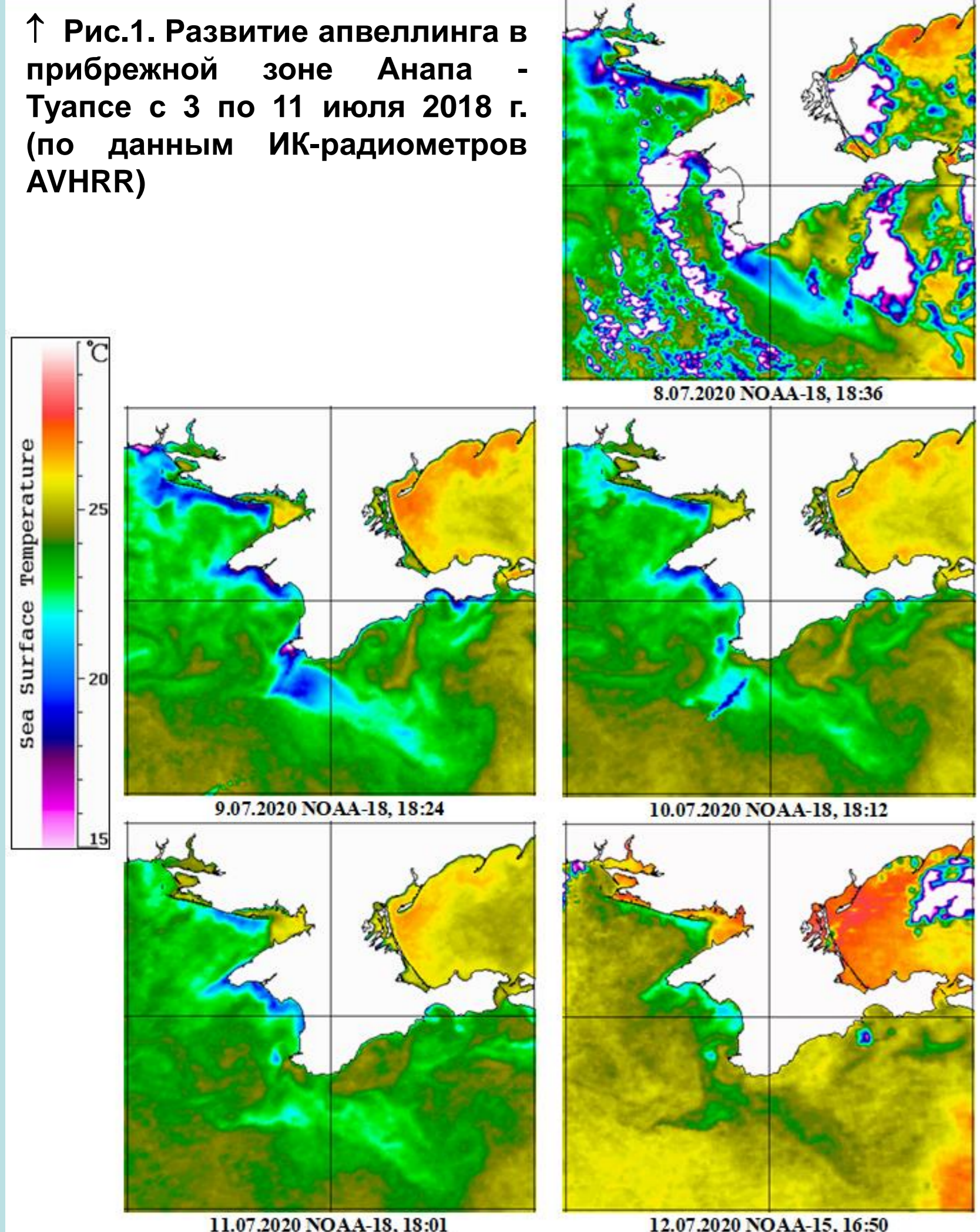
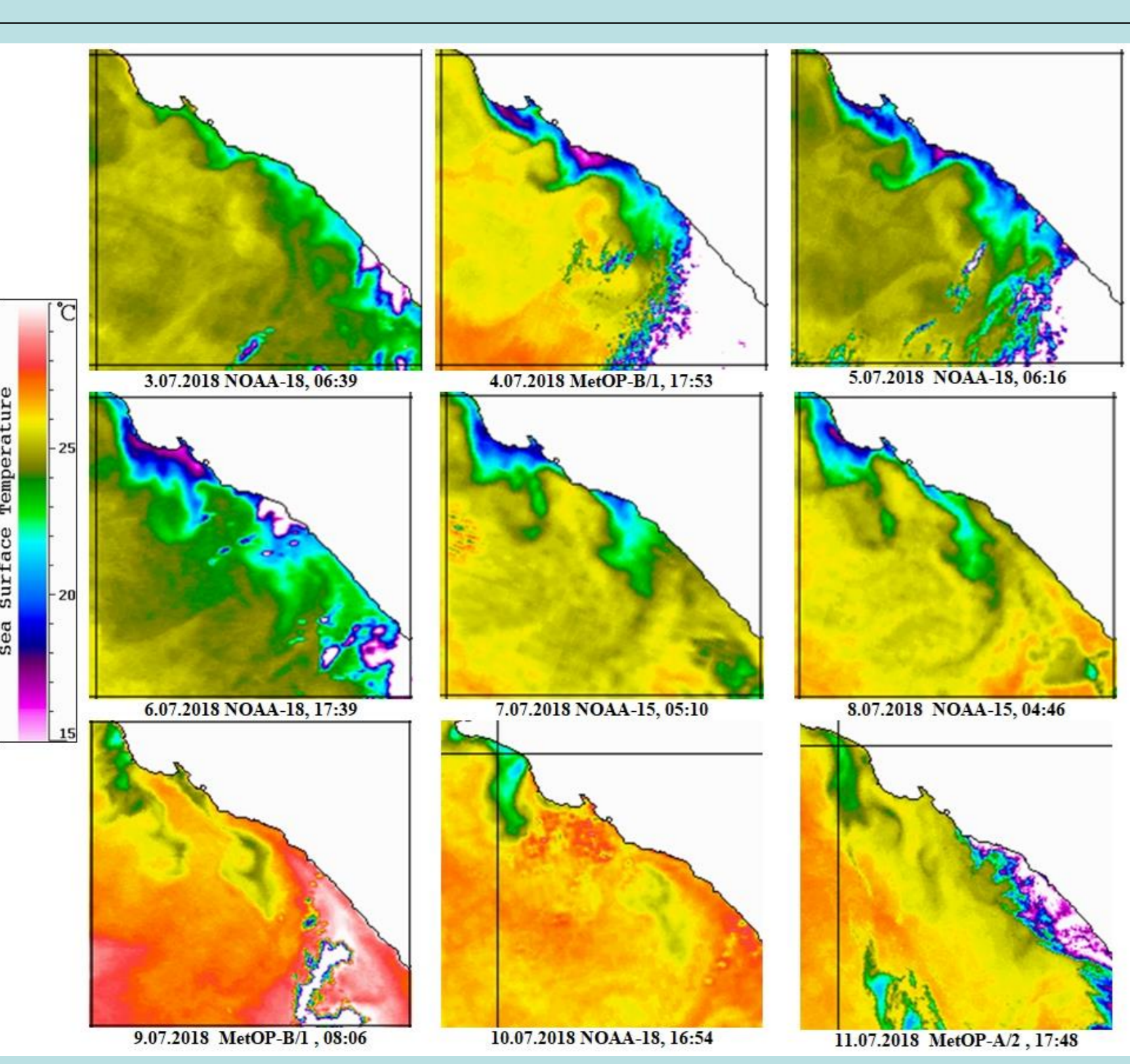


Рис. 2. Развитие апвеллинга у Тендровской косы и в прибрежной зоне Западного Крыма с 8 по 12 июля 2020 г. (по данным ИК-радиометров AVHRR)

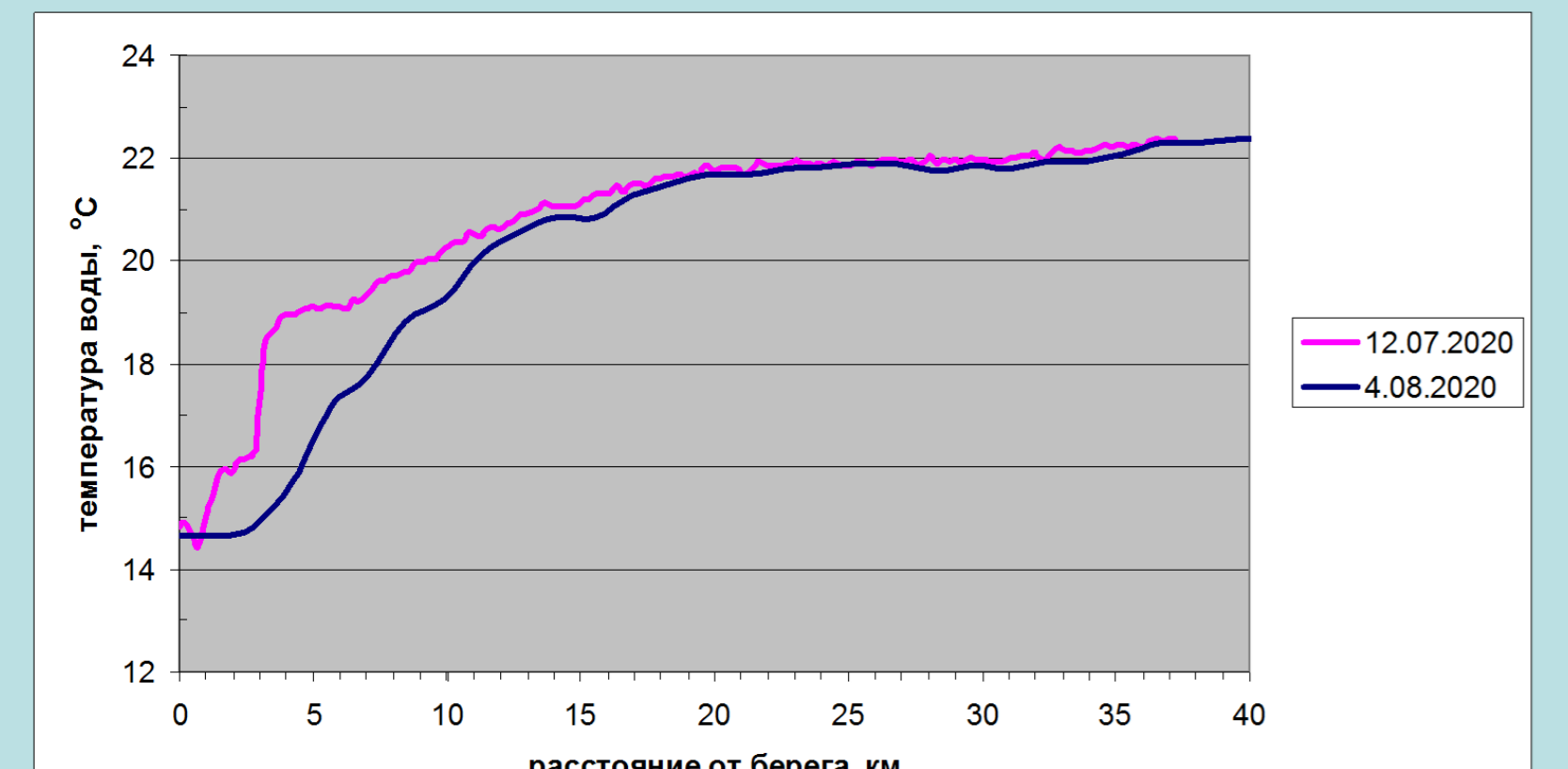


Рис. 6. Температурные разрезы через апвеллинги у турецкого побережья (по данным радиометра TIRS на ИСЗ Landsat-8)

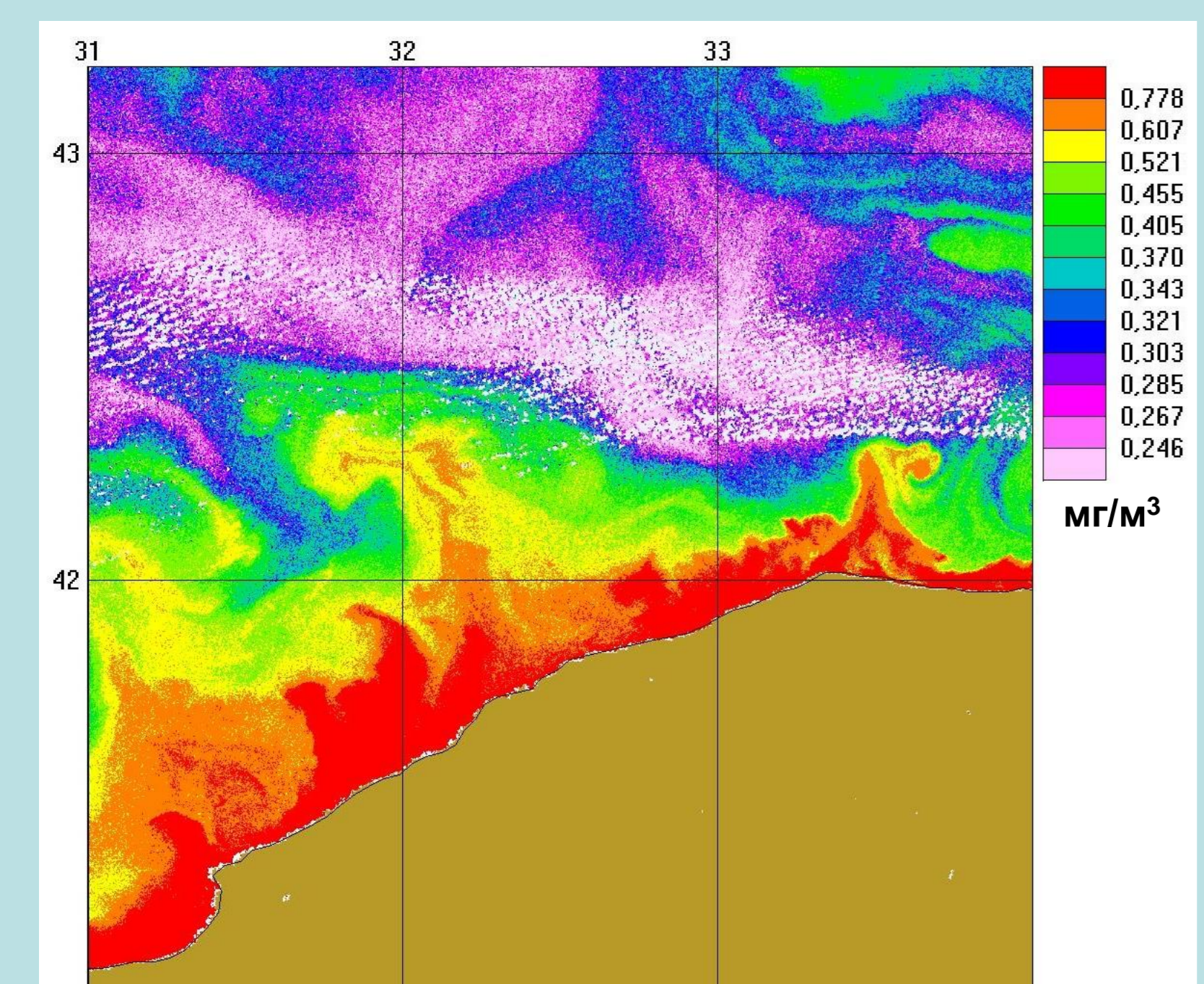


Рис. 7. Распределение chl<sub>a</sub> в турецком апвеллинге по данным спектрорадиометра OLCI (Sentinel-3B, 11.07.2020) – см. рис 5 (внизу)

Табл. 1. Характеристики апвеллингов, полученные по данным ДЗЗ →

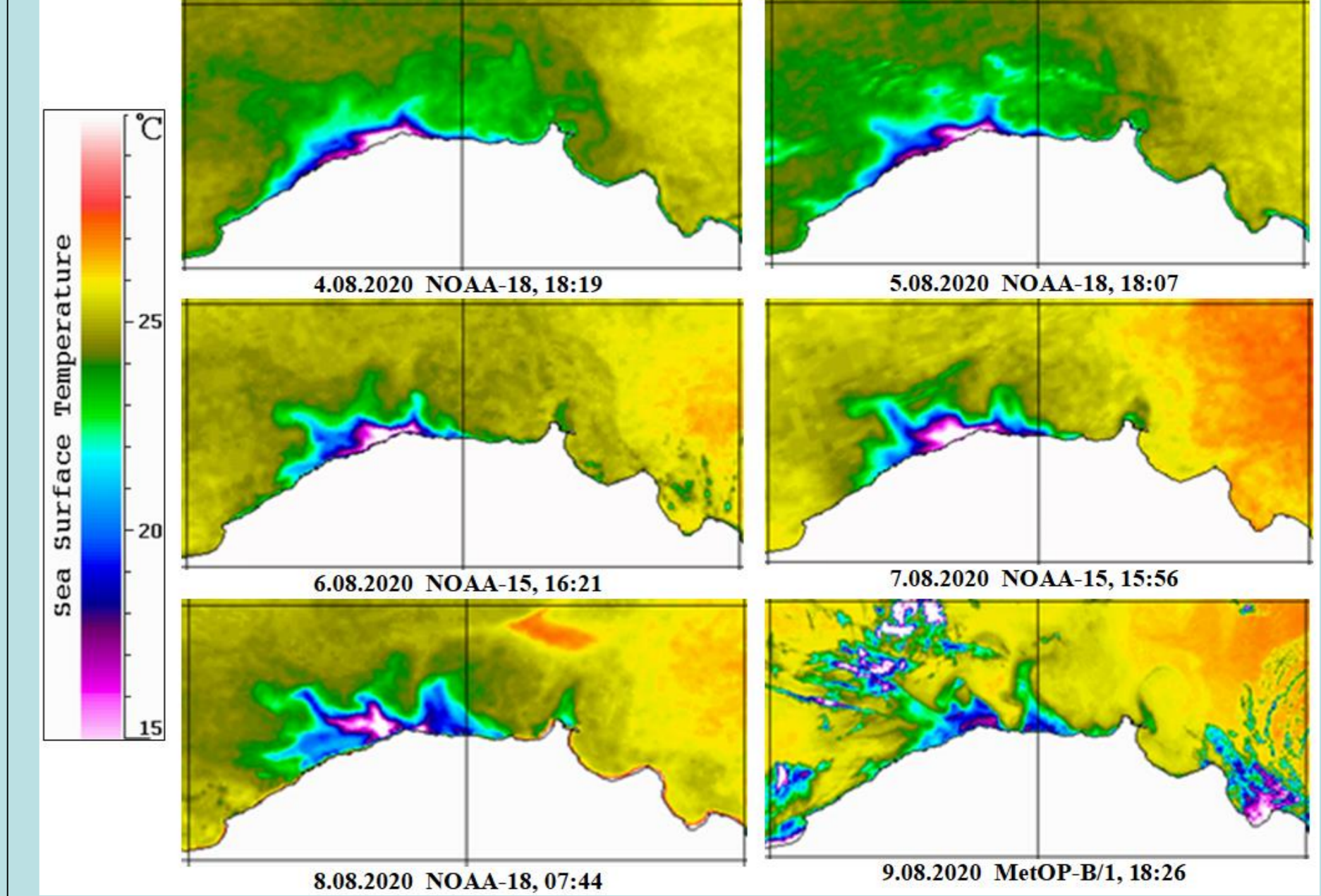
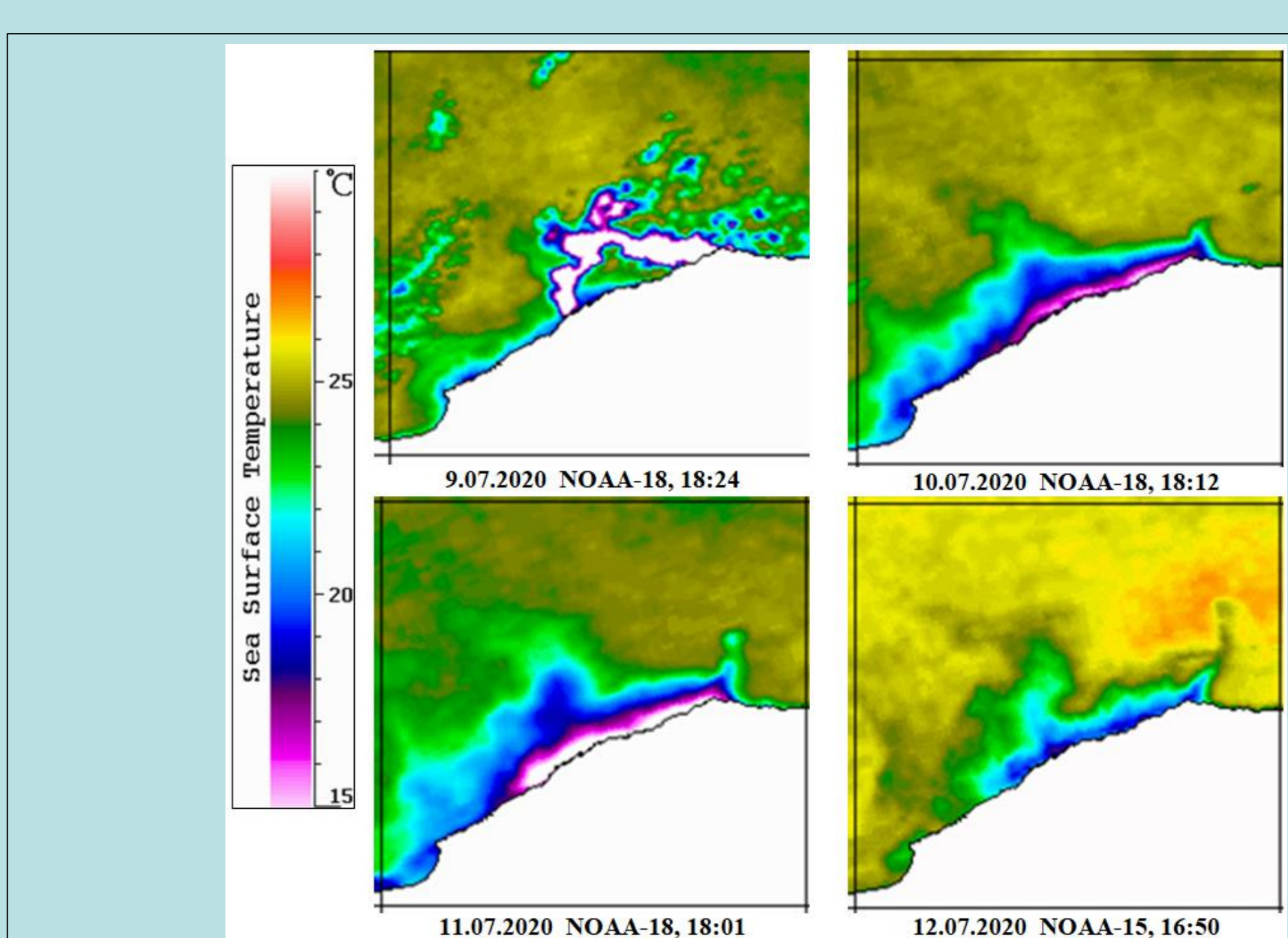


Рис. 3. Развитие апвеллинга у побережья Турции в южной части Черного моря с 9 по 12 июля (вверху) и с 4 по 9 августа (внизу) 2020 г. (по данным ИК-радиометров AVHRR)

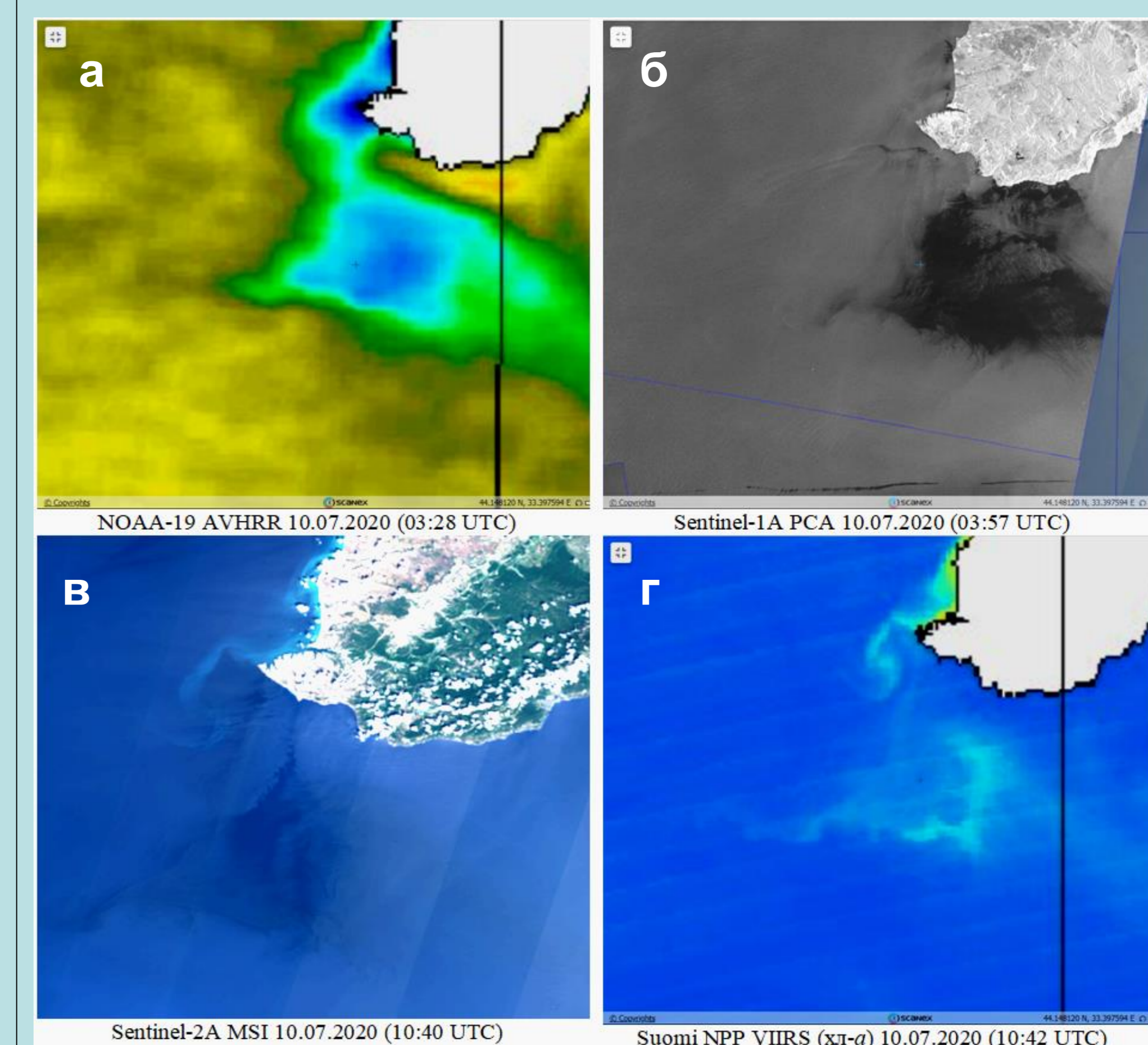


Рис. 4. Квазисинхронное отображение апвеллинга у ЮБК в поле ТПМ (а), шероховатости морской поверхности (б), отраженного излучения (в) и хлорофилла chl<sub>a</sub> (г)

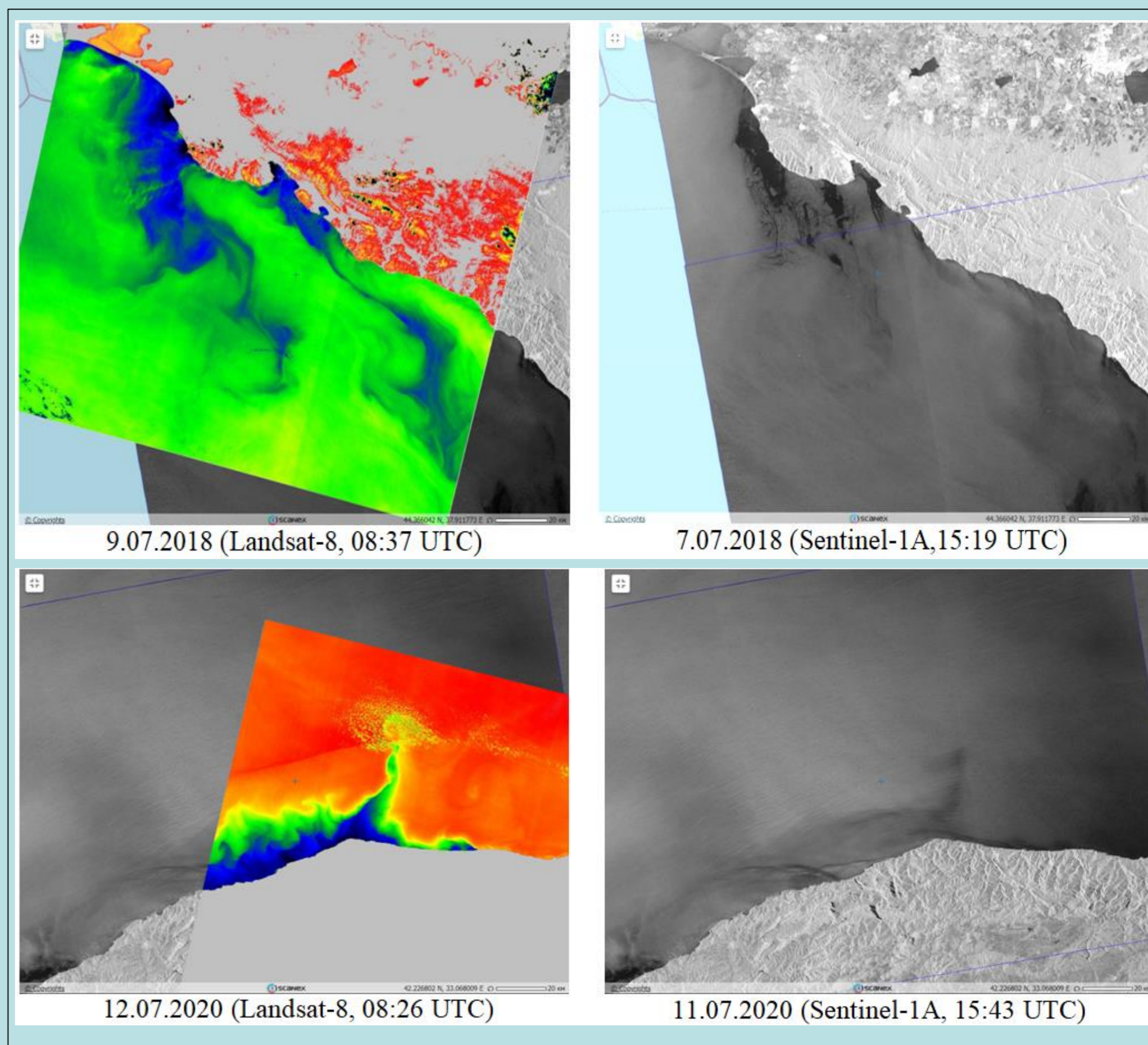


Рис. 5. Квазисинхронное отображение апвеллинга в поле ТПМ (слева) и шероховатости морской поверхности на РЛИ (справа) у побережий Анапа-Новороссийск (вверху) и Турции (внизу)

1. Станичная Р.Р., Станичный С.В. Апвеллинги Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 195-207.
2. Иванов А.Ю., Хлебников Д.В., Коновалов Б.В., Евтушенко Н.В., Терлева 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.
3. 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. 2239-224.
4. Запалов А.С. Наблюдения шероховатости морской поверхности в период апвеллинга // Морской гидрофиз. журн. 2001. № 2. С. 36-43.
5. 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.
6. 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.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и образования России (тема FMWE-2021-0001). Авторы благодарны ГК «СКАНЭКС» за возможность использования ресурсов геопорталов, созданных на основе веб-ГИС приложения «Геомиксер».