

# **Связь сезонного распределения хлорофилла-а и взвешенного вещества у восточного побережья Среднего Каспия с локальной мезомасштабной динамикой вод**

**Гинзбург А.И. (1), Костяной А.Г. (1,2), Шеремет Н.А. (1), Соловьев Д.М. (3)**

(1) Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*E-mails: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, sheremet@ocean.ru*

(2) Московский университет им. С.Ю. Витте, Москва, 115432, Россия

(3) Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

Концентрация хлорофилла-а (Хл-а) является основным показателем продуктивности вод водоемов. Каспийское море – водоем с высокой продуктивностью вод [1]. С использованием спутниковой информации были получены как «мгновенные» распределения Хл-а по всей акватории Каспия в летний сезон [2, 3], так и карты его среднемесячных и среднеклиматических распределений для каждого месяца года [4, 5]. Менее изучены внутригодовые изменения структуры полей хлорофилла-а и взвешенного вещества у восточного побережья Среднего Каспия и их связь с сезонной мезомасштабной динамикой вод.

**Цель исследования** – выявление связи сезонного изменения этих биооптических параметров в районе Среднего Каспия в границах  $42^{\circ}$ – $45^{\circ}$  с.ш.,  $49.5^{\circ}$  в.д. – линия берега (рис. 1) с сезонной мезомасштабной динамикой вод данного района (ветроуправляемым прибрежным апвеллингом и струйными потоками из Северного Каспия в теплый сезон, потоком южнокаспийских вод, распространяющихся по периферии Дербентского циклонического круговорота, – в холодный [3]).

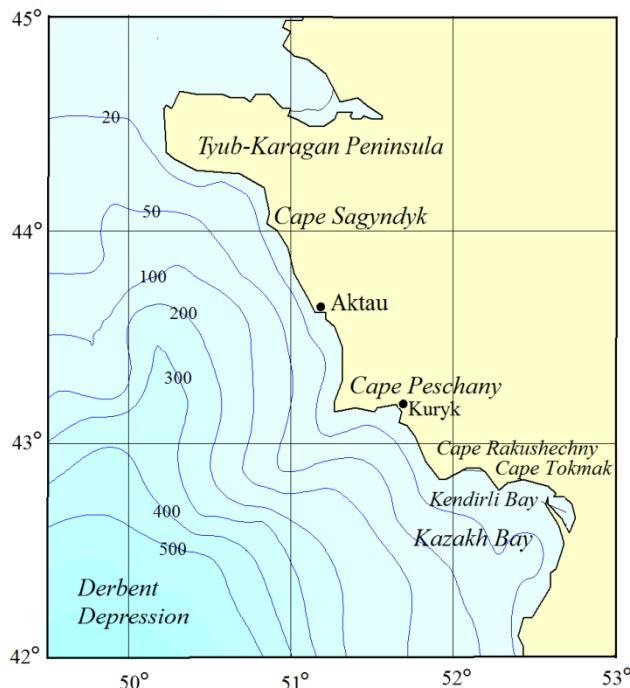


Рис. 1. Район исследования.

**Исследование основано** на совместном анализе синхронных карт температуры поверхности моря (ТПМ), концентрации Хл-а и взвешенного вещества в разные сезоны (январь – март 2022 г. и июль – декабрь 2023 г.), полученных с использованием спутниковых данных с хорошим пространственным разрешением (250–1000 м). Для построения карт ТПМ и концентрации хлорофилла-а использованы данные радиометров MODIS и VIIRS, в качестве информации об относительных значениях концентрации взвеси (TSM) – спутниковые карты Water-Leaving Radiance на длине волны 0,551 нм (WLR 551). Значения концентрации Хл-а на шкалах соответствующих карт рассчитаны не по региональному алгоритму для Каспийского моря [5], а с использованием стандартного алгоритма NASA и, скорее всего, завышены. Использовались также рассчитанные по трехканальной композиционной методике цветные синтезированные изображения MODIS, VIIRS NOAA-20 и VIIRS SNPP в формате True Color.

## РЕЗУЛЬТАТЫ:

**1. Летом**, при ярко выраженной плотностной (термической) стратификации вод, в районе исследования, лишнем речного стока, наблюдаются два источника поступления поверхностных вод с повышенной концентрацией Хл-а:

- *прибрежный апвеллинг*: воды с концентрацией хлорофилла-а 1–1.5 мг/м<sup>3</sup> сосредоточены в основном в пределах 20-метровой изобаты (рис. 2). Малая продуктивность поверхностных вод апвеллинга связана с положением максимума хлорофилла-а в области сезонного термоклина [6, 7]), однако в сентябре 2023 г., при ослабленной стратификации вод, в результате интенсификации апвеллинга вследствие кратковременного усиления ветра 10 сентября до 10–15 м/с (в порывах до 18 м/с) [8] концентрация Хл-а во вдольбереговой полосе увеличилась до 2.5 мг/м<sup>3</sup> (рис. 3). В узкой полосе южнее Актау, восточнее мыса Токмак в Казахском заливе концентрация Хл-а увеличивается до 3 мг/м<sup>3</sup>, а наибольшие концентрации этого пигмента (6–7 мг/м<sup>3</sup>) и взвеси наблюдаются в районе Курык и в заливе Кендерли (рис. 2, 3);
- *струеобразные потоки вод* шириной примерно от 10 до 40 км, периодически прорывающиеся из Северного Каспия и распространяющиеся в квазимеридиональном направлении от южного побережья п-ова Тюб-Караган на расстояние до примерно 250 км. Концентрация Хл-а в районе этого полуострова – примерно 5 мг/м<sup>3</sup>, убывает по мере распространения струи на юг (рис. 2).

## **2. Особенности динамики таких струй:**

- в случае близкого расположения струи к фронту апвеллинга ее узкая центральная часть с максимальной концентрацией Хл-а и взвеси распространяется в основном вдоль фронта с присущими ему элементами неустойчивости до широты мыса Песчаный, далее – на юг (желтая полоса между водами апвеллинга (24.5°C) и водами открытого моря (27°C) на рис. 2а);
- оцененная по последовательным спутниковым изображениям скорость распространения струй на юг может достигать 36 см/с;
- в районе примерно 43°30' с.ш.–44° с.ш. иногда наблюдается разделение струи на два потока, один из которых продолжает движение на юг, другой направлен на северо-запад примерно вдоль 100-метровой изобаты (рис. 4); причиной этого разделения потоков является, по-видимому, локальная особенность циркуляции вод;
- месяц наиболее частого наблюдения струй северокаспийских вод – июль.

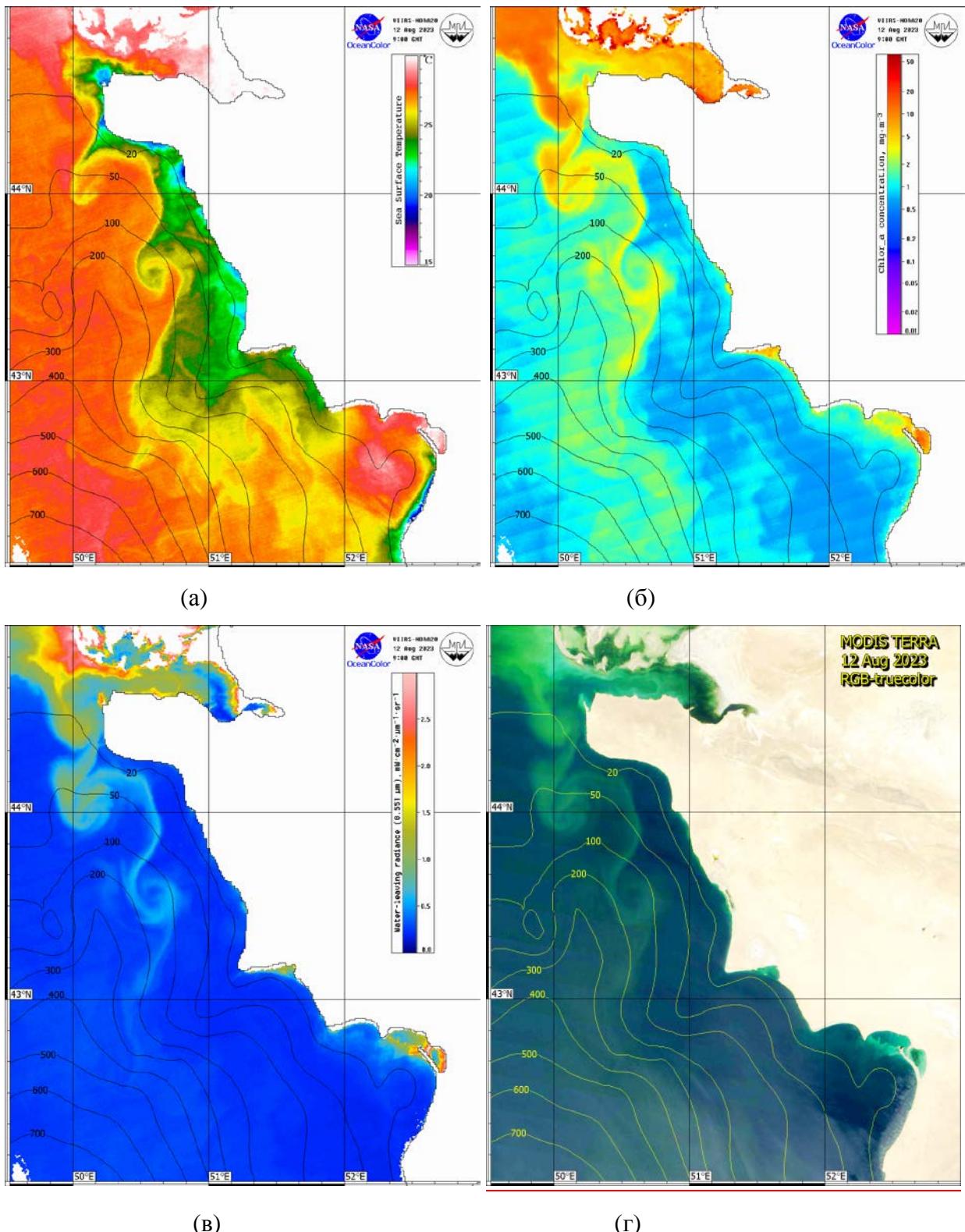
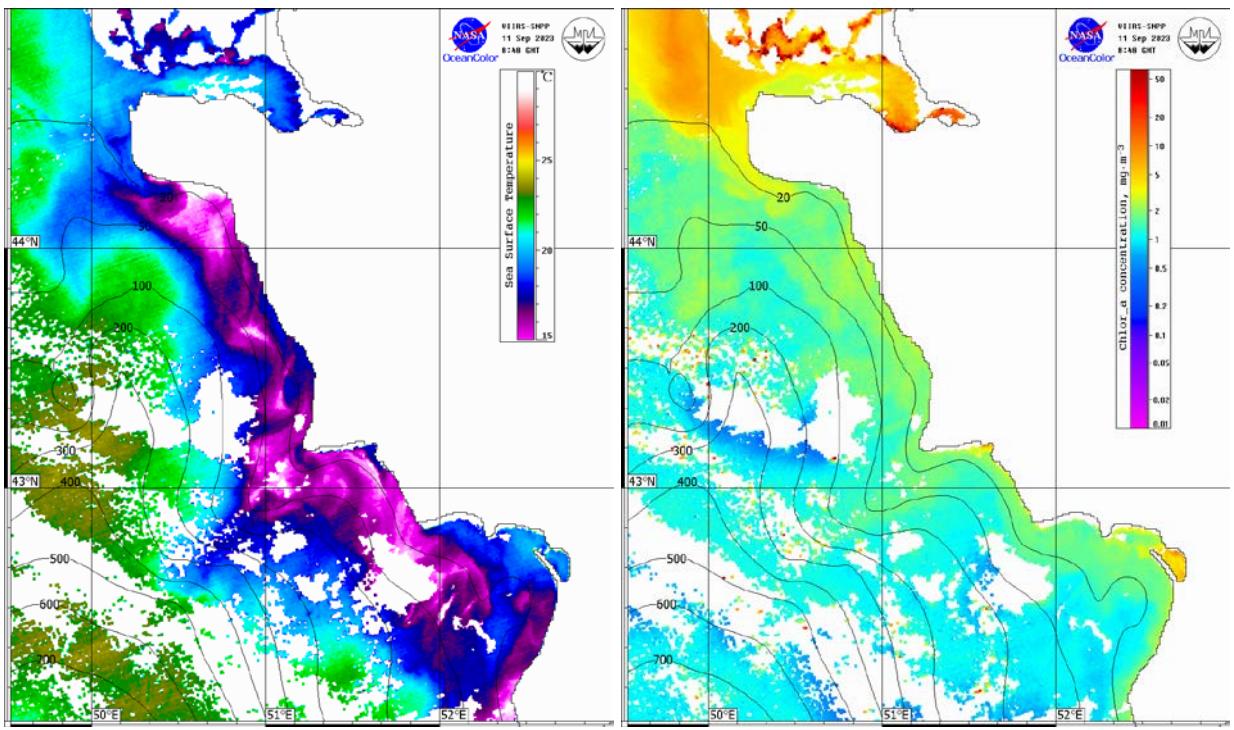
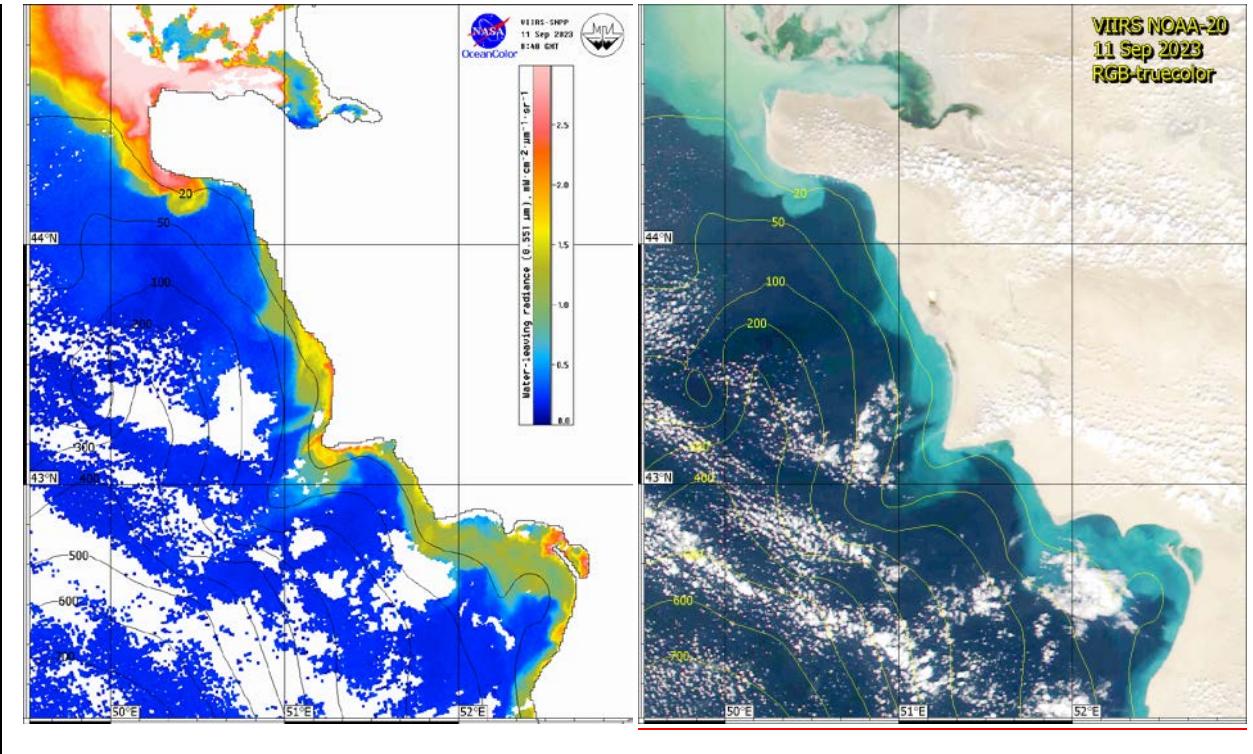


Рис. 2. Карты ТПМ ( $^{\circ}\text{C}$ ) (а), концентрации Хл-а ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) (б), взвеси (в) и оптическое изображение (комбинация RGB каналов) (г) 12 августа 2023 г.



(а)

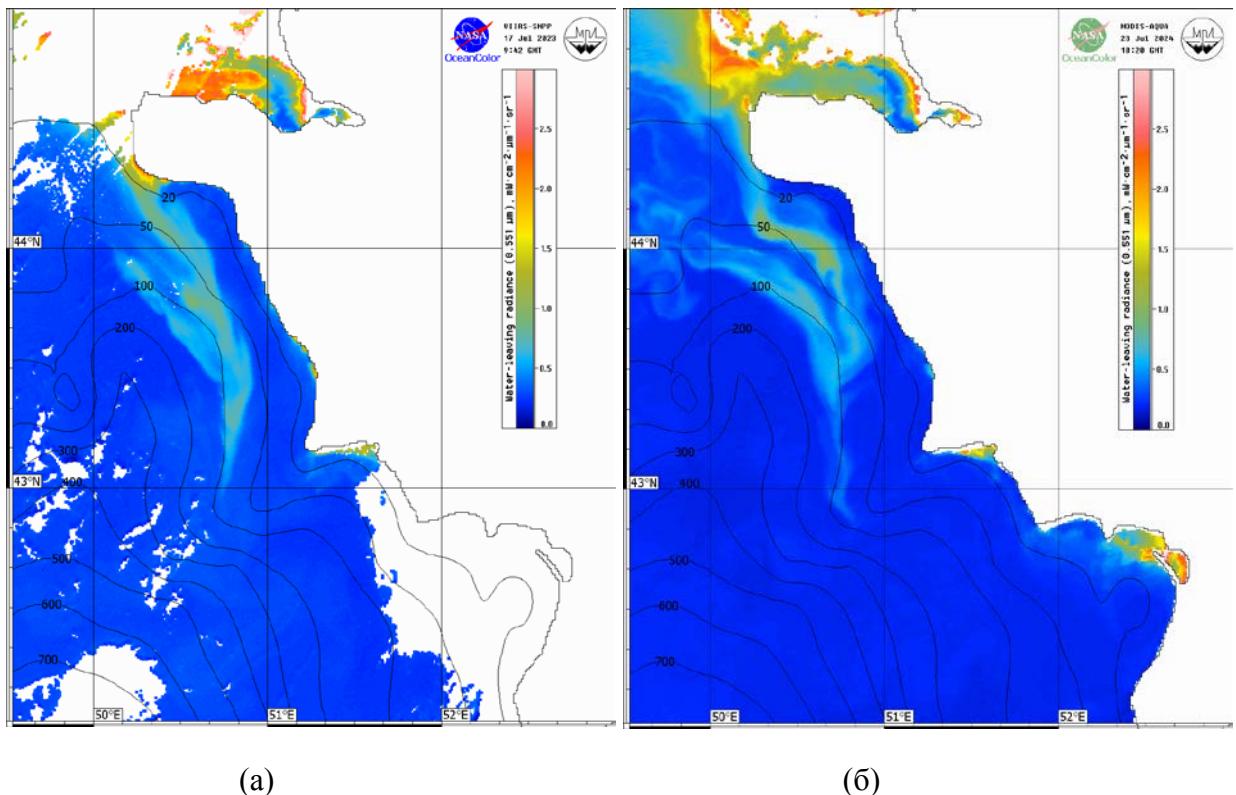
(б)



(в)

(г)

Рис. 3. Карты ТПМ ( $^{\circ}\text{C}$ ) (а), концентрации Хл-а ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) (б), взвеси (в) и оптическое изображение (комбинация RGB каналов) (г) 11 сентября 2023 г.



(а)

(б)

Рис. 4. Разделение струи северокаспийских вод, распространяющихся вдоль фронта апвеллинга, в поле взвешенного вещества 17 июля 2023 г. (а) и 23 июля 2024 г. (б).

**3. В холодное время года (октябрь – март)** повышенные значения концентрации хлорофилла (до 3 мг/м<sup>3</sup>) соответствуют прибрежным областям понижения ТПМ вследствие **сезонного выхолаживания** (в большинстве случаев – в пределах изобаты 50 м). Дополнительным источником повышенной концентрации хлорофилла за пределами 50-метровой изобаты в холодный период являются воды Южного Каспия, распространяющиеся по периферии циклонического круговорота над Дербентской впадиной (воды с температурой выше 8°C на рис. 5а). Граница поля взвеси (рис. 5в, г) в общем соответствует распределениям ТПМ и ХЛ-а (рис. 5б) с максимальными значениями в пределах 20-метровой изобаты. В заливе Кендерли – лед.

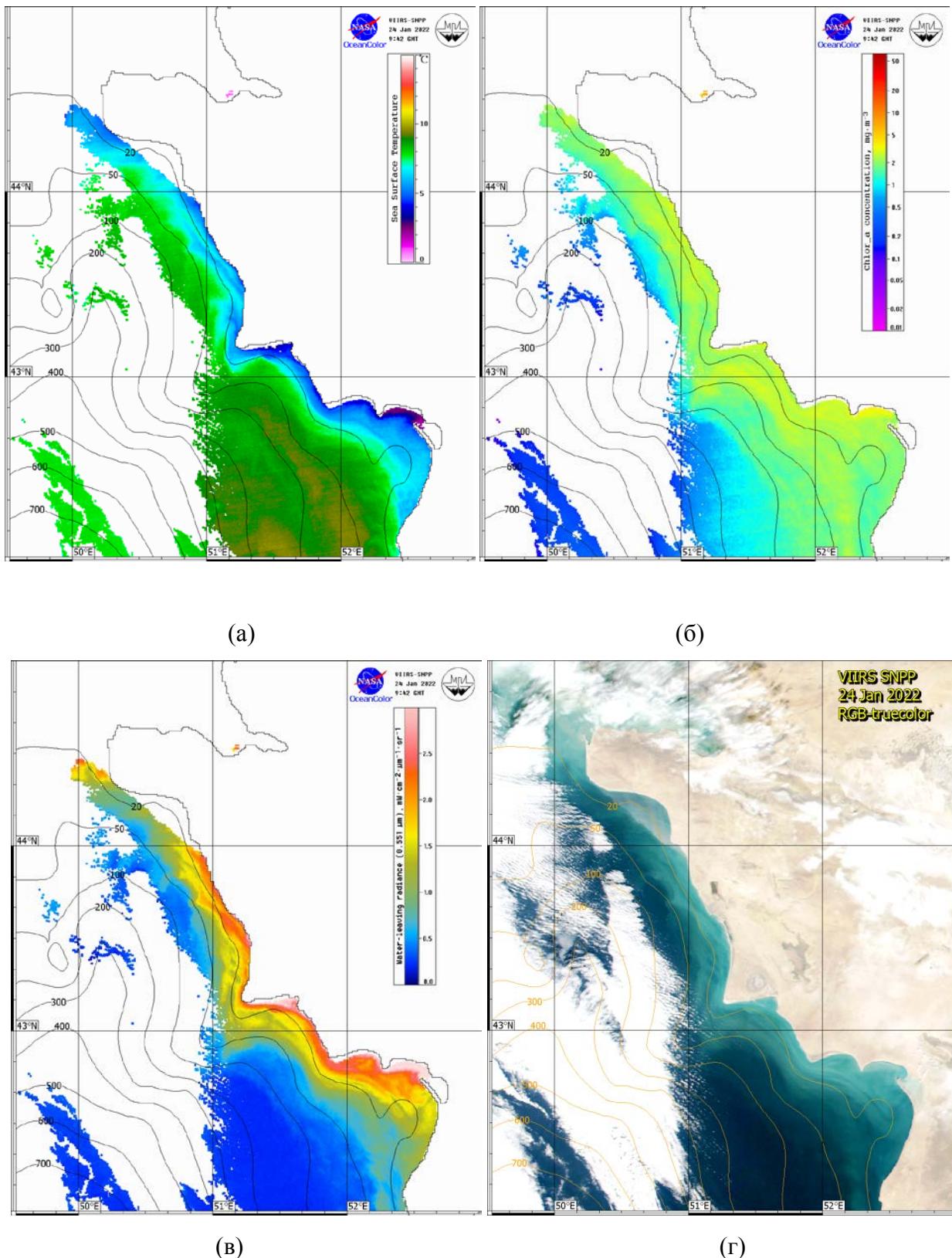


Рис. 5. Карты ТПМ ( $^{\circ}$ С) (а), концентрации Хл-а (мг/м<sup>3</sup>) (б), взвеси (в) и оптическое изображение (комбинация RGB каналов) (г) 24 января 2022 г.

**Благодарности:** А.И. Гинзбург и Н.А. Шеремет выполнили данное исследование (анализ пространственного распределения ТПМ и оптических параметров) в рамках темы Госбюджета № FMWE-2024-0016 «Разномасштабные гидрофизические процессы в Мировом океане и его пограничных слоях: их исследование методами оперативной океанографии, судовых наблюдений, дистанционного зондирования, теоретического, численного и лабораторного моделирования». Работа Соловьева Д.М (обработка спутниковых данных для картирования температуры поверхности моря, концентрации хлорофилла-а и восходящей радиации) выполнена в рамках темы госзадания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0012 «Анализ, диагноз и оперативный прогноз состояния гидрофизических и гидрохимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных методов измерений» (шифр «Оперативная океанология»). А.Г. Костяной исследовал мезомасштабную динамику вод в прибрежной зоне Среднего Каспия при поддержке гранта РНФ N 23-77-00027 «Исследование климатической изменчивости термогидродинамического режима Каспийского моря по данным дистанционного зондирования» (2023-2026), <https://rscf.ru/project/23-77-00027/>.

**Ключевые слова:** Каспийское море, восточное побережье Среднего Каспия, сезонный прибрежный апвеллинг, температура поверхности моря, концентрация хлорофилла-а, взвешенное вещество, сезонная изменчивость

## Литература

1. Мордасова Н.В. Косвенная оценка продуктивности вод по содержанию хлорофилла // Труды ВНИРО. 2014. Т. 152. С. 41–56.
2. Востоков С.В., Долгова А.О., Сивкович А.Е. Мониторинг пространственно-временной изменчивости фитопланктона на акватории Каспийского моря по данным спутникового зондирования // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2006. С. 60–67.
3. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.:ИКИ РАН, 2011. 471 с.
4. Nezlin N.P. Patterns of seasonal and interannual variability of remotely sensed chlorophyll // In: A.G. Kostianoy, A.N. Kosarev (eds.), The Caspian Sea Environment. Hdb. Env. Chemistry, 5(P), 143–157. DOI:10.1007/698\_5\_007
5. Копелевич О.В., Салинг И.В., Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Карапли П.Г., Юшманова А.В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. // М.: ООО «ВАШ ФОРМАТ», 2018. 140 с.
6. Бондаренко А.И. Сезонные изменения концентрации хлорофилла «А» в Среднем Каспии в 1976 г. // Океанология. 1981. Т. XXI. Вып. 4. С. 691–698.
7. Кравчишина М.Д., Леин А.Ю., Паутова Л.А.. Клювяткин А.А., Политова Н.В., Новигатский А.Н., Силкин В.А. Вертикальное распределение взвешенных частиц в Каспийском море в начале лета // Океанология. 2016. Т. 56. № 6. С. 901–918.
8. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A., Kurbaniyazov A.K., Kurbaniyazov N.K., Zhangozhayeva E.T. Interannual and seasonal variability of the Caspian coastal upwelling offshore Aktau (Kazakhstan) // Pure and Applied Geophysics. 2024. Р. 1–17. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03626-6>