

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ БИООПТИЧЕСКИХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ЗОНЕ АПВЕЛЛИНГА У ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Д.В.Хлебников, А.Ю.Иванов, к.ф.-м.н., М.А.Жукова, к.ф.-м.н., С.К.Клименко
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

INVESTIGATION OF SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF BIOOPTICAL AND TEMPERATURE FIELDS IN THE UPWELLING ZONE AT THE EASTERN COAST OF THE CASPIAN SEA BASED ON REMOTE SENSING DATA

D.V.Khlebnikov, A.Yu.Ivanov, Cand.Sc., M.A.Zhukova, Cand.Sc., S.K.Klimenko
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

С помощью данных дистанционного зондирования (оптических и инфракрасных) и сопутствующих контактных и модельных данных исследуются особенности апвеллинга, возникающего у восточного побережья Каспийского моря. Установлен сезонный характер апвеллинга; наиболее интенсивно он проявляется в июне-июле. Данные ДЗЗ в оптическом и инфракрасном диапазоне позволили уточнить его пространственные размеры, временные масштабы, характерные значения концентрации хлорофилла а в его ядре и контрасты температур. Показано, что уникальность восточно-каспийского апвеллинга заключается в отсутствии существенного увеличения концентрации хлорофилла а в его зоне по сравнению с другими аналогами, возникающими во внутренних морях, из-за малого содержания биогенов в глубинных водах этой части Каспия.

Using remote sensing data (optical and infrared) and associated contact and model data, the upwelling features that occur near the eastern coast of the Caspian Sea are studied. The seasonal nature of upwelling has been confirmed, it is most intense in June-July. Remote sensing data and images acquired in the optical and infrared ranges made it possible to clarify its spatial dimensions, time frames, characteristic values of the chlorophyll a pigment in its core, and temperature contrasts. It is shown that the uniqueness of the East Caspian upwelling is the absence of a significant increase in chlorophyll a in its zone compared with other upwellings in the internal seas, due to the low content of nutrients in the deep waters of this part of the Caspian Sea.

Значение апвеллинга (поднятия более холодных водных масс с глубины на поверхность) в жизни Мирового океана трудно переоценить [1]. Апвеллинги также возникают во внутренних морях (например, в Балтийском, Черном и Каспийском), где они имеют свою специфику и масштабы, выявленные по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [2-6]. Апвеллинг у восточного берега Каспийского моря является крайне интересным и в то же время недостаточно изученным явлением природы [5,6]. Здесь, как показывают исследования [7-12], он появляется очень часто и имеет специфические черты. Ему присущи следующие уникальные характеристики. Во-первых, пространственные размеры. Часто он простирается с севера на юг вдоль восточного берега Каспия от п-ова Тюб-Караган до г. Туркменбаши (при сильных северных и северо-западных ветрах – до о. Огурчинский) почти на 600 км. Во-вторых, продолжительность процесса: сезонный апвеллинг здесь часто наблюдается с июня по август [8]. В-третьих, в отличие от других известных апвеллингов во внутренних морях, ему обычно присуще не повышение концентрации хлорофилла фитопланктона по сравнению с окружающими районами моря, а понижение, или вообще отсутствие корреляции этого параметра с температурой поднявшихся на поверхность холодных вод.

Основными материалами для исследования апвеллинга в восточной части казахстанского сектора Каспийского моря послужили мультисенсорные данные дистанционного зондирования: оптические и инфракрасные съемки с помощью сенсоров нового поколения (спутники Sentinel-3, SeaHawk, Landsat-8/9). Для их верификации использовались наблюдения на гидрометеопостах, данные ЕСИМО (58 карт ТПМ и ветра) [13] и доступная информация о ветре и температуре поверхности моря (ТПМ) [14,15]. На их основе проведен комплексный анализ, показана специфика

(длительность, повторяемость, масштабы) и уникальность апвеллинга, возникающего у восточного берега Среднего Каспия. Использовался методологический подход, разработанный в [3].

Причины возникновения апвеллинга. Географическое положение Каспийского моря обуславливает зависимость его климата и погоды в основном от трех центров действия атмосферы – азорского, сибирского и полярного максимумов. Основные барические центры, определяющие атмосферную циркуляцию над Каспийским морем летом – гребень азорского максимума и ложбина южно-азиатской депрессии. В теплый период года (апрель – сентябрь) усиливается влияние азорского (атлантического) максимума. То есть, летом часто атлантические воздушные массы через Европу и Черное море достигают средней части Каспия (области высокого давления, отделяемые азорским максимумом, прорываются на Каспий и далее на юго-восток). Таким образом, в северной и средней частях Каспийского моря с мая по сентябрь в основном преобладают ветры северо-западных румбов. Согласно классической теории Экмана при этом возникает уход поверхностных вод в открытое море и подъем на их место более холодных водных масс (экмановский апвеллинг).

Динамика развития апвеллинга восточного берега Каспия. Карты ТПМ Каспийского моря на рис. 1-3 построены на основе данных оперативных спутниковых (NCDC/NOAA) и подспутниковых наблюдений. Карты доступны в Единой государственной системе информации об обстановке в Мировом океане (оперативный модуль ЕСИМО) [13].

Карты ТПМ на рис. 1-3 наглядно показывают общее распределение температуры в Каспийском море, на фоне которого восточно-каспийский апвеллинг проявляется как мезомасштабное явление. Его целостность нарушается Казахским заливом, который глубоко внедряется в сушу в восточном направлении.

Наиболее четко апвеллинг проявляется в данных спутниковой ИК-радиометрии (рис. 4). Из рисунка видно, что фронт апвеллинга в открытом море в некоторой степени повторяет очертания береговой черты, однако его фронт крайне неустойчив и изменчив. Он осложнен многочисленными динамическими особенностями: меандрами, вихревыми и грибовидными структурами, что говорит о том, что холодная вода, поднявшаяся на поверхность, переносится от берега в сторону открытого моря за счет экмановского переноса в поверхностном слое; подобная неустойчивость/изменчивость отмечалось предыдущими исследователями [5,6]. Хотя считается, что подъем вод из подповерхностных слоев к поверхности происходит в узкой прибрежной зоне шириной от 5 до 15 км [9], согласно рис. 4 поперечный масштаб зоны апвеллинга изменялся в более широких пределах: от 10-12 км на севере до 20-22 км (для 8.07.2023) на юге и от 22-23 до 35-37 км (для 1.08.2023). Контрасты ТПМ апвеллинг-открытое море по данным TIRS (Landsat-8) составляют 6-10°C.

На рис. 5 показан ход температуры воды на поверхности моря, измеренной на гидрометеопосту г. Актау, в июне и июле 2023 г. На нем четко видны фазы понижения ТПМ или фазы периодического развития/возобновления апвеллинга; как участки понижения температуры с периодом 2-3 – 6-10 дней. Из рис. 5 также видно, что минимальная ТПМ в июне была 14.4°C, максимальная – 20.9°C, в июле – 15.1°C и 21.7°C соответственно; перепад 6.5-6.6°C. Вполне очевидно, что фазы апвеллинга (понижения ТПМ) коррелируют с ветром (рис. 1, 3).

Связь концентрации хлорофилла фитопланктона и апвеллинга восточного Каспия. Исследователи ранее неоднократно обращали внимание на одно из отличий апвеллинга восточного берега Каспия – отсутствие повышенной концентрации хлорофилла фитопланктона по сравнению с другими известными апвеллингами, в том числе, например, апвеллингами Черного моря или апвеллингом у западного берега Каспия. Это может быть связано с несколькими факторами:

а) Известно, что в Каспийское море впадает более 130 рек. Волга, Урал, Эмба, Терек (суммарный годовой сток 88% всего речного стока в море) впадают в северную часть моря. На западном побережье реки Сулак, Самур, Кура и др., более мелкие, дают 7% общего стока. Остальные 5% стока поставляют реки иранского побережья. В то же время сток рек на восточном побережье Каспия практически отсутствует, т.е. здесь нет притока необходимых для развития фитопланктона биогенных элементов.

б) Восточно-каспийский апвеллинг может длиться несколько месяцев, и имевшиеся в его начальной фазе биогенные элементы выедаются фитопланктоном на начальном этапе, а поступление новых ограничено из-за особенностей гидрологии и географии этой акватории.

в) У восточного берега Казахстана дно между изобатами 20 и 50 м_г фактически образует подводную полку, в результате чего доступ биогенов к верхним горизонтам затруднен.

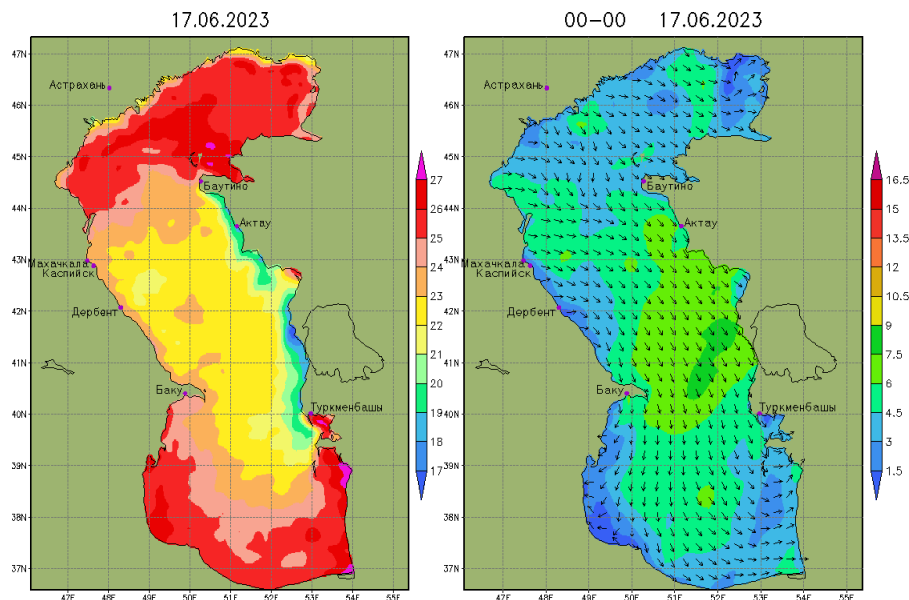


Рис. 1. ТПМ Каспия в °С м (слева) и скорость ветра в м/с (справа) на 17.06.23, ЕСИМО [13]

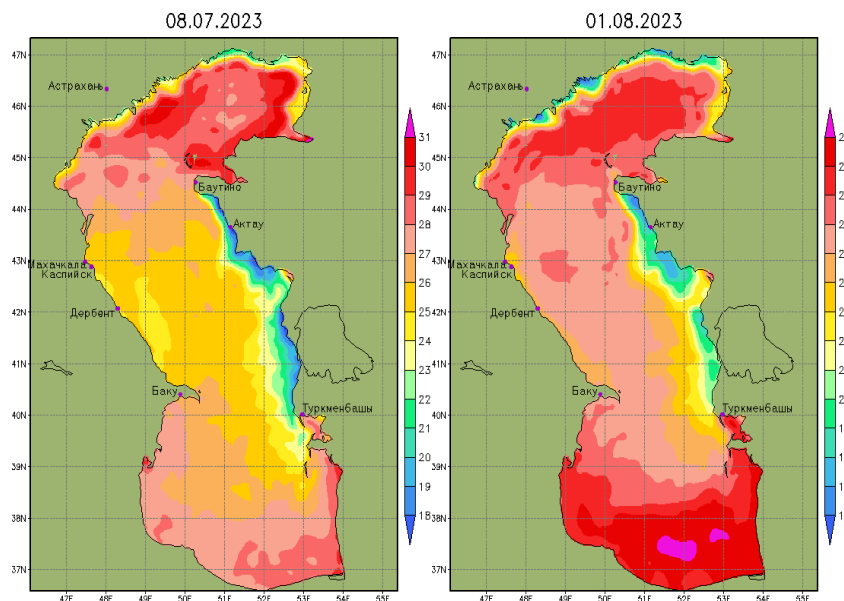


Рис. 2. ТПМ Каспия в °С на 08.07.23 (слева) и на 1.08.23 (справа) по данным ЕСИМО [13]

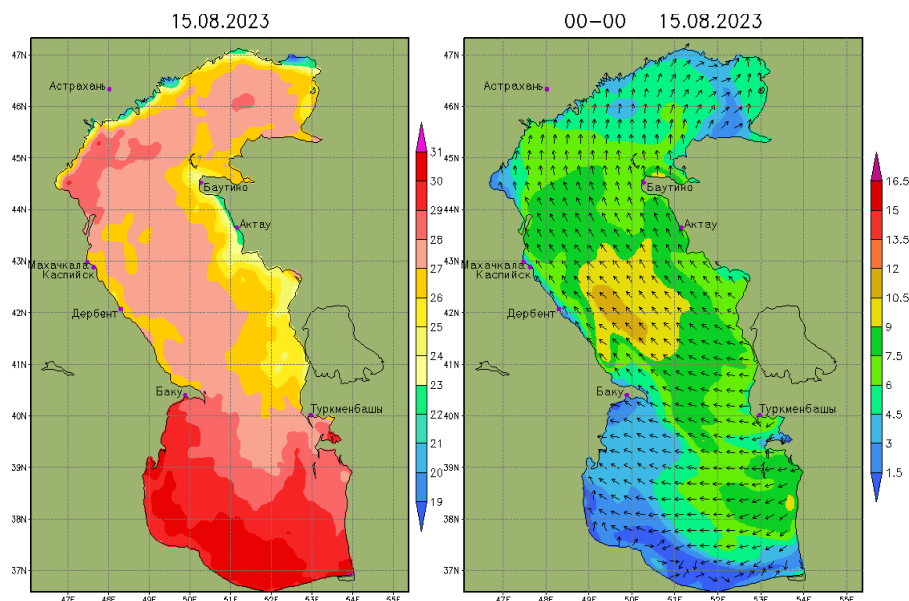


Рис. 3. ТПМ Каспия в °С (слева) и скорость ветра в м/с (справа) на 15.08.23, ЕСИМО [13]

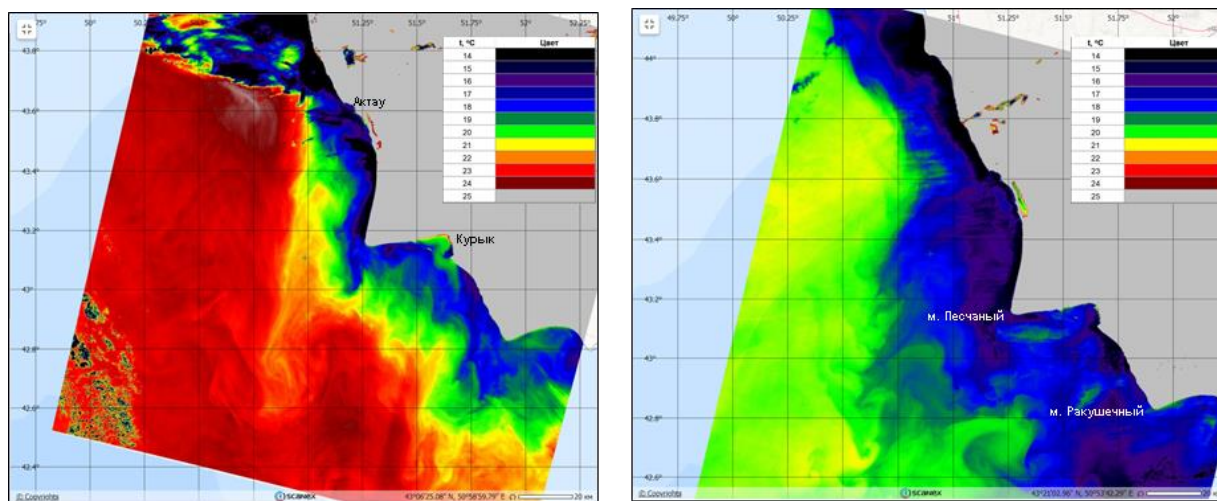


Рис. 4. Карты ТПМ по данным ИК-радиометра TIRS с пространственным разрешением ~100 м, установленном на ИСЗ Landsat-8: 8.07.2023 (слева) и 1.08.2023 (справа)

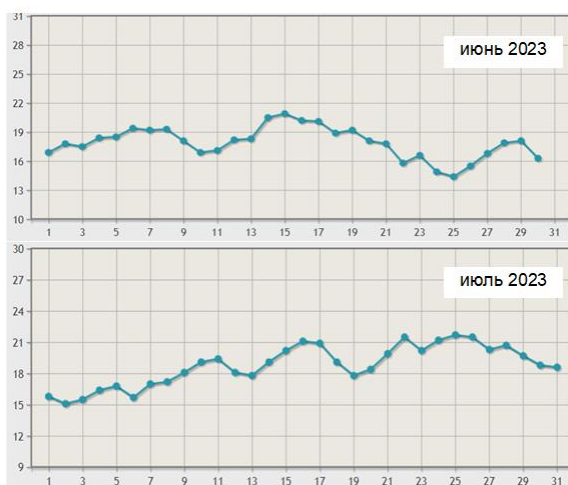


Рис. 5. Температура воды на поверхности моря, измеренная на гидрометеопосту г. Актау [15]

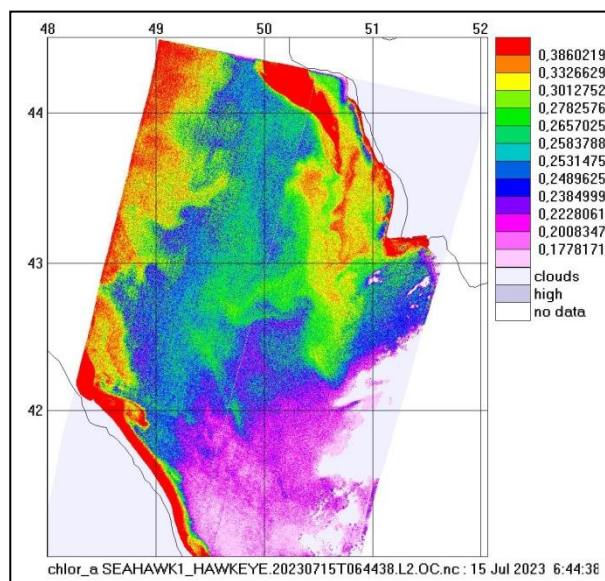


Рис. 6. Распределение $chlora$ (в mg/m^3) в Среднем Каспии по данным спутника SeaHawk (сканер HawkEye) от 15.07.2023 с пространственным разрешением 120 м

На снимке со спутника SeaHawk от 15.07.23 (рис. 6), в то время, когда восточный апвеллинг близился к максимуму, значения концентрации пигмента хлорофилла а ($chlora$) фитопланктона по сравнению с окружающими районами Каспия были малы. Это характерно для апвеллинга у восточного берега Каспия и в общем согласуется с данными предыдущих исследований [5,6]. Что касается зоны повышенного содержания $chlora$ в верхней части рисунка, то это, возможно, заток воды с повышенным содержанием $chlora$ из Северного Каспия, как часть противотечения, направленного на юг, в отличие от основной циркуляции поверхностных вод Каспия, которые имеют циклоническую направленность; это, по-видимому, является особенностью циркуляции в летнее время.

В результате анализа оптических данных установлено, что значения $chlora$ у восточного берега изменялись в диапазоне от 2-3 mg/m^3 в узкой прибрежной полосе шириной в (несколько км; она ограничена изобатами 10-15 м) и до 1 mg/m^3 и меньше мористее и в открытом море. В изолированных прибрежных заливах $chlora$ может достигать 10-15 mg/m^3 (например, в изолированных заливах Курык, Кендерли и др.). Сканеры цвета моря (OLCI и HawkEye) подтвердили крайне низкие значения $chlora$ в зоне восточно-каспийского апвеллинга (рис. 6, 7).

Заключение

1) Апвеллинг у восточного берега Каспия носит сезонный характер, может существовать почти 2-3 месяца, обычно в июне-июле, и разбивается на две зоны с максимальными градиентами ТПМ (у г. Актау и зал. Кара-Богаз-Гол). Фактически во времени восточно-каспийский апвеллинг, обусловленный северо-западным переносом, разбивается на несколько фаз (от 6 до 9). Понижение температуры воды во время развития очередной фазы апвеллинга приводит к соответствующим оптическим и температурным сигнатурам в данных дистанционного зондирования.

2) Пространственные поперечные масштабы апвеллинга локальны: (хотя поперечный масштаб зоны апвеллинга варьирует в пределах от 10-12 км до 35-37 км), однако географически он протягивается на значительное расстояние вдоль побережья от г. Форт-Шевченко до г. Туркменбаши (~600 км). Характерная пространственно-временная изменчивость апвеллинга у восточного побережья Каспийского моря обусловлена в первую очередь изменчивостью ветровых условий, а затем особенностями береговой линии и локальной циркуляции вод

3) Уникальность восточно-каспийского апвеллинга заключается в отсутствии значительного увеличения концентрации хлорофилла а фитопланктона в его зоне при контрастах температуры на

поверхности в 6-10°C (значения в 2-3 мг/м³ наблюдались только в узкой прибрежной полосе ~1-2 км), из-за указанных выше факторов

4) Оптические и инфракрасные данные дистанционного зондирования позволяют отследить и охарактеризовать пространственно-временную изменчивость восточно-каспийского апвеллинга качественно и количественно.

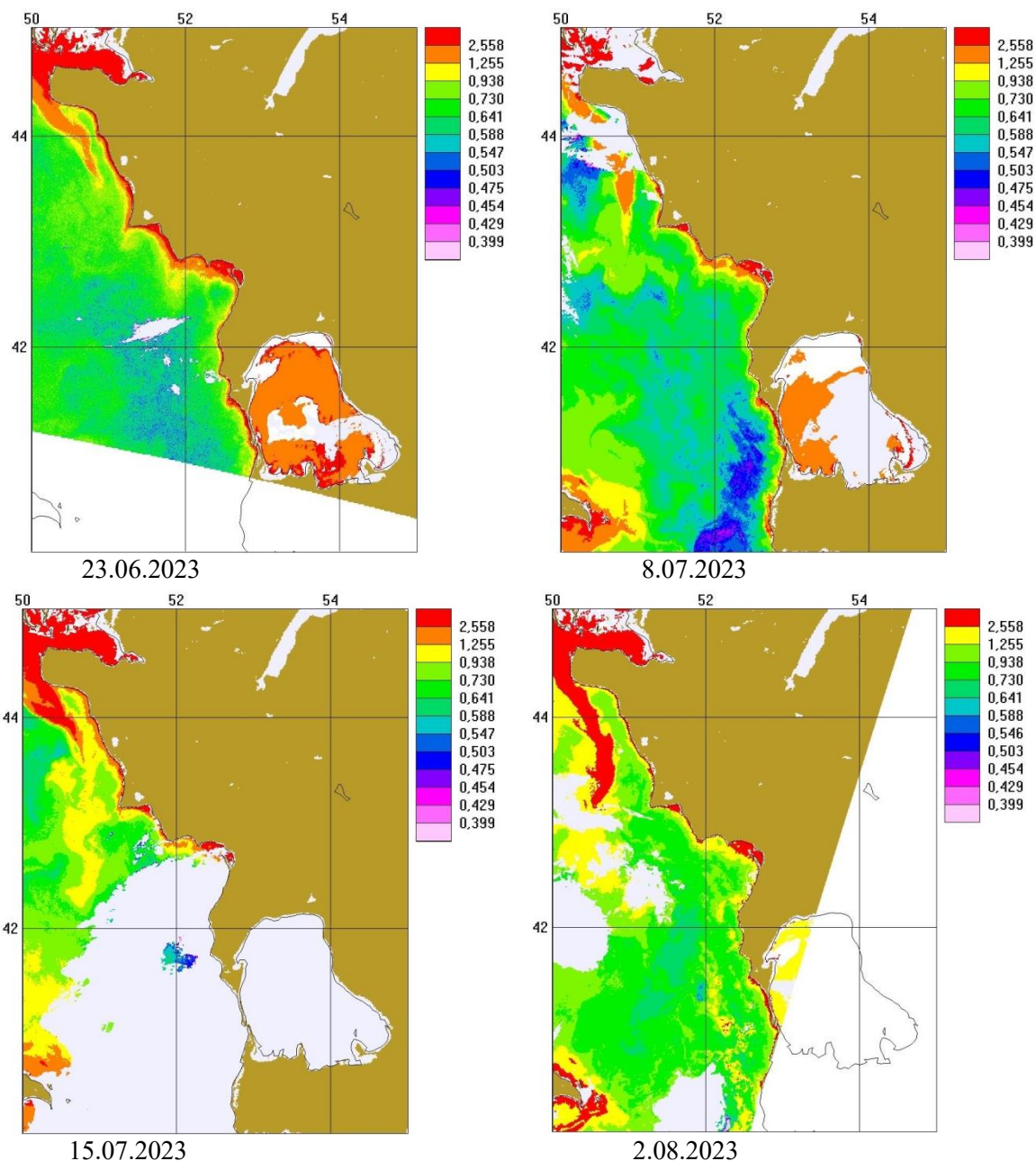


Рис. 7. Карты $chlora$ (в мг/м³), построенные по данным спектрорадиометра OLCI (Sentinel-3A/3B). Хорошо видна узкая полоса повышенных значений хлорофилла a у восточного побережья от г. Форт-Шевченко до г. Туркменбаши.

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

Литература

1. Fischer W.E., Green A.B. (Eds.). Upwelling: Mechanisms, Ecological Effects and Treats to Biodiversity. N.Y.: Nova Science Publ. Inc. 2013.
2. Станичная Р.Р., Станичный С.В. Апвеллинги Черного моря // Соврем. проблемы дист. зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 195-207.
3. Хлебников Д.В., Иванов А.Ю., Евдошенко М.И., Клименко С.К. Проявление апвеллингов в Черном море в данных мультисенсорного дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 6 (в печати).
4. 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.
5. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Шеремет Н.А. Фронтальная зона апвеллинга у восточного побережья Каспийского моря (спутниковые наблюдения) // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 4. С. 3-12.
6. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А. Динамика зоны апвеллинга у восточного побережья Каспия в сезонном цикле (май-сентябрь) по спутниковым среднемноголетним температурным данным (2003–2019) // Соврем. проблемы дист. зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 215–226.
7. Косарев А.Н. Структура вод и условия формирования биологической продуктивности Среднего и Южного Каспия // Водные ресурсы. 1980. № 3. С. 26-36.
8. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 6. Каспийское море. Вып. 1. / Под ред. Ф.С. Терзиева, А.Н. Косарева, А.А. Керимова. СПб.: Гидрометеониздат, 1992. С. 358-359.
9. Архипкин В.С. Гидрология прибрежного апвеллинга Черного и Каспийского морей. Автореф. дис. канд. геогр. наук. МГУ им. М.В. Ломоносова. М.: 1996.
10. Ивкина Н.И., Соколова Л.М., Кожахметова Л.К. Режим температуры воды в районе порта Актау // Гидрометеорология и экология. 2006. № 2. С. 58-65.
11. Ивкина Н.И. Особенности прибрежного апвеллинга в восточной части Среднего Каспия // Гидрометеорология и экология. 2012. № 2. С. 81-88.
12. Елтай А.Ф., Ивкина Н.И., Нарбаева К.Т. Явление апвеллинга у казахстанского побережья Каспия // Гидрометеорология и экология. 2019. № 3. С. 17–25.
13. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО). http://hmc.meteorf.ru/sea/casp/sst/sst_casp.html
14. Подспутниковые данные (ветер): <https://earth.nullschool.net>
15. Измерения температуры воды у берега: <https://www.inaktau.kz/p/temperatura-vody-v-kaspiyskom-more>, https://pogoda.turtella.ru/caspian_sea/sea_temperature