

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ
И БИООПТИЧЕСКИХ 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

Введение

- ❖ 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_a в его ядре и контрасты температур (6-10°С). Показано, что уникальность восточно-каспийского апвеллинга заключается в отсутствии существенного увеличения концентрации хлорофилла_a в его зоне по сравнению с другими аналогами, возникающими во внутренних морях, из-за малого содержания биогенов в глубинных водах этой части Каспия.

Особенности апвеллинга восточного берега Каспийского моря

- ❖ 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.
- ❖ 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.

Причины возникновения апвеллинга и методы исследования

- ❖ 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).
- ❖ Для анализа апвеллинга использовались ИСЗ: Sentinel-3 и Landsat-8/9. Для их верификации применялись наблюдения на гидрометеопостах и данные ЕСИМО (58 карт ТПМ и ветра) .

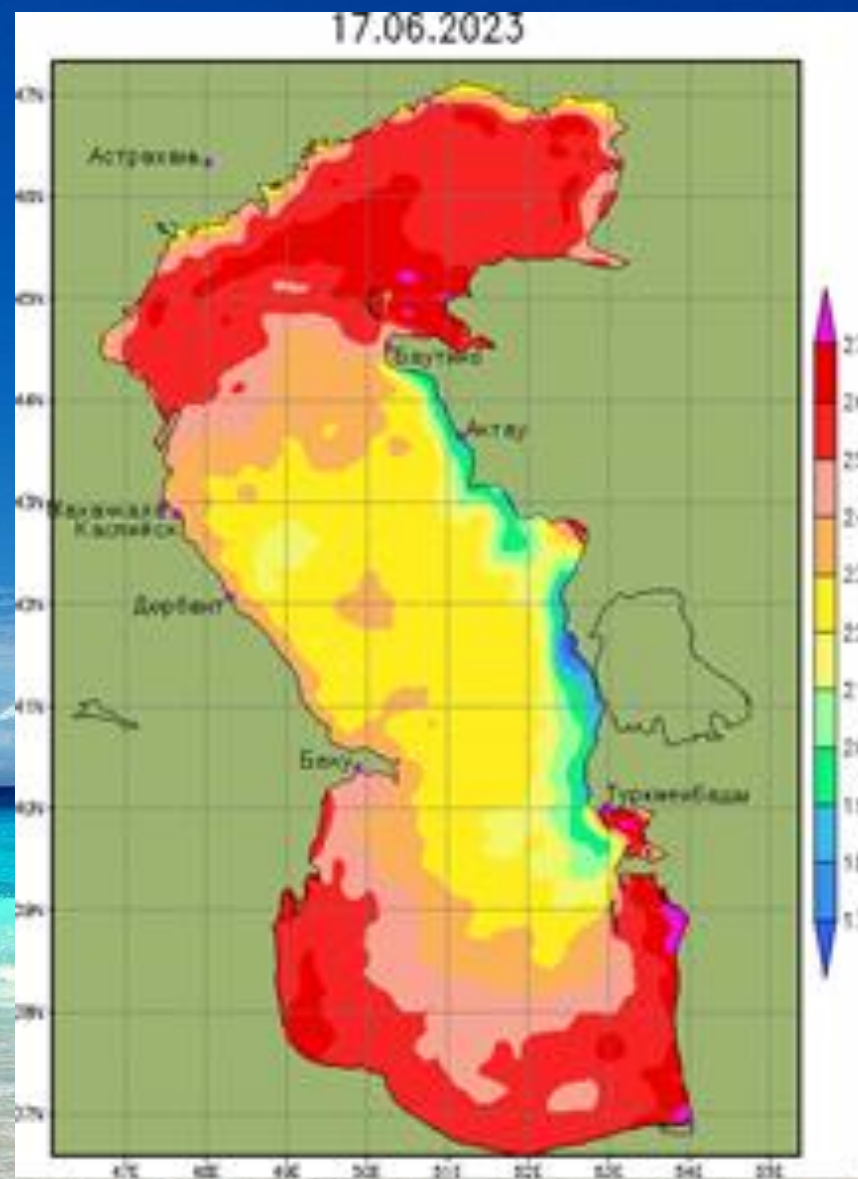
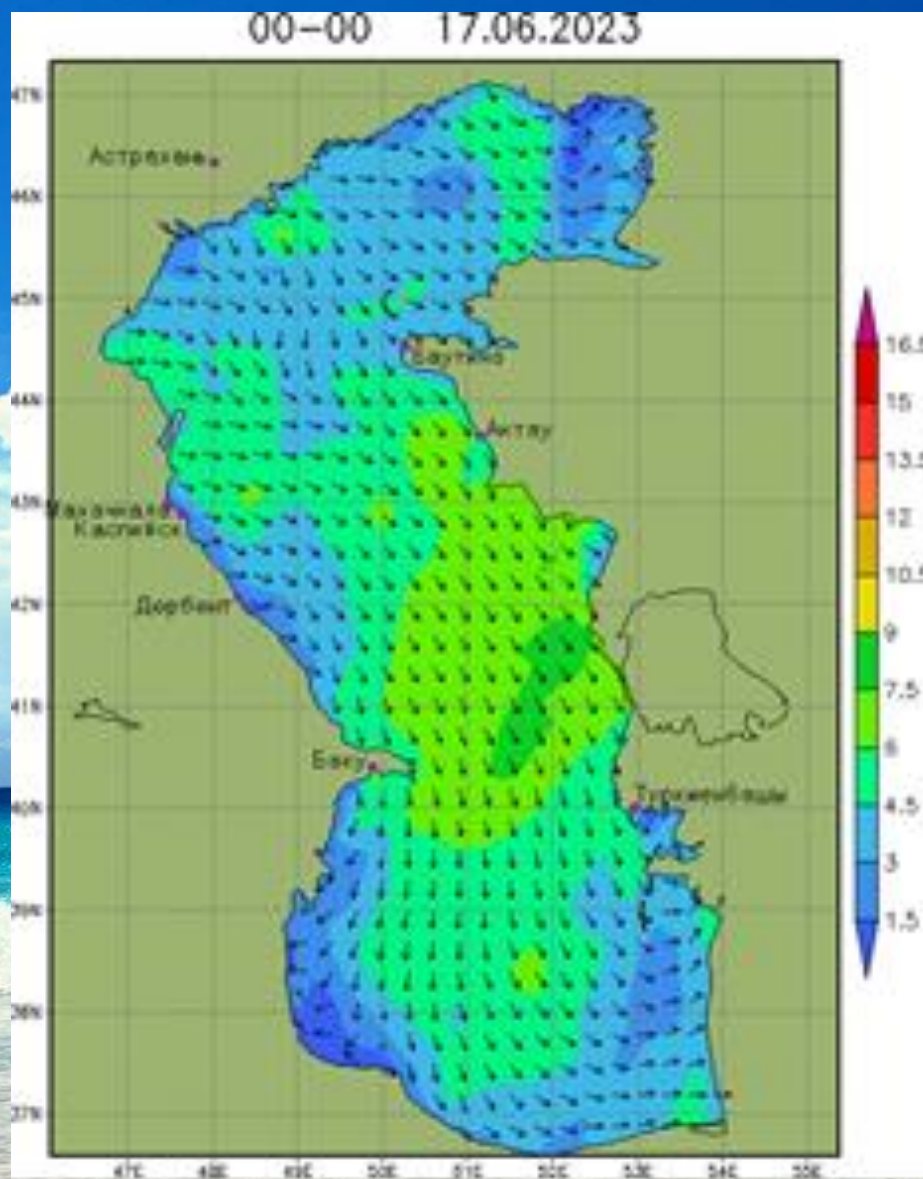


Рис. 1. Скорость ветра в м/с (слева) и ТПМ Каспия в °С (справа) на 17.06.23, ЕСИМО [13]

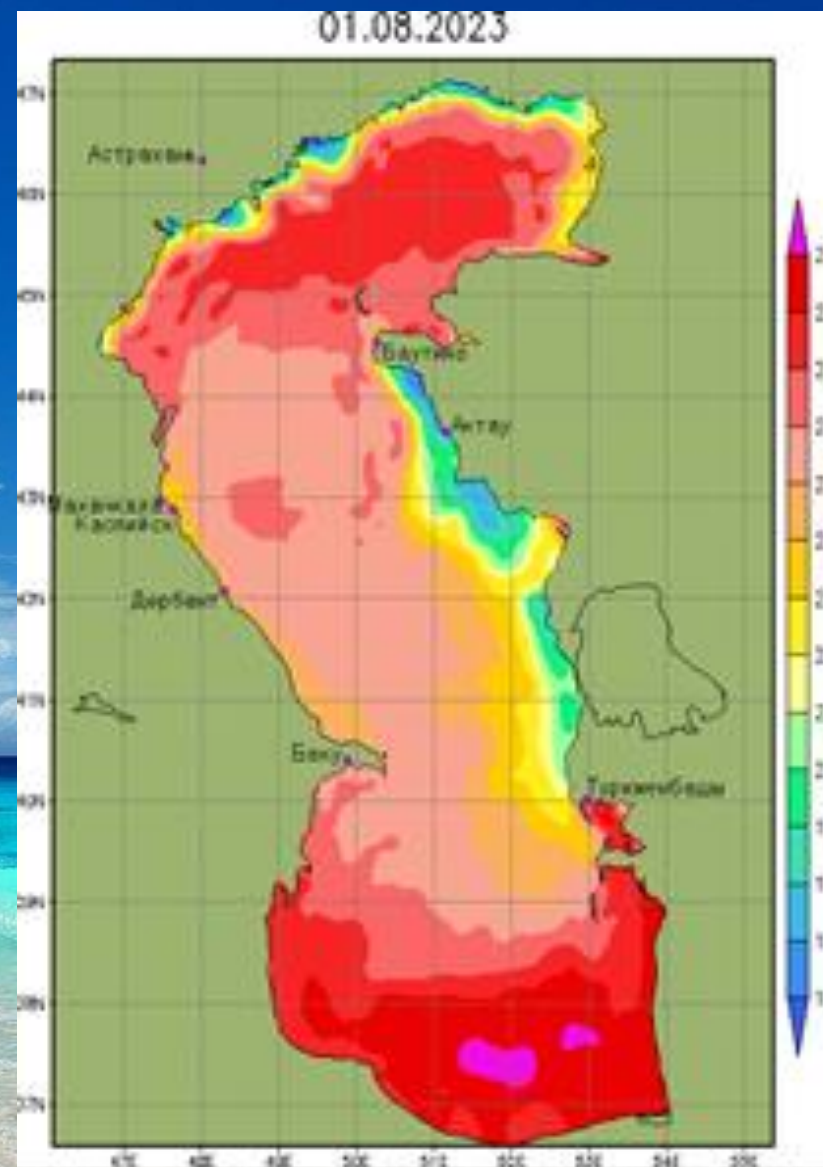
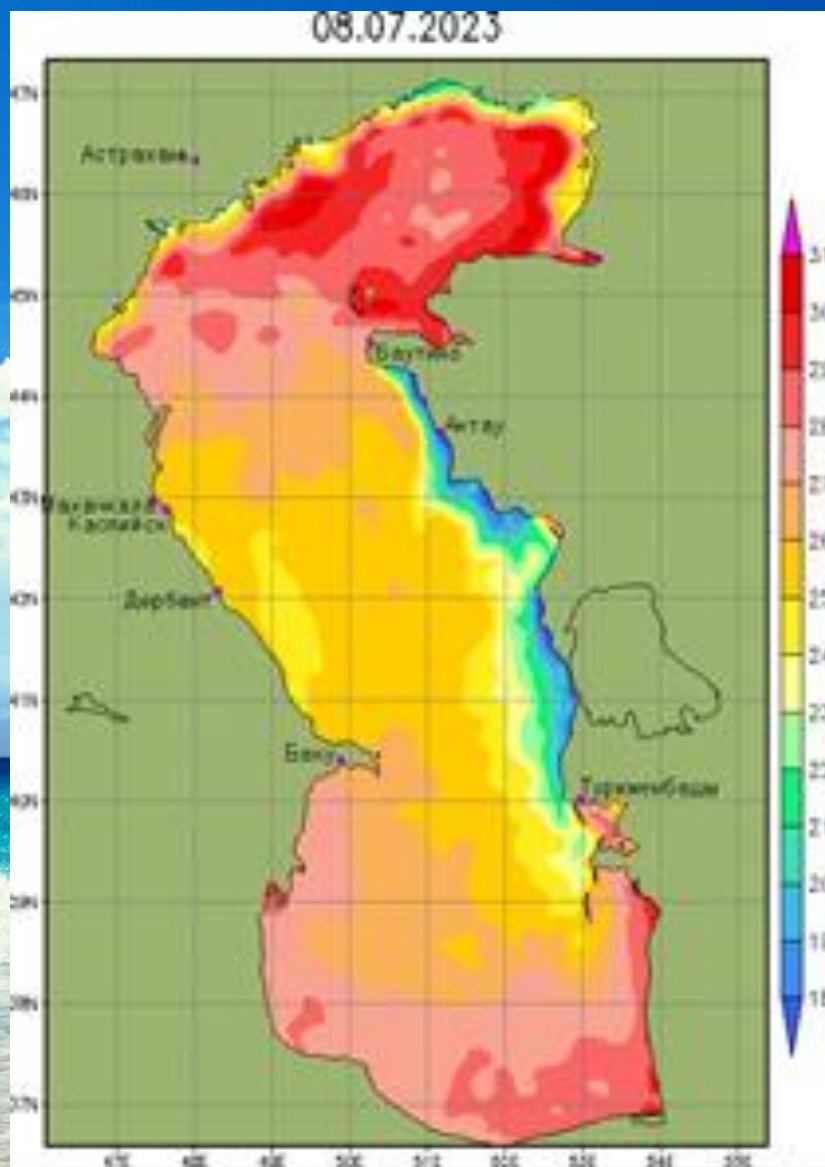


Рис. 2. ТПМ Каспия в °С на 08.07.23 (слева) и на 1.08.23 (справа) по данным ЕСИМО.

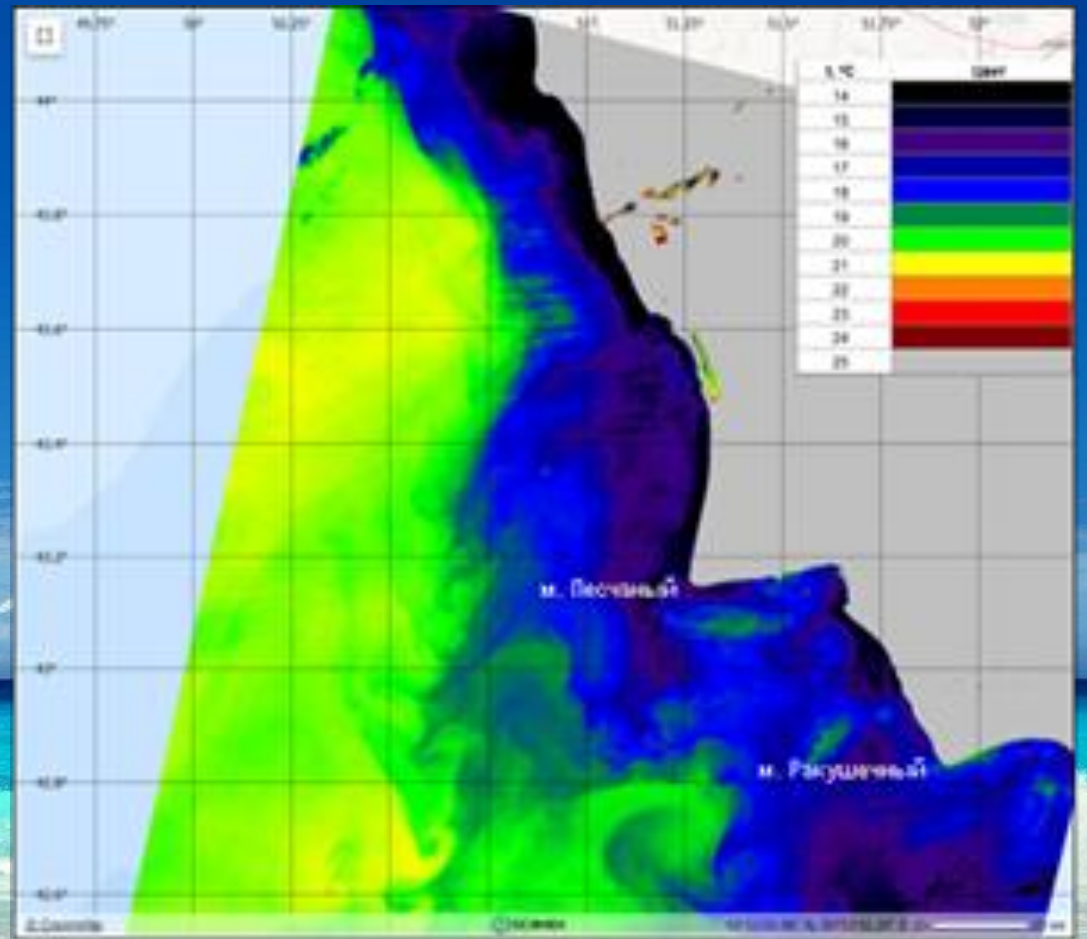
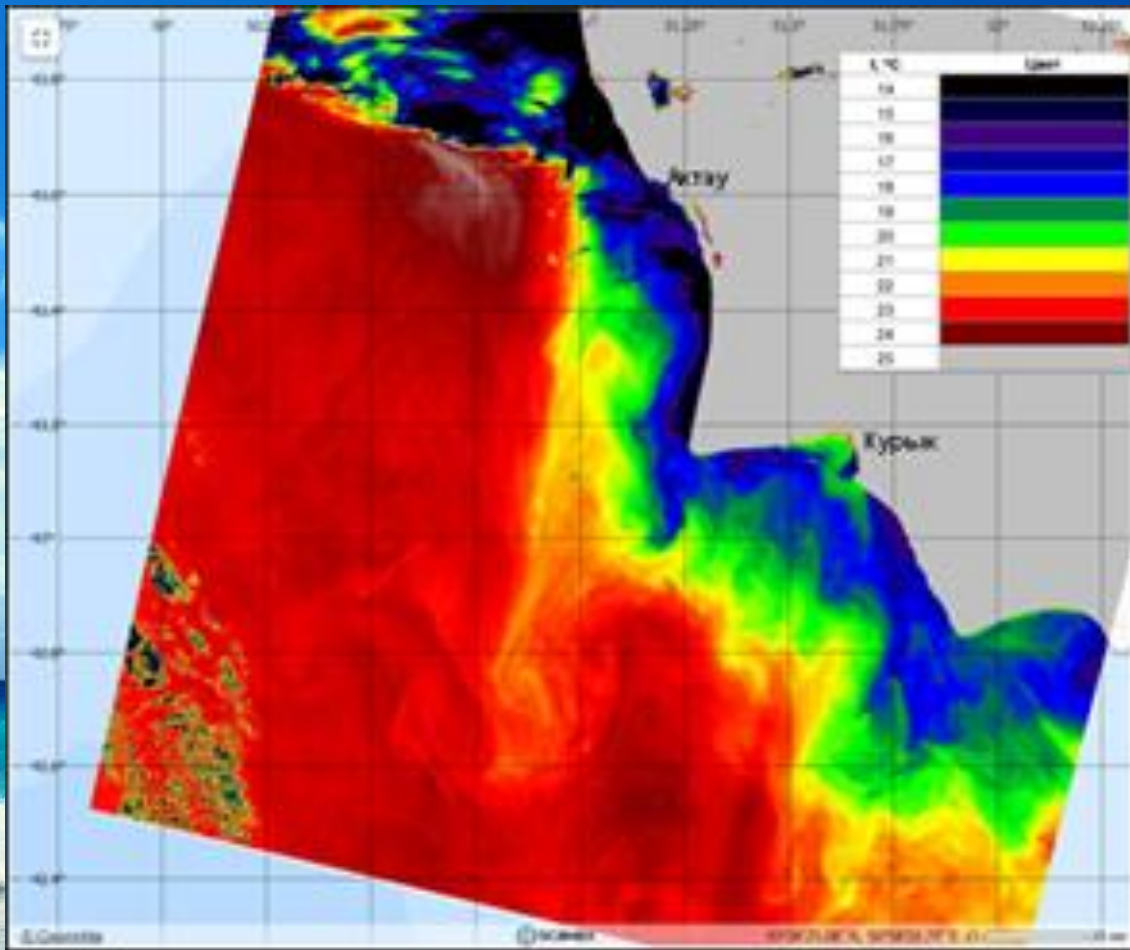


Рис. 4. Карты ТПМ по данным ИК-радиометра TIRS с пространственным разрешением ~ 100 м: 8.07.2023 (слева) и 1.08.2023 (справа)

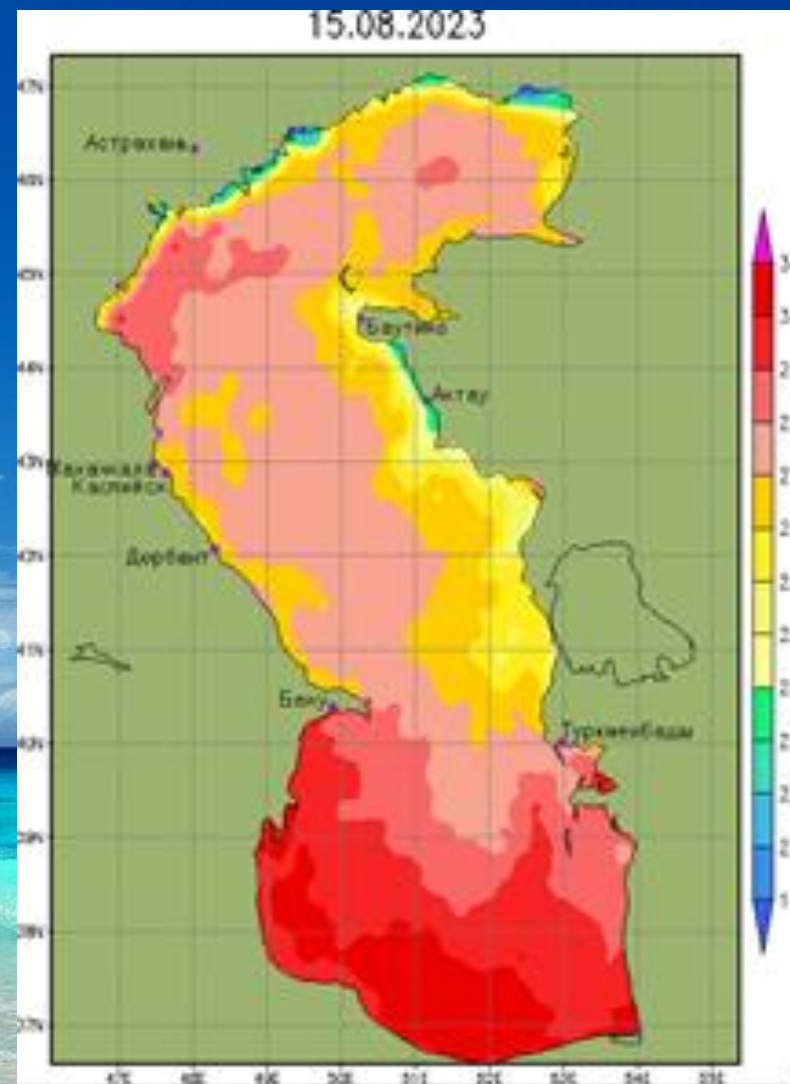
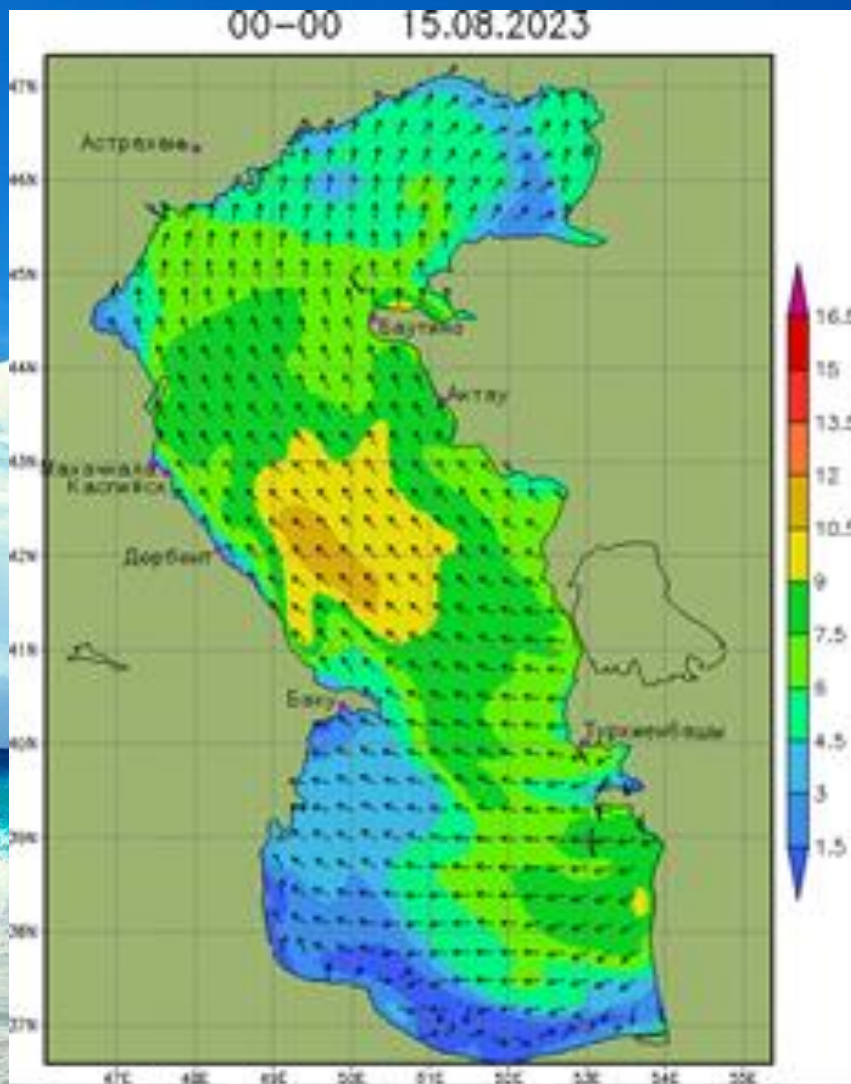


Рис. 3. Скорость ветра в м/с (слева) и ТПМ Каспия в °С (справа) на 15.08.23, ЕСИМО.

Динамика развития апвеллинга восточного берега Каспия

- ❖ Обобщенные карты ТПМ (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. Однако наиболее детально апвеллинг проявляется в данных спутниковой ИК-радиометрии, например, в данных ИК-радиометра TIRS на ИСЗ Landsat-8/9 (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. Хотя считается, что подъем вод из подповерхностных слоев к поверхности происходит в узкой прибрежной зоне шириной от 5 до 15 км, согласно рис. 4 поперечный масштаб зоны апвеллинга варьировал 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 °С.

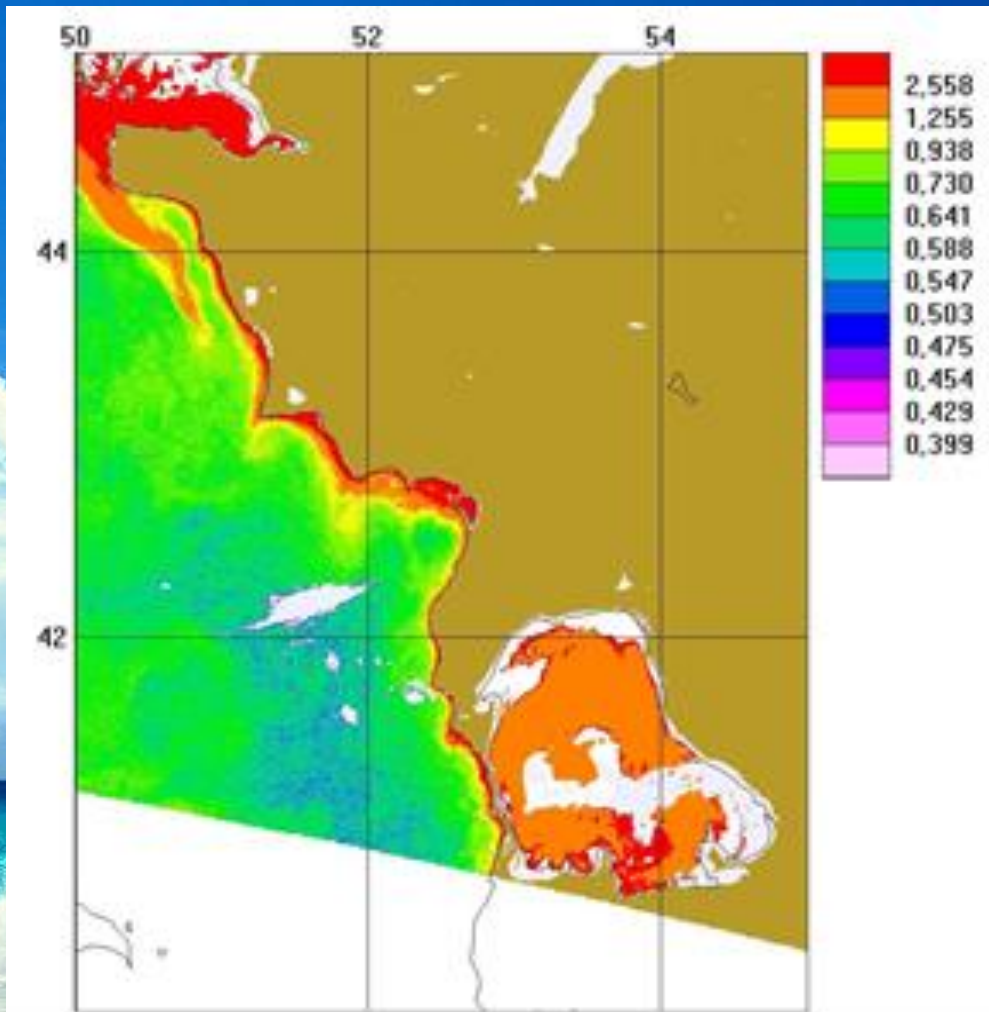


Рис. 5. Температура воды на поверхности моря, измеренная на гидрометеопосту г. Актау.

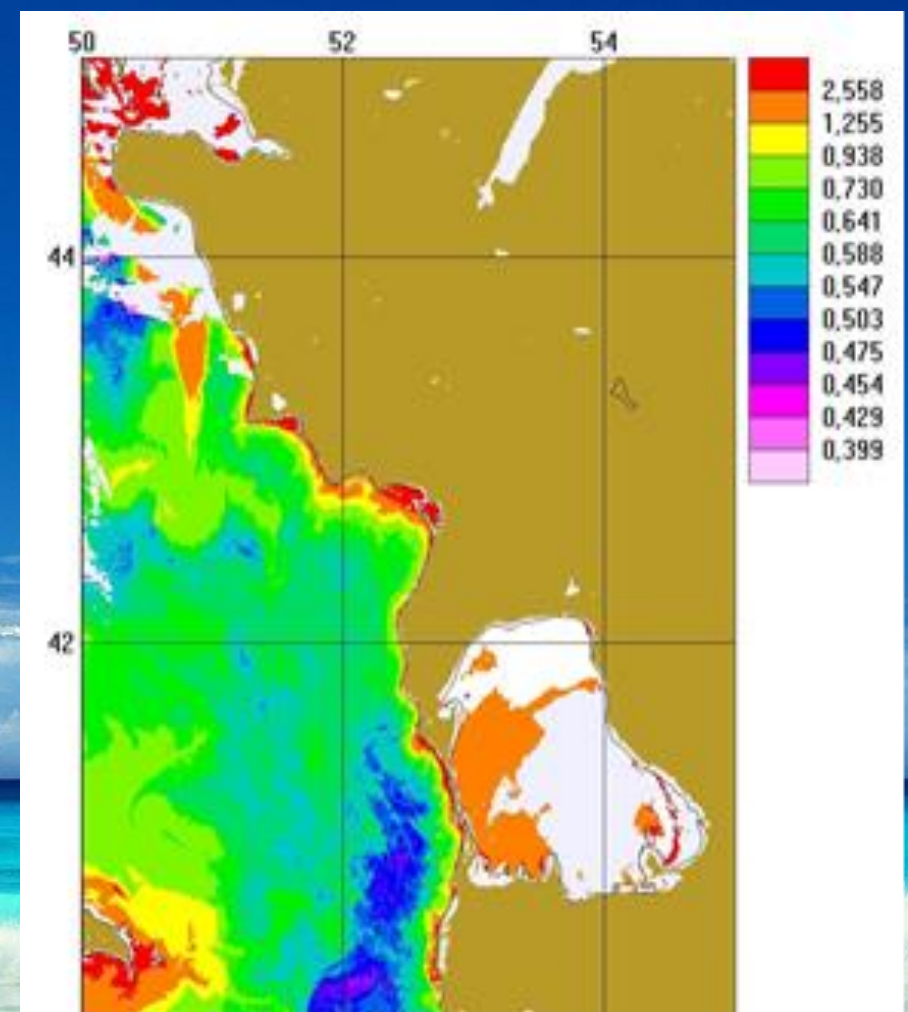
На рис. 5 показан ход температуры воды на поверхности моря, измеренной на гидрометеопосту г. Актау, в июне и июле 2023 г. На нем четко прослеживаются фазы понижения ТПМ или фазы периодического развития/возобновления апвеллинга как участки понижения температуры с периодом 2-3 – 6-10 дней. Из рис. 5 также 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).

Возможные причины низкой концентрации хлорофилла фитопланктона в апвеллинге 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 фактически образует подводную полку, в результате чего доступ биогенов к верхним горизонтам затруднен.

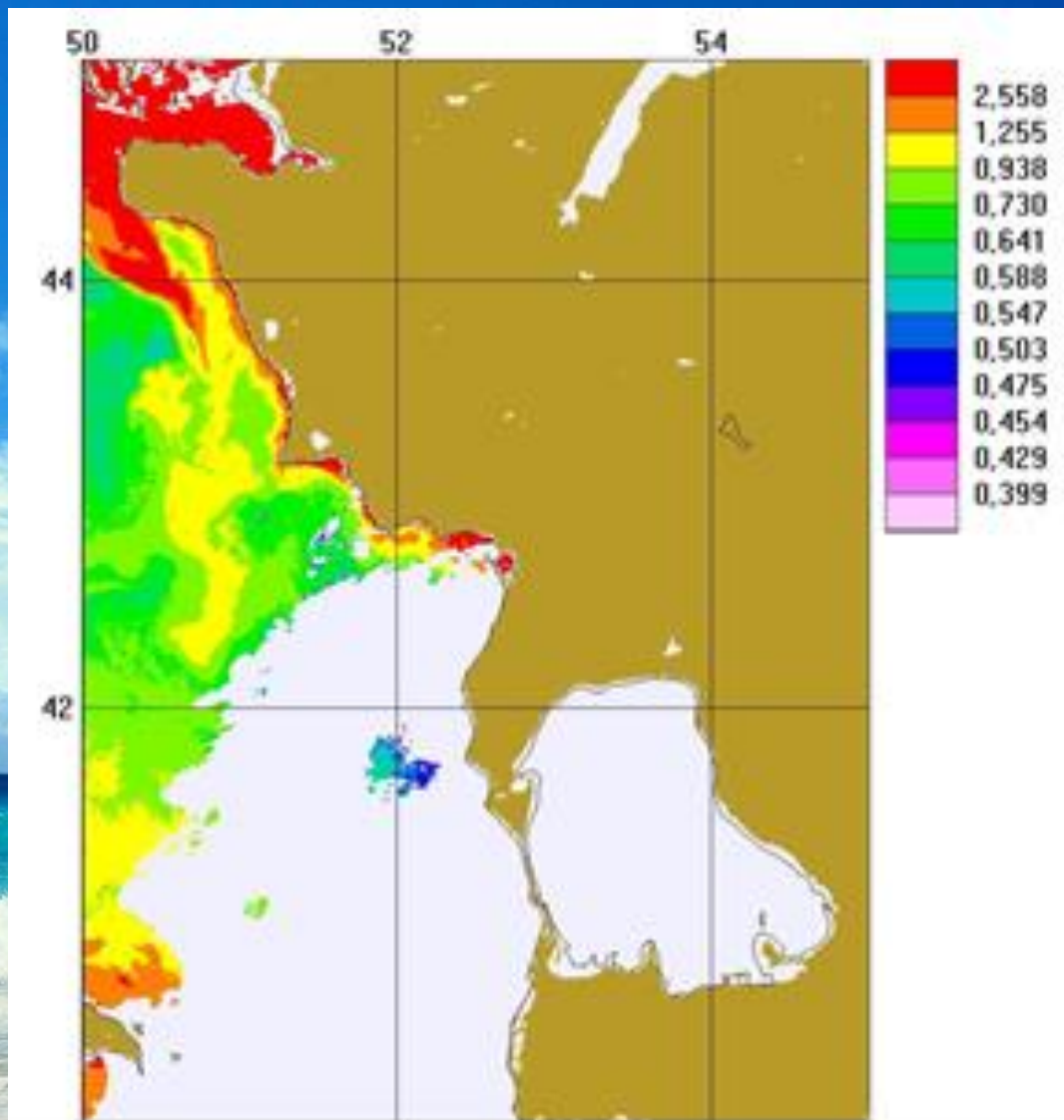


23.06.2023

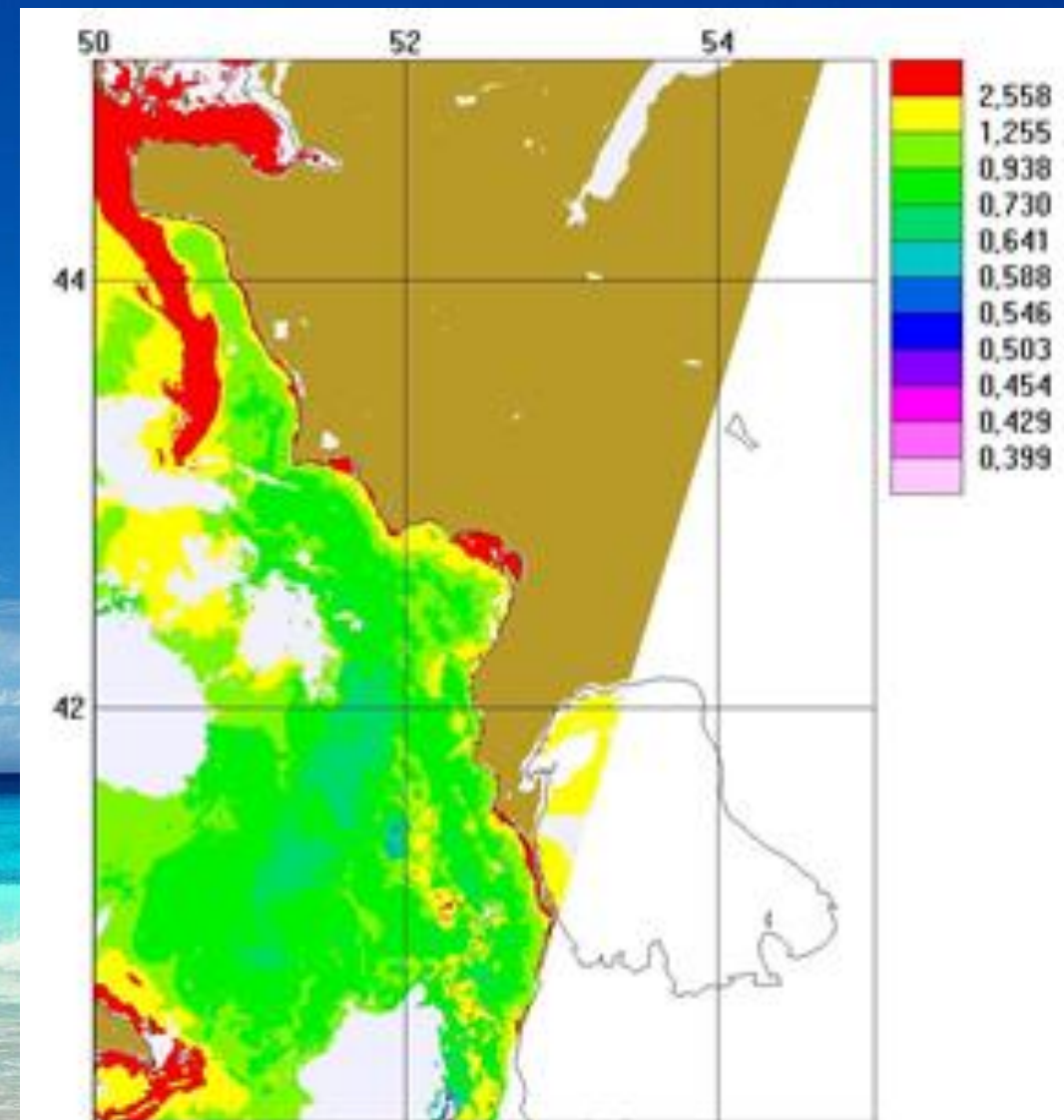


8.07.2023

Рис. 6а. Карты chlor_a (в мг/м³), построенные по данным спектрорадиометра OLCI (Sentinel-3A/3B) с пространственным разрешением ~300 м. Хорошо видна крайне узкая полоса повышенных значений хлорофилла у восточного побережья от г. Форт-Шевченко до г. Туркменбаши



15.07.2023



2.08.2023

Рис. 6б. Карты chlor_a (в мг/м³), построенные по данным спектрорадиометра OLCI (Sentinel-3A/3B) с разрешением ~300 м.

Изменчивость концентрации хлорофилла фитопланктона в апвеллинге восточного Каспия

- ❖ На картах значений концентрации пигмента хлорофилла-а (chl_{or_a}) фитопланктона (рис. 6) видно, что восточный апвеллинг, по сравнению с окружающими акваториями Каспия, характеризуется малыми значениями chl_{or_a} . Это характерно для апвеллинга у восточного берега Каспия и, в общем, согласуется с данными предыдущих исследований [5,6]. Что касается зоны повышенного содержания chl_{or_a} в верхних частях рисунков, то это, как представляется, заток воды с большим содержанием chl_{or_a} из Северного Каспия, как часть противотечения, направленного на юг, в отличие от основной циркуляции поверхностных вод Каспия, которые имеют циклоническую направленность.
- ❖ В результате анализа оптических данных (MODIS, VIIRS, OLCI и HawkEye) установлено, что значения chl_{or_a} у восточного берега изменялись в диапазоне от 2-3 мг/м³ в узкой прибрежной полосе шириной в несколько км (она ограничена изобатами 10-15 м) и меньше 1 мг/м³ мористее и в открытом море. В прибрежных изолированных заливах таких, как Курык, Кендерли и др., chl_{or_a} может достигать 10-15 мг/м³ (рис. 6). В итоге практически все сканеры цвета моря показали низкие значения chl_{or_a} в зоне восточно-каспийского апвеллинга.

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 ДЗЗ.
- ❖ 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 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 ДЗЗ в рамках мультисенсорного подхода позволяют отследить и охарактеризовать пространственно-временную изменчивость восточно-каспийского апвеллинга качественно и количественно.

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 среднесезонным 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.: Гидрометеоиздат, 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

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

