Дистанционное наблюдение апвеллингов морей России

Д.В. Хлебников, А.Ю. Иванов, С.К. Клименко (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН)

Введение.

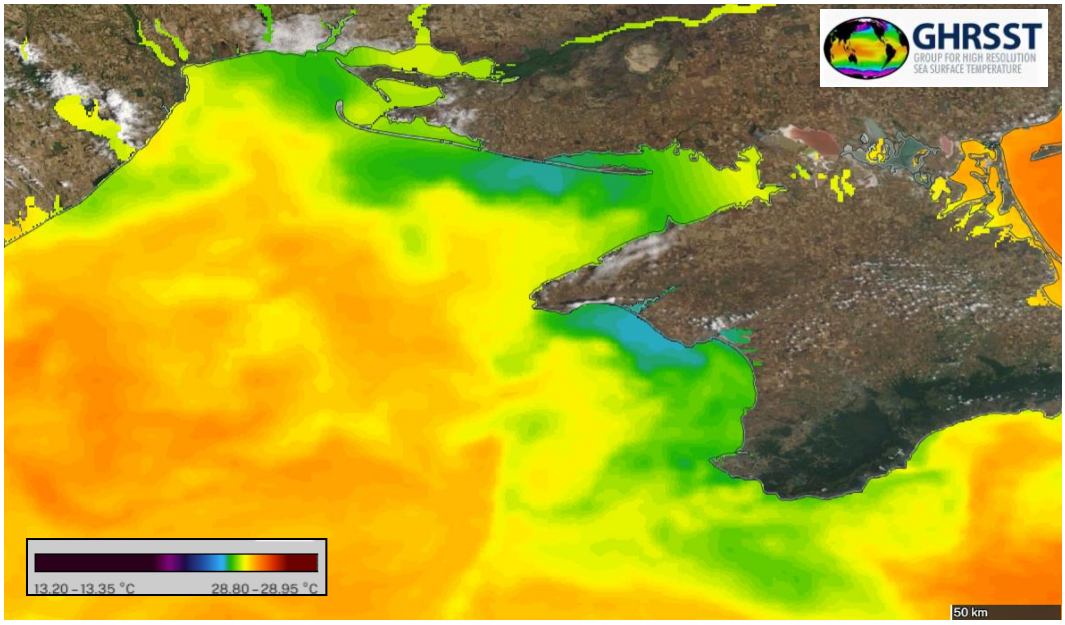
Целью данной работы является дистанционное изучение такого природного явления, как апвеллинг, особенностей его возникновения и характеристик в различных окраинных морях России за несколько последних лет. Моря, выбранные для наблюдения, были следующие: Каспийское, Черное, Балтийское, Белое, Охотское и Японское. Апвеллингом в океанографии называется подъем глубинных, более холодных вод на поверхность океана или морей, ярче всего проявляющийся в прибрежной зоне. Фактически это устойчивый подъем более глубинных вод к поверхности, вызываемый сгоном поверхностных вод под воздействием ветра и/или дивергенций течений. Он может быть вызван разными гидрометеорологическими явлениями. Основные типы апвеллинга следующие: прибрежный ветровой, топографический, вихревой, крупномасштабный открытого океана и экваториальный. В морях, окружающих РФ, наиболее часто проявляются прибрежные ветровые (экмановские) апвеллинги, а в ряде морей с особенностями подводной топографии – топографические.

Для наблюдения апвеллингов в российских морях использовались исключительно геофизические продукты на основе данных ДЗЗ (температура поверхности моря (ТПМ), содержание хлорофилла, ветер). Карты ТПМ и приповерхностного ветра (на высоте 10 м) – из оперативного модуля ЕСИМО, построенные в Гидрометцентре России Росгидромета (по данным NCDC/NOAA и NCEP/NOAA) на основе информации оперативных спутниковых и наземных наблюдений; карты ТПМ со спутников MetOp-A/2 и MetOp-C/3, доступные на Морском портале МГИ РАН, а также продукты проектов GHRSST multimission (The Group for High-Resolution Sea Surface Temperature, NASA) и Odyssea Regional 4 (IFREMER).

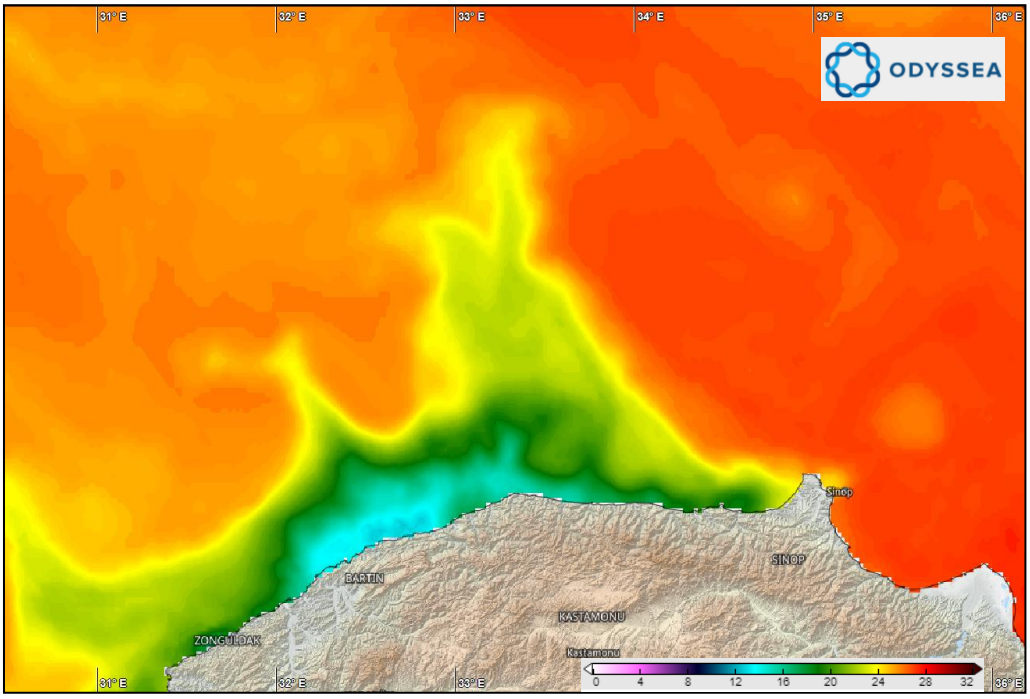
В данном докладе приведены и рассматриваются примеры отображения апвеллингов в морях РФ в данных ДЗЗ и его продуктов.

Черное море

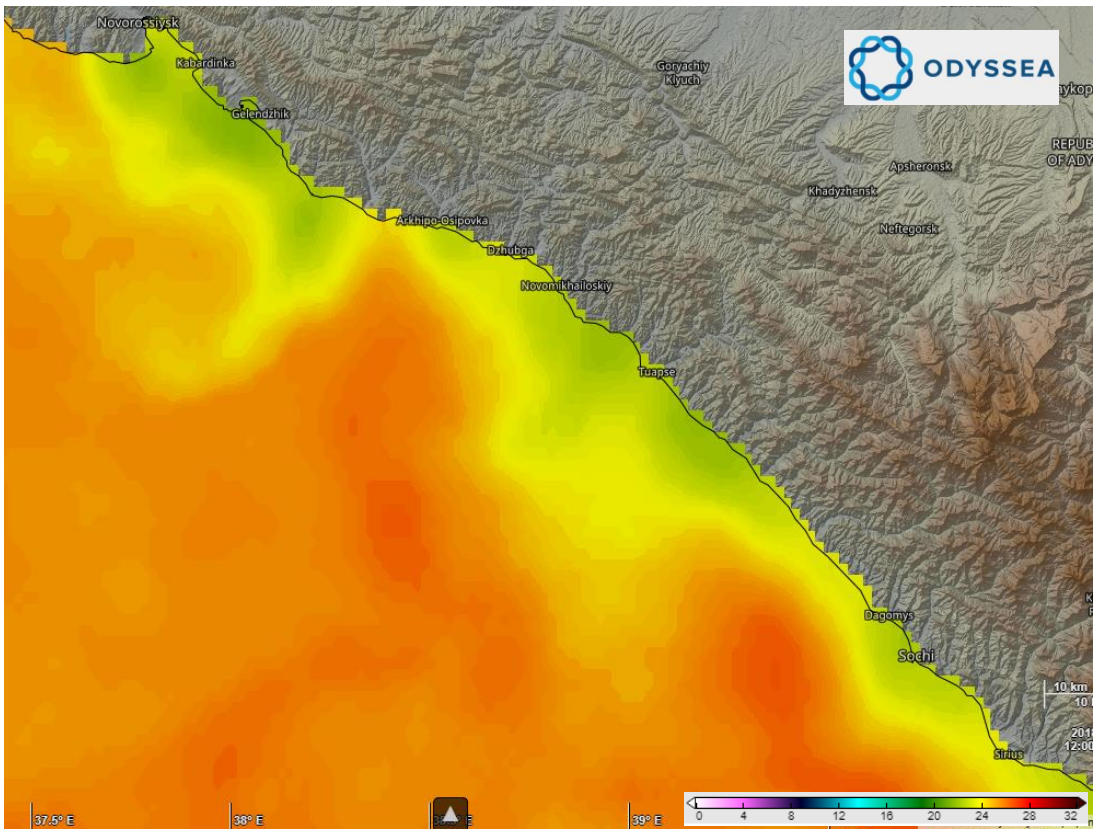
В Черном море часто проявляются три апвеллинга – у Тендровской косы, западного побережья Крыма и в Одесском заливе; у побережья Турции; и у северо-восточного побережья моря между Анапой и Туапсе. Они вызваны ветрами соответствующих румбов и являются классическими ветровыми прибрежными апвеллингами. В первом случае разность температур между апвеллингом и окружающими водами (температурный индекс апвеллинга) составляла 4-8°С, а иногда – 10-12°С.



Апвеллинги у Тендровской косы и западного побережья Крыма 7.07.2026 в поле ТПМ (GHRSST multimission), ΔT=3-4°С

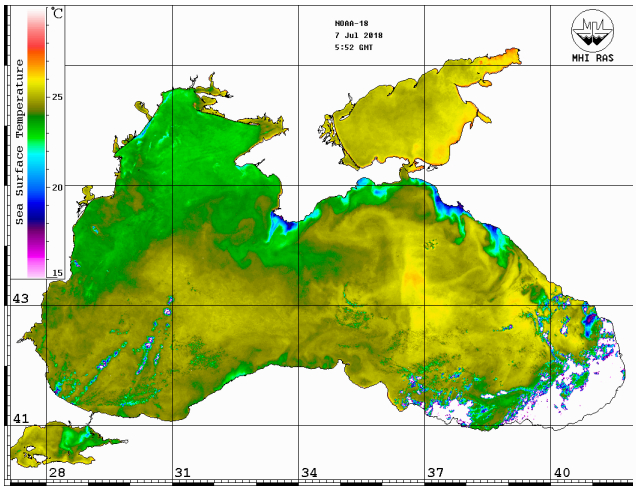


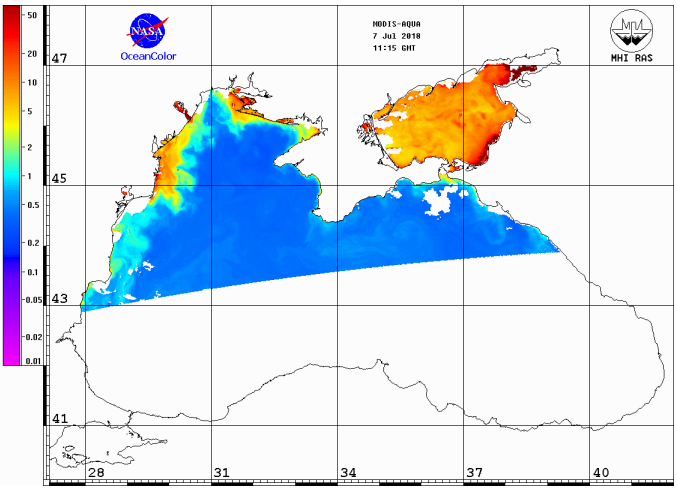
Апвеллинг у побережья Турции (между гг. Синоп и Зонгулдак) 15.08.2025 в поле ТПМ (Odyssea Regional 4), ΔT_{max}=13°С



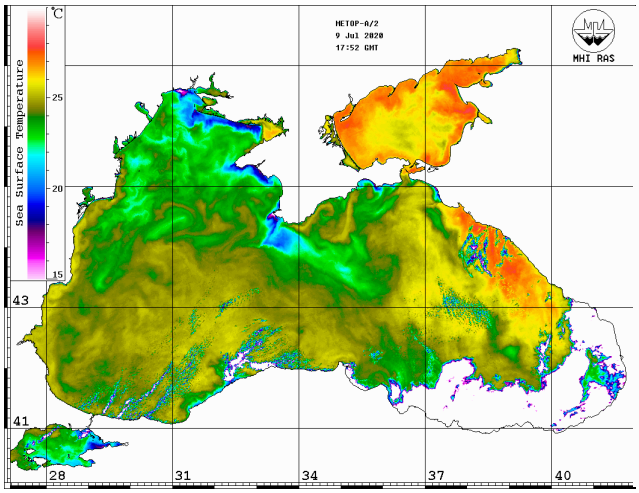
Проявление апвеллинга в прибрежной зоне Новороссийск–Сириус 5.07.2018 г. в поле ТПМ (Odyssea Regional 4), ΔT=8-9°C

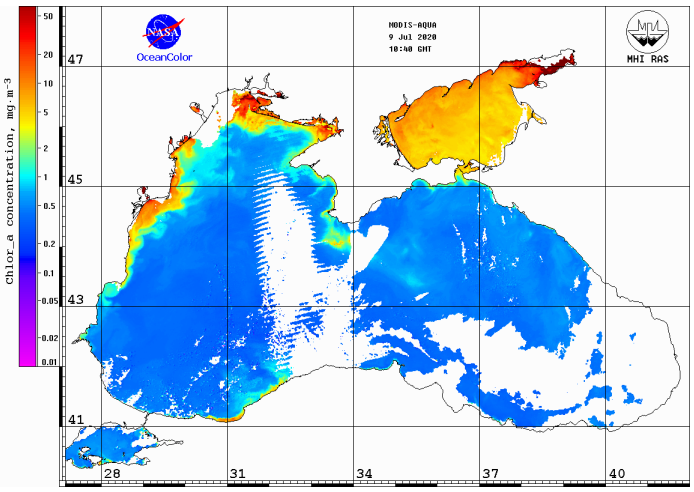
В начале июля 2020 г. на Черном море проявились три мощных прибрежных апвеллинга, вызванных северо-западными ветрами – у Тендровской косы, западного и юго-западного берегов Крыма. Температурный индекс апвеллинга во всех случаях составил 4-6°C.



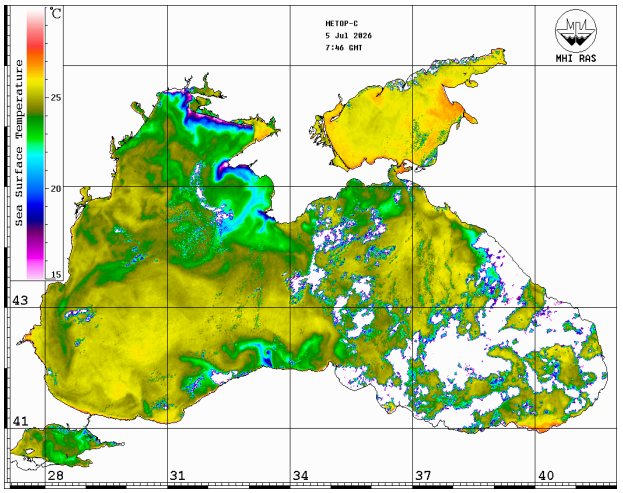


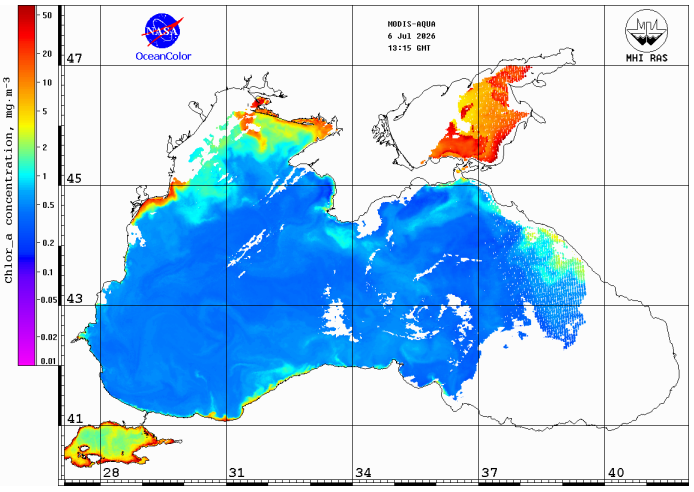
В Черном море в начале июля 2026 г. возникло несколько прибрежных апвеллингов, инициированных ветрами северо-западных румбов – у Тендровской косы, западного и юго-западного побережий Крыма, у Керченского пролива и Черноморского побережья Кавказа. Температурный индекс апвеллингов в разных случаях составил от 4-6 до 6-8°C.

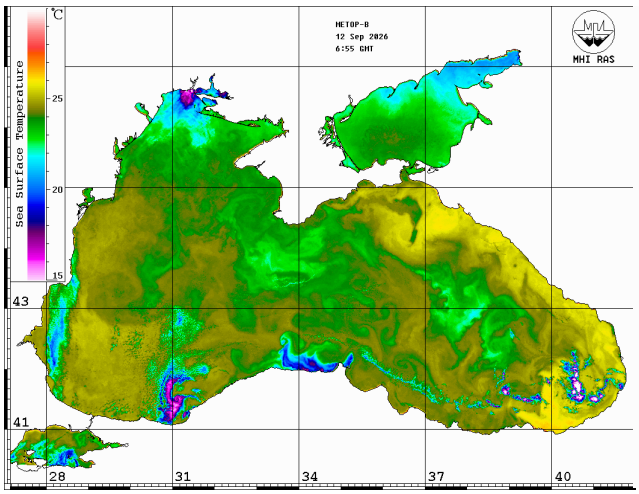


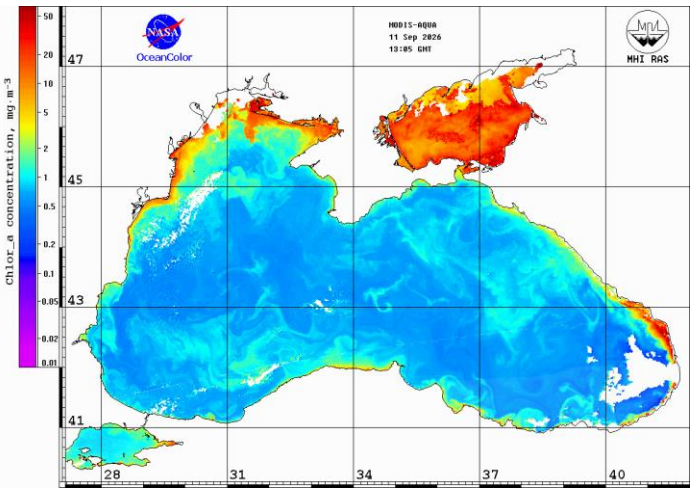


У побережья Турции к западу от Синопа в Черном море вследствие действия восточных ветров возник прибрежный экмановский апвеллинг со струями (филаментами) холодной воды, выходящими далеко в море. Температурный индекс апвеллинга в данном случае оказался равен 4-6°C.



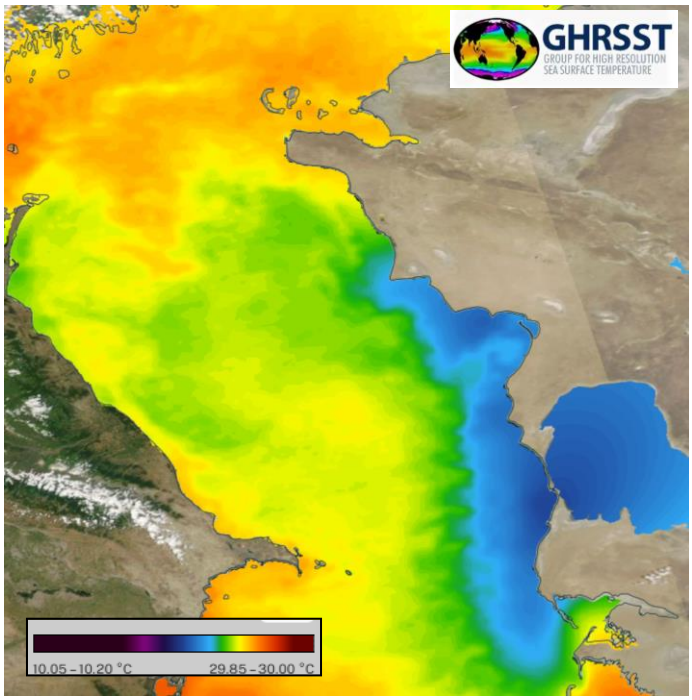




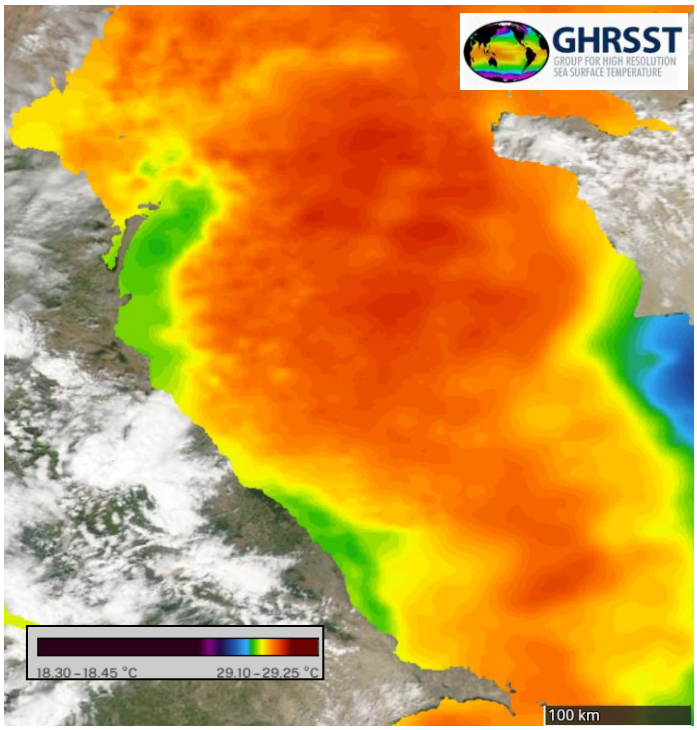


Каспийское море

В Каспийском море наблюдаются два вида апвеллинга: у западного и восточного побережий. 3 августа 2024 г. расположенный над Каспийском море антициклон со скоростями ветра 2-6 м/с вызвал одновременно два экмановских апвеллинга – в западной и восточной прибрежных областях Каспия. При этом температурный градиент может достигать 4-6°С на западе и до 8-10°С и более на востоке.

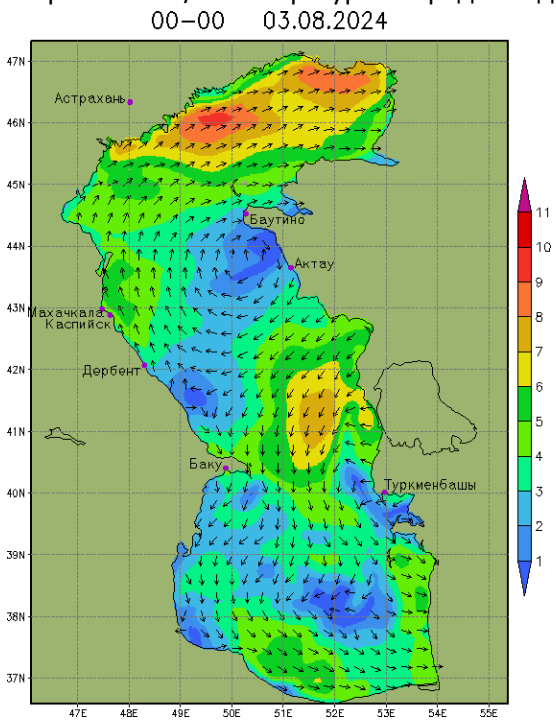


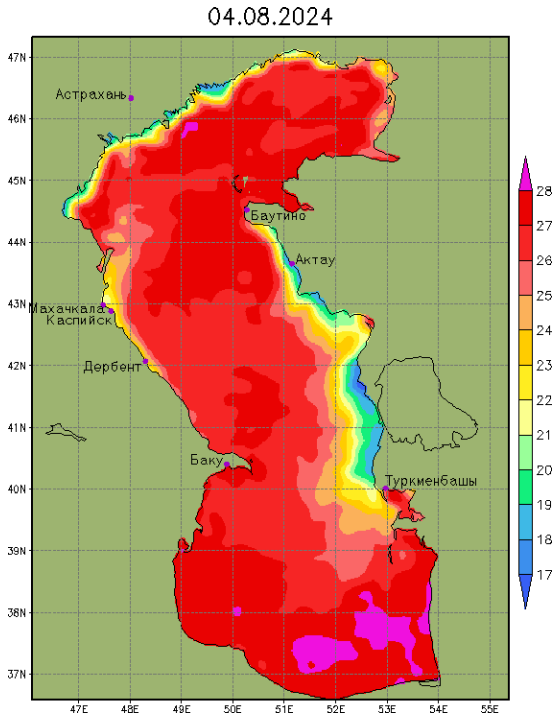
Восточно-каспийский апвеллинг 25.06.2023 в поле ТПМ (GHRSST multimission), ΔT=6-8°С

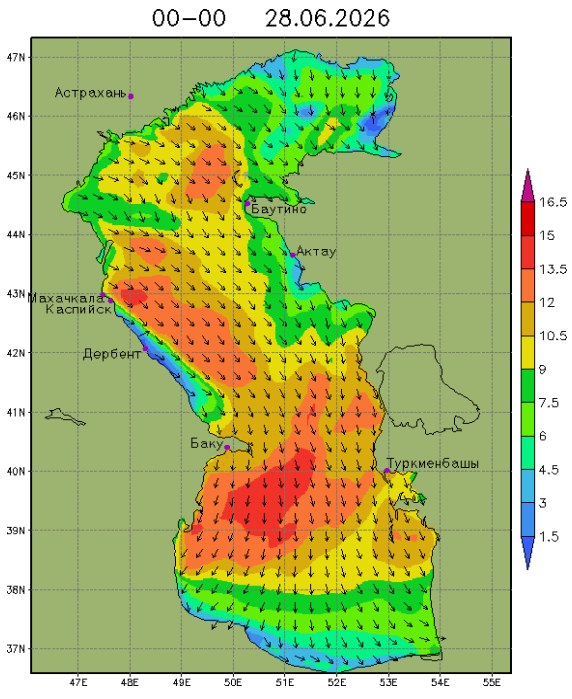


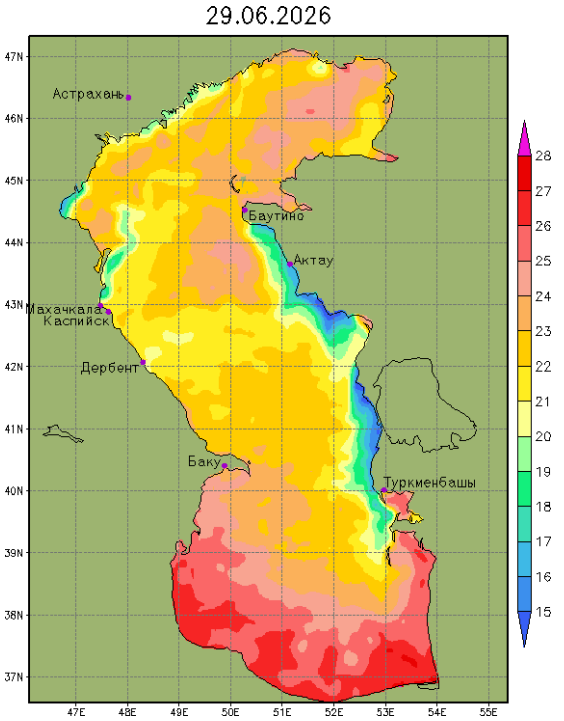
Западно-каспийский апвеллинг 31.07.2024 в поле ТПМ (GHRSST multimission), ΔT=2-3°С

Как известно, в северной и средней частях Каспийского моря с мая по сентябрь в основном преобладают ветры северо-западных румбов, которые вызывают квазипостоянный ветровой апвеллинг у восточного берега. 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 даже до о. Огурчинский) на 500-600 км. Апвеллинг 28 июня 2026 г. является хорошей иллюстрацией этому явлению. При скорости ветра в 6-12 м/с температурный градиент достигает 8-10°С.





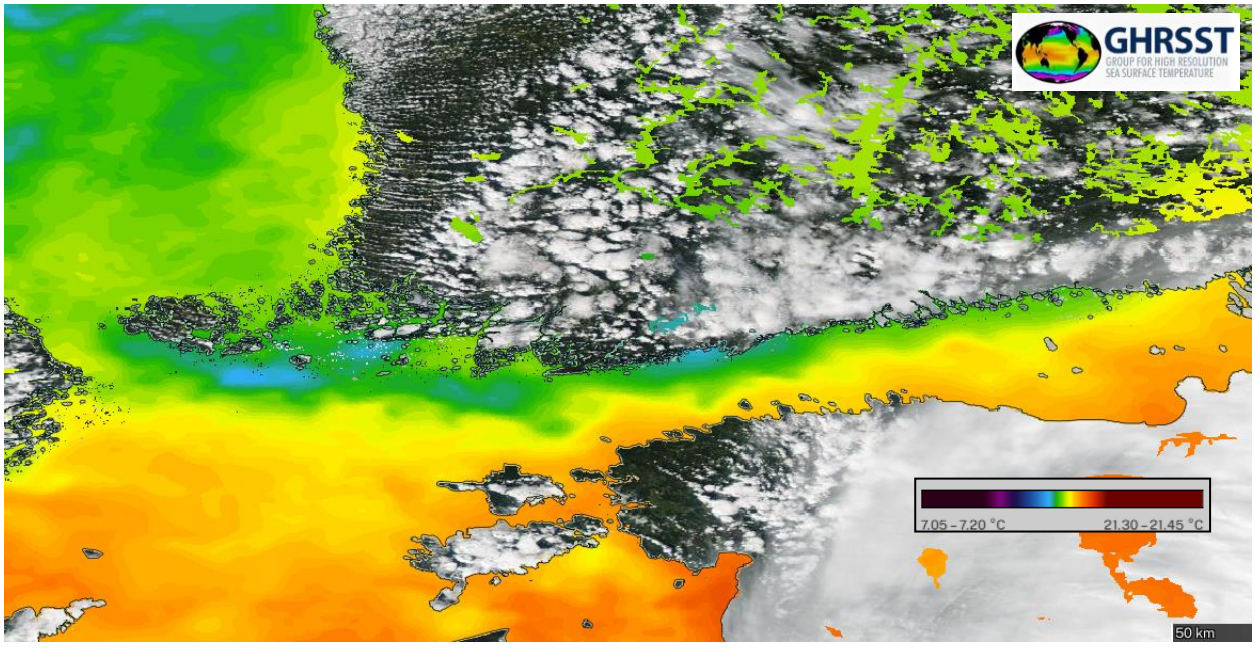




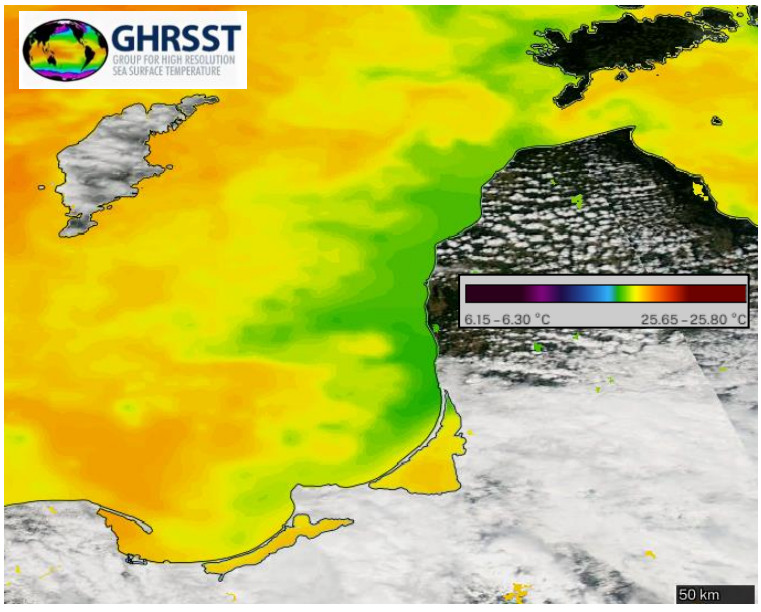
Как известно, в северной и средней частях Каспийского моря с мая по сентябрь в основном преобладают ветры северо-западных румбов, которые вызывают квазипостоянный ветровой апвеллинг у восточного берега. Часто он простирается с севера на юг вдоль восточного берега Каспия от п-ова Тюб-Караган до г. Туркменбаши (при сильных северных и северо-западных ветрах даже до о. Огурчинский) на 500-600 км. Апвеллинг 28 июня 2026 г. является хорошей иллюстрацией этому явлению. При скорости ветра в 6-12 м/с температурный градиент достигает 8-10°С.

Балтийское море

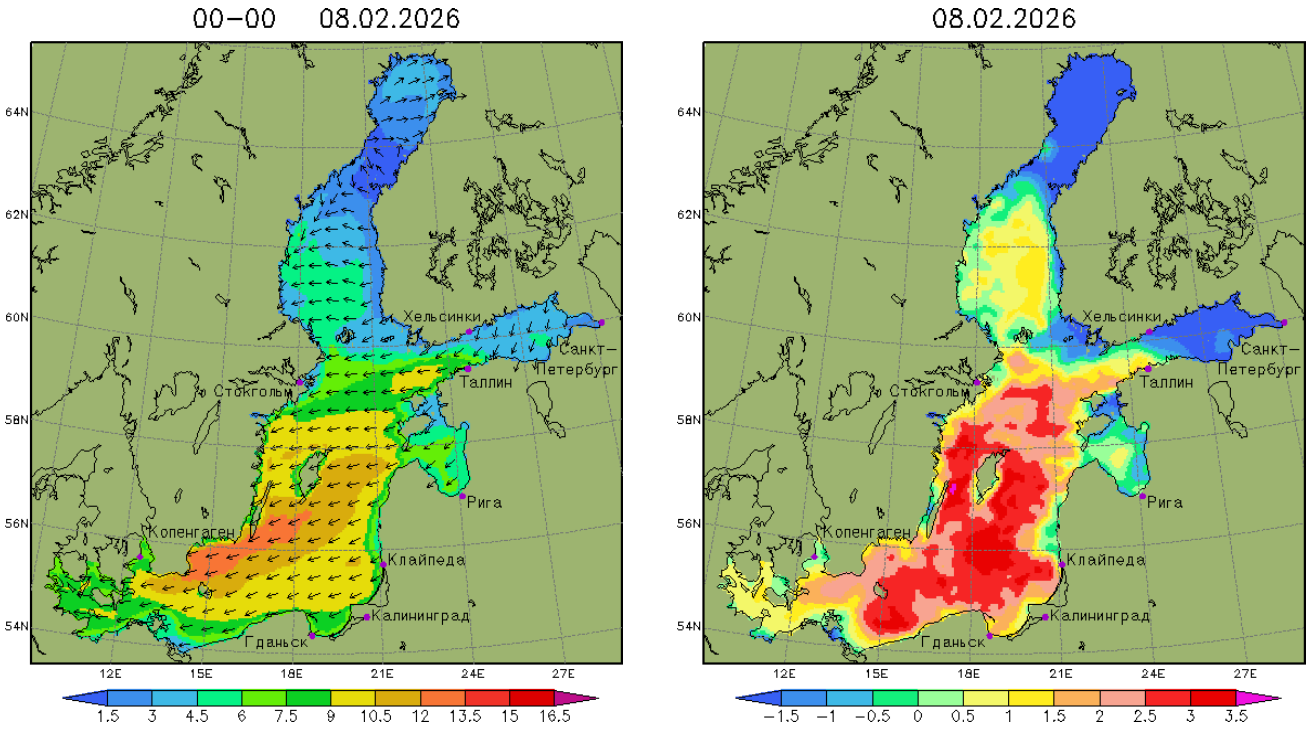
В начале февраля 2026 г. длительный ветер восточных румбов силой 9-10 м/с вызвал в юго-восточном районе Балтийского моря сгон воды в западном направлении, то есть “сгонный” ветровой апвеллинг. Разность температур с окружающими апвеллинг водами в связи с их зимним выхолаживанием была небольшой и достигала 2-3°С.



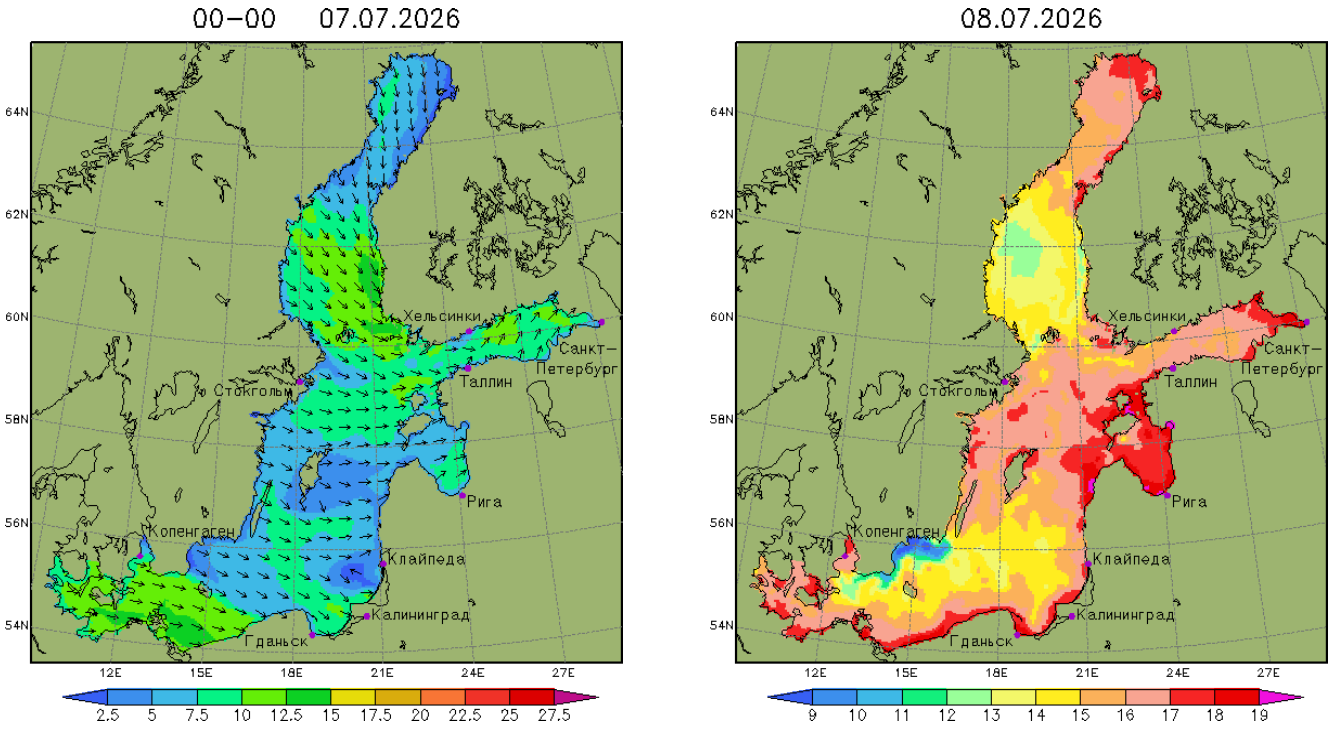
Апвеллинг в Финском заливе у побережья Финляндии 18.08.2026 в поле ТПМ (GHRSST multimission), ΔT=3-4°С



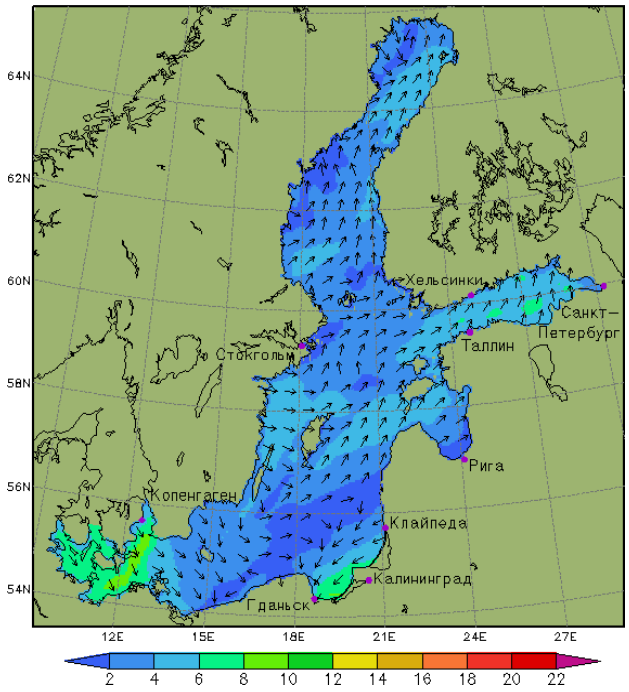
Обширный апвеллинг у побережья Прибалтики и Калининградской области 8.08.2006 в поле ТПМ (GHRSST multimission), ΔT=2-2.5°С



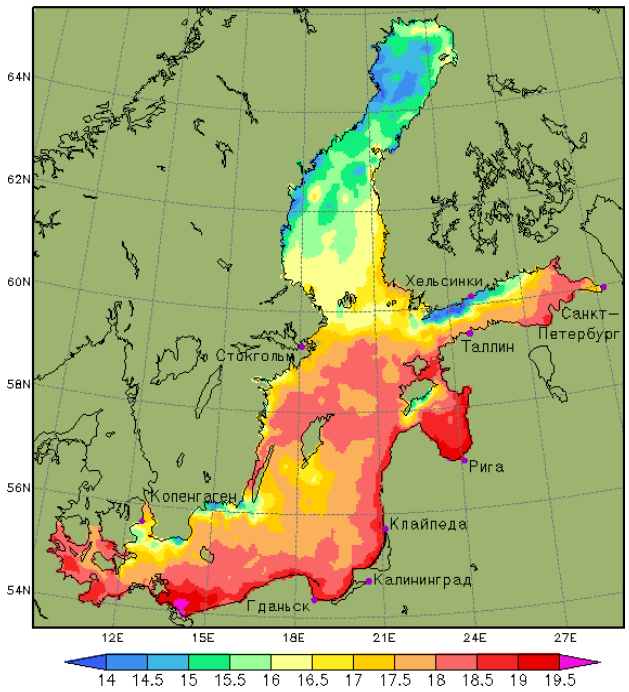
В конце августа 2026 г. на Балтийском море ветры юго-западных румбов 4-8 м/с инициировали сразу два ветровых сдвиговых апвеллинга – на восточном побережье Швеции и в Финском заливе на побережье Финляндии. Разность температур апвеллингов с окружающими водами достигала 4-6°С.



00–00 22.08.2026

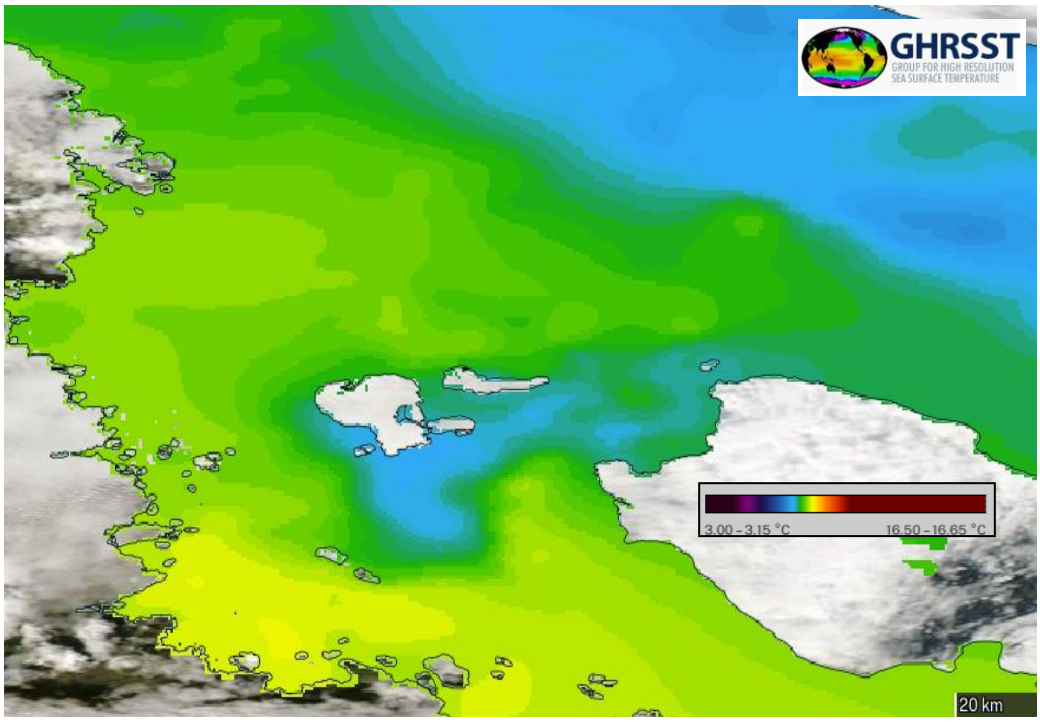


22.08.2026

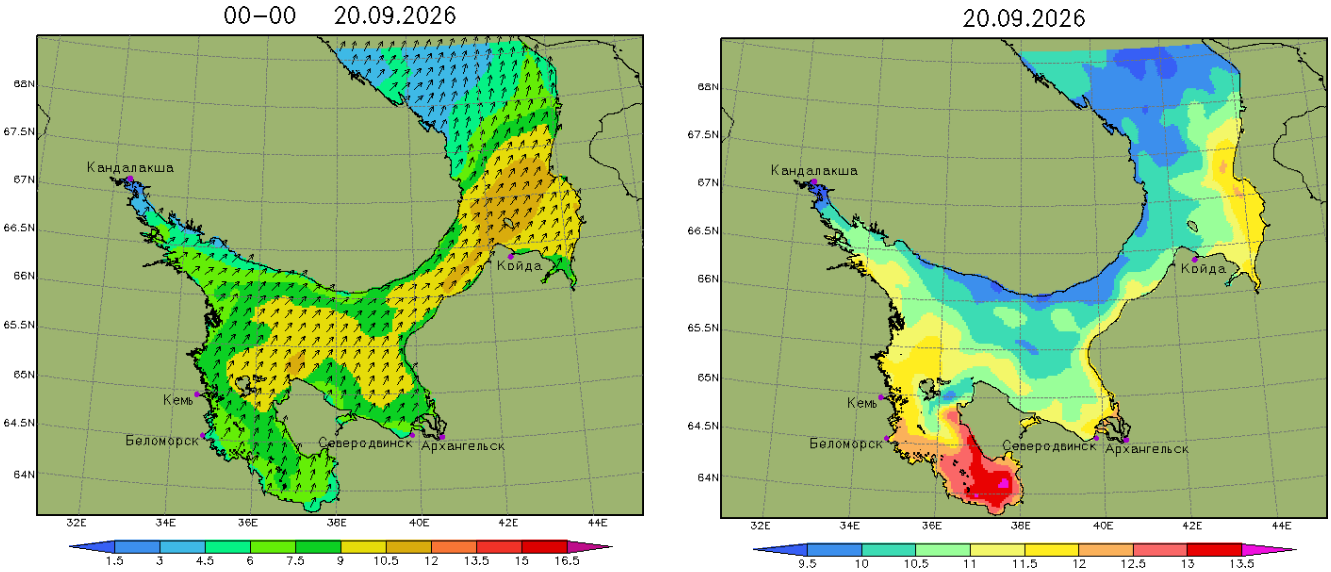


Белое море

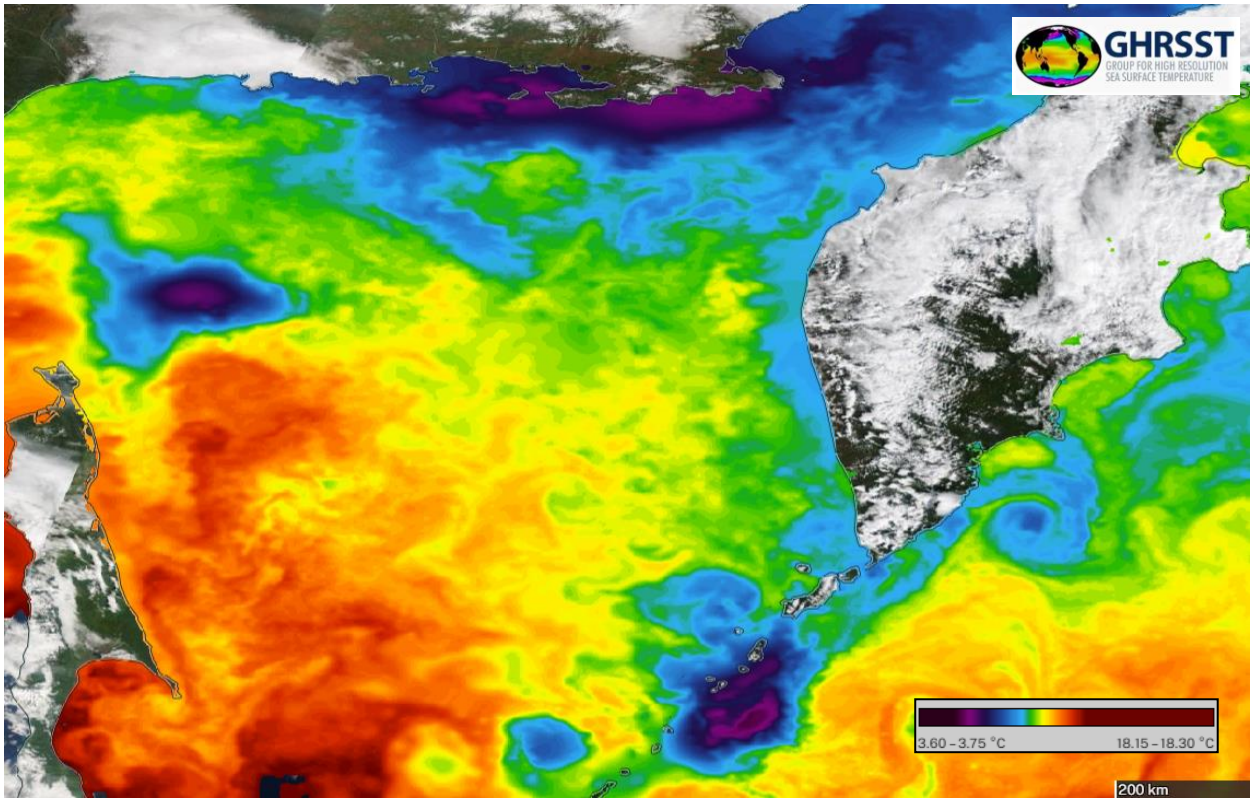
В Белом море 20 сентября 2026 г. проявились одновременно 4 апвеллинга, нередко наблюдаемые в этих районах – три береговых ветровых (в Кандалакшском заливе, к востоку от Соловецких островов, вдоль южного берега Кольского полуострова) и один, вероятней всего, топографического происхождения - в середине Горла между мысами Святой Нос и Канин Нос. В этих местах в Белом море апвеллинги проявляются наиболее часто. В данном случае разность температур с окружающими водами достигала 2-4°С, а скорость ветра 8-10 м/с.



Апвеллинг у Соловецких островов в Белом море 18.09.2026 в поле ТПМ (GHRSST multimission), ΔT=2°C

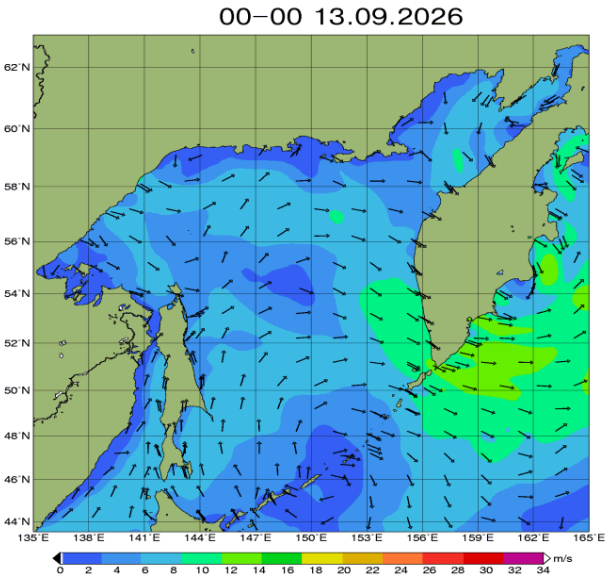


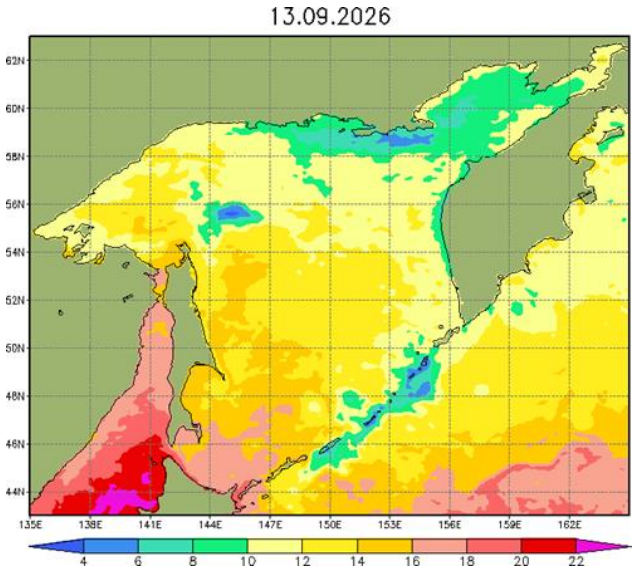
Охотское море



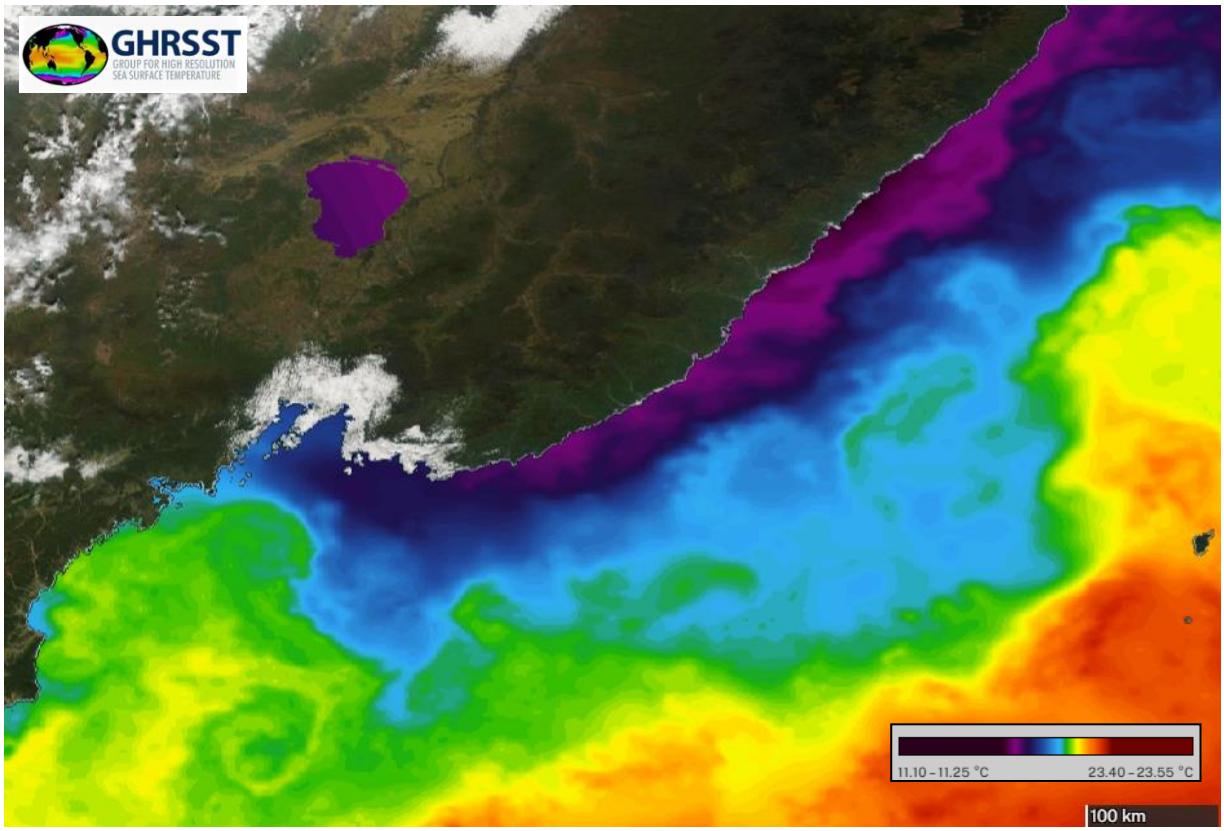
Апвеллинги в Охотском море (над банкой Кошеварова, у средних Курильских о-вов (Онекотан - Шиашкотан) и северного побережья моря) 13.09.2026 в поле ТПМ (GHRSST multimission), ΔT=6-8°C

В Охотском море в сентябре 2026 г. апвеллинги часто возникали в трех местах: над банкой Кашеварова, к югу от п-ова Кони и в районе Курильских островов. Первый является классическим топографическим апвеллингом, так как приливное течение в данном месте взаимодействует со склоном банки и возникает сильное перемешивание придонной более холодной воды с поверхностной, что отображается на картах ТПМ. Контраст температур с окружающими банку водами достигает 7-10°C и больше. При этом воздействие ветра на поверхность моря минимально.
Что касается двух последних апвеллингов, то природа их появления до конца не понятна, так как они могут иметь как ветровую, так и топографическую причину возникновения.



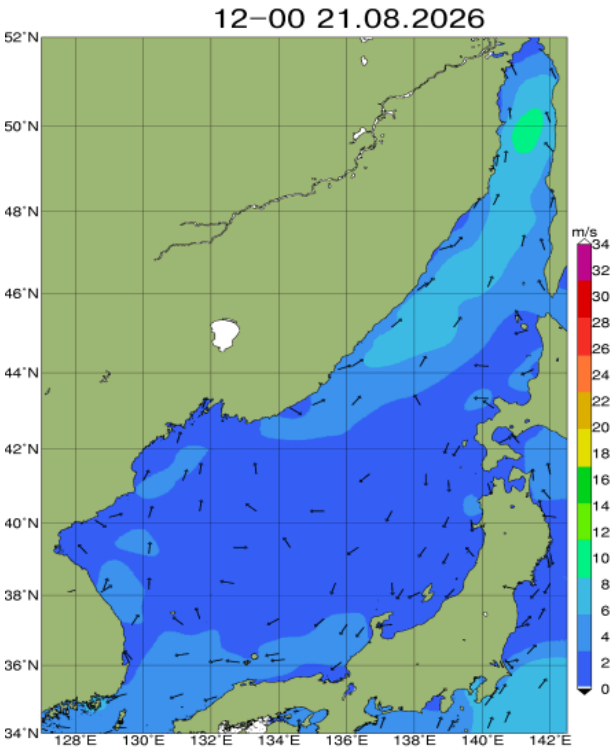


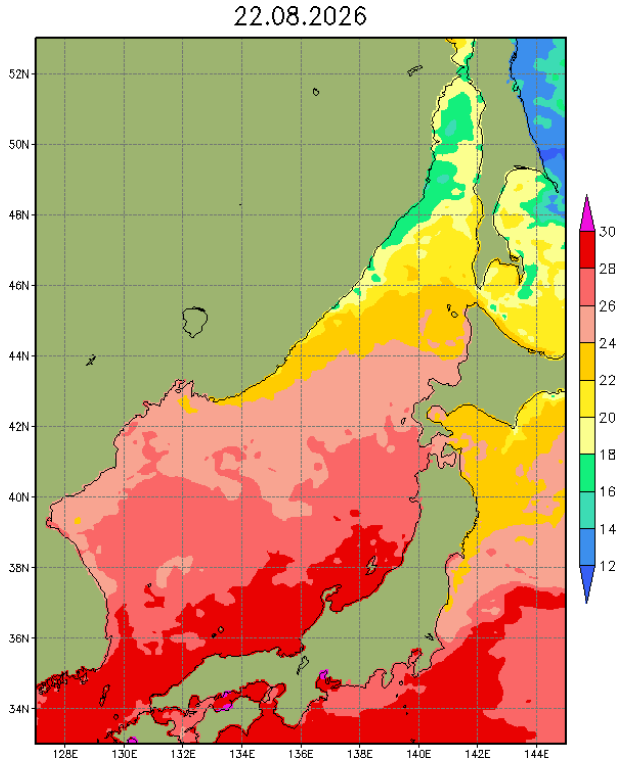
Японское море



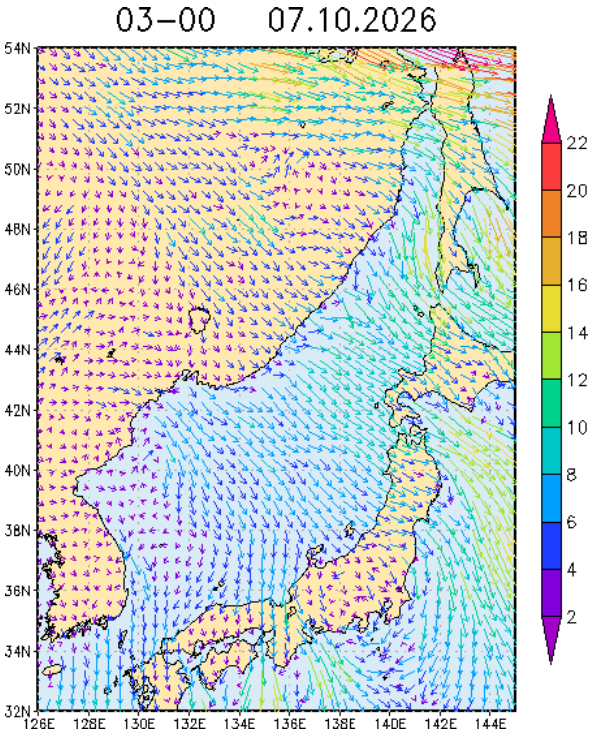
Апвеллинг у западного побережья Японского моря 28.09.2022, спровоцированный прохождением тайфуна Хиннамнор, в поле ТПМ (GHRSST multimission), ΔT=6-8°C

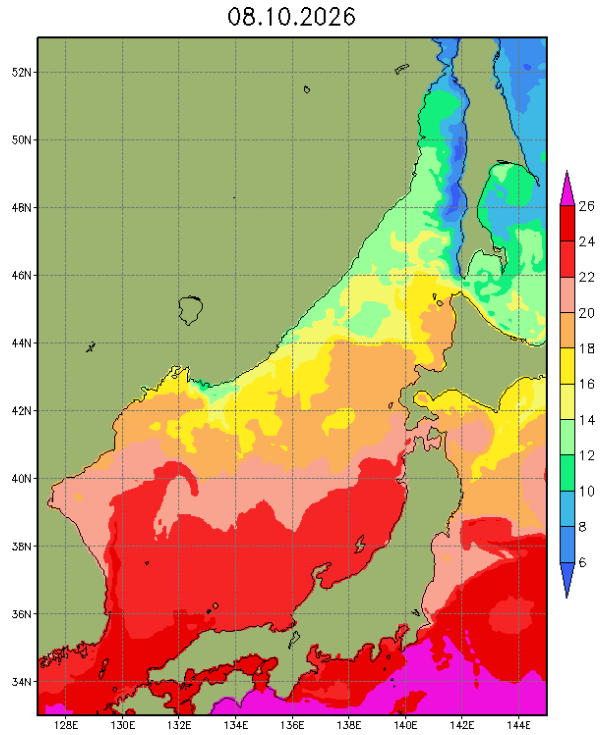
В Японском море в конце августа 2026 г. у северо-восточного побережья Приморья наблюдался хорошо выраженный прибрежный ветровой апвеллинг. Его вызвали сильные юго-западные ветры 4-8 м/с. Температурный индекс достигал значений 4-6°С. Возникновение прибрежного апвеллинга здесь часто провоцируют прохождения глубоких циклонов и тихоокеанских тайфунов.





С начала октября 2026 г. в Японском море развившиеся ветры северных румбов 10-12 м/с явились причиной берегового ветрового апвеллинга, распространившегося на весь западный берег о. Сахалин. Температурный индекс достигал значений 6-8°С.





Выводы и заключение

Изучение и постоянный круглогодичный мониторинг апвеллингов в морях, окружающих Россию, является важной научной задачей. Использование для этого исключительно данных ДЗЗ – ИК-радиометрических спутников, с целью сравнения основных характеристик апвеллингов, их сходства и различия, а также информации о поверхностном ветре над морем, находящиеся в открытом доступе позволяет проанализировать ряды спутниковых наблюдений, которые удобны для понимания динамики апвеллингов и определения их масштабов. Показано, что современный дистанционный подход позволяет получить их ключевые характеристики, практически полностью их охарактеризовать и сравнить характеристики апвеллингов между собой в разных морях и изучать как типично океанологическое явление. На основе анализа спутниковых данных выявлено, что апвеллинги во внутренних и окраинных морях России имеют в основном ветровой синоптический и локальный/мезомасштабный характер с продолжительность не больше 5-7 дней (иногда до 10 ней и более) и площадями до тысячи кв. км и с ΔT от 2-4 до 12-13°C, за исключением топографических апвеллингов в Охотском и Белом морях, которые являются практически круглогодичными и квазипостоянными. Особым квазипостоянством отличается и восточно-каспийский апвеллинг, который наблюдается практически в течение всего лета, простирается на более чем на 500 км вдоль берега и охватывает площади от 800 до 15 тыс. кв. км. Более того, подобный подход позволяет обнаруживать апвеллинги в морях РФ, еще не описанные океанологически. Есть факты, говорящие о существовании апвеллингов в Карском и Беринговом морях. Таким образом, в настоящее время изучение апвеллингов абсолютно во всех морях РФ не предоставляет принципиальных затруднений и может проводиться с использованием широкого набора доступных данных ДЗЗ (ТПМ, хлорофилл, ветер, геострофика, альтиметрия) в рамках мультисенсорного подхода и моделирования с их использованием.

Литература

1. Океанографическая энциклопедия. Л. Гидрометеоиздат, 1974. С. 20-22.

2. Fischer W.E., Green A.B. (Eds.). Upwelling: Mechanisms, Ecological Effects and Treats to Biodiversity. N.Y.: Nova Science Publ. Inc. 2013.

3. Хлебников Д.В., Иванов А.Ю., Евдошенко М.А., Клименко С.К. Проявление апвеллингов в Черном море в данных мультисенсорного дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 6. С. 35–51

4. Хлебников Д.В., Иванов А.Ю., Жукова 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 // Труды XII Всерос. конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». М.: Изд-во ИО РАН, 2023. С.159–165.

5. Станичная Р.Р., Станичный С.В. Апвеллинги Чёрного моря // Совр. проблемы дист. зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 195–207.

6. 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.

7. 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 // Совр. проблемы дист. зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 191-202.

8. Архипкин В.С. Особенности структуры и динамики прибрежного апвеллинга в Каспийском море / В «Каспийское море. Структура и динамика вод». М: Наука, 1990.

9. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Прибрежный апвеллинг в северо-западной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 6. С. 66-72.

10. Горячкин Ю.Н. Апвеллинг у берегов Западного Крыма // Морской гидрофиз. журн. 2018. Т. 34. № 5. С. 399-411.

11. Зацепин А.Г., Сильвестрова К.П., Куклев С.Б., Пиотух В.Б., Подымов О.И. Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга и даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 203-214.

12. Козлов И.Е., Дайлидене И. Исследование прибрежного апвеллинга в Балтийском море по спутниковым оптическим и радиолокационным данным // Совр. проблемы дист. зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 161–167.

13. Полонский А.Б., Музылева М.А. Современная пространственно-временная изменчивость апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма // Изв. РАН. Сер. географ. 2016. № 4. С. 96-108.

14. Сильвестрова К.П. Прибрежные апвеллинги в северо-восточной части Черного моря: связь с ветром и течением. Диссертация на соискание уч. ст. канд. геогр. наук. М.: 2019.

15. Горячкин Ю.Н. Апвеллинг у берегов Западного Крыма // Морской гидрофиз. журн. 2018. Т. 34. № 5. С. 399-411.

16. Шевченко Г.В., Марыжихин В.Е., Частиков В.Н. Гидролого-гидрохимическая структура вод в зоне апвеллинга у юго-западного побережья о. Сахалин // Океанологические исследования. 2023. № 51 (1). С. 54-70.

17. Бондаренко А.Л., Борисов Е.В., Серых И.В., Суркова Г.В., Филиппов Ю.Г. Закономерности формирования апвеллинга Мирового океана // Метеорология и гидрология. 2012. № 11.С. 75–81.