

Исследование апвеллингов в Мраморном море в холодное время года по данным дистанционного зондирования

А. В. Медведева, С. В. Станичный

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mail: sstanichny@mail.ru

Мраморное море имеет уникальную температурную стратификацию, когда в холодный сезон температура поверхностных вод более низкая по сравнению с водами под пикноклином. Таким образом процессы апвеллинга могут регистрироваться за счёт потепления поверхностного слоя в отличие от типичных, например, для Чёрного моря, где глубинные воды всегда холоднее поверхностных. По данным спутниковых радиометров ETM+ (англ. Enhanced Thematic Mapper Plus) Landsat-7, TIRS (англ. Thermal Infrared Sensor) Landsat-8 и -9, MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Terra, MODIS Aqua и VIIRS (англ. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) Suomi-NPP с пространственным разрешением от 60 м до 1 км проанализированы случаи проявления апвеллинга в период с ноября по март 2000–2023 гг. Обнаружено 22 события продолжительностью от 1 до 4 сут в результате влияния северо-восточного ветра со скоростью не менее 9–10 м/с. Температурный контраст вод апвеллинга с окружающими водами составил до 3–4 °С, температура ядер апвеллинга в среднем не превышала квазипостоянную температуру 14,6 °С придонного слоя. Выделены случаи, когда температура ядер варьировала от 15,5 до 18,2 °С, часть из них объясняется сохранением теплозапаса в Гемликском зал.

Ключевые слова: Мраморное море, зимний апвеллинг, тёплый апвеллинг, дистанционное зондирование, температура поверхности моря, ETM+, TIRS Landsat, MODIS, VIIRS, Босфорская струя

Одобрена к печати: 03.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-235-243

Введение

Мраморное море — бассейн площадью около 11 000 км², соединяется проливом Босфор на северо-востоке с Чёрным морем и проливом Дарданеллы на юго-западе с Эгейским морем (рис. 1).



Рис. 1. Географические объекты Мраморного моря

Чёрное море значительно менее солёное (около 18 ‰), чем Эгейское (более 38 ‰), что формирует в Мраморном море особую гидрологическую структуру вод (Beşiktepe et al., 1994): движение придонных вод направлено из Эгейского в Чёрное море, а поверхностных — из Чёрного в Эгейское. Такое движение в поверхностном слое обусловлено более высоким уровнем Чёрного моря, а в глубинных — более высокой плотностью вод Эгейского моря и, соответственно, Мраморного моря. Важной функцией движения средиземноморских вод является перенос кислорода в сероводородную зону Чёрного моря (Gregg, Özsoy, 2002; Latif et al., 1991).

Поступление вод из Эгейского моря на глубине больше 20–40 м и черноморских в поверхностном слое (которые частично перемешиваются с более солёными водами и формируют собственные поверхностные мраморноморские воды с солёностью около 26 ‰) обуславливает существование выраженной двухслойной стратификации с разделением водных масс пикноклином на глубине около 25 м и перепадом плотности 5–8 кг/м³ (Tezcan et al., 2018). Установлено, что температура нижнего слоя моря практически не изменяется и составляет 14,5–14,7 °С (Запезалов, 2005), а поверхностная температура изменяется в течение года от 7 до 28 °С. При этом термоклин практически всегда совпадает с галоклином и находится на глубине 20–30 м.

Исследования апвеллингов в Мраморном море проводились редко и более детально, по-видимому, только с 2023 г. Ранее публиковались отдельные сведения о подъёме солёных вод (Chiggiato et al., 2012; Tuğrul et al., 1986) и изменении солёности на поверхности (Beşiktepe et al., 1994; Ünlülata et al., 1990), на вероятность существования апвеллингов в Мраморном море также указывали результаты моделирования (Aydoğdu et al., 2018; Ilicak et al., 2021; Oguz, 2017; Sannino et al., 2017). В 2023 г. была опубликована работа (Mutlu et al., 2023) по результатам натурных измерений, в которой описывалось три тёплых и солёных апвеллинга в прибрежной зоне Яловы в январе 2018 г., в Гемликском зал. в ноябре 2022 г. и в зал. Пендик в январе 2022 г.

Основная цель настоящего исследования заключалась в обнаружении апвеллингов и изучении их развития в Мраморном море в холодное время года на основе данных спутниковых радиометров.

Методы и материалы

В период с 2000 по 2023 г. для оценки температуры поверхности моря и выделения тёплых апвеллингов выполнен анализ данных радиометров ETM+ (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus) Landsat-7, TIRS (*англ.* Thermal Infrared Sensor) Landsat-8 и -9, MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Terra, MODIS Aqua и VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) Suomi-NPP. Данные ETM+ имеют пространственное разрешение 60 м, TIRS — 100 м, а данные MODIS и VIIRS — 1 км и 750 м соответственно. В отдельных случаях также привлекались данные радиометров AVHRR (*англ.* Advanced Very-High-Resolution Radiometer) с пространственным разрешением 1 км. Методика исследования заключалась в обнаружении тёплых аномалий в холодный период года с дальнейшим анализом возможных причин их возникновения. Проводился анализ ветровых условий за предыдущие дни с целью выявления способствующего апвеллингу направления ветра, рассматривалось возможное влияние речных стоков, локального дневного прогрева и продолжения Верхнебосфорского течения (Босфорской струи).

Информация о характеристиках ветра получена по данным NOMADS/NCEP (*англ.* National Operational Model Archive and Distribution System/National Centers for Environmental Prediction) (с дискретностью 6 ч) и архивным данным, предоставляемым сервисом Ventusky (<https://www.ventusky.com/>) (модели ECMWF (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) и ICON (*англ.* Icosahedral Nonhydrostatic)), — с дискретностью 3 ч.

Данные TIRS Landsat-8, -9 обрабатывались в программе Sentinel Application Platform (версии 7–10). Значения температуры рассчитывались по двухканальному методу (Aleskerova

et al., 2016). Так как архивы спутниковых данных ETM+ Landsat-7 содержат только один температурный канал, то аномалии выделялись путём анализа пространственных контрастов радиационной температуры. Оценка температуры поверхности в этом случае проводилась по данным MODIS, VIIRS, AVHRR, TIRS, полученным в тот же день. Использованные данные получены в рамках государственного задания FNNN-2024-0012.

Основными помехами при идентификации апвеллингов в холодное время года были ситуации локального дневного прогрева (Rubakina et al., 2019), пресноводные стоки и проявление в поле температуры Босфорской струи. Один раз была обнаружена ситуация интенсивного ветрового перемешивания. Кроме того, учитывалось, что при наличии облачности (особенно при значительном покрытии акватории Мраморного моря или его отдельных районов) небольшие облачные образования, облака с высокой степенью прозрачности или края облаков могли иметь в конечном продукте (снимки MODIS Aqua, MODIS Terra и VIIRS Suomi-NPP) значения, близкие к температуре исследуемого явления.

Так как интенсивность проявления апвеллингов в Мраморном море ниже, чем в ряде других акваторий, внимание уделялось и тем случаям, когда температурный контраст был ниже 3 °С.

Обсуждение результатов

Апвеллинги в Мраморном море выявляются в тёплое и холодное время года. Их существование в холодное время года обуславливается особенностями термохалинной структуры Мраморного моря, которая характеризуется тем, что зимой придонный слой теплее поверхностного (рис. 2). Соответственно, апвеллинги в холодное время года обнаруживаются по проявлению на поверхности вод с более высокой температурой, чем у окружающих вод, и обозначаются в настоящей работе как тёплые.

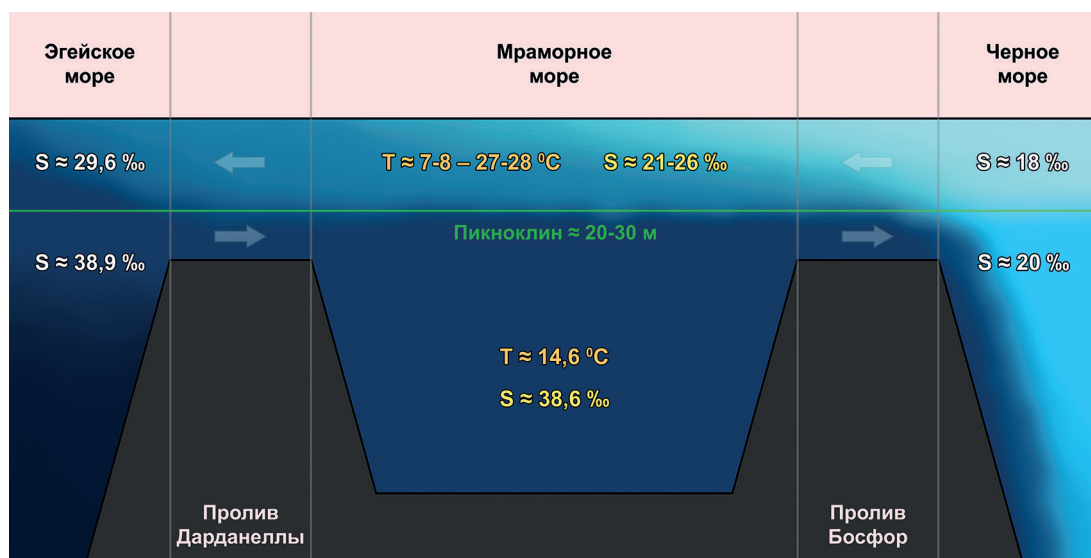


Рис. 2. Схематическое представление термохалинной структуры вод Мраморного моря. Стрелками отмечено направление движения придонных и поверхностных течений в Турецких проливах. S — солёность, T — температура

В период с 2000 по 2023 г. было выделено 22 случая развития тёплых апвеллингов, которые фиксировались с декабря по январь, однократно в ноябре и марте. Все обозначенные события происходили в восточной части Мраморного моря (рис. 3, см. с. 238) — в прибрежной зоне п-ова Бозбурун, на выходе из Измитского зал. и в Гемликском зал. Рост температуры воды в зал. Эрдек как проявление апвеллинга вызывает сомнение, поскольку в холодное

время года увеличивается объём речных и материковых стоков, нередко отличных по температуре от вод моря. Остальная прибрежная зона п-ова Капыдаг и близлежащих островов также нередко характеризуется более тёплыми зонами, но их происхождение преимущественно обусловлено локальным прогревом. Идентификация апвеллингов в ряде случаев осложнялась из-за распространения вод Босфорской струи в восточной части Мраморного моря (в частности, у северо-западного и северного побережья п-ова Бозбурун). Хотя Босфорская струя имеет значительный температурный градиент преимущественно в тёплое время года (выражается в проявлении вод с пониженной температурой), зимой также нередко возникают ситуации, при которых температура вод собственно течения или в зоне конвергенции на его восточной периферии повышается на несколько градусов Цельсия.

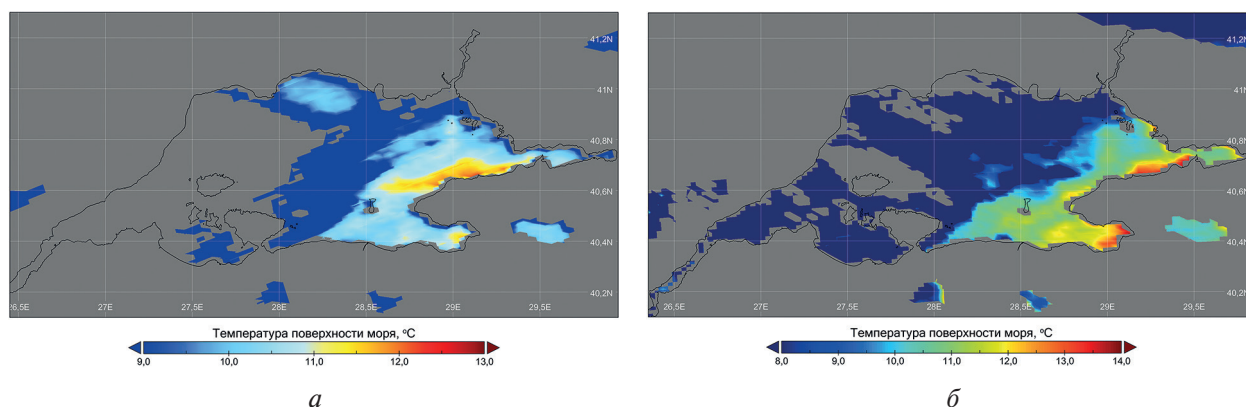


Рис. 3. Карты температуры поверхности моря, на которых идентифицируется тёплый апвеллинг в восточной части акватории, по данным MODIS Aqua: а — 26.12.2002; б — 03.02.2014

Основным препятствием в холодное время года для зондирования поверхности Мраморного моря является выраженное преобладание пасмурных дней над ясными из-за облачного покрова, непроницаемого для оптических сенсоров. Тем не менее, судя по распределению обнаруженных случаев по времени (15 лет из 24 отмечены наличием апвеллинга), развитие апвеллингов в зимний период становится обычным событием.

Примечательно то, что зимой не выявлено ни одного апвеллинга у западного берега Мраморного моря (в мае эпизодически регистрируются) и все случаи регистрировались только в восточной части бассейна. Развитие апвеллингов обуславливалось, по-видимому, влиянием северо-восточного ветра, скорость которого варьировала от 3 до 20 м/с. Причём для каждой ситуации фиксировалась скорость ветра не менее 10 м/с. Продолжительность воздействия ветра для каждого случая значительно различалась, но составляла не менее 9–12 ч при скорости 9–10 м/с и выше.

В силу изрезанности береговой линии на востоке Мраморного моря при развитии апвеллинга нередко тёплые ядра формируются в нескольких районах — как указывалось ранее, обычно в северной и северо-западной прибрежной зоне п-ова Бозбурун, Измитском и Гемликском зал. Температура этих ядер обычно различается между собой от десятых долей градуса до 1 °С и несколько более, но при смене интенсивности ветрового напряжения районы регистрации максимальной температуры могут изменяться. В целом контраст тёплых ядер с окружающими водами может достигать 3–4 °С, но обычно он варьирует в диапазоне $2 \pm 0,5$ °С.

Хотя термохалинная структура вод Мраморного моря не предполагает развитие апвеллингов с температурой, превышающей 14,6–14,7 °С, по данным радиометров MODIS и VIIRS отмечено шесть случаев, когда температура ядра составляла от 15,7 до 17,0 °С (в 2011, 2013, 2015, 2016, 2019, 2022 и 2023 гг.). Все эти случаи зарегистрированы, в основном, в декабре (2011 г. — в ноябре). Максимальная температура наблюдалась в Гемликском зал. (таблица). Отмечается, что высокая температура (16,41 °С) была выявлена на глубине

около 30 м и при натуральных измерениях в Гемликском зал. в январе 2011 г. (Balci et al., 2012). Предположительно, в Гемликском зал. в конце осени и начале зимы сохраняется теплозапас в силу ограниченности водообмена из-за геоморфологических особенностей: глубина в центре залива превышает 100 м, тогда как на выходе уменьшается до 30–50 м и менее.

Краткая характеристика апвеллингов, выявленных в холодное время года в Мраморном море

| Дата | Максимальная температура ядра, °С | Температура окружающих вод, °С | Контраст температуры, °С | Район развития | Ветер: направление и максимальная скорость (м/с) |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|---|--|
| 08.03.2001 | 11,3 | 9,8 | 1,5 | СЗ берег п-ова Бозбурун | СВ до 12 |
| 15.12.2001 | 10,6 | 9,1 | 1,5 | Гемликский зал. | СВ до 16 |
| 26.12.2002 | 12,2 | 10,6 | 1,6 | С, СЗ берег п-ова Бозбурун | СВ до 10 |
| 10.12.2003 | 14,6 | 11,0 | 3,6 | Измитский зал. На выходе из Измитского зал. С, СЗ берег п-ова Бозбурун Гемликский зал. | СВ до 13 |
| 15.12.2007 | 13,1 | 10,9 | 2,2 | С, СЗ берег п-ова Бозбурун | СВ до 12 |
| 13–15.11.2011 | 16,0 | 13,1 | 2,9 | С, СЗ берег п-ова Бозбурун Гемликский зал. | СВ до 12 |
| 11.02.2012 | 10,3 | 6,7 | 3,6 | Измитский зал. На выходе из Измитского зал. | СВ до 14 |
| 24.12.2012 | 11,9 | 10,6 | 1,3 | С, СЗ берег п-ова Бозбурун | СВ до 11 |
| 04–05.12.2013 | 16,6 | 12,8 | 3,8 | С, СЗ берег п-ова Бозбурун Гемликский зал. | СВ до 14 |
| 18–19.12.2013 | 12,2 | 10,9 | 1,3 | С, СЗ берег п-ова Бозбурун. Гемликский зал. | СВ до 10 |
| 02–05.02.2014 | 14,6 | 10,4 | 4,2 | С, СЗ берег п-ова Бозбурун. Гемликский зал. | СВ до 13 |
| 17–20.12.2015 | 15,7 | 11,6 | 4,1 | Измитский зал. С, СЗ берег п-ова Бозбурун. Гемликский зал. | СВ до 12 |
| 21.01.2017 | 8,9 | 7,3 | 1,6 | С, СЗ берег п-ова Бозбурун | СВ до 11 |
| 24–25.12.2017** | 13,7 | 11,0 | 2,7 | СВ берег Мраморного моря. С берег п-ова Бозбурун | СВ до 13 |
| 15.01.2018 | 13,0 | 10,3 | 2,7 | С берег п-ова Бозбурун | СВ до 17 |
| 26.02.2019 | 11,3 | 8,8 | 2,5 | С берег п-ова Бозбурун | СВ до 19 |
| 06.12.2019 | 17,0 | 14,5 | 2,5 | С берег п-ова Бозбурун. Гемликский зал. | СВ до 16 |
| 02–04.01.2020 | 14,1 | 11,6 | 2,5 | Измитский зал. На выходе из Измитского зал. С, СЗ берег п-ова Бозбурун. Гемликский зал. | СВ до 14 |
| 14–15.01.2022** | 14,3 | 10,0 | 4,3 | На выходе из Измитского зал. С, СЗ берег п-ова Бозбурун | СВ до 19 |
| 20–22.12.2022 | 16,6 | 13,3 | 3,3 | С берег п-ова Бозбурун. Гемликский зал. | СВ до 16 |
| 15.01.2023 | 13,3 | 11,0 | 2,3 | С, СЗ берег п-ова Бозбурун | СВ до 10 |
| 17–18.12.2023 | 16,3 | 12,7 | 3,6 | С, СЗ берег п-ова Бозбурун Гемликский зал. | СВ до 18 |

Примечание: С, СЗ, СВ — северный, северо-западный, северо-восточный.

В 2013, 2019, 2022 и 2023 гг. получено, что максимальная температура вод апвеллингов, которые формировались в районе северной прибрежной зоны п-ова Бозбурун, также характеризовалась высокими значениями и составляла примерно 16 °С. Северо-восточная область Мраморного моря, за исключением Измитского зал., имеет значительную глубину, не препятствующую вентиляции этой части бассейна, — до 1000 м и более. В итоге для достоверного объяснения появления вод с температурой выше 14,7 °С у северного берега п-ова Бозбурун на данный момент недостаточно информации.

В *таблице* с краткой характеристикой апвеллингов есть события, отмеченные (**), как возможное совместное проявление прибрежного апвеллинга и подъёма вод на восточной периферии Босфорской струи. И если развитие апвеллинга в зимнее время затруднительно проследить из-за облачности, то в январе 2022 г. сложность заключалась в определении природы тёплых вод. То есть на спутниковых снимках одновременно проявляются признаки динамического апвеллинга слева от Босфорской струи и признаки развития прибрежного апвеллинга у северного побережья п-ова Бозбурун после двухдневного северо-восточного ветра со скоростью 10–15 м/с. В настоящее время интерпретация этих ситуаций неоднозначна и авторами допускается существование комплексного механизма, при котором подтермоклинные воды слева от Босфорской струи взаимодействуют с водами прибрежного ветрового апвеллинга. Эта ситуация была единственной, для которой авторам удалось найти синхронные опубликованные судовые наблюдения вертикальных профилей температуры и солёности (Mutlu et al., 2023). На *рис. 4*, демонстрирующем Босфорскую струю и область повышенной температуры восточнее неё, место измерений указано звёздочкой. Температура на поверхности составляла около 14 °С (что соответствует спутниковым данным), а солёность — 36,5 ‰ (характерная для глубинных слоёв).

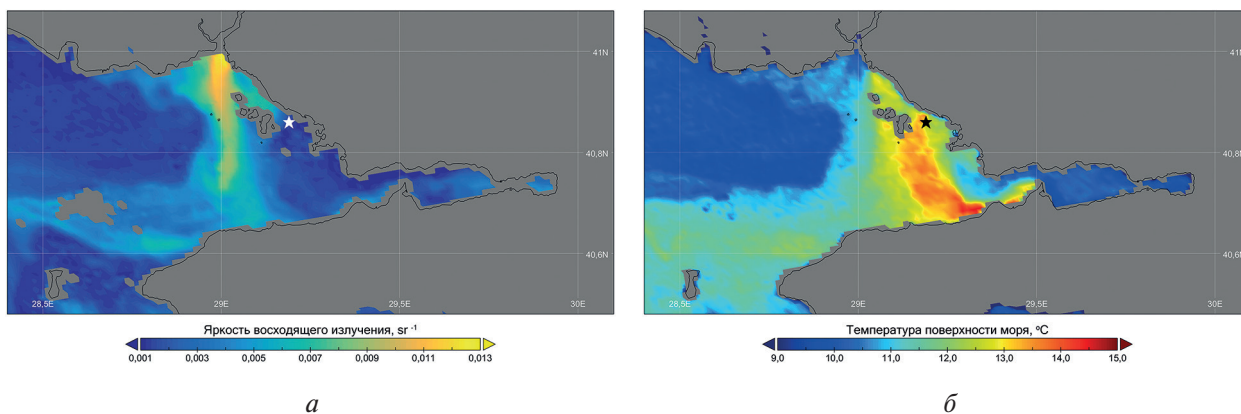


Рис. 4. Карты разности яркости восходящего излучения на длинах волн 555 и 678 нм (*а*) (идентифицируется Босфорская струя) и температуры поверхности моря (*б*) (идентифицируются тёплые воды восточнее Босфорской струи) по данным MODIS Aqua за 14.01.2022. Звёздочкой отмечена станция M11 из работы (Mutlu et al., 2023)

На тепловых изображениях ETM+ Landsat-7 и TIRS Landsat-8, -9, отличающихся более высоким пространственным разрешением, чем данные MODIS Aqua, MODIS Terra и VIIRS Suomi-NPP, выявлено пять случаев проявления апвеллинга в холодное время года: в 2013, 2015, 2017, 2019 и 2022 гг.

Сенсором ETM+ Landsat-7 зафиксировано два случая проявления апвеллинга — в декабре 2015 и 2017 гг., оценки контраста температуры получены по данным радиометров MODIS и VIIRS. На изображениях TIRS Landsat-8, -9 выделено три события развития апвеллинга, для которых отмечена температура тёплых ядер и выполнено сравнение с окружающими водами. Таким образом, по данным сенсоров TIRS ядра апвеллингов имели следующую температуру: 17,8 °С — 5 декабря 2013 г. (при температуре окружающих вод около 13,2–13,9 °С), 18,2 °С — 6 декабря 2019 г. (при температуре окружающих вод около 14,7–15,7 °С)

и 15,5 °С — 22 декабря 2022 г. (при температуре окружающих вод около 12,4–12,8 °С). В декабре 2013 и 2019 гг. максимальная температура зарегистрирована в Гемликском зал. (рис. 5), тогда как в декабре 2022 г. — у северного берега п-ова Бозбурун.

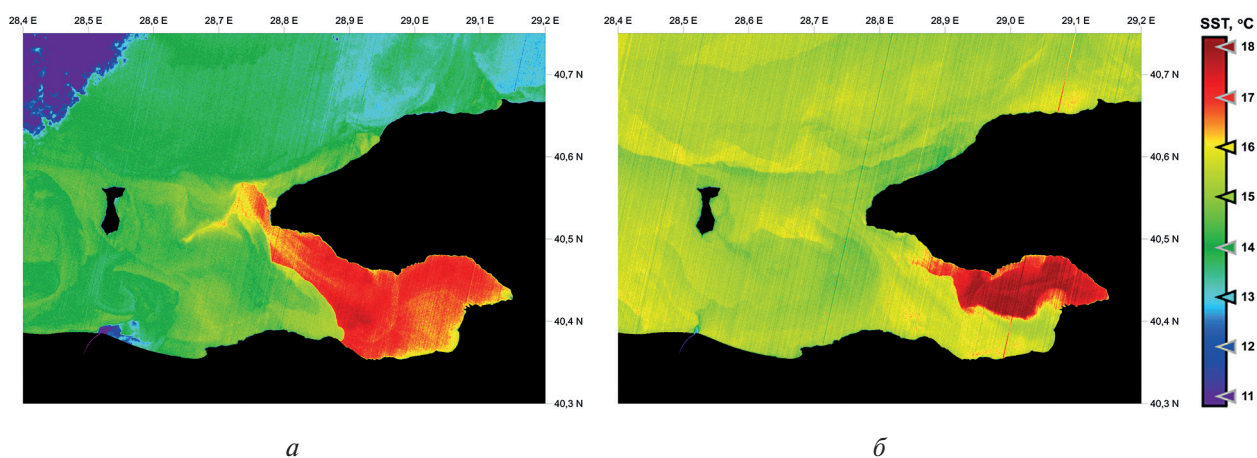


Рис. 5. Проявление тёплого апвеллинга на поверхности моря в Гемликском зал. на фрагменте изображения TIRS Landsat-8: а — 05.12.2013; б — 06.12.2019

Достоверно установить среднюю продолжительность проявления апвеллингов в холодное время года затруднительно из-за большого числа дней со сплошным облачным покровом, но отдельные события позволяют предположить, что развитие может длиться от 1 до 4 сут.

Заключение

На основе анализа карт температуры по спутниковым данным с различных носителей проведено исследование проявления апвеллингов в Мраморном море в холодное (ноябрь — март) время года и обнаружено 22 случая в период с 2000 по 2023 г. Зимние апвеллинги идентифицируются по проявлению более тёплых вод на поверхности, температурный контраст ядер апвеллингов и окружающих вод может достигать 3–4 °С. При этом обычно температура их ядер не превышала 14,6 °С.

В холодное время года развитие апвеллингов регистрировалось только в восточной части Мраморного моря после достаточно длительного воздействия северо-восточного ветра со скоростью более 9–10 м/с в прибрежной зоне п-ова Бозбурун, в Измитском и Гемликском зал. Однако в отдельных случаях в декабре наблюдались и более высокие значения температуры (от 15,5 до 18,2 °С) в Гемликском зал. и у северного берега п-ова Бозбурун. Предположительно, высокая температура ядер в Гемликском зал. может быть связана с существованием под галоклином более тёплых вод из-за наличия более глубокой области в центре залива и ослабленным обменом с глубоководной частью моря. Причины высокой температуры ядра апвеллинга у северного берега п-ова Бозбурун достоверно не установлены. Рассмотрены случаи формирования тёплых аномалий за счёт взаимного эффекта прибрежного апвеллинга и подъёма вод на восточной периферии Босфорской струи.

По данным дистанционного зондирования среднее время жизни тёплых апвеллингов в рамках данного исследования сложно определить из-за частого наличия облачного покрова в зимние месяцы, но для обнаруженных ситуаций оно составило от 1 до 4 сут.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-27-00421 «Развитие методов спутникового мониторинга аномальных процессов в морских экосистемах на основе многоспектрального подхода», <https://rscf.ru/project/23-27-00421/>.

Литература

1. *Заневалов А. С.* Сезонная изменчивость вертикальных распределений температуры и солености в Мраморном море // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 2. С. 78–84.
2. *Aleskerova A. A., Kubryakov A. A., Stanichny S. V.* A two-channel method for retrieval of the Black Sea surface temperature from Landsat-8 measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. P. 1155–1161. <https://doi.org/10.1134/S0001433816090048>.
3. *Aydoğdu A., Pinardi N., Özsoy E. et al.* Circulation of the Turkish straits system between 2008–2013 under complete atmospheric forcing // *Ocean Science Discussion*. 2018. <https://doi.org/10.5194/os-2018-7>.
4. *Balci M., Durmuş T., Balkıs N.* Seasonal variations in the environmental parameters and water quality status of the Gulf of Gemlik in the Marmara Sea (Turkey) // *Fresenius Environmental Bull.* 2012. V. 21. No. 10a. P. 3059–3068.
5. *Beşiktepe Ş., Sur H. İ., Özsoy E. et al.* The circulation and hydrography of the Marmara Sea // *Progress in Oceanography*. 1994. V. 34. No. 4. P. 285–334.
6. *Chiggiato J., Jarosz E., Book J. et al.* Dynamics of the circulation in the Sea of Marmara: numerical modeling experiments and observations from the Turkish straits system experiment // *Ocean Dynamics*. 2012. V. 62. No. 1. P. 139–159. <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0485-5>.
7. *Gregg M., Özsoy E.* Flow, water mass changes, and hydraulics in the Bosphorus // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2002. V. 107. No. C3. Article 3016. 23 p. <https://doi.org/10.1029/2000JC000485>.
8. *Ilicak M., Federico I., Barletta I. et al.* Modeling of the Turkish Strait System using a high resolution unstructured grid ocean circulation model // *J. Marine Science and Engineering*. 2021. V. 9. No. 7. Article 769. <https://doi.org/10.3390/jmse9070769>.
9. *Latif M., Özsoy E., Oğuz T., Ünlüata Ü.* Observations of the Mediterranean inflow into the Black Sea // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. 1991. V. 38. P. S711–S723.
10. *Mutlu S., Kuzyaka E., Atabay H., Topal A.* Coastal upwellings in the Sea of Marmara // *Intern. J. Environment and Geoinformatics*. 2023. V. 10. No. 4. P. 48–55. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.1338236>.
11. *Oğuz T.* Impacts of a buoyant strait outflow on the plankton production characteristics of an adjacent semi-enclosed basin: A case study of the Marmara Sea // *J. Marine Systems*. 2017. V. 173. P. 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.05.002>.
12. *Rubakina V. A., Kubryakov A. A., Stanichny S. V.* Seasonal variability of the diurnal cycle of the Black Sea surface temperature from the SEVIRI satellite measurements // *Physical Oceanography*. 2019. V. 26. No. 2. P. 157–169. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-2-157-169.
13. *Sannino G., Sözer A., Özsoy E.* A high-resolution modelling study of the Turkish Straits System // *Ocean Dynamics*. 2017. V. 67. No. 3. P. 397–432. DOI: 10.1007/s10236-017-1039-2.
14. *Tezcan D., Myroshnychenko V., Kantarli S.* MARMOD database: Marmara Sea marine data // *Bollettino di Geofisica: teorica ed applicata. An Intern. J. Earth Sciences*. 2018. V. 59 Suppl. 1. P. 289–290.
15. *Tuğrul S., Sunay M., Baştürk Ö., Balkaş T.* The Izmit Bay Case Study // *The role of the oceans as a waste disposal option*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1986. P. 243–274.
16. *Ünlüata U., Oğuz T., Latif M., Özsoy E.* On the physical oceanography of the Turkish Straits // *The physical oceanography of sea straits*. Kluwer, Dordrecht, 1990. P. 25–60. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0677-8_2.

Study of Marmara Sea upwellings in cold season using remote sensing data

A. V. Medvedeva, S. V. Stanichny

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mail: sstanichny@mail.ru

The Marmara Sea has a unique temperature stratification, when in the cold season the surface waters have a lower temperature compared to the waters under the pycnocline. Thus, upwelling processes due to the warming of the surface layer can be recorded, unlike those typical, for example, of the Black Sea where the deep waters are always colder than the surface waters. Using data of satellite radiometers Landsat-7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), Landsat-8, -9 TIRS (Thermal Infrared

Sensor), Terra and Aqua MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) and Suomi-NPP VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) with spatial resolution of 60 to 1 km, cases of upwelling manifestation from November to March from 2000 to 2023 have been analyzed. 22 events lasting from 1 to 4 days were detected as a result of the influence of northeast winds with speeds of at least 9–10 m/s. The temperature contrast of the upwelling waters with the surrounding waters was up to 3–4 °C, the temperature of the cores on average did not exceed the quasi-constant temperature of 14.6 °C of the bottom layer. There were cases when the core temperature varied from 15.5 to 18.2 °C, some of them were explained by the preservation of heat reserves in the Gemlik Bay.

Keywords: Marmara Sea, winter upwelling, warm upwelling, satellite sensing, sea surface temperature, ETM+, TIRS Landsat, MODIS, VIIRS, Bosphorus Jet

Accepted: 03.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-235-243

References

1. Zapevalov A. S., Seasonal variability of vertical distributions of temperature and salinity in the Sea of Marmara, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2005, No. 2, pp. 78–84 (in Russian).
2. Aleskerova A. A., Kubryakov A. A., Stanichny S. V., A two-channel method for retrieval of the Black Sea surface temperature from Landsat-8 measurements, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, V. 52, pp. 1155–1161, <https://doi.org/10.1134/S0001433816090048>.
3. Aydoğdu A., Pinardi N., Özsoy E. et al., Circulation of the Turkish straits system between 2008–2013 under complete atmospheric forcing, *Ocean Science Discussion*, 2018, <https://doi.org/10.5194/os-2018-7>.
4. Balcı M., Durmuş T., Balkis N., Seasonal variations in the environmental parameters and water quality status of the Gulf of Gemlik in the Marmara Sea (Turkey), *Fresenius Environmental Bull.*, 2012, V. 21, No. 10a, pp. 3059–3068.
5. Beşiktepe Ş., Sur H. İ., Özsoy E. et al., The circulation and hydrography of the Marmara Sea, *Progress in Oceanography*, 1994, V. 34, No. 4, pp. 285–334.
6. Chiggiato J., Jarosz E., Book J. et al., Dynamics of the circulation in the Sea of Marmara: numerical modeling experiments and observations from the Turkish straits system experiment, *Ocean Dynamics*, 2012, V. 62, No. 1, pp. 139–159, <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0485-5>.
7. Gregg M., Özsoy E., Flow, water mass changes, and hydraulics in the Bosphorus, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2002, V. 107, No. C3, Article 3016, 23 p., <https://doi.org/10.1029/2000JC000485>.
8. Ilicak M., Federico I., Barletta I. et al., Modeling of the Turkish Strait System using a high resolution unstructured grid ocean circulation model, *J. Marine Science and Engineering*, 2021, V. 9, No. 7, Article 769, <https://doi.org/10.3390/jmse9070769>.
9. Latif M., Özsoy E., Oğuz T., Ünlüata Ü., Observations of the Mediterranean inflow into the Black Sea, *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1991, V. 38, pp. S711–S723.
10. Mutlu S., Kuzyaka E., Atabay H., Topal A., Coastal upwellings in the Sea of Marmara, *Intern. J. Environment and Geoinformatics*, 2023, V. 10, No. 4, pp. 48–55, <https://doi.org/10.30897/ijegeo.1338236>.
11. Oğuz T., Impacts of a buoyant strait outflow on the plankton production characteristics of an adjacent semi-enclosed basin: A case study of the Marmara Sea, *J. Marine Systems*, 2017, V. 173, pp. 90–100, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.05.002>.
12. Rubakina V. A., Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Seasonal variability of the diurnal cycle of the Black Sea surface temperature from the SEVIRI satellite measurements, *Physical Oceanography*, 2019, V. 26, No. 2, pp. 157–169, DOI: 10.22449/1573-160X-2019-2-157-169.
13. Sannino G., Sözer A., Özsoy E., A high-resolution modelling study of the Turkish Straits System, *Ocean Dynamics*, 2017, V. 67, No. 3, pp. 397–432, DOI: 10.1007/s10236-017-1039-2.
14. Tezcan D., Myroshnychenko V., Kantarli S., MARMOD database: Marmara Sea marine data, *Bollettino di Geofisica: teorica ed applicata, An Intern. J. Earth Sciences*, 2018, V. 59 Suppl. 1, pp. 289–290.
15. Tuğrul S., Sunay M., Baştürk Ö., Balkaş T., The Izmit Bay Case Study, In: *The role of the oceans as a waste disposal option*, Dordrecht: Springer Netherlands, 1986, pp. 243–274.
16. Ünlülata U., Oğuz T., Latif M., Özsoy E., On the physical oceanography of the Turkish Straits, In: *The physical oceanography of sea straits*, Kluwer, Dordrecht, 1990, pp. 25–60, https://doi.org/10.1007/978-94-009-0677-8_2.