Сезонный и суточный ход температуры вод Чёрного моря по данным термопрофилирующих дрейфующих буёв

В.А. Рубакина, А.А. Кубряков, С.В. Станичный

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия E-mail: valenru93@mail.ru

В настоящей работе исследованы особенности суточного хода температуры в верхнем слое Чёрного моря в различные сезоны по данным термопрофилирующих дрейфующих буёв и сканера SEVIRI. По данным термодрифтеров максимальные по модулю отрицательные аномалии температуры в поверхностном слое (горизонт 0,2 м) приходятся на период с 06:00 до 07:00 утра, а максимальные положительные — на вторую половину дня с 15:00 до 17:00. Наибольшие по модулю суточные отклонения температуры от среднесезонных значений наблюдаются в весенне-летний период с максимумом в мае. Отмечен ряд особенностей суточного хода в холодный период года. В январе температура на горизонте 0,2 м ниже, чем на горизонтах 12,2 и 15,2 м в течение суток. На горизонте 0,2 м выражен суточный ход с максимумом в 16:00 и минимумом в 08:00. В феврале – марте днём поверхность нагревается сильнее, чем слои 12,2–15,2 м, а в период ночного охлаждения температура становится меньше, чем на данных горизонтах. Рассмотрены случаи значительного дневного прогрева в холодный и тёплый периоды года. В феврале 2014 г. по данным дрифтера № 248990 выделено четыре таких случая. Разность максимального и минимального значений температуры за сутки на горизонте 0,2 м достигала 0,6 °С. На горизонтах ниже 10 м изменений температуры практически не наблюдалось. В тёплое время года в периоды прогрева разница максимального и минимального значений за сутки на горизонте 0,2 м превысила 4 °C и достигла 5,1 °C. Во всех случаях значимый дневной прогрев наблюдался во время минимальных скоростей ветра, которые не превышали 5 м/с, а облачный покров отсутствовал. Уменьшение ветрового перемешивания и потоки коротковолновой радиации способствовали стратификации жидкости и наблюдаемому дневному прогреву в летний и зимний периоды года. Выполнено краткое сопоставление данных сканера SEVIRI с данными термопрофилирующих дрейфующих буёв. Проведённая интеркалибрация показывает хорошее соответствие между спутниковыми и контактными данными. Относительные ошибки спутниковых измерений не превышают 0,4 °С.

Ключевые слова: термопрофилирующие дрейфующие буи, SEVIRI, сезонный и суточный ход температуры, Чёрное море, дневной прогрев

Одобрена к печати: 18.09.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-268-281

Введение

Суточные колебания температуры вод приповерхностного слоя вносят существенный вклад в турбулентный обмен теплом и импульсом между океаном и атмосферой, оказывают воздействие на формирование ветров (Marullo et al., 2016; Stuart-Menteth et al., 2003). Изменения стратификации вод, связанные с суточными колебаниями потоков тепла, влияют на физические и биогеохимические процессы в верхних слоях моря (океана) (Stuart-Menteth et al., 2003). Температура поверхностного слоя моря (далее — ТПМ) оказывает значительное влияние на точность восстановления параметров океана и атмосферы по спутниковым измерениям в микроволновом диапазоне: солёности, содержания водяного пара, скорости ветра и т.д. (Greenwald et al., 1993; Grodsky et al., 2012; Meissner et al., 2012). Для практически замкнутого Чёрного моря мониторинг ТПМ особенно важен, так как суточный ход ТПМ влияет на бризовые ветры, которые могут оказывать существенное воздействие на процессы обмена в береговой зоне (Ефимов, Барабанов, 2009; Efimov, Krupin, 2016).

Поглощение солнечного тепла наиболее интенсивно на поверхности, и максимальное увеличение температуры обычно ограничивается тонким приповерхностным слоем (на глубине $\sim 0,5-1$ м). Однако ветровое перемешивание может распространять поглощённое тепло ниже, в толщу вод. Таким образом, слой суточного прогрева может распространяться на глубину до 10-20 м под поверхность (Castro et al., 2014). Спутниковые средства дистанционного зондирования Земли на геостационарной орбите позволяют получать информацию о параметрах океана и атмосферы на планетарных масштабах с очень высоким временным разрешением. Эти данные являются важным источником информации для исследования высокочастотных колебаний температуры поверхностного слоя моря. В настоящее время одним из широко используемых приборов для дистанционного определения ТПМ является сканер SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager), который размещается на геостационарных метеорологических спутниках MSG (Meteosat Second Generation). С его помощью можно получать информацию о ТПМ с высокой дискретностью — 15 мин, что позволяет эффективно применять данные SEVIRI для изучения процессов дневного прогрева в различных районах океана (Filipiak et al., 2012; Gentemann et al., 2008; Marullo et al., 2010; Merchant et al., 2008).

В частности, в работах (Karagali, Hoyer, 2014; Marullo et al., 2016) проанализированы особенности суточного хода ТПМ по данным сканера SEVIRI для Средиземного моря и Атлантического океана, изучены случаи экстремального дневного прогрева, на основе дрифтерных и модельных данных проведён анализ суточных колебаний теплового баланса (Marullo et al., 2016). Отмечено также наличие случаев дневного прогрева зимой, весной и осенью, однако их количество существенно меньше.

В работе (Акимов и др., 2014) была разработана методика уменьшения средней ошибки восстановления полей ТПМ на основе данных спутникового сенсора SEVIRI для Черноморского региона. В исследовании (Рубакина и др., 2019) по данным SEVIRI выполнен анализ суточного хода ТПМ в Чёрном море, рассмотрены особенности пространственного распределения ТПМ, а также случаи значительного дневного прогрева. В частности, в этой работе было показано, что в отдельно взятых точках бассейна зафиксированы экстремально высокие значения амплитуды суточного хода 7–7,2 °C.

Однако исследования вертикального распределения суточных колебаний температуры, проникновение этих колебаний в толщу вод в открытой части моря невозможно осуществить по спутниковым измерениям. В то же время эта задача имеет важное фундаментальное значение, так как изменчивость стратификации в поверхностном слое определяет пульсационный характер стабильности вод. Это, в частности, может стать одной из причин спорадических зимних цветений фитопланктона в Чёрном море (Mikaelyan et al., 2017).

В настоящей работе для этой цели используются данные дрифтеров с термокосой, которые осуществляют высокочастотные измерения температуры в слое 0–50 м. (Толстошеев и др., 2008, 2014). На сегодняшний день исследование океана с помощью темопрофилирующих дрейфующих буёв (термодрифтеров), ориентированных главным образом на исследование термической структуры верхнего слоя глубоководной части моря, является важной частью современной системы оперативных наблюдений за Мировым океаном.

В работе (Толстошеев и др., 2014) проведено исследование результатов применения термодрифтеров, дана информация о принципе работы устройств и особенности их применения, представлены данные о дрифтерных экспериментах в Чёрном море и других регионах Мирового океана, рассмотрены методы обработки данных мониторинга. Возможности применения данных этих буёв для исследования короткопериодной изменчивости температуры верхнего слоя Чёрного моря (0–80 м) по долговременным измерениям описаны в публикации (Толстошеев, 2011).

В настоящей работе эти данные используются для исследования суточной динамики хода температуры вод Чёрного моря на различных горизонтах в разные сезоны года. Рассмотрены особенности суточного хода температуры и случаи максимального дневного прогрева в холодный и тёплый периоды по данным термопрофилирующих дрейфующих буёв и сканера SEVIRI. Также выполнено краткое сопоставление данных SEVIRI с данными темодрифтеров.

Использованные данные

В работе проведён анализ данных о температуре вод Чёрного моря на горизонтах 0,2–80 м двадцати буёв-профилемеров (далее — дрифтеры/термодрифтеры), функционировавших в Чёрном море в различные годы (2005–2007, 2009, 2013–2014) в разные сезоны. Временное разрешение термодрифтеров (частота измерения температуры) — от 30 мин до 2 ч (в зависимости от модификации термодрифтера); первый горизонт измерений — ~0,2 м; последний горизонт измерений, а также количество горизонтов зависят от модификации термодрифтера (максимальная глубина, на которой измерялась температура, составляет ~80 м). Временной интервал поступления данных (частота обновления данных с отправкой оператору) различен: от нескольких дней до нескольких месяцев. Погрешность измерений датчиков термокосы составляет 0,1 °C (Толстошеев и др., 2014). Для оценки средних значений проводилась также линейная интерполяция данных по глубине с шагом 1 м. Информация была получена из банка океанографических данных Морского гидрофизического института РАН (Моисеенко, Белокопытов, 2008).

На *рис. 1* приведены траектории термодрифтеров, данные с которых использовались в работе. Данные термодрифтеров получены практически для всей глубоководной части Чёрного моря. Большинство измерений дрифтеров сосредоточено в западной части бассейна в районе Основного Черноморского течения (ОЧТ).



Рис. 1. Траектории термодрифтеров за период с 2005 по 2007, 2009, с 2013 по 2014 гг. Различные цвета отображают траектории разных термодрифтеров, данные которых используются в работе

Поле ТПМ анализировалось по данным сканера SEVIRI за период с 2004 по 2016 г. Временная дискретность этой информации составляет 1 ч, пространственное разрешение — 5 км. Температура, измеряемая в ИК-диапазоне, формируется в тонком скин-слое (~0,1 мм) (Saunders, 1967). Данные получены из архива http://www.osi-saf.org/. На основе сравнения информации, полученной сканером SEVIRI, и измерений *in situ* свободно дрейфующими буями (дрифтерами) в работе (Акимов и др., 2014) были даны оценки точности измерений. Среднеквадратическое отклонение разности этих температур составило 0,45 К.

Анализ поля ветра производился по данным реанализа Era-Interim о скорости ветра на высоте 10 м. Временная дискретность составляет 6 ч, пространственное разрешение — 0,75° (Dee et al., 2011). Данные получены из архива https://www.ecmwf.int/. В работе (Garmashov et al., 2016) показано, что данные Era-Interim достаточно хорошо согласуются с контактными измерениями скорости ветра. Все вычисления, графики, диаграммы, карты приведены для локального времени.

Результаты и анализ

Высокочастотная изменчивость температуры по измерениям буёв-профилемеров

Рассмотрим ход температуры в Чёрном море на примере данных термодрифтера № 34860. На протяжении всего времени работы этот термодрифтер находился в юго-западной части Черноморского бассейна (*puc. 2a*.)



Рис. 2. Траектория термодрифтера № 34860 за период с 4 апреля по 4 июля 2005 г. (точка 1 — начальное положение дрифтера, точка 2 — конечное) (*a*); диаграмма распределения температуры на различных горизонтах по данным термодрифтера № 34860 (*б*); суточный ход температуры на горизонтах: 0,2 м (чёрная линия, сглаженная скользящим средним — красная линия) и 12,7 м (синяя линия) по данным термодрифтера № 34860 за период с 4 апреля по 4 июля 2005 г., зелёными эллипсами выделены случаи значительного дневного прогрева (*в*)

Диаграмма распределения температуры по горизонтам за всё время функционирования термодрифтера, представленная на *рис. 26*, хорошо отображает сезонные изменения температуры на различных горизонтах (от 0,2 м – поверхности – до 50 м). С середины апреля наблюдается плавное увеличение температуры, прогрев начинает достигать глубин 20–25 м, и к началу июля увеличение температуры уже затрагивает горизонты 28–30 м.

На горизонте 0,2 м ярко выражены суточные колебания температуры (*puc. 2в*). В то же время колебания на горизонте 12,7 м — высокочастотные, носят сложный характер (график на *puc. 2в*). Величины температур на этих горизонтах значительно отличаются, что наглядно отображает наличие в тёплое время года устойчивой стратификации между слоями. На протяжении всей работы термодрифтера отмечен ряд случаев значительного дневного прогрева (выделены эллипсами на графике *puc. 2в*). Разница максимального и минимального значений температуры за сутки (далее — амплитуда суточного хода) превысила 1,5-2 °C. По измерениям этого буя за 3 мес всего таких случаев было отмечено восемь. В мае зафиксировано наибольшее их количество (четыре), а также максимальная амплитуда событий дневного прогрева.

На примере дрифтера № 34860 проведено краткое сопоставление данных сканера SEVIRI с данными термопрофилирующих дрейфующих буёв. Для этого данные SEVIRI были линейно проинтерполированы на координаты и время измерения буя.

Временная изменчивость температуры, полученная по контактным и спутниковым данным, достаточно хорошо согласуется (*рис. 3*). Для большей части измерений разность температур не превышает сотые доли градуса. Случаи значительного дневного прогрева, зафиксированные дрифтером, также хорошо просматриваются и по спутниковым данным (обведены зелёным эллипсом). Коэффициент корреляции между рядами составляет 0,99, среднеквадратичное отклонение разницы данных — 0,32 °C. Таким образом, проведённая интеркалибрация показывает хорошее соответствие между этими массивами данных. Относительные ошибки спутниковых измерений не превышают 0,4 °C.



Рис. 3. Суточный ход температуры на горизонте 0,2 м по данным термодрифтера № 34860 за период с 4 апреля по 4 июля 2005 г. (синяя линия) и суточный ход ТПМ по интерполированным данным SEVI-RI за соответствующий период (красная линия); зелёными эллипсами выделены случаи значительного дневного прогрева

Для анализа сезонной динамики среднего суточного хода на поверхности была рассчитана диаграмма распределения средней температуры на горизонте 0,2 м в зависимости от времени суток и месяца (*puc. 4a*, см. с. 273). Для этого в каждом месяце находилось среднее значение температуры за определённый час суток по всем имеющимся данным (для всех дрифтеров). На диаграмме хорошо видно, что основной вклад в изменчивость температуры вод на поверхности даёт сезонный ход. Максимальные значения температуры наблюдаются в июле – августе (до 25,5 °C). Минимальные температуры приходятся на февраль – март.

Для того чтобы выделить суточный ход температуры, из массива распределения средней температуры на горизонте 0,2 м (диаграмма на *puc. 4a*) был вычтен средний сезонный ход (среднее значение температуры в каждом месяце). Таким образом получена диаграмма аномалий температуры (*puc. 4б*), которая отображает отклонение суточного хода температуры от среднего значения. Максимальные по модулю отрицательные аномалии температуры приходятся на время с 05:00 до 09:00 (0,2–0,4 °C), а максимальные положительные — с 15:00 до 18:00 (также 0,2–0,4 °C). Суточный ход температуры наблюдается с марта по ноябрь и отсутствует лишь в декабре – феврале, в период интенсивной зимней конвекции. Наибольшие по модулю отклонения температуры от среднесезонных значений отмечаются в весенне-летний период. Максимальные аномалии приходятся на май (±0,4 °C), т.е. амплитуда суточного хода в среднем равна 0,8 °C. В осенний период эти амплитуды составляют 0,2–0,4 С°. Эти оценки достаточно хорошо согласуются с результатами анализа суточного хода, полученного по данным сканера SEVIRI, в работе (Рубакина и др., 2019), в которой показано, что наибольшие значения ТПМ фиксируются в августе во второй половине дня, а наименьшие — в феврале – марте в первой половине дня; максимальные отрицательные аномалии TПМ наблюдаются с 05:00 до 07:00, а максимальные положительные — с 15:00 до 19:00. Наибольшие отклонения TПМ приходятся на апрель – июль, при этом максимальные аномалии отмечены в июне. Минимальные аномалии наблюдаются с середины ноября по март.



Рис. 4. Диаграммы сезонной изменчивости, построенные по данным всех термодрифтеров, используемых в работе (на горизонте 0,2 м по часам суток и месяцам года): *а* — температура, *б* — аномалии температуры

По данным термопрофилирующих буёв рассмотрен суточный ход температуры в Чёрном море на различных глубинах. Наиболее детально рассмотрены горизонты 0,2 и 12,2 м. На горизонте 0,2 м наблюдается наличие более или менее выраженного суточного хода для всех месяцев, кроме ноября и декабря.

Отмечен ряд особенностей суточного хода в холодное время года. Для этого периода характерна незначительная разница температуры вод для горизонтов 0,2 и 12,2 м. Это обусловлено отсутствием стратификации водных слоёв по температуре в холодный период.

В январе температура на горизонте 0,2 м меньше, чем в глубинных слоях, на горизонтах 12,2 и даже 15,2 м, что отображают графики *puc. 5a*. В феврале с 21:00 до 10:00 температура вод на горизонте 0,2 м ниже, чем в более глубинных слоях. Днём, однако, прогрев становится более интенсивным, чем в январе, и температура поверхностного слоя оказывается выше, чем на горизонте 12,2 м (*puc. 5б*). В марте большую часть суток горизонт 0,2 м имеет более высокую температуру, чем глубинные слои. Тем не менее в утренние часы (с 03:00 до ~08:30 по местному времени) происходит снижение температуры на горизонте 0,2 м до значений, близких к температуре на горизонте 12,2 м.



Рис. 5. График температуры на горизонтах 0,2 м (сплошная линия) и 12,2 м (пунктирная линия) по данным всех термодрифтеров, использованных в работе: *а* — в январе; *б* — в феврале; *в* — в марте; *е* — в мае; *д* — в августе; *е* — в октябре

На протяжении всего зимнего сезона в январе – марте для горизонта 0,2 м хорошо выражен суточный ход температуры с максимумом в 16:00 (по местному времени) и минимумом в 08:00-09:00 (*рис.* 5a-e). В среднем в январе – феврале амплитуды суточного хода невелики и не превышают $0,1^{\circ}$ С, а в марте составляют $0,2^{\circ}$ С. В то же время, по-видимому из-за более интенсивного перемешивания, в это время года суточный ход проникает на большие глубины. В частности, можно отметить наличие слабо выраженного суточного хода и на глубинах 12,2 м в феврале – марте с минимумом в 09:00 и максимумом в 17:00. Разница максимального и минимального значений несущественная (сотые доли градуса). Таким образом, в этот период года дневной прогрев может периодически стабилизировать верхний двадцатиметровый слой.

Для сравнения на *рис. 5г–е* приведены графики изменения средней температуры в зависимости от времени суток для мая, августа и октября, т.е. для тёплого времени года. В данный период суточный ход температуры ярко выражен только для горизонта 0,2 м и не отмечается в нижних слоях. Как и в предыдущий период, максимум температуры наблюдается в 16:00, а минимум — в 08:00. Амплитуды среднего суточного хода на горизонте 0,2 м составляют: в мае — ~1 °C, в августе — ~0,9 °C и в октябре — ~0,3 °C.

По данным дрифтеров проанализированы случаи значительного дневного прогрева в холодное время года (декабрь – март). Значительными считались те случаи, когда разница минимального и максимального значений температуры за сутки превышала 0,3 °C. По данным различных термодрифтеров в разные годы эти события имеют место 3-10 раз за холодный период. Анализ случаев значительного дневного прогрева в холодное время года имеет особый интерес, так как эти события могут стимулировать вспышки цветения фитопланктона (Mikaelyan et al., 2017).



Рис. 6. Суточный ход температуры на горизонтах 0,2 м (сплошная линия) и 13 м (пунктирная линия) в феврале 2014 г. (*a*); карта распределения среднего модуля скорости ветра за 11.02.2014 и направления ветра в 09:00 (чёрные стрелки) (*б*); карта распределения ТПМ 11.02.2014 в 09:00 по данным SEVIRI (*в*); карта распределения ТПМ 11.02.2014 в 09:00 по данным SEVIRI (*в*); карта распределения ТПМ 11.02.2014 в 15:00 по данным SEVIRI (*г*). Красной точкой на *рис. 6в* и *г* обозначена траектория дрифтера за рассматриваемый временной интервал

На примере данных дрифтера № 248990 более подробно рассмотрены случаи дневного прогрева в феврале – марте 2014 г. На *рис. 6а* (см. с. 275) представлен график суточного хода температуры на горизонтах 0,2 и 13 м в феврале 2014 г., наглядно иллюстрирующий практически полное отсутствие температурной стратификации в рассматриваемом временном интервале: разница температуры вод на горизонтах 0,2 и 13 м минимальна. Исключением являются случаи значительного дневного прогрева.

За рассматриваемый промежуток времени имели место четыре случая значительного дневного прогрева: 11, 12, 14 и 23 февраля (выделены на графике *puc. 6a* цифрами 1, 2, 3, 4 соответственно). Амплитуда суточного хода в выделенных случаях составила: 11 февраля — ~0,5 °C; 12 февраля — ~0,4 °C; 14 февраля — ~0,4 °C; максимальная амплитуда пришлась на 23 февраля — ~0,6 °C.

Детально проанализирован случай дневного прогрева 11 февраля 2014 г. (случай 1). В этот день температура за сутки на горизонте 0,2 м увеличилась от минимального значения 8,8 °C до максимального ~9,3 °C. Таким образом, величина суточного прогрева составила ~0,5 °C. На горизонте 13 м за этот же период времени изменения температуры практически не наблюдалось (см. пунктирную красную линию на графике *puc. 6a*). Это косвенно указывает на то, что перемешивание поверхностного слоя с более глубинными не происходило.

Данному случаю прогрева способствовали соответствующие условия: достаточно малая скорость ветра и низкая облачность над большей частью бассейна, что подтверждается данными реанализа Era-Interim и сканера SEVIRI (*рис.* 66-r). По данным реанализа Era-Interim в этот период в районе измерений наблюдался южный ветер со скоростями 3-5 м/с (см. *рис.* 66). Слабые ветра создавали условия для уменьшения перемешивания и перераспределения поглощённого солнечного излучения в ограниченном, достаточно тонком, верхнем слое. Отметим, что низкие скорости ветра наблюдались и во время остальных случаев значимого суточного прогрева вод, т.е. являлись необходимым условием для его возникновения.

Рассматриваемый случай прогрева хорошо отображают карты распределения ТПМ, построенные по данным сканера SEVIRI. На *рис. 6в* и *г* представлены карты за 09:00 и 15:00 (локальное время) 11 февраля 2014 г. По ним хорошо видно, что в районе пребывания дрифтера (обведён эллипсом) 11 февраля сохранялась безоблачная погода (область открыта для наблюдений в ИК-диапазоне), а также прослеживается рассматриваемый температурный перепад. По данным SEVIRI минимальная температура на поверхности в районе пребывания дрифтера составила ~9,2 °C, а максимальная — ~9,7 °C (амплитуда суточного хода — ~0,5 °C). Также следует отметить значительное увеличение ТПМ юго-восточной части бассейна, где скорость ветра не превышала 3,5–4 м/с, в то время как в северо-западном и юго-западном районах изменения ТПМ не столь существенны.

Дневной прогрев в тёплый период года

По данным термодрифтеров рассмотрены случаи значительно дневного прогрева в весеннелетнее время (май – август). Значительными считались те случаи, когда разница минимального и максимального значений температуры за сутки превышала 3 °C. На примере данных дрифтера № 34253 более подробно рассмотрены случаи дневного прогрева в 2005 г. За время функционирования термодрифтера (с января по август 2005 г.) в тёплый период года (май – август) было выделено три таких случая (*puc. 7a*, см. с. 277). В этот период случаи максимального дневного прогрева наблюдались 17 мая (~5 °C), 12 июля (~4,5 °C) и 17 августа (~3,9 °C) (выделены на графике цифрами 1, 2, 3 соответственно).

Детально проанализирован случай дневного прогрева 12 июля 2005 г. (случай 2).

В этот день температура за сутки на горизонте 0,2 м увеличилась от минимального значения 25,6 до 30,1 °C. Таким образом, величина суточного прогрева составила ~4,5 °C. На горизонте 12 м температура была значительно ниже — присутствовала характерная для тёплого периода года устойчивая стратификация.



Рис. 7. Суточный ход температуры на горизонте 0,2 м с января по август 2005 г. (*a*); карта распределения среднего модуля скорости ветра и его направления в 09:00 (чёрные стрелки) за 12.07.2005 (*б*); карта распределения ТПМ 12.07.2005 в 04:00 по данным SEVIRI (*в*); карта распределения ТПМ 12.07.2005 в 17:00 по данным SEVIRI (*е*). Красной точкой на *рис. 76* и *г* обозначена траектория дрифтера за рассматриваемый временной интервал

Формирование рассматриваемого случая прогрева обусловлено соответствующими погодными условиями в районе пребывания дрифтера: достаточно низкой скоростью ветра и отсутствием облачного покрова. Анализ поля ветра за указанную дату показал, что скорость ветра в районе пребывания дрифтера не превышала 4 м/с (*puc. 76*), а в юго-восточной части моря была ниже 3 м/с. Слабые ветра способствовали формированию тонкого дневного термоклина.

По данным SEVIRI над районом пребывания дрифтера облачный покров отсутствовал, что наглядно отображают карты распределения ТПМ за 04:00 и 17:00 (по местному времени) 12 июля 2005 г. (*рис. 7в* и *г*). Минимальная температура в 04:00 на поверхности по данным сканера составила ~24,5 °C, максимальная — ~27 °C. Таким образом, по данным SEVIRI зафиксирована амплитуда суточного хода ~3,5 °C, что несколько ниже, чем значение, полученное по данным дрифтера № 34253. На картах распределения ТПМ (см. *рис. 7в* и *г*) хорошо видно, что значительное увеличение ТПМ присуще большей части юго-восточного района Чёрного моря, где скорости ветра минимальны — не превышают 4 м/с (карта *рис. 7б*), в то время как в западной его части, открытой для ИК-наблюдений, изменения температуры незначительны, а скорость ветра выше — 7–9 м/с.

Заключение

В представленной работе проведено исследование сезонного и суточного хода температуры вод Чёрного моря на горизонтах 0,2–12,2 м по данным двадцати буев-профилемеров, которые измеряли температуру верхнего слоя Чёрного моря с дискретностью 0,5–1 ч в различные годы в разные сезоны.

Проведён анализ сезонной динамики среднего суточного хода на поверхности. На горизонте 0,2 м наблюдается наличие более или менее выраженного суточного хода для всех месяцев, кроме ноября и декабря. Максимальные по модулю отрицательные аномалии суточного хода температуры на горизонте 0,2 м от среднего значения за сутки приходятся на время с 05:00 до 09:00, а максимальные положительные — с 15:00 до 18:00. Наибольшие по модулю суточные отклонения температуры от среднемесячных значений наблюдаются в весенне-летний период, максимальные аномалии приходятся на май (0,8 °C).

Сопоставление спутниковых и контактных данных, использованных в работе, показало, что временная изменчивость температуры, полученная по контактным и спутниковым данным, достаточно хорошо согласуется. Зафиксированные термодрифтером случаи значительного дневного прогрева также хорошо просматриваются и по спутниковым данным SEVIRI. Коэффициент корреляции между рядами составляет 0,99, среднеквадратичное отклонение разницы этих данных — 0,32 °C. Выполненная интеркалибрация показывает хорошее соответствие между массивами данных контактных и спутниковых измерений. Относительные ошибки спутниковых измерений не превышают 0,4 °C.

Выявлен ряд особенностей суточного хода температуры в холодный период года. В январе температура в слое 0,2 м ниже, чем на горизонте 12,2 м. В феврале – марте с ростом интенсивности дневного прогрева в дневное время температура на поверхности выше, чем на горизонте 12,2 м, а в ночное время — ниже. Для холодного времени характерна незначительная разница температуры вод для горизонтов 0,2 и 12,2 м — 0,01–0,1 °С. Для горизонта 0,2 м выражен суточный ход температуры с минимумом в 08:00–10:00 и максимумом в 16:00. В холодный период года суточный ход температуры отмечается также на горизонте 12,2 м.

Исследованы случаи максимального дневного прогрева в холодный и тёплый периоды года на примере данных дрифтеров № 248990 и 34253 соответственно. Амплитуды дневного прогрева в холодное время достигали 0,6 °С, а в тёплое — 4,5 °С. Формирование значительного дневного прогрева как в холодное, так и в тёплое время года происходило при соответствующих условиях: малой облачности и низкой скорости ветра, способствующих возникновению стабильного дневного термоклина. Во всех рассмотренных случаях эти условия выполнялись, что подтверждается данными реанализа Era-Interim и сканера SEVIRI.

Анализ данных сканера SEVIRI выполнен в рамках государственного задания № 0555-2019-0001. Сопоставление спутниковых и контактных данных проведено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-31-27001.

Литература

- 1. *Акимов Е.А., Станичный С.В., Полонский А.Б.* Использование данных сканера SEVIRI для оценки температуры поверхностного слоя Черного моря // Морской гидрофиз. журн. 2014. № 6. С. 37–46.
- 2. *Ефимов В. В., Барабанов В. С.* Бризовая циркуляция в Черноморском регионе // Морской гидрофиз. журн. 2009. № 5. С. 23–36.
- 3. *Рубакина В.А., Кубряков А.А., Станичный С. В.* Сезонная изменчивость суточного хода температуры поверхностного слоя Чтрного моря по данным сканера SEVIRI // Морской гидрофиз. журн. 2019. № 2. С. 171–184. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-2-171-184.
- 4. *Толстошеев А. П.* Использование термопрофилирующих дрейфующих буев для изучения верхнего слоя Черного моря // Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу. 2011. С. 273–278.
- 5. *Толстошеев А. П., Лунев Е. Г., Мотыжев В. С.* Развитие средств и методов дрифтерной технологии применительно к проблеме изучения Черного моря // Океанология. 2008. Т. 48. № 1. С. 149–158.
- 6. *Толстошеев А. П., Лунев Е. Г., Мотыжев С. В.* Анализ результатов натурных экспериментов с термопрофилирующими дрейфующими буями в Черном море и других районах Мирового океана // Морской гидрофиз. журн. 2014. № 5. С. 9–32.
- Castro S. L., Wick G. A., Buck J. J. Comparison of diurnal warming estimates from unpumped Argo data and SEVIRI satellite observations // Remote Sensing of Rnvironment. 2014. V. 140. P. 789–799. URL: https:// doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.042.

- Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., Hólm E. V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2011. V. 137. No. 65. P. 553–597. URL: https://doi.org/10.1002/qj.828.
- 9. *Efimov V.V., Krupin A.V.* Breeze circulation in the Black Sea region // Russian Meteorology and Hydrology. 2016. V. 41. Iss. 4. P. 240–246. DOI: 10.3103/S1068373916040026.
- 10. *Filipiak M.J., Merchant C.J., Kettle H., Borgne P.L.* An empirical model for the statistics of sea surface diurnal warming // Ocean Science. 2012. V. 8. Iss. 2. P. 197–209. DOI: 10.5194/os-8-197-2012.
- 11. *Garmashov A. V., Kubryakov A. A., Shokurov M. V., Stanichny S. V., Toloknov Y. N., Korovushkin A. I.* Comparing satellite and meteorological data on wind velocity over the Black Sea // Izvestiya — Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. V. 52. Iss. 3. P. 309–316. DOI: 10.1134/S000143381603004X.
- 12. *Gentemann C. L., Minnett P.J., Le Borgne P., Merchant C.J.* Multi-satellite measurements of large diurnal warming events // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. Iss. 22. P. 1–6. DOI: 10.1029/2008GL035730.
- Greenwald T.J., Stephens G. L., Vonder Haar T. H., Jackson D. L. A physical retrieval of cloud liquid water over the global oceans using Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) observations // J. Geophysical Research: Atmospheres. 1993. V. 98. No. D10. P. 18471–18488. URL: https://doi.org/10.1029/93JD00339.
- Grodsky S.A., Kudryavtsev V.N., Bentamy A., Carton J.A., Chapron B. Does direct impact of SST on short wind waves matter for scatterometry? // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. Iss. 12. P. 1–6. DOI: 10.1029/2012GL052091.
- 15. *Karagali I., Hoyer J. L.* Characterisation and quantification of regional diurnal SST cycles from SEVIRI // Ocean Science. 2014. V. 10. Iss. 5. P. 745–758. DOI: 10.5194/os-10-745-2014.
- Marullo S., Santoleri R., Banzon V., Evans R. H., Guarracino M. A diurnal-cycle resolving sea surface temperature product for the tropical Atlantic // J. Geophysical Research: Oceans. 2010. V. 115. Iss. 5. P. 1–18. DOI: 10.1029/2009JC005466.
- Marullo S., Minnett P.J., Santoleri R., Tonani M. The diurnal cycle of sea-surface temperature and estimation of the heat budget of the Mediterranean Sea // J. Geophysical Research: Oceans. 2016. V. 121. Iss. 11. P. 8351–8367. DOI: 10.1002/2016JC012192.
- 18. *Meissner T., Wentz F., Hilburn K., Lagerloef G., Le Vine D.* The Aquarius salinity retrieval algorithm // Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2012. P. 386–388.
- Merchant C. J., Filipiak M. J., Le Borgne P., Roquet H., Autret E., Piollé J. F., Lavender S. Diurnal warmlayer events in the western Mediterranean and European shelf seas // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. Iss. 4. P. 1–4. DOI: 10.1029/2007GL033071.
- Mikaelyan A. S., Chasovnikov V. K., Kubryakov A. A., Stanichny S. V. Phenology and drivers of the winter-spring phytoplankton bloom in the open Black Sea: The application of Sverdrup's hypothesis and its refinements // Progress in Oceanography. 2017. V. 151. P. 163–176. URL: https://doi.org/10.1016/j. pocean.2016.12.006.
- 21. *Saunders P. M.* The temperature at the ocean-air interface // J. Atmospheric Sciences. 1967. V. 24. No. 3. P. 269–273. DOI: 10.1002/2017MS001175.
- Stuart-Menteth A. C., Robinson I. S., Challenor P. G. A global study of diurnal warming using satellite-derived sea surface temperature // J. Geophysical Research: Oceans. 2003. V. 108. No. C5. P. 1–16. DOI: 10.1029/2002JC001534.

Seasonal and diurnal cycle of the Black Sea water temperature from temperature-profiling drifters data

V.A. Rubakina, A.A. Kubryakov, S.V. Stanichny

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia E-mail: valenru93@mail.ru

In the present study, the features of the temperature diurnal cycle of the Black Sea upper layer during different seasons were studied using temperature-profiling drifters data and the scanner SEVIRI. According to the thermodrifters data, the maximal negative temperature anomalies in the surface layer

(horizon of 0.2 m) are typical for period from 06:00 to 07:00 in the morning, and the maximum positive anomalies in the second half of the day from 15:00 to 17:00. The largest diurnal absolute temperature deviations from mean seasonal values are noted in the spring-summer period with a maximum in May. Set of the diurnal cycle features in the cold period of the year is noted. In January, the temperature on the horizon 0.2 m is lower than on the horizons of 12.2 and 15.2 m during the day. On the horizon of 0.2 m, the diurnal cycle with a maximum at 16:00 and a minimum at 08:00 is expressed. In February and in March, during the daytime, the surface heats up more strongly than the layers of 12.2–15.2 m, and during the night cooling period the temperature becomes lower than at these horizons. Events of significant diurnal warming in the cold and warm period of the year are considered. In February 2014, according to the data of drifter N 248990, four significant events were identified. The difference between the maximum and minimum temperature values during the day reached 0.6 $^{\circ}$ C on a horizon of 0.2 m. Temperature changes of the horizons below 10 m were not observed. During the warm period of the year the difference between the maximum and minimum values during the day on a horizon of 0.2 m for significant diurnal warming events exceeded 4 °C and reached 5.1 °C. The rise of short-wave radiation fluxes and the decrease of wind mixing lead to the water stratification and the observed daily warming in the summer and winter periods of the year. All of these events were observed during calm weather conditions in which the wind speed did not exceed 5 m/s and cloud cover was absent. A brief comparison of the SEVIRI data with the temperature-profiling drifters data was carried out. The performed intercalibration shows a good conformity between satellite and contact data. Relative errors of satellite measurements do not exceed 0.4 °C.

Keywords: temperature-profiling drifters, SEVIRI, seasonal and diurnal cycle of the water temperature, Black Sea, diurnal warming

Accepted: 18.09.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-268-281

References

- 1. Akimov E. A., Stanichnyi S. V., Polonskii A. B., Ispol'zovanie dannykh skanera SEVIRI dlya otsenki temperatury poverkhnostnogo sloya Chernogo morya (Using of SEVIRI Scanner Data for estimation of Black Sea Surface Temperature), *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2014, No. 6, pp. 37–46.
- 2. Efimov V.V., Barabanov V.S., Brizovaya tsirkulyatsiya v Chernomorskom regione (Breeze circulation in the Black Sea region), *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2009, No. 5, pp. 23–36.
- 3. Rubakina V.A., Kubryakov A.A., Stanichnyi S.V., Sezonnaya izmenchivost' sutochnogo khoda temperatury poverkhnostnogo sloya Chernogo morya po dannym skanera SEVIRI (Seasonal Variability of the Diurnal Cycle of the Black Sea Surface Temperature from the SEVIRI Satellite Measurements), *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2019, No. 2, pp. 171–184, DOI: 10.22449/0233-7584-2019-2-171-184.
- 4. Tolstosheev A. P., Ispol'zovanie termoprofiliruyushchikh dreifuyushchikh buev dlya izucheniya verkhnego sloya Chernogo morya (The use of temperature-profiling drifters to study the Black Sea upper layer), *Ekologichna bezpeka priberezhnoï ta shel'fovoï zon ta kompleksne vikoristannya resursiv shel'fu*, 2011, pp. 273–278.
- 5. Tolstosheev A. P., Lunev E. G., Motyzhev V. S., Razvitie sredstv i metodov drifternoi tekhnologii primenitel'no k probleme izucheniya Chernogo morya (Development of means and methods of drifter technology applied to the problem of the Black Sea research), *Okeanologiya*, 2008, Vol. 48, No. 1, pp. 149–158.
- 6. Tolstosheev A. P., Lunev E. G., Motyzhev S. V., Analiz rezul'tatov naturnykh eksperimentov s termoprofiliruyushchimi dreifuyushchimi buyami v Chernom more i drugikh raionakh Mirovogo okeana (Analysis of the field experiments results with temperature-profiling drifters in the Black Sea and other World Ocean regions), *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2014, No. 5, pp. 9–32.
- Castro S. L., Wick G.A., Buck J.J., Comparison of diurnal warming estimates from unpumped Argo data and SEVIRI satellite observations, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 140, pp. 789–799, available at: https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.042.
- Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., Hólm E. V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F., The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2011, Vol. 137, No. 65, pp. 553–597, available at: https://doi.org/10.1002/qj.828.

- 9. Efimov V.V., Krupin A.V., Breeze circulation in the Black Sea region, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, Vol. 41, Issue 4, pp. 240–246, DOI: 10.3103/S1068373916040026.
- Filipiak M.J., Merchant C.J., Kettle H., Borgne P.L., An empirical model for the statistics of sea surface diurnal warming, *Ocean Science*, 2012, Vol. 8, Issue 2, pp. 197–209, DOI: 10.5194/os-8-197-2012.
- 11. Garmashov A. V., Kubryakov A. A., Shokurov M. V., Stanichny S. V., Toloknov Y. N., Korovushkin A. I., Comparing satellite and meteorological data on wind velocity over the Black Sea, *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, Issue 3, pp. 309–316, DOI: 10.1134/S000143381603004X.
- 12. Gentemann C. L., Minnett P. J., Le Borgne P., Merchant C. J., Multi-satellite measurements of large diurnal warming events, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35, Issue 22, pp. 1–6, DOI:10.1029/2008GL035730.
- Greenwald T.J., Stephens G.L., Vonder Haar T.H., Jackson D.L., A physical retrieval of cloud liquid water over the global oceans using Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) observations, J. Geophysical Research: Atmospheres, 1993, Vol. 98, No. D10, pp. 18471–18488, available at: https://doi. org/10.1029/93JD00339.
- Grodsky S.A., Kudryavtsev V.N., Bentamy A., Carton J.A., Chapron B., Does direct impact of SST on short wind waves matter for scatterometry? *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, Issue 12, pp. 1–6, DOI: 10.1029/2012GL052091.
- 15. Karagali I., Hoyer J. L., Characterisation and quantification of regional diurnal SST cycles from SEVIRI, *Ocean Science*, 2014, Vol. 10, Issue 5, pp. 745–758, DOI:10.5194/os-10-745-2014.
- Marullo S., Santoleri R., Banzon V., Evans R. H., Guarracino M., A diurnal-cycle resolving sea surface temperature product for the tropical Atlantic, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2010, Vol. 115, Issue 5, pp. 1–18, DOI: 10.1029/2009JC005466.
- 17. Marullo S., Minnett P.J., Santoleri R., Tonani M., The diurnal cycle of sea-surface temperature and estimation of the heat budget of the Mediterranean Sea, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2016, Vol. 121, Issue 11, pp. 8351–8367, DOI: 10.1002/2016JC012192.
- 18. Meissner T., Wentz F., Hilburn K., Lagerloef G., Le Vine D., Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS), 2012, pp. 386–388.
- 19. Merchant C.J., Filipiak M.J., Le Borgne P., Roquet H., Autret E., Piollé J.F., Lavender S., Diurnal warm-layer events in the western Mediterranean and European shelf seas, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35, Issue 4, pp. 1–4, DOI: 10.1029/2007GL033071.
- Mikaelyan A. S., Chasovnikov V. K., Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Phenology and drivers of the winter–spring phytoplankton bloom in the open Black Sea: The application of Sverdrup's hypothesis and its refinements, *Progress in Oceanography*, 2017, Vol. 151, pp. 163–176, available at: https://doi.org/10.1016/j. pocean.2016.12.006.
- 21. Saunders P. M., The temperature at the ocean-air interface, *J. Atmospheric Sciences*, 1967, Vol. 24, No. 3, pp. 269–273, DOI: 10.1002/2017MS001175.
- Stuart-Menteth A. C., Robinson I. S., Challenor P. G., A global study of diurnal warming using satellitederived sea surface temperature, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2003, Vol. 108, No. C5, pp. 1–16, DOI: 10.1029/2002JC001534.