Аномальное ветровое воздействие на температуру поверхностного слоя Чёрного моря осенью 2017 года

С. В. Станичный, Р. Р. Станичная, Е. П. Давыдова, В. А. Рубакина

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mails: sstanichny.ru, rrsta@mail.ru, elenadavydov@gmail.com, valenru93@mail.ru

На основе комплексного анализа спутниковых данных о температуре поверхности моря, данных дрифтеров ARGO и результатов атмосферного моделирования SKIRON рассмотрена ситуация с наблюдаемым понижением температуры поверхностного слоя более чем на 10 °C в северо-восточной части Чёрного моря в конце сентября – начале октября 2017 г. Такого рода аномалии могут играть важную роль в процессах обмена между поверхностными и подтермоклинными водами. В результате ветрового воздействия перемешанный слой по данным ARGO заглубился до 24 м, а ядро холодного промежуточного слоя сместилось на 14 м вверх и находилось на глубине 30 м. Совместный анализ вертикальных профилей температуры и завихренности напряжения трения ветра показал, что основную роль в изменении температуры играют вертикальные движения (экмановский подъём вод). Рассчитанные по завихренности касательного напряжения трения скорости подъёма вод достигали величины 4,2 м за сутки. Оценённый по изменению вертикальных скоростей с учётом вертикального распределения температуры временной ход температуры перемешанного слоя хорошо соответствует наблюдаемому по данным SEVIRI (*англ.* Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) спутника Meteosat.

Ключевые слова: Чёрное море, аномалии температуры, неоднородность ветра, спутниковые данные, дрифтеры ARGO

Одобрена к печати: 30.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-341-349

Введение

Быстрые изменения температуры поверхностного слоя Чёрного моря в тёплый сезон под действием ветра хорошо изучены для прибрежных апвеллингов (Гинзбург и др., 1997; Зацепин и др., 2016; Станичная, Станичный, 2021). Однако локальные особенности поля ветра могут вызывать резкие наблюдаемые понижения температуры и в открытой части Чёрного моря. Примеры таких изменений и влияние сильных ветров на параметры экосистемы описаны в работах (Kubryakov et al., 2019; Stanichny et al., 2021). Отметим, что в обоих случаях это не собственно охлаждение вод поверхностного слоя, а замещение тёплых вод более холодными. Физическими процессами, отвечающими за такие изменения, считаются вертикальные скорости как результат экмановской накачки, определяющие подъём сезонного термоклина, и сильные ветры, вызывающие перемешивание верхнего слоя с водами термоклина (Ефимов, Барабанов, 2017; Зацепин и др., 2008; Яровая, Ефимов, 2021). Чёрное море, как замкнутый бассейн с наличием изменчивой топографии берегов от невысоких степных районов до горных массивов, характеризуется достаточно высокой пространственной изменчивостью поля приводного ветра (Ефимов и др., 2011), что в свою очередь вызывает достаточно большие вертикальные скорости в море за счёт экмановской накачки. Так локальные атмосферные циклоны в конце сентября 2005 г. и в начале октября 2024 г. в западной части моря (Ефимов и др., 2008; Станичный и др., 2024) вызывали холодные аномалии в поверхностной температуре величиной до 10 °C, а оценённая по завихренности напряжения трения ветра вертикальная скорость достигала 10^{-4} м/с. Анализ спутниковых данных с 1996 по 2025 г. по проявлению аномальных изменений температуры в восточной части Чёрного моря выявил 12 случаев с изменениями, превышающими 5–10 °C за несколько дней.

В настоящей работе на основе спутниковых данных сканеров MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite),

AVHRR (*англ.* Advanced Very High Resolution Radiometer), SEVIRI (*англ.* Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager), данных о скорости ветра SKIRON, вертикальных профилей температуры ARGO рассмотрены причины и характеристики изменений поверхностной температуры для ситуации с сильными ветрами в конце сентября – начале октября 2017 г. в северо-восточной части Чёрного моря, вызвавшими изменение температуры поверхностного слоя более чем на 10 °С. Результаты простых модельных оценок по данным о завихренности напряжения трения ветра сопоставлены с измерениями.

Данные и методы

Данные о температуре сканеров MODIS, VIIRS, AVHRR получены с сайта (dvs.net.ru) отдела дистанционных методов исследования ФГБУН ФИЦ МГИ РАН (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»). В статье используются данные прогноза ветра системы моделирования SKIRON/ETA, выполненные в Афинском университете группой по атмосферному моделированию и прогнозированию погоды (Kallos et al., 1997). Применены данные о скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря на сетке с шагом 0,1×0,1° с временным разрешением 3 ч.

Расчёт параметров ветра проводился по следующим формулам:

• компоненты напряжения трения ветра τ_x и τ_y (по оси x — восток и оси y — север) определяются аэродинамической формулой:

$$\tau_x = \rho_a C_d |\mathbf{V}| U, \tau_y = \rho_a C_d |\mathbf{V}| V,$$

где ρ_a — плотность воздуха (обычно принимается ≈1,24 кг/м^3); C_d — безразмерный коэффициент сопротивления морской поверхности (в работе считался постоянным — $1{,}3 \cdot 10^{-3}$); $\mathbf{V} = (U, V)$ — вектор скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря (в м/с); $|\mathbf{V}|$ — модуль скорости ветра.

• уравнение расчёта вертикальной скорости Экмана W:

$$W = (\mathrm{rot}\ \tau)/(\rho_w \times f),$$

где ρ_w — плотность морской воды (в кг/м^3); f — параметр Кориолиса (в с$^{-1}$).

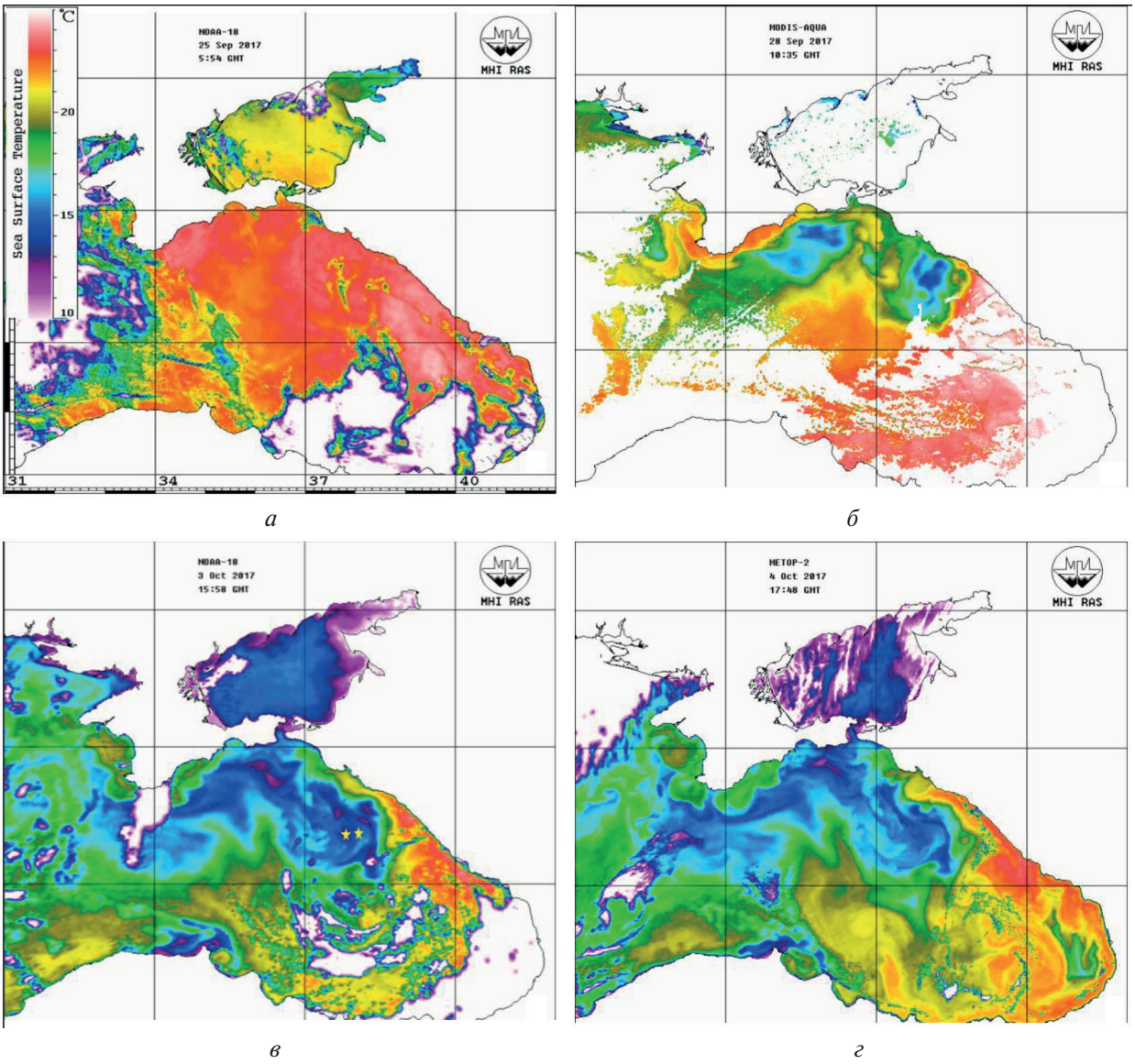
Данные ARGO номер 7900591 были загружены с сайта (https://fleetmonitoring.euro-argo.eu) и интерполированы на регулярный шаг по глубине в 1 м.

Для исследования временного изменения температуры поверхности моря (*англ.* sea surface temperature) использовались данные сканера SEVIRI в инфракрасном диапазоне спутника Meteosat второго поколения на геостационарной орбите. Временное разрешение данных — 1 ч, пространственное разрешение — 5 км. Данные получены на портале OSI SAF (*англ.* Satellite Application Facility on Ocean and Sea Ice) (https://osi-saf.eumetsat.int).

Температура

Ситуация в третьей декаде сентября в северо-восточной части Чёрного моря характеризовалась достаточно высокой температурой морской поверхности, превышающей 25 °С.

На *рис. 1* показаны карты температуры для северо-восточной части Чёрного моря за 25, 28 сентября, 3 и 4 октября 2017 г. Отметим почти равномерное поле температуры в рассматриваемой области со значениями, превышающими 25 °С на карте за 25 сентября. Однако уже на карте за 28 сентября видны области с температурой меньше 15 °С и существенные пространственные неоднородности. Выделяются две зоны пониженных значений температуры — южнее Крымского полуострова и на юг от Новороссийска — с характерными размерами порядка 100 км. На карте температуры за 3 октября минимальные значения температуры уже составляли около 13 °С, хорошо проявились мезомасштабные структуры, которые могут играть важную роль в формировании вертикальных движений (Podymov et al., 2023). Образовавшаяся холодная аномалия расширялась на запад и уже 17 октября занимала большую часть центрального бассейна моря (*рис. 2*), отличаясь на 5–8 °С от температуры периферийной части моря.



а *б*

в *г*

Рис. 1. Карты температуры морской поверхности демонстрируют развитие холодной аномалии температуры за 25 (*а*), 28 (*б*) сентября, 3 (*в*), 4 октября (*г*) 2017 г.

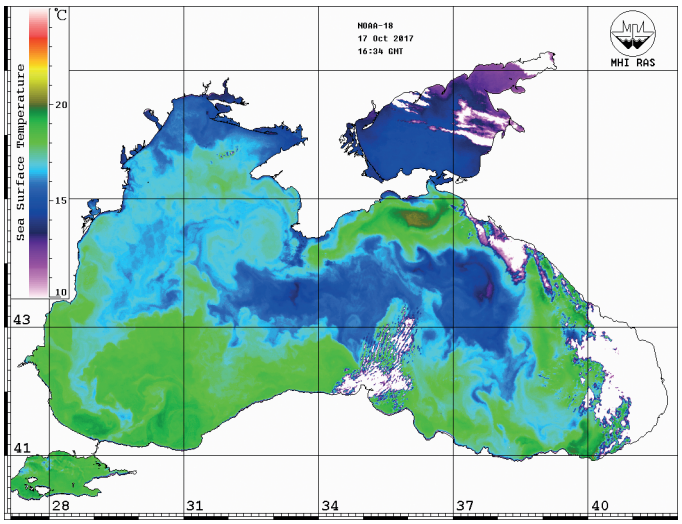


Рис. 2. Карта температуры морской поверхности через две недели после ветрового воздействия

Ветер

Сильные северо-восточные ветры со скоростями до 17–18 м/с наблюдались с 26 сентября по 4 октября. Пример карты скорости ветра по данным SKIRON показан на *рис. 3*.

На *рис. 4* приведена карта средней скорости ветра за период 26 сентября – 4 октября по данным SKIRON. Отметим существование двух максимумов, в которых значения скорости превышают 10 м/с.

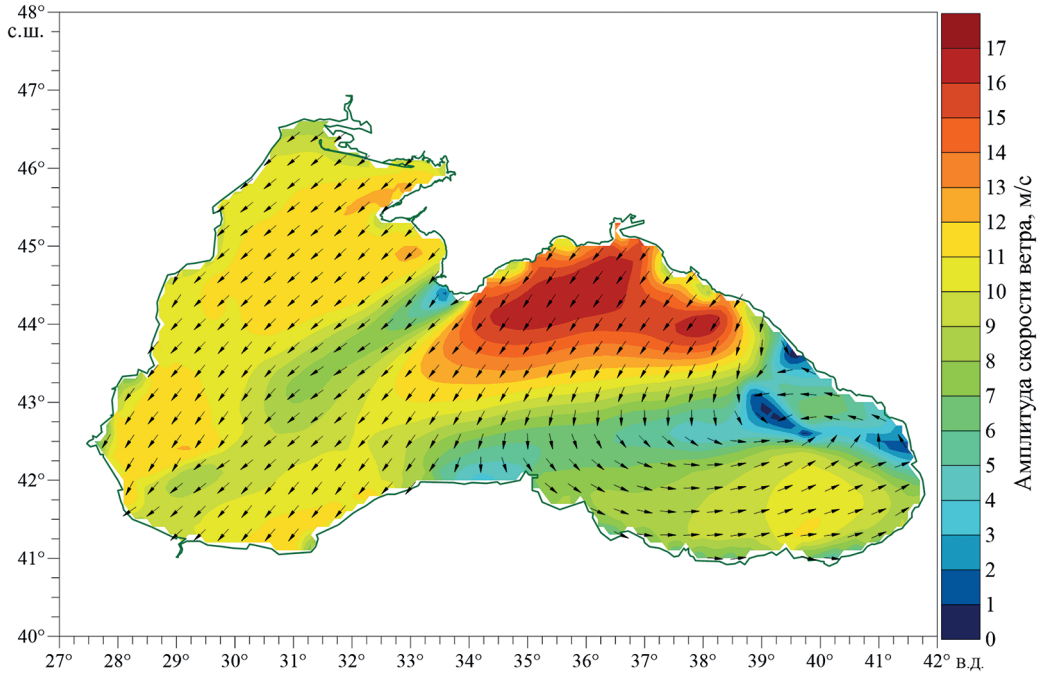


Рис. 3. Пример карты скорости ветра за 28.09.2017, 09:00, по данным SKIRON

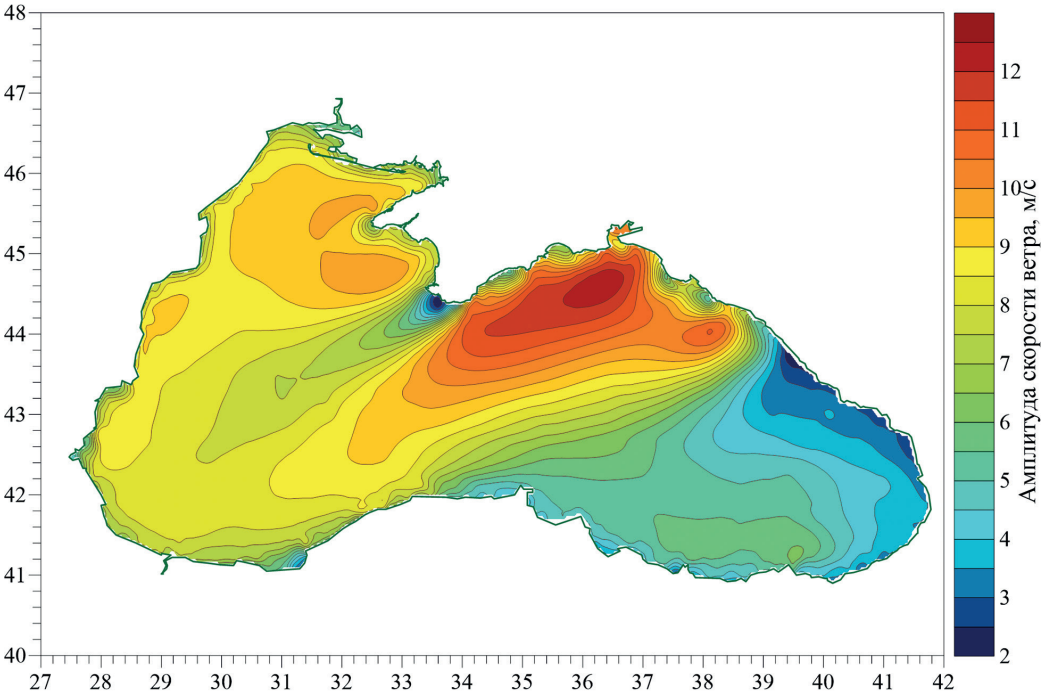


Рис. 4. Карта средних значений амплитуды скорости ветра за период 26 сентября – 4 октября

Данные ARGO

В зоне сильных ветров находился буй ARGO номер 7900591, с которого были получены вертикальные профили температуры 23 сентября и 3 октября, положения зондирования отмечены на *рис. 1* звёздочками. На *рис. 5* показаны экстремальные изменения вертикальных профилей температуры. Хорошо видно перемешивание верхнего слоя (заглубление термоклина) и подъём подтермоклинных вод на 14 м. При этом ядро холодного промежуточного слоя с температурой 7,67 °С оказалось на глубине 30 м. Температура перемешанного слоя уменьшилась с 25 °С до 14,3 °С. Общее изменение температуры затронуло слои до 80 м.

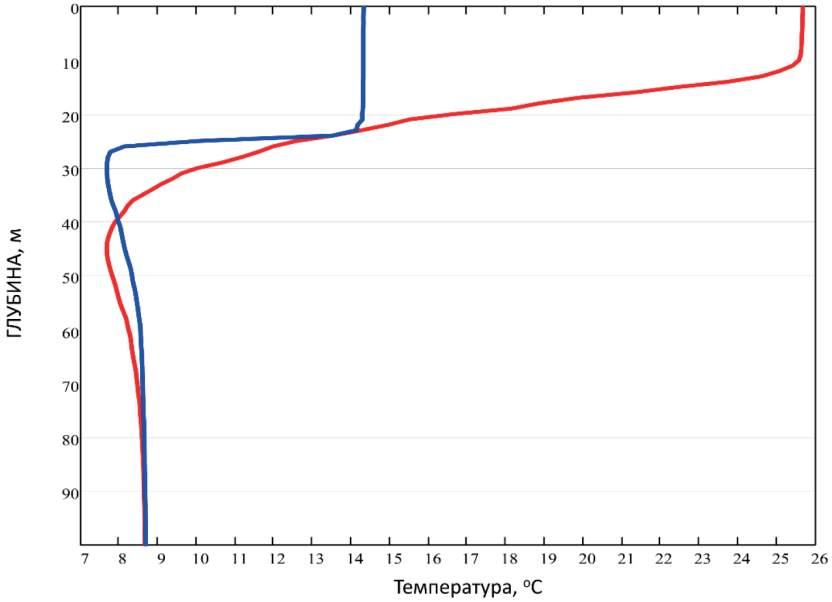


Рис. 5. Вертикальные профили температуры по данным дрифтера ARGO номер 7900591. Красная линия — 23.09.2017, синяя — 03.10.2017

Обсуждение результатов

Простое перемешивание не могло изменить температуру воды на величину больше 10 °С, так как среднее значение температуры до глубины 24 м по профилю за 23 сентября составляет 22 °С, т. е. существенную роль играет вертикальная скорость и, соответственно, поступление подтермоклинных вод в перемешанный слой. На *рис. 6* представлена карта средних значений W за период с 25 по 28 сентября.

Отметим пространственную неоднородность этой скорости и высокие значения в максимумах. Пространственная структура поля схожа со средними значениями завихренности поля ветра, полученными в работе (Шокурова и др., 2021) для спутниковых данных.

Проведём оценку вклада вертикальных скоростей в формирование профиля температуры на основе данных о скорости ветра.

На *рис. 7* приведены рассчитанные значения вертикальных экмановских скоростей для ближайшего к зондированиям ARGO 3 октября узла сетки SKIRON. Хорошо прослеживается увеличение скорости 27–28 сентября до $5{\cdot}10^{-5}$ м/с, что соответствует подъёму вод до 4,3 м/сут. Интегральный подъём за 10 дней между зондированиями составил 15 м, что хорошо совпадает с наблюдаемым по профилям температуры — 14 м.

Для оценки временной изменчивости температуры предположим, что перемешивание верхнего слоя до 24 м прошло достаточно быстро (Яровая, 2021), а дальнейшие изменения температуры определялись замещением вод перемешанного слоя низлежащими водами, поступающими за счёт вертикальной скорости.

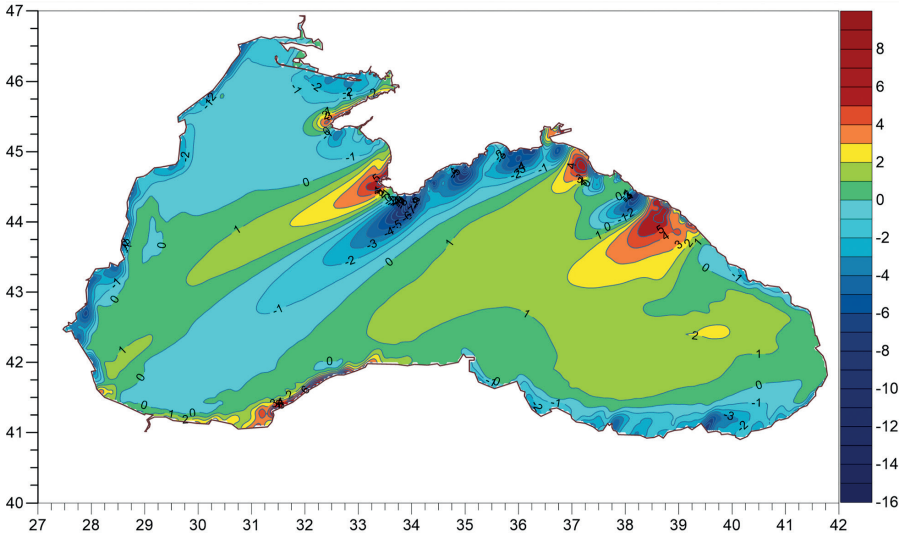


Рис. 6. Средние значения экмановской вертикальной скорости ($\times 10^5$), рассчитанные по данным модели SKIRON за 25–28 сентября 2017 г.

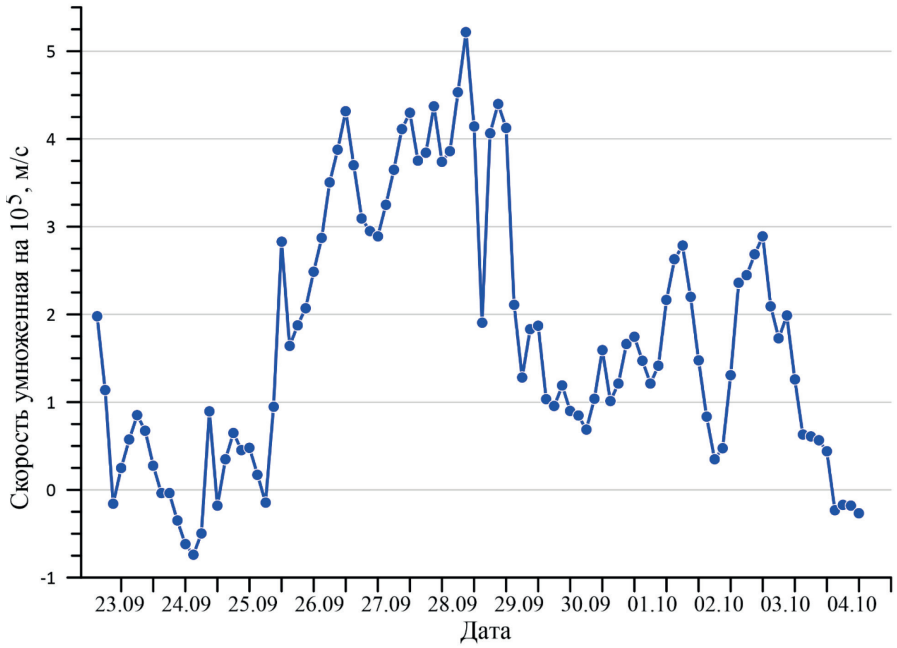


Рис. 7. Рассчитанные с интервалом 3 ч. и осреднённые за период 23.09–04.10.2017 значения экмановской вертикальной скорости в точке с широтой 43,7° и долготой 38,1°

В этом случае можно записать уравнение для расчёта изменений температуры за сутки:

$$T(\text{day}+1) = T(\text{day}) + (T(\text{day}) - T_u)\cdot(W(\text{day})\times 86\,400)/H,$$

где T(day) — температура перемешанного слоя; T_u — температура вод ниже перемешанного слоя; W(day) — средняя за сутки экмановская вертикальная скорость; H — глубина перемешанного слоя; 86 400 — количество секунд в сутках. Считая, $H = 24$ м, $T_u = 8$ °C, W(day) — среднее за сутки рассчитанное значение вертикальной скорости, полученное по данным SKIRON, можно получить зависимость температуры от времени. На *рис. 8* вычисленные значения нанесены на график температуры, построенный по данным SEVIRI для района зондирования ARGO. Пропуски в спутниковых данных обусловлены облачностью в рассматриваемом районе.

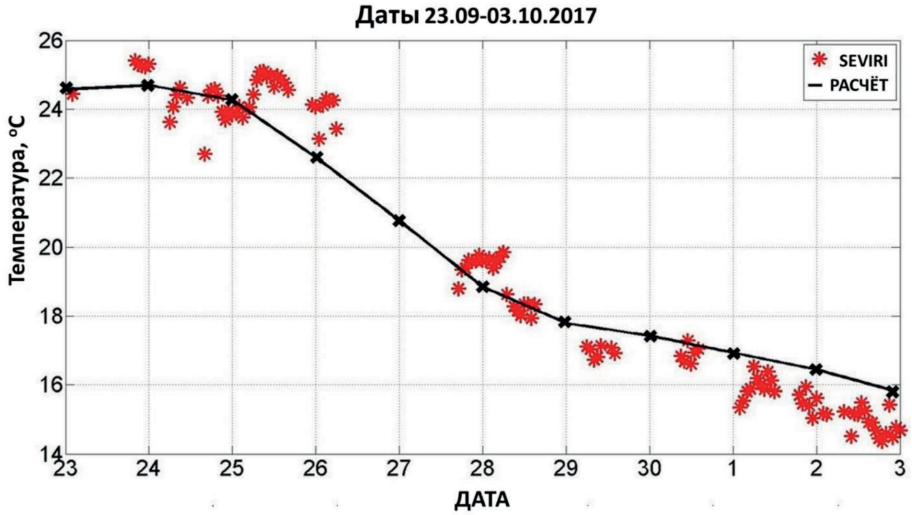


Рис. 8. Сопоставление временного хода температуры по данным SEVIRI для акватории 37,83–37,93° в. д. и 43,68–43,78° с. ш. с рассчитанными значениями

Как видно, даже при таких упрощённых предположениях оценка временного хода изменения температуры достаточно хорошо соответствует спутниковым измерениям. Несколько более низкие значения температуры по спутниковым данным могут быть объяснены собственно охлаждением поверхностного слоя за счёт потоков тепла на границе «море – атмосфера», не учитываемым в предложенном подходе (из *рис. 1* видно, что окружающие район исследования воды охладились за 10 дней на 1,5–2 °С). Таким образом, определяющую роль в изменении температуры поверхностного слоя в рассматриваемом случае играли именно вертикальные движения.

Заключение

В работе рассмотрена ситуация с появлением отрицательной аномалии температуры в северо-восточной части Чёрного моря в конце сентября – начале октября 2017 г. В результате совместного анализа температурных полей по спутниковым данным с данными о скорости ветра и вертикальными профилями температуры, полученными с дрифтера ARGO, показано, что определяющую роль в формировании температуры поверхностного слоя играла пространственная неоднородность поля ветра, породившая вертикальную скорость экмановской накачки. Вызываемые завихренностью напряжения трения ветра вертикальные скорости достигали величин $5 \cdot 10^{-5}$ м/с, общий подъём вод составил 14 м, а наблюдаемое падение температуры превышало 10 °С. Рассчитанный по вертикальным скоростям с учётом профилей температуры ARGO временной ход температуры хорошо совпадал с данными SEVIRI. Возникшая аномалия температуры через две недели после ветрового воздействия занимала до трети площади центральной части моря.

Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» по теме FNNN-2024-0012.

Выбор ситуаций с аномальными изменениями температуры выполнен при поддержке гранта Российского научного фонда 26-17-00198.

Литература

1. *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.

2. *Ефимов В. В.*, *Барабанов В. С.* Аномалии температуры поверхности Черного моря и моделирование формирования интенсивной холодной аномалии сентября 2014 г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 3. С. 389–398. DOI: 10.7868/S0002351517030063.
3. *Ефимов В. В.*, *Станичный С. В.*, *Шокуров М. В*, *Яровая Д. А.* Наблюдение квазитропического циклона над Черным морем // Метеорология и гидрология. 2008. № 4. С. 53–62.
4. *Ефимов В. В.*, *Анисимов А. Е.*, *Барабанов В. С.* Климатическая структура поля ветра в черноморском регионе // Морской гидрофиз. журн. 2011. № 3. С. 3–13.
5. *Зацепин А. Г.*, *Кременецкий В. В.*, *Пиотух В. Б.*, *Поярков С. Г.*, *Ратнер Ю. Б.*, *Соловьев Д. М.*, *Станичная Р. Р.*, *Станичный С. В.*, *Якубиенко В. Г.* Формирование прибрежного течения в Черном море из-за пространственно-неоднородного ветрового воздействия на верхний квазиоднородный слой // Океанология. 2008. Т. 48. № 2. С. 176–192.
6. *Зацепин А. Г.*, *Сильвестрова К. П.*, *Куклев С. Б. и др.* Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга и даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 203–214. DOI: 10.7868/S0030157416020222.
7. *Станичная Р. Р.*, *Станичный С. В.* Апвеллинги Чёрного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 195–207. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-195-207.
8. *Станичный С. В.*, *Станичная Р. Р.*, *Давыдова Е. П.* Аномальное охлаждение поверхностного слоя в западной части Чёрного моря под воздействием интенсивного атмосферного циклона в начале октября 2024 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 383–388. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-383-388.
9. *Шокурова И. Г.*, *Кубряков А. А.*, *Шокуров М. В.* Влияние долговременных изменений крупномасштабного поля приземного давления на ветровой режим и завихренность напряжения трения ветра в Черном море // Морской гидрофиз. журн. 2021. Т. 37. № 2. С. 179–194. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-2-179-194.
10. *Яровая Д. А.*, *Ефимов В. В.* Развитие холодной аномалии температуры поверхности Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 4. С. 471–483. DOI: 10.31857/S0002351521040118.
11. *Kallos G.*, *Nickovic S.*, *Papadopoulos A.*, *Jovic D.*, *Kakaliagou O.*, *Misirlis N.*, *Boukas L.*, *Mitikou N.*, *Sakellaridis G.*, *Papageorgiou J.*, *Anadranistakis E.*, *Manousakis M.* The regional weather forecasting system SKIRON: an overview // Proc. Intern. Symp. on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments. Athens, Greece: University of Athens, 1997. P. 109–122.
12. *Kubryakov A. A.*, *Zatsepin A. G.*, *Stanichny S. V.* Anomalous summer-autumn phytoplankton bloom in the Black Sea driven by several strong wind events // J. Marine Systems. 2019. V. 194. P. 11–24. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2019.02.004.
13. *Podymov O. I.*, *Ocherednik V. V.*, *Silvestrova K. P.*, *Zatsepin A. G.* Upwellings and downwellings caused by mesoscale water dynamics in the coastal zone of Northeastern Black Sea // J. Marine Science and Engineering. 2023. V. 11(8). Article 1628. DOI: 10.3390/jmse11081628.
14. *Stanichny S. V.*, *Kubryakova E. A.*, *Kubryakov A. A.* Quasi-tropical cyclone caused anomalous autumn coccolithophore bloom in the Black Sea // Biogeosciences. 2021. V. 18. No. 10. P. 3173–3188. DOI: 10.5194/bg-18-3173-2021.

Anomalous wind impact on surface temperature of the Black Sea in autumn 2017

S. V. Stanichny, R. R. Stanichnaya, E. P. Davydova, V. A. Rubakina

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mails: sstanichny@mail.ru, rrsta@mail.ru, elenadavydov@gmail.com, valenru93@mail.ru

On the basis of a comprehensive analysis of satellite data on sea surface temperature, ARGO drifter data and SKIRON atmospheric modeling results the decrease in surface layer temperature by more than 10 °C observed in the northeastern part of the Black Sea in late September and early October 2017 was examined. Such anomalies can play an important role in the exchange processes between surface

and subthermocline waters. As a result of wind stress, the mixed layer, according to ARGO data, sunk to 24 m, and the core of the cold intermediate layer moved 14 m up to a depth of 30 m. A joint analysis of vertical temperature profiles and wind stress vorticity showed that the main role in temperature change was played by vertical movements (Ekman pumping). Water rise velocities calculated from tangential stress vorticity reached 4.2 m per day. Estimated by the change of vertical velocities, taking into account the vertical distribution of temperature, the time course of the mixed layer temperature is well consistent with the one observed from Meteosat SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) data.

Keywords: Black Sea, temperature anomalies, wind heterogeneity, satellite data, ARGO drifters

Accepted: 30.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-341-349

References

1. Ginzburg A. I., Kostyanoy A. G., Solov'yev D. M., Stanichnyy S. V., Coastal upwelling in the northwestern part of the Black Sea, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1997, No. 6, pp. 66–72 (in Russian).
2. Efimov V. V., Barabanov V. S., Anomalies of the Black Sea surface temperature and modeling of intense cold anomaly formation in September 2014, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, V. 53, No. 3, pp. 343–351, DOI: 10.1134/S0001433817030057.
3. Efimov V. V., Stanichny S. V., Shokurov M.V, Yarovaya D. A., Observation of a quasi-tropical cyclone over the Black Sea, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2008, V. 33, No. 4, pp. 233–239, DOI: 10.3103/S1068373908040067.
4. Efimov V. V., Anisimov A. E., Barabanov V. S., Climatic structure of the wind fields in the Black-Sea region, *Physical Oceanography*, 2011, V. 21, No. 3, pp. 153–162, DOI: 10.1007/s11110-011-9112-8.
5. Zatsepin A. G., Kremenetskiy V. V., Piotukh V. B. et al., Formation of the coastal current in the Black Sea caused by spatially inhomogeneous wind forcing upon the upper quasi-homogeneous layer, *Oceanology*, 2008, V. 48, No. 2, pp. 159–174, DOI: 10.1134/S0001437008020021.
6. Zatsepin A. G., Silvestrova K. P., Kuklev S. B. et al., Observations of a cycle of intense coastal upwelling and downwelling at the research site of the Shirshov Institute of Oceanology in the Black Sea, *Oceanology*, 2016, V. 56, No. 2, pp. 188–199, DOI: 10.1134/S0001437016020211.
7. Stanichnaya R. R., Stanichny S. V., Black Sea upwellings, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 4, pp. 195–207 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-195-207.
8. Stanichny S. V., Stanichnaya R. R., Davydova E. P., Anomalous cooling of surface layer in the western Black Sea under the impact of an intense atmospheric cyclone at the beginning of October 2024, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 383–388 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-383-388.
9. Shokurova I. G., Kubryakov A. A., Shokurov M. V., Influence of long-term changes in the large-scale sea level pressure field on the wind regime and the wind stress curl in the Black Sea, *Physical Oceanography*, 2021, V. 28, No. 2, pp. 165–179, DOI: 10.22449/1573-160X-2021-2-165-179.
10. Iarovaia D. A., Efimov V. V., Development of cold sea surface temperature anomalies in the Black Sea, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, V. 57, No. 4, pp. 413–424, DOI: 10.1134/S0001433821040228.
11. Kallos G., Nickovic S., Papadopoulos A., Jovic D., Kakaliagou O., Misirlis N., Boukas L., Mitikou N., Sakellaridis G., Papageorgiou J., Anadranistakis E., Manousakis M., The regional weather forecasting system SKIRON: an overview, *Proc. Intern. Symp. on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments*, Athens, Greece: University of Athens, 1997, pp. 109–122.
12. Kubryakov A. A., Zatsepin A. G., Stanichny S. V., Anomalous summer-autumn phytoplankton bloom in the Black Sea driven by several strong wind events, *J. Marine Systems*, 2019, V. 194, pp. 11–24, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2019.02.004.
13. Podymov O. I., Ocherednik V. V., Silvestrova K. P., Zatsepin A. G., Upwellings and downwellings caused by mesoscale water dynamics in the coastal zone of Northeastern Black Sea, *J. Marine Science and Engineering*, 2023, V. 11(8), Article 1628, DOI: 10.3390/jmse11081628.
14. Stanichny S. V., Kubryakova E. A., Kubryakov A. A., Quasi-tropical cyclone caused anomalous autumn coccolithophore bloom in the Black Sea, *Biogeosciences*, 2021, V. 18, No. 10, pp. 3173–3188, DOI: 10.5194/bg-18-3173-2021.