

Численное моделирование взаимодействия новороссийской боры и верхнего слоя Чёрного моря

Д. А. Яровая, В. В. Ефимов

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mail: darik777@mhi-ras.ru*

Исследуется реакция верхнего слоя Чёрного моря вблизи кавказского побережья на резкое усиление ветра во время новороссийской боры 20–22 августа 2005 г. Случай боры воспроизведён при помощи совместной мезомасштабной модели «море – атмосфера» NOW (NEMO — *англ.* Nucleus for European Modelling of the Ocean, OASIS — *англ.* Ocean Atmosphere Sea Ice Soil, WRF — *англ.* Weather Research and Forecasting) с пространственным разрешением 1 км. Проведено сравнение результатов совместного моделирования с доступными данными наблюдений. Рассмотрена вертикальная структура полей ветра и температуры в боре на момент её наибольшего развития. По результатам моделирования рассмотрены основные возможные причины значительного, на 6 °С, понижения температуры поверхности моря (ТПМ) вблизи Новороссийска в течение 2 сут. Выполнены количественные оценки влияния различных факторов на изменение ТПМ, таких как вертикальное турбулентное перемешивание с вовлечением холодной воды из термоклина в верхний квазиоднородный слой, подъём более холодной воды с нижних уровней и горизонтальный перенос вод, потоки явного и скрытого тепла от поверхности моря. Сделан вывод, что основной вклад в охлаждение внесло вертикальное турбулентное перемешивание вследствие развития динамической неустойчивости в верхнем слое моря, а адвекция температуры и теплообмен с атмосферой не играли существенной роли.

Ключевые слова: новороссийская бора, совместное мезомасштабное моделирование

Одобрена к печати: 05.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-262-272

Введение

К экстремальным явлениям погоды на Чёрном море относится новороссийская бора — сильный порывистый ветер, дующий с прибрежных горных хребтов на море. В Черноморском бассейне такой ветер наблюдается в районе Крымских гор и особенно часто в окрестностях Новороссийска, где за год случается в среднем 46 дней с борой (Иванов, 2008; Efimov et al., 2019). Новороссийская бора — это преимущественно зимнее явление погоды, примерно 3/4 случаев приходится на холодный период (с сентября по март) (Efimov et al., 2019). При этом бора представляет собой не только сильный, но и холодный ветер, имеющие иногда катастрофические последствия в виде обледенения и даже гибели судов в порту. В тёплый период года бора хотя и вызывает затруднения в хозяйственной деятельности города, но всё же не наносит значительного ущерба. Согласно публикации (Вельтищев, Степаненко, 2006), бора относится к мезомасштабным атмосферным явлениям.

Новороссийская бора исследовалась неоднократно как по данным спутниковых наблюдений, так и по результатам атмосферного моделирования с высоким пространственным разрешением (Гавриков, Иванов, 2015; Ефимов, Барабанов, 2013а, б; Ефимов, Михайлова, 2017; Иванов, 2008; Шестакова и др., 2015; Efimov, Komarovskaya, 2015). Однако воздействие боры на верхний слой Чёрного моря изучено недостаточно. Так как приводная скорость ветра в области боры достигает больших значений, более 20 м/с, даже такое кратковременное (до 2 сут) явление может оказать заметное влияние на верхний слой моря. В первую очередь это относится к полю температуры поверхности моря (ТПМ) в летние месяцы, когда верхний квазиоднородный слой (ВКС) имеет наименьшую глубину.

Поэтому представляет интерес при помощи совместной численной модели, учитывающей взаимодействие атмосферы и моря с высоким пространственным разрешением, воспроизвести процессы развития новороссийской боры, возникающей в тёплый период года,

когда в море развиваются характерные возмущения не только динамических, но и термических полей. В настоящей работе рассматриваются результаты моделирования взаимодействия «море – атмосфера» с разрешением 1 км во время новороссийской боры в августе 2005 г. с использованием совместной мезомасштабной модели NOW (NEMO — *англ.* Nucleus for European Modelling of the Ocean, OASIS — *англ.* Ocean Atmosphere Sea Ice Soil, WRF — *англ.* Weather Research and Forecasting) (Samson, 2014). Эта совместная модель уже использовалась нами для изучения реакции Чёрного моря на интенсивный квазитропический циклон в сентябре 2005 г. (Яровая и др., 2020), а также для исследования характерной реакции верхнего слоя Чёрного моря на интенсивное ветровое воздействие (Яровая, Ефимов, 2021). Насколько известно авторам, совместное моделирование такого мезомасштабного явления, как бора в Чёрном море, ещё не проводилось.

Описание численной модели

Совместная модель NOW состоит из известной атмосферной модели WRF (Skamarock et al., 2008), морской модели NEMO (Madec, 2008) последней 4-й версии и каплера (приложение, которое осуществляет обмен данными между WRF и NEMO) OASIS (Valcke, 2013). При моделировании использовались две вложенные сетки с разрешением 3 и 1 км. Обмен данными происходил как между основными, так и между вложенными доменами. В атмосферной модели использовалось 37 вертикальных уровней, в морской — 50. При моделировании каждые два часа от NEMO к WRF передаются температура поверхности моря и скорость течения на поверхности, от WRF к NEMO — полные радиационные потоки тепла (коротковолновый и длинноволновый), потоки явного и скрытого тепла, напряжение трения ветра, а также разность между испарившейся влагой и выпавшими осадками. Для параметризации планетарного пограничного слоя в WRF использовалась схема Yonsei University scheme (схема Университета Йонсей). Начальные и граничные условия для атмосферной модели были взяты из реанализа European Reanalysis 5-го поколения (ERA5). Для параметризации вертикального турбулентного перемешивания в NEMO применялась схема Generic Length Scale closure.

Результаты моделирования выводились с шагом 1 ч. В WRF и NEMO временной шаг при моделировании составлял соответственно 15 и 300 с для расчётной сетки с разрешением 3 км и 5 и 100 с для сетки с разрешением 1 км.

Начальные условия для морской модели (поля скорости, температуры, солёности и уровня моря), а также рельеф дна были взяты из глобального реанализа Copernicus с разрешением $1/12^\circ$ (https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030). Этот реанализ получен при помощи модели NEMO с усвоением данных наблюдений и атмосферным форсингом на поверхности моря, взятым из атмосферного реанализа ERA-Interim (замещённым впоследствии более современным реанализом ERA5).

Так как в качестве начальных и граничных условий для атмосферной модели использовался тот же атмосферный реанализ, с помощью которого были получены начальные условия для морской модели, это позволило сократить время адаптации NEMO и WRF друг к другу. Расчёт был начат за 3 сут до начала эпизода боры, который продолжался около 2 сут, а общая длительность моделирования составила 6 сут.

Исследуемый случай боры

Для совместного моделирования выбран случай боры 20–22 августа 2005 г., описанный в работе (Иванов, 2008), но без проведения соответствующих численных оценок. Согласно данным наблюдений, сильная бора на черноморском побережье продолжалась с 20 по 22 августа 2005 г., а скорость ветра в Новороссийске достигала 20–22 м/с (Иванов, 2008). На спутниковых снимках ТПМ (http://dvs.net.ru/mp/data/200508bs_sst_ru.shtml) видно появление после 20 августа областей холодных вод в восточной части моря вблизи Новороссийска, а также

вдоль юго-восточной части крымского побережья и к югу от Крыма (рис. 1а). Согласно спутниковым данным, к 22 августа ТПМ вблизи Южного берега Крыма (44–45° с. ш., 34–36° в. д.) и вблизи кавказского побережья (43–45° с. ш., 37–39° в. д.) понизилась по сравнению с 18 августа на величину, достигающую 6–7 °С (см. рис. 1а). Отметим, что 18 и 22 августа — это даты, наиболее близкие ко времени начала и окончания боры, для которых имеются спутниковые данные о распределении ТПМ в северо-восточной части моря. Таким образом, понижение ТПМ произошло во всей северо-восточной части моря, включая и часть, находившуюся под влиянием новороссийской боры.

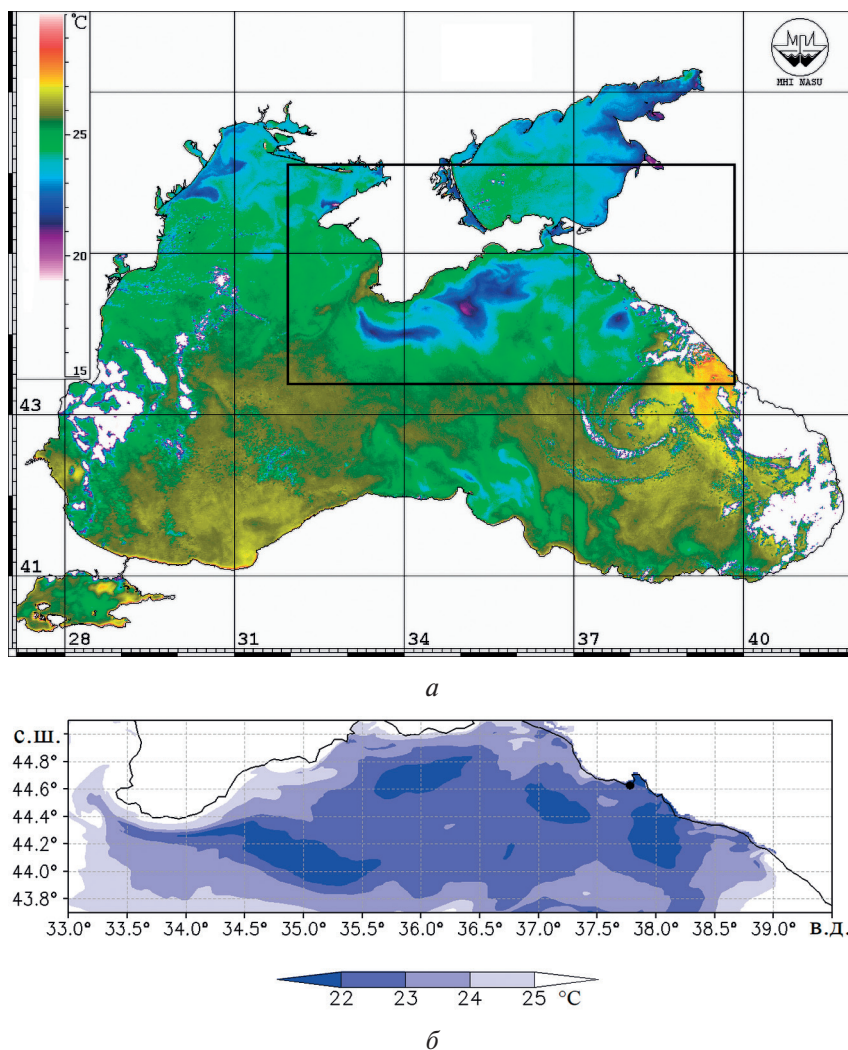


Рис. 1. Температура поверхности моря (°С): а — по спутниковым данным NOAA (англ. National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США) за 10:44 UTC (англ. Coordinated Universal Time, всемирное координированное время) 22 августа 2005 г., чёрный прямоугольник обозначает расчётную область с разрешением 1 км; б — по результатам совместного моделирования с разрешением 1 км за 10:00 UTC 22 августа.

Структура полей скорости ветра и температуры воздуха в боре

Рассмотрим полученные в результате совместного моделирования поля скорости и температуры во время боры. На рис. 1б показано поле ТПМ, воспроизведённое совместной моделью на расчётной сетке с разрешением 1 км, для того же времени, что и на рис. 1а. Как видно из рис. 1, модель правильно воспроизвела появление областей с пониженной ТПМ в прибрежной области вблизи Новороссийска и вблизи кавказского и крымского побережья.

На *рис. 2* показаны рассчитанные в численной модели значения скорости ветра на высоте 10 м, температура воздуха на высоте 2 м и температура поверхности моря в течение 6 сут в прибрежной точке (44,63° с. ш., 37,78° в. д.), где приводная скорость ветра достигала наибольшего в расчётной области значения — 21 м/с. Хорошо видно развитие боры: начиная с 20 августа скорость ветра резко увеличилась до 20 м/с, а ТПМ понизилась на ~6 °С. Бора продолжалась около 2 сут и достигла наибольшей интенсивности в 23:00 UTC 20 августа.

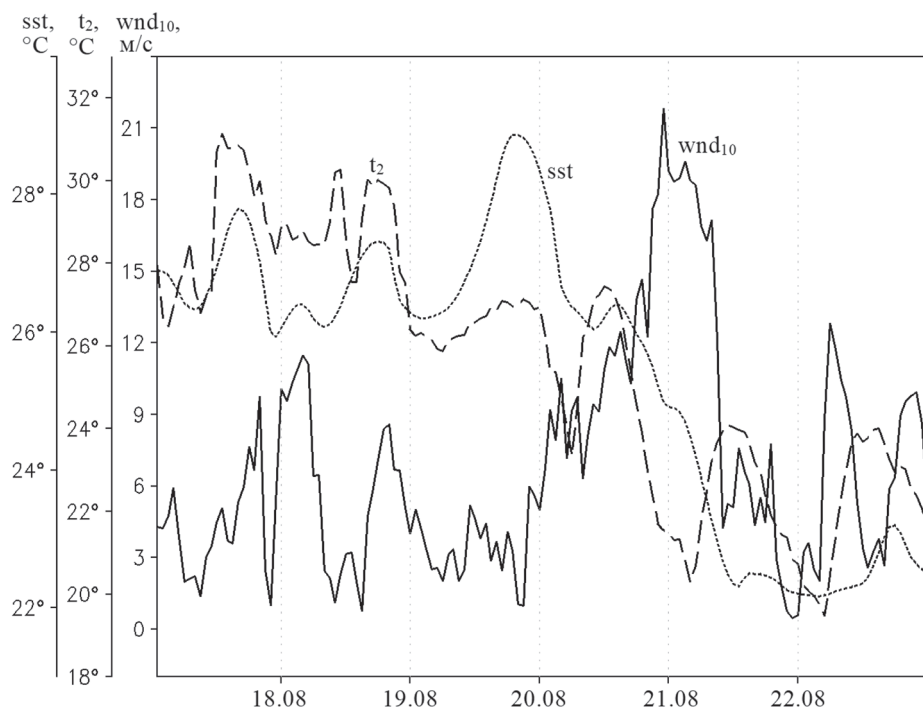


Рис. 2. Изменение со временем скорости приповерхностного ветра на высоте 10 м (wnd_{10}), температуры воздуха на высоте 2 м (t_2) и ТПМ (sst) в точке (44,63° с. ш., 37,8° в. д.), отмеченной на *рис. 1а*

К сожалению, данные наблюдений на гидрометеорологических станциях Новороссийска для исследуемого случая боры отсутствуют, однако в работе (Иванов, 2008) по радиолокационной информации (РЛИ) Envisat было отмечено, что скорость ветра в Новороссийске во время боры 20–21 августа 2005 г. достигала 20–22 м/с, что также согласуется с результатами моделирования.

На *рис. 3а* (см. с. 266) показана воспроизведённая атмосферной моделью мелкомасштабная структура приводного поля ветра для 23:00 UTC 20 августа — времени максимального развития боры. Характерной особенностью поля скорости ветра на *рис. 3а* представляется локальная область больших скоростей ветра над морем вблизи Новороссийска. Как будет отмечено далее, эта особенность отражает меандрирование по вертикали струи воздуха, обтекающей хребет при закритическом режиме обтекания потоком воздуха горного препятствия. В поле приводной скорости ветра также различимы пятна и полосы, начинающиеся от побережья и проходящие над морем, в которых происходит столкновение и конвергенция воздушных потоков, скорость ветра в этих полосах понижена. Появление такой пятнистой структуры в поле ветра вызвано мелкомасштабными особенностями рельефа прибрежных Кавказских гор, из-за чего вдоль хребта изменяется поведение воздушного потока, набегающего на горы с северо-востока. Кроме того, локальные неоднородности в поле скорости ветра возникают и в результате пространственно-временной неоднородности самой боры над морем, когда области больших скоростей сменяются зонами меньших скоростей. Такие ветровые полосы во время новороссийской боры наблюдались и на спутниковых данных и отмечены ранее в модели (Гавриков, Иванов, 2015).

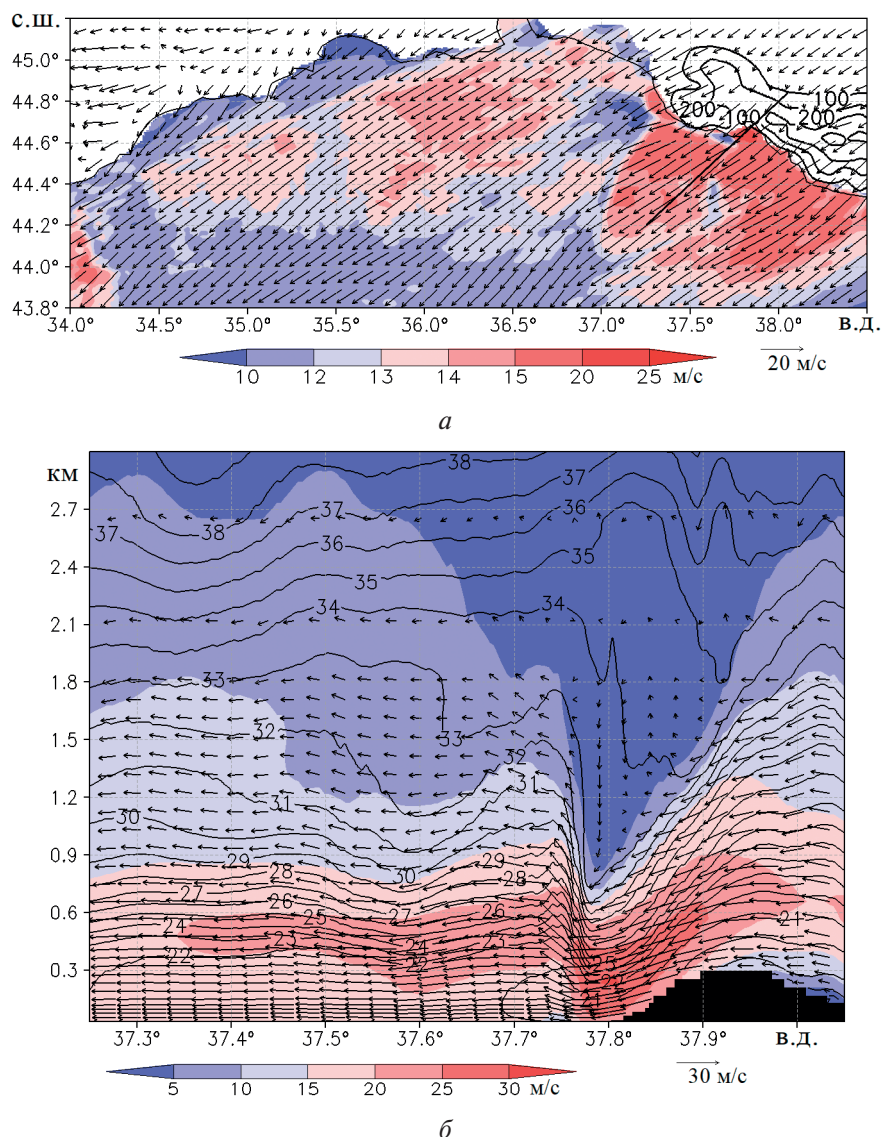


Рис. 3. Горизонтальная и вертикальная структура поля ветра в 23:00 UTC 20 августа: а — скорость (м/с; цвет) и направление приповерхностного ветра, а также высота рельефа над уровнем моря (м; изолинии); б — вертикальный разрез вдоль линии, показанной на рис. 3а: скорость (м/с; цвет) и направление (вертикальная компонента вектора для наглядности увеличена в 10 раз) ветра в плоскости разреза, а также потенциальная температура (°С; изолинии)

Отметим, что над юго-восточной частью моря в результате обтекания высокогорной части Кавказского хребта воздушным потоком возник мезомасштабный циклонический вихрь (не показано). На спутниковом снимке (см. рис. 1) он представлен белыми полосами спиральной формы над морем, соответствующими участкам неба, закрытым облаками. Как было показано в исследовании (Ефимов, Михайлова, 2017), формирование такого циклонического вихря над морем — характерная особенность, сопровождающая новороссийскую бору.

На рис. 3б показана структура термодинамических полей на вертикальном разрезе, проходящем по нормали к берегу. Подобные иллюстрации вертикальной структуры новороссийской бору рассмотрены ранее для других случаев бору в работах (Ефимов, Барабанов, 2013а, б). Было показано, что обычно бору в нижней части атмосферы над вершиной горы по существу представляет собой сравнительно тонкое по высоте гравитационное течение холодного воздуха, стекающего с горы в тёплую атмосферу над морем. Известно, что распространение гравитационного течения далее в область подветренного склона определяется числом Фруда $Fr = V/(Nh)$, где V — скорость ветра, h — высота горы, N — частота плавуче-

сти. Не вдаваясь в детали, отметим, что при малых числах $Fr < 1$, в докритическом режиме, на наветренном склоне происходит блокирование набегающего потока, а при $Fr > 1$ поток имеет достаточную кинетическую энергию и переваливает через хребет, отрываясь от наветренного склона, и далее распространяется в нижнем атмосферном пограничном слое в виде довольно протяжённого и иногда меандрирующего по высоте воздушного течения, которое сопровождается распространяющимся вверх по потоку гравитационным скачком плотности. Интересно, что при этом для одного и того же эпизода боры на разных стадиях развития эти два режима боры могут чередоваться (Ефимов, Барабанов, 2013а, б).

На вертикальном разрезе (см. *рис. 3б*) хорошо видно, как в прибрежной области толщина струйного течения в нижней части атмосферы скачком уменьшается в два раза, от 1,5 до 0,7 км, вследствие чего максимальная скорость воздушного потока в струе возрастает от ~20 до 30 м/с. Подобная особенность была получена и в других работах, посвящённых численному исследованию боры с высоким разрешением (Гавриков, Иванов, 2015).

Возмущения полей скорости и температуры поверхностного слоя моря

На *рис. 4* показано разностное поле ТПМ между двумя моментами развития боры: перед усилением ветра (00:00 UTC 20 августа) и после усиления (00:00 UTC 22 августа), т. е. суммарное изменение поверхностной температуры за 2 сут боры. Там же показаны векторы скорости ветра на высоте 10 м, относящиеся к 23:00 UTC 20 августа. Как видно из *рис. 4*, к 22 августа влияние боры охватило всю северо-восточную часть Чёрного моря, где ТПМ понизилась на 6–7 °С. При этом наибольшее понижение ТПМ произошло вблизи кавказского побережья.

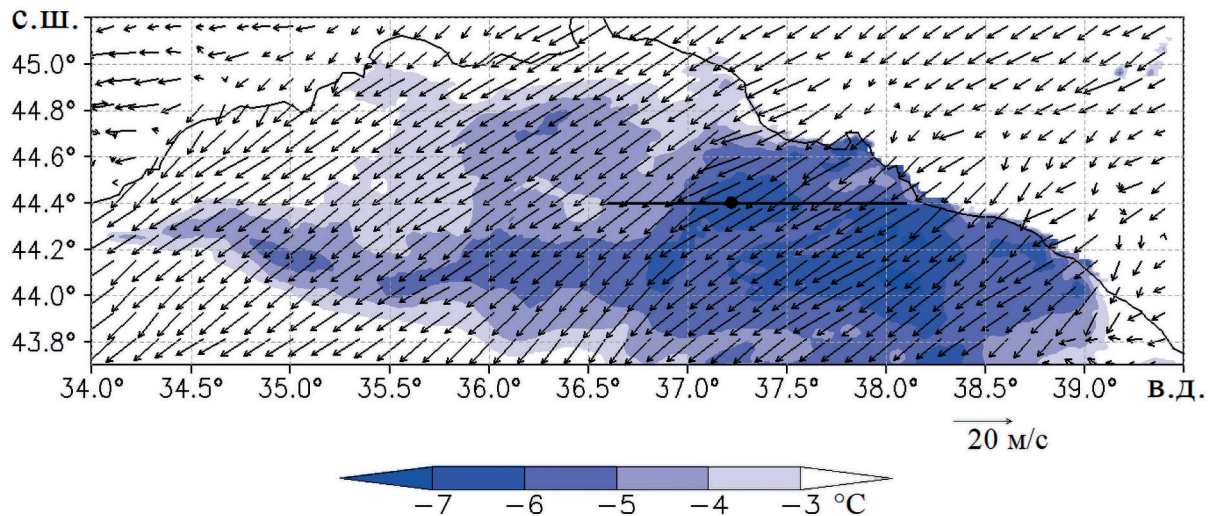


Рис. 4. Разность полей ТПМ (°С; цвет) за два срока: 00:00 UTC 22 августа и 00:00 UTC 20 августа, а также приповерхностная скорость ветра (стрелки) для 23:00 UTC 20 августа

Рассмотрим подробно область пониженной температуры вблизи кавказского побережья. Изменение по глубине и по времени температурных профилей в точке наибольшего понижения ТПМ (44,4° с. ш., 37,22° в. д.) показано на *рис. 4*. Видно, что резкое понижение ТПМ, более чем на 6 °С, и появление ВКС толщиной 15 м произошло в течение двух суток, 20 и 21 августа, что совпадает с усилением боры; в остальные дни температурный профиль менялся незначительно. Из *рис. 5* (см. с. 268) следует, что в рассматриваемой точке температура воды уменьшилась не только вблизи поверхности, но и на глубинах 10–50 м. Это говорит о том, что произошло вовлечение холодных вод из нижележащих слоёв в процессе турбулентного перемешивания. Развитие ВКС можно пояснить следующими простыми оценками.

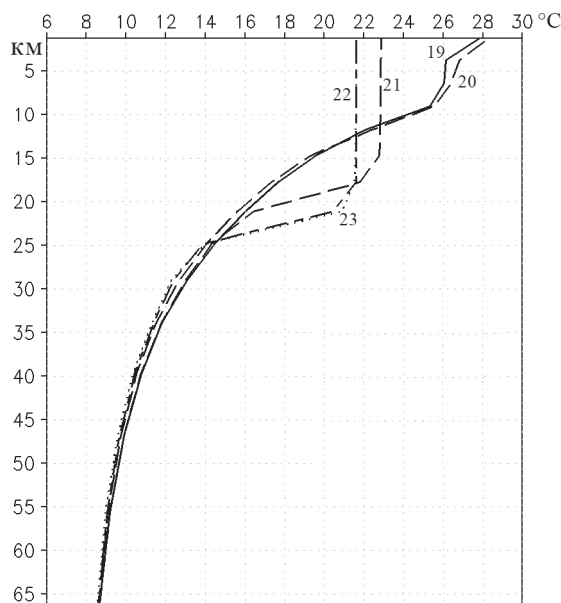


Рис. 5. Профили температуры моря (°C) с 00:00 UTC 19 августа по 00:00 UTC 23 августа в точке (44,4° с. ш., 37,22° в. д.), отмеченной на рис. 4. Профили для 22 и 23 августа практически совпадают

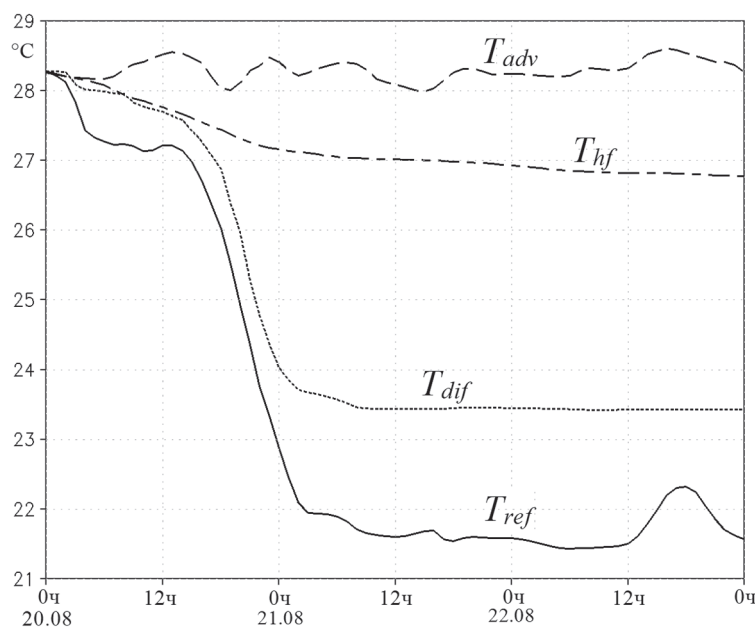


Рис. 6. Количественная оценка влияния различных факторов на понижение ТПМ в точке (44,4° с. ш., 37,22° в. д.), отмеченной на рис. 4: ТПМ по результатам совместного моделирования (T_{ref}) и ТПМ, рассчитанная нами по простым соотношениям (1)–(3) с учётом влияния различных факторов: вертикального турбулентного обмена (T_{dif}), вертикальной и горизонтальной адвекции (T_{adv}), потоков тепла от поверхности моря (T_{hf})

Как известно, изменение ТПМ происходит в основном под действием трёх факторов: потоков тепла от поверхности моря, вертикального турбулентного перемешивания в верхнем слое моря и подъёма холодных вод из-под термоклина в более тёплый приповерхностный слой. На рис. 6 показано изменение ТПМ в рассматриваемой точке за счёт каждого из этих трёх процессов по отдельности, также для сравнения продемонстрировано результирующее изменение ТПМ по итогам совместного моделирования. Для расчёта представленных на рис. 6 величин использовались следующие простые соотношения:

$$\Delta T_{hf} = \frac{Q}{\rho C_p H} \Delta t, \quad (1)$$

$$\Delta T_{adv} = -\Delta t \int_{-H}^0 u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} dz, \quad (2)$$

$$\Delta T_{dif} = \Delta t \int_{-H}^0 \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz = -\frac{\Delta t}{H} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H}, \quad (3)$$

где Q — суммарный (явный плюс скрытый) поток тепла через поверхность моря; H — толщина ВКС; T — температура воды; K — коэффициент вертикальной турбулентной диффузии тепла; ρ и C_p — плотность и удельная теплоёмкость воды; Δt — период времени (1 ч). Детали расчёта величин ΔT_{hf} , ΔT_{adv} и ΔT_{dif} по формулам (1)–(3) подробно описаны в нашей предыдущей работе (Яровая, Ефимов, 2021).

Как видно из рис. 6, наиболее значительное понижение ТПМ, более чем на 4°C , связано с вертикальной турбулентной диффузией ΔT_{dif} , что говорит о значительной динамической неустойчивости, возникшей в ВКС. Уменьшение ТПМ за счёт теплообмена с атмосферой (не показано на рис. 6) составило $\sim 1,5^\circ\text{C}$. Причём главную роль для этого периода года играл поток скрытого тепла, а понижение ТПМ за счёт потока явного тепла было несущественным.

Суммарное изменение ТПМ за счёт адвекции ΔT_{adv} было незначительным: согласно расчётам, небольшое понижение ТПМ за счёт подъёма холодных вод было почти полностью скомпенсировано горизонтальным переносом более тёплых поверхностных вод из юго-восточной части моря.

Уменьшение ТПМ совпало с усилением зональной скорости ветра, направленной на запад, и увеличением суммарного потока тепла от поверхности моря до 400 Вт/м^2 . Хотя поток тепла от поверхности моря был велик, из-за кратковременности боры это не могло привести к значительному охлаждению ВКС.

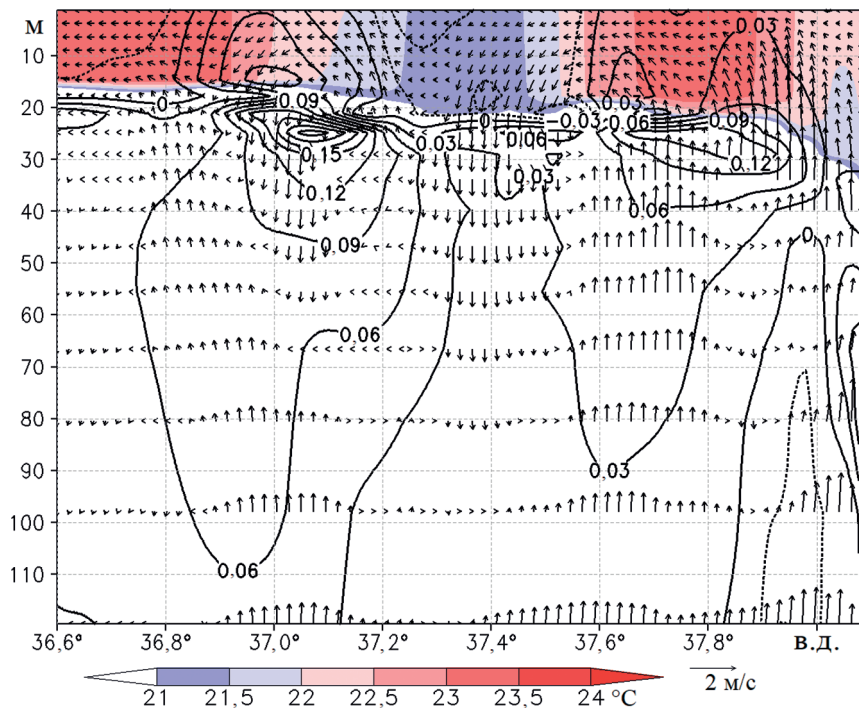


Рис. 7. Зональный разрез по $44,4^\circ$ с. ш. в 11:00 UTC 21 августа: температура моря ($^\circ\text{C}$; цвет), меридиональная скорость (изолинии) и векторы скорости течения в плоскости разреза (для наглядности вертикальная компонента вектора увеличена в $5 \cdot 10^3$ раз)

На *рис. 7* (см. с. 269) на вертикальном разрезе по $44,4^\circ$ с.ш. показано распределение температуры и меридиональной скорости, а также векторы скорости в плоскости разреза. Хорошо представлена локальная область, в которой понижена температуры воды и увеличена глубина верхнего квазиоднородного слоя. Стрелки на *рис. 7* представляют собой внутренние волны в верхнем слое моря и не имеют прямого отношения к боре. Не приводя иллюстраций, укажем также, что модель NEMO с шагом по времени 5 мин позволяет выделять в Чёрном море инерционные колебания скорости и температуры с периодом около 18 ч (Гилл, 1986).

Заключение

При помощи совместной численной модели с пространственным разрешением 1 км, включающей атмосферную модель WRF и морскую NEMO, воспроизведено взаимодействие «море – атмосфера» во время новороссийской боры 20–22 августа 2005 г. В качестве начальных условий для морской модели использовались данные глобального реанализа Copernicus с разрешением $1/12^\circ$, а в качестве начальных и граничных условий для атмосферной модели — данные реанализа ERA5 с разрешением $0,25^\circ$. Таким образом, решалась задача выделения мезомасштабных особенностей реакции верхнего слоя моря вблизи кавказского побережья на резкое усиление приводного ветра (от 5 до 20 м/с в течение суток), которые могли не разрешаться в исходных атмосферных и морских данных.

Модель позволила воспроизвести процессы развития скорости ветра и температуры в боре и возмущений верхнего слоя моря, связанных с борой. Была оценена горизонтальная и вертикальная структура полей скорости ветра и температуры в боре, которая хорошо согласуется с другими расчётами новороссийской боры, выполненными нами ранее с использованием атмосферной модели WRF. В частности, совместная модель воспроизвела меандрирование по вертикали струи воздуха при обтекании гор в районе Новороссийска: на вертикальном разрезе хорошо видно, как высота струйного течения на подветренном склоне горы скачком уменьшается почти в два раза, вследствие чего возникает локальная область больших скоростей ветра над морем вблизи побережья.

В море совместная модель воспроизвела локальные области пониженных значений ТПМ как вблизи кавказского, так и вблизи крымского побережья, появившиеся после 20 августа, что согласуется со среднесуточными спутниковыми полями ТПМ.

Показано, что наиболее сильное понижение ТПМ вблизи кавказского побережья, в окрестности Новороссийска, было вызвано увеличением приводной скорости ветра при боре. Количественно оценено влияние различных факторов на понижение ТПМ: вертикального турбулентного перемешивания через нижнюю границу ВКС, подъёма холодной воды из глубины моря и горизонтальной адвекции температуры, а также потоков тепла от поверхности моря. Показано, что понижение ТПМ было вызвано интенсивным вертикальным турбулентным перемешиванием с вовлечением холодной воды из термоклина. Влияние адвекции на изменение температуры ВКС было несущественным: некоторое понижение её вследствие подъёма холодных вод с более низких уровней было почти полностью скомпенсировано горизонтальным переносом в ВКС более тёплых вод из юго-восточной части моря. Понижение ТПМ за счёт теплообмена с атмосферой также было незначительным из-за кратковременности боры, хотя суммарный поток тепла от поверхности моря в области боры и достигал больших величин — до 400 Вт/м^2 .

Кроме того, для рассматриваемой области было получено распределение по глубине скорости течения и температуры воды и показано, что совместная модель способна успешно воспроизводить внутренние колебания в верхнем слое моря. Хотя это не имеет прямого отношения к исследуемой боре, тем не менее подтверждает выбор модели NOW для исследования мелкомасштабных явлений в Чёрном море.

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № 0555-2021-0002 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан – атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата».

Литература

1. Вельтищев Н. Ф., Степаненко В. М. Мезометеорологические процессы: учеб. пособие. М.: МГУ, 2006. 101 с.
2. Гавриков А. В., Иванов А. Ю. Аномально сильная бора на Черном море: наблюдение из космоса и численное моделирование // Изв. Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 5. С. 615–626. DOI: 10.7868/S0002351515050053.
3. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. В 2-х т. Т. 2 / пер. с англ. В. Э. Рябиной, А. Н. Филатовой; под ред. Г. П. Курбаткина. М.: Мир, 1986. 415 с.
4. Ефимов В. В., Барабанов В. С. (2013а) Моделирование черноморской боры // Изв. Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 688–698. DOI: 10.7868/S0002351513060060.
5. Ефимов В. В., Барабанов В. С. (2013б) Порывистость новороссийской боры // Метеорология и гидрология. 2013. № 12. С. 68–75.
6. Ефимов В. В., Михайлова Н. В. Мезомасштабный атмосферный вихрь как проявление новороссийской боры // Изв. Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 4. С. 512–522. DOI: 10.7868/S0003351517040092.
7. Иванов А. Ю. Новороссийская бора: взгляд из космоса // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 2. С. 68–83.
8. Шестакова А. А., Моисеенко К. Б., Торопов П. А. Гидродинамические аспекты эпизодов новороссийской боры 2012–2013 гг. // Изв. Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 5. С. 602–614. DOI: 10.7868/S0002351515040112.
9. Яровая Д. А., Ефимов В. В. Развитие холодной аномалии температуры поверхности Черного моря // Изв. Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 4. С. 471–483. DOI: 10.31857/S0002351521040118.
10. Яровая Д. А., Ефимов В. В., Барабанов В. С., Мизюк А. А. Реакция верхнего слоя Черного моря на прохождение циклона 25–29 сентября 2005 г. // Метеорология и гидрология. 2020. № 10. С. 38–52.
11. Efimov V. V., Komarovskaya O. I. Spatial-temporal structure of bora in Yalta // Physical Oceanography. 2015. No. 3. P. 3–13. DOI: 10.22449/1573-160X-2015-3-3-13.
12. Efimov V. V., Komarovskaya O. I., Bayankina T. M. Temporal characteristics and synoptic conditions of extreme bora formation in Novorossiysk // Physical Oceanography. 2019. V. 26. No. 5. P. 361–373. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-5-361-373.
13. Madec G. NEMO ocean engine. Paris, France: Inst. Pierre-Simon Laplace, 2008. <https://www.nemo-ocean.eu/doc/>.
14. Samson G., Masson S., Lengaigne M., Keerthi M. G., Vialard J., Pous S., Madec G., Jourdain N. C., Jullien S., Menkes C., Marchesiello P. The NOW regional coupled model: Application to the tropical Indian Ocean climate and tropical cyclone activity // J. Advances in Modeling Earth Systems. 2014. V. 6. P. 700–722. DOI: 10.1002/2014MS000324.
15. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D., Duda M. G., Powers J. G. A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical Note. 2008. 113 p. <https://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes:500>.
16. Valcke S. The OASIS3 coupler: A European climate modelling community software // Geoscientific Model Development. 2013. V. 6. Iss. 2. P. 373–388. DOI: 10.5194/gmd-6-373-2013.

Numerical modelling of interaction between Novorossiysk bora and upper layer of the Black Sea

D. A. Iarovaia, V. V. Efimov

*Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mail: darik777@mhi-ras.ru*

We study the reaction of the Black Sea upper layer to the sharp intensification of the surface wind near the Caucasian coast during Novorossiysk bora in 20–22 August 2005. This case is studied using coupled mesoscale air-sea model NOW (NEMO — Nucleus for European Modelling of the Ocean, OASIS — Ocean Atmosphere Sea Ice Soil, WRF — Weather Research and Forecasting) with spa-

tial resolution of 1 km. Modelling results are compared with the available observation data. Vertical structure of wind and temperature fields of the bora is studied. Using modelling results, we consider various reasons for the significant, more than 6 °C, drop of the sea surface temperature (SST) near Novorossiysk during 20–22 August. We consider various factors of the SST decrease, such as: vertical turbulent mixing and the entrainment of cold water from the thermocline into the upper quasiisohomogenous layer; ascend of cold water from lower levels and horizontal advection of water; latent and sensible heat fluxes from the sea surface. It is concluded, that the main reason for the SST decrease was dynamical instability in the sea upper layer, whereas temperature advection and sea-atmosphere heat exchange did not play an important role.

Keywords: Novorossiysk bora, coupled mesoscale modelling

Accepted: 05.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-262-272

References

1. Veltishev N. F., Stepanenko V. M., *Mezometeorologicheskie protsessy* (Mesometeorological processes), Moscow: MSU, 2006, 101 p. (in Russian).
2. Gavrikov A. V., Ivanov A. Yu., Anomalous Strong Bora over the Black Sea: Observations from Space and Numerical Modeling, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, Vol. 51, No. 5, pp. 546–556, DOI: 10.1134/S0001433815050059.
3. Gill A. E., *Atmosphere – Ocean Dynamics*, Intern. Geophysics Series, Vol. 30, New York; London: Academic Press, 1982, 680 p.
4. Efimov V. V., Barabanov V. S. (2013a), Black Sea Bora Modeling, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013, Vol. 49, No. 6, pp. 632–641, DOI: 10.1134/S0001433813060066.
5. Efimov V. V., Barabanov V. S. (2013b), Gustiness of the Novorossiysk bora, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013, Vol. 38, No. 12, pp. 840–845, DOI: 10.3103/S1068373913120054.
6. Efimov V. V., Mikhaylova N. V., The Mesoscale atmospheric vortex as a manifestation of the Novorossiysk bora, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, Vol. 53, No. 4, pp. 449–458, DOI: 10.1134/S000143381704003X.
7. Ivanov A. Yu., Bora in Novorossiysk: A Look from Space, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2008, No. 2, pp. 68–83 (in Russian).
8. Shestakova A. A., Moiseenko K. B., Toropova P. A., Hydrodynamic Aspects of the Novorossiysk Bora Episodes in 2012–2013, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, Vol. 51, No. 5, pp. 602–614, DOI: 10.1134/S0001433815040118.
9. Iarovaia D. A., Efimov V. V., Development of Cold Sea Surface Temperature Anomalies in the Black Sea, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, No. 4, pp. 413–424, DOI: 10.31857/S0002351521040118.
10. Iarovaya D. A., Efimov V. V., Barabanov V. S., Mizyuk A. A., Response of the Black Sea Upper Layer to the Cyclone Passage on September 25–29, 2005, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, Vol. 45, No. 10, pp. 701–711, DOI: 10.3103/S1068373920100040.
11. Efimov V. V., Komarovskaya O. I., Spatial-temporal structure of bora in Yalta, *Physical Oceanography*, 2015, No. 3, pp. 3–13, DOI: 10.22449/1573-160X-2015-3-3-13.
12. Efimov V. V., Komarovskaya O. I., Bayankina T. M., Temporal characteristics and synoptic conditions of extreme bora formation in Novorossiysk, *Physical Oceanography*, 2019, Vol. 26, No. 5, pp. 361–373, DOI: 10.22449/1573-160X-2019-5-361-373.
13. Madec G., *NEMO ocean engine*, Paris, France: Inst. Pierre-Simon Laplace, 2016, <https://www.nemo-ocean.eu/doc/>.
14. Samson G., Masson S., Lengaigne M., Keerthi M. G., Vialard J., Pous S., Madec G., Jourdain N. C., Jullien S., Menkes C., Marchesiello P., The NOW regional coupled model: Application to the tropical Indian Ocean climate and tropical cyclone activity, *J. Advances in Modeling Earth Systems*, 2014, Vol. 6, pp. 700–722, DOI: 10.1002/2014MS000324.
15. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D., Duda M. G., Powers J. G., *A description of the Advanced Research WRF version 3*, NCAR Technical Note, 2008, 113 p., <https://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes:500>.
16. Valcke S., The OASIS3 coupler: A European climate modelling community software, *Geoscientific Model Development*, 2013, Vol. 6, Issue 2, pp. 373–388, DOI: 10.5194/gmd-6-373-2013.