

Влияние параметризации вертикального турбулентного обмена на результаты реанализа гидрофизических полей Черного моря

Л. И. Сухих*, В. Л. Дорофеев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: l.sukhikh@gmail.com*

Поступила в редакцию 30.01.2018 г., после доработки – 19.02.2018 г.

Проведен сравнительный анализ двух расчетов долговременной изменчивости гидрофизических полей Черного моря за период 1993–2012 гг. Два реанализа были выполнены различными способами параметризации вертикального турбулентного обмена в модели циркуляции. В первом расчете применялась простая параметризация с использованием постоянного коэффициента вертикальной турбулентной вязкости и коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в виде климатических профилей. Во втором расчете для параметризации процессов вертикального обмена применялась модель турбулентности типа модели Меллора – Ямады. Сравнение результатов реанализов с данными измерений показало, что использование турбулентной модели для параметризации вертикального обмена позволило лучше описать термохалинную структуру вод Черного моря. В частности, точнее воспроизводятся структура летнего сезонного термоклина и положение главного галоклина, в которых, как правило, отмечаются максимальные отклонения модельных значений температуры и солёности от *in-situ* измерений. Разница способов параметризации вертикального обмена импульсом оказала влияние на вертикальную структуру горизонтальной циркуляции. Значительная часть кинетической энергии течений по первому расчету сконцентрирована в тонком 10-метровом слое, что сказывается на особенностях циркуляции на мелководье северо-западного шельфа, в то время как в расчете с использованием турбулентной модели кинетическая энергия интенсивнее передается в нижние слои. Выполненное исследование показало, что результаты реанализа гидрофизических полей зависят от аккуратного описания термодинамических процессов в деятельном слое моря, особенно процессов вертикального турбулентного обмена.

Ключевые слова: реанализ, динамика Черного моря, численное моделирование, ассимиляция данных, термохалинная структура.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0002 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» (шифр «Оперативная океанология») (численное моделирование с ассимиляцией спутниковых данных) и при поддержке гранта РФФИ № 17-77-30001 «Новые методы и суперкомпьютерные технологии анализа и прогноза Мирового океана и Арктического бассейна» (анализ полученных результатов).

Для цитирования: Сухих Л. И., Дорофеев В. Л. Влияние параметризации вертикального турбулентного обмена на результаты реанализа гидрофизических полей Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 4. С. 283–301. doi:10.22449/0233-7584-2018-4-283-301

Influence of the Vertical Turbulent Exchange Parameterization on the Results of Reanalysis of the Black Sea Hydrophysical Fields

L. I. Sukhikh*, V. L. Dorofeyev

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

**e-mail: l.sukhikh@gmail.com*

Comparative analysis of two simulations of the Black Sea hydrophysical fields' long-term variability in 1993 – 2012 is performed. Two reanalyses are done using various methods of parameterizing the vertical turbulent exchange in the circulation model. The first variant implies a simple parameterization including the constant coefficient of vertical turbulent viscosity and the coefficient of vertical turbulent diffusion in a form of climatic profiles.

© Сухих Л. И., Дорофеев В. Л., 2018

The second simulation includes the turbulence model of the Mellor-Yamada type to parametrize the vertical exchange processes. Having been compared, the reanalysis results and the measurement data show that application of the turbulent model for parametrizing the vertical exchange yields a better description of the Black Sea water thermohaline structure. In particular, structure of the summer seasonal thermocline and location of the main halocline (in both of them maximum deviations of the model temperature and salinity from the *in-situ* measurement data are observed) are reproduced more accurately. Different methods of parametrizing the momentum vertical exchange influence the horizontal circulation vertical structure. The first variant of simulation shows that a significant part of the currents' kinetic energy is concentrated in the thin 10-m layer, and this fact affects the circulation features of shallow water on the northwestern shelf; whereas the simulation based on the turbulent model implies more intensive transfer of the kinetic energy to the lower layers. The carried out investigation shows that the results of the hydrophysical fields' reanalysis depend on accurate description of the thermodynamic processes in the sea upper layer and the vertical turbulent exchange ones, in particular.

Keywords: reanalysis, Black Sea dynamics, numerical modeling, data assimilation, thermohaline structure.

Acknowledgements: the investigation is carried out within the framework of the state task on the theme № 0827-2018-0002 "Development of the methods of operational oceanology based on the inter-disciplinary studies of the marine environment formation and evolution processes, and mathematical modeling using the data of remote and direct measurements" (code "Operational oceanology") (numerical modeling with satellite data assimilation) at support of the RSF № 17-77-30001 "New methods and supercomputer technologies of the World Ocean and Arctic basin nowcast and forecast" (analysis of the obtained results).

For citation: Sukhikh, L.I. and Dorofeyev, V.L., 2018. Influence of the vertical turbulent exchange parameterization on the results of reanalysis of the Black Sea hydrophysical fields. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 34(4), pp. 283-301. doi:10.22449/0233-7584-2018-4-283-301 (in Russian).

Введение

Для изучения процессов в атмосфере, Мировом океане и морях широко используется метод ретроспективного анализа (реанализ). Одним из главных достоинств реанализов является возможность получения длительных непрерывных по пространству и времени массивов параметров морской среды. Реанализ позволяет исследовать тенденции сезонной и межгодовой изменчивости термохалинных характеристик и кинетической энергии скорости течений для всего бассейна, что представляет научный и практический интерес. Периодически результаты реанализов обновляются на основе использования новых или улучшенных моделей, методов ассимиляции данных измерений, параметров атмосферного воздействия.

Так, для Черного моря был выполнен ряд реанализов гидрофизических полей, которые отличались рассматриваемыми периодами, моделями циркуляции и наборами данных измерений, ассимилируемых в моделях. В работах [1–3] реанализ проводился на основе ассимиляции данных гидрологических съемок температуры и солености и охватывал период от начала 70-х до начала 90-х годов. В работах [4, 5] исследовалась динамика Черного моря за 20 лет (1993–2012 гг.) на основе ассимиляции данных спутниковых измерений. В эти годы в акватории Черного моря проводилось мало гидрологических съемок, но зато стали доступными данные дистанционных измерений, такие как аномалии возвышения уровня моря и поверхностная температура.

Качество результатов физического реанализа зависит от ряда факторов: используемой модели циркуляции, атмосферного воздействия, которое определяет граничные условия на морской поверхности, и ассимилируемых данных измерений. В работе [6] проводилось исследование чувствительности результатов реанализа к выбору атмосферных полей в приводной области для задания граничных условий. Для этого были выполнены два расчета, в которых использовались одна и та же гидродинамическая модель и одинаковые массивы данных для ассимиляции. Разными были только поля атмосферного

воздействия, определяющие граничные условия на поверхности моря. Сравнительный анализ показал, что результаты двух расчетов близки друг к другу. То есть вес ассимилируемых данных в полученных результатах достаточно высок. В то же время был выявлен ряд различий, обусловленных разными наборами атмосферного воздействия.

Как отмечалось выше, помимо ассимилируемых данных и атмосферного воздействия качество выполненного физического реанализа зависит также от используемой гидродинамической модели. Для правильного воспроизведения долгосрочной эволюции гидротермодинамики Черного моря, включающей как сезонную, так и межгодовую изменчивость, необходимы высокие требования к качеству используемой модели. Для Черного моря разработан ряд моделей циркуляции, отличающихся различным пространственным разрешением и способами описания гидродинамических процессов, в том числе параметризации вертикальных турбулентных потоков импульса, тепла и соли. Кроме моделей, использованных в цитируемых выше выполненных реанализах, следует отметить описанные в других работах численные эксперименты по моделированию динамики всего бассейна Черного и Азовского морей и его отдельных регионов, в том числе и с ассимиляцией данных измерений [7–12].

Целью настоящей работы является исследование зависимости результатов реанализа гидрофизических полей Черного моря от выбора способа параметризации вертикального турбулентного обмена, который играет важную роль при моделировании процессов в верхнем слое моря.

Метод исследования

Для решения поставленной задачи был выполнен реанализ гидрофизических полей Черного моря (1993–2012 гг.) на основе варианта модели циркуляции, использованной ранее в работе [4], к которой для более аккуратного описания термодинамических процессов в деятельном слое моря, особенно процессов вертикального обмена, добавлена турбулентная модель.

Модель циркуляции Черного моря разработана в Морском гидрофизическом институте [13] для описания крупномасштабной изменчивости динамических характеристик Черноморского бассейна. Позже эта z -уровневая модель, основанная на аппроксимации системы примитивных уравнений динамики океана, была модифицирована и применялась в действующей системе диагноза – прогноза гидрофизических полей Черного моря [14].

Пространственный шаг модели, которая используется в данной работе, составляет 4,8 км, что позволяет достаточно аккуратно описывать синоптические процессы. Модель содержит 40 расчетных уровней по вертикали, сгущающихся к морской поверхности. Шаг по времени равнялся 5 мин. В модель циркуляции включена оптическая модель для расчета проникающего коротковолнового излучения. Для параметризации вертикальных потоков импульса, тепла и соли использована турбулентная модель. Это модель квазиравновесной турбулентной энергии *QETE* [15], входящая в семейство моделей Меллора – Ямады [16] и состоящая из двух уравнений – эволюции турбулентной энергии $q^2/2$ и масштаба турбулентности l . Этот вариант модели циркуляции подробно описан в работе [17] и использовался для моделирова-

ния долговременной эволюции динамики Черного моря без ассимиляции данных.

В качестве граничных условий на боковых границах в местах устьев рек и проливов задавались значения нормальной компоненты скорости, отличной от нуля, которые определялись по климатическим значениям расходов воды. Скорость Нижнебосфорского течения в описываемых расчетах имела такую постоянную величину, чтобы обеспечить общий водный баланс за рассматриваемый период (расходы рек и проливов, испарение и осадки). В устьях рек на границе расчетной области задавались низкие значения солёности (3‰), а в Нижнебосфорском течении – значение солёности (36‰), соответствующее средиземноморской воде. На твердых границах расчетной области потоки соли были нулевыми. Потоки тепла на боковых границах принимались равными нулю.

В качестве краевых условий на верхней невозмущенной границе моря для уравнений модели циркуляции и турбулентной модели использовались параметры атмосферы, полученные по результатам атмосферного реанализа *ERA-Interim (European Center for Medium-range Weather Forecasts)* [18].

Для ассимиляции в модели циркуляции были выбраны данные дистанционных измерений: температура поверхности моря (ТПМ) и аномалии возвышения свободной поверхности. Кроме того, на горизонтах глубже 200 м подправлялись средние на данном горизонте значения температуры и солёности согласно среднегодовым профилям температуры и солёности, на которые был наложен климатический сезонный ход. Среднегодовые профили температуры и солёности были подготовлены В. Н. Белокопытовым по результатам проведенных в этот период гидрологических съемок и данных дрейфующих буев. Температура поверхности моря для периода 1993–2009 гг. бралась из архивов *GHRSSST* и *NODC*. Для последнего периода реанализа (2010–2012 гг.) данные ТПМ брались из архива *OSI TAC*. Для ассимиляции данных об аномалии уровня моря использовалась вся доступная спутниковая альтиметрическая информация за период реанализа, представленная архивами *NASA*, *AVISO* и *SL TAC*. Процедуры ассимиляции в данной работе полностью соответствуют тем, которые применялись ранее в работе [4]. Эти методы основаны на оптимальной интерполяции и релаксации модельных полей к имеющимся данным измерений (наджинг).

Полученные результаты сравнивались с реанализом, выполненным по модели, содержащей 35 расчетных уровней, в которой вертикальная турбулентная диффузия параметризовалась с помощью коэффициентов, зависящих от глубины и времени, а вертикальная вязкость – с помощью постоянного коэффициента турбулентной вязкости [4, 5].

В дальнейшем изложении для краткости будем обозначать реанализ, результаты которого описаны в [4, 5], как P1, а реанализ по модели циркуляции, в которую добавлена турбулентная модель, как P2.

Анализ результатов

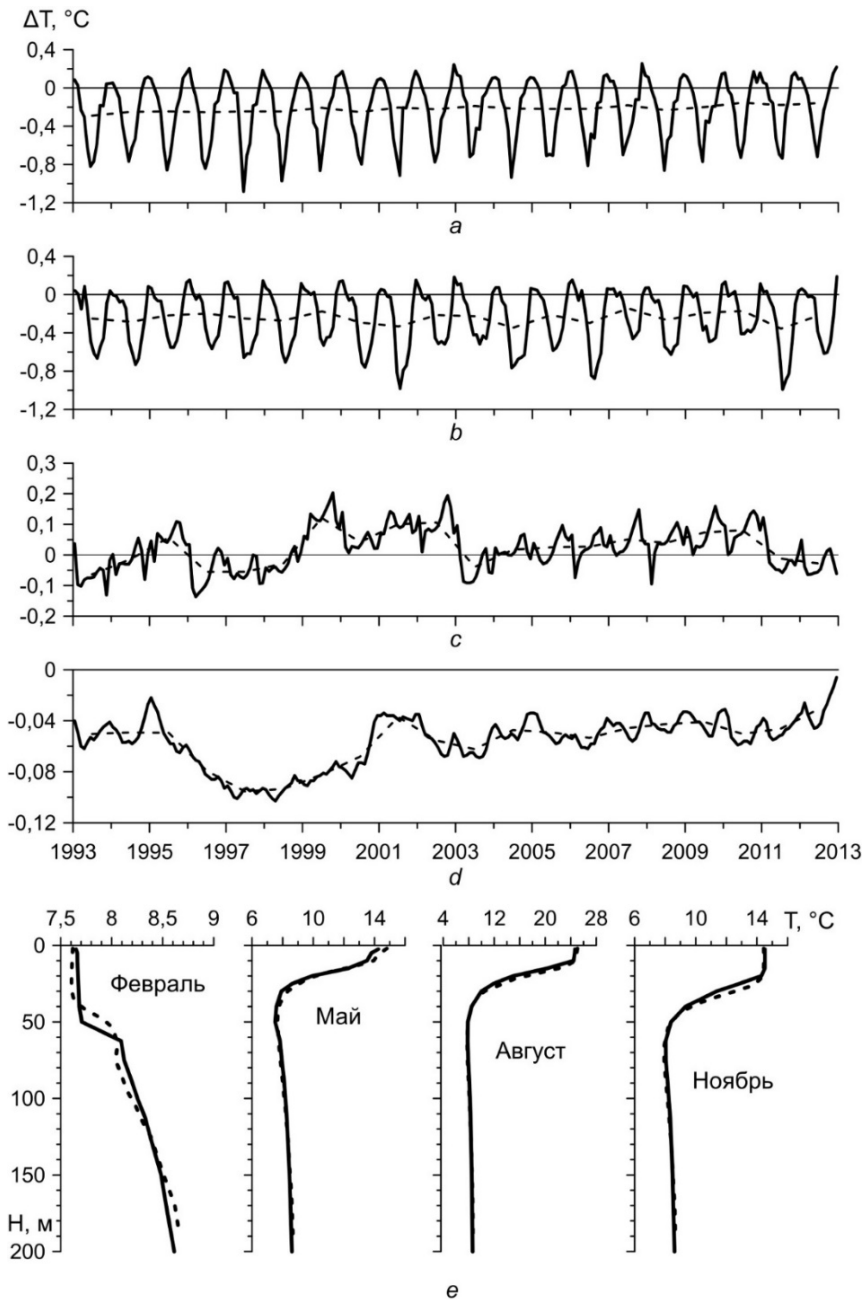
Рассмотрим характеристики термохалинной структуры Черного моря, скорости течений и кинетическую энергию, полученные с использованием двух моделей циркуляции.

Температура. Проведем анализ температурного режима верхнего слоя Черного моря по результатам двух расчетов. Разность температур в разных слоях Черного моря (рис. 1, *a – d*) имеет четко выраженную межсезонную изменчивость. Заметна и межгодовая изменчивость, особенно в двух нижних слоях. Температура поверхности моря (рис. 1, *a*) из расчета P1, как правило, выше в конце года и в начале следующего. Причем длительность периодов с положительными значениями разности температур составляет около 3 мес. В остальные сезоны температура по расчету P2 выше для всех лет. Максимальные значения отрицательных отклонений всегда наблюдаются в середине лета. Следует отметить, что в обоих расчетах проводится ассимиляция ТПМ. Однако ассимилируемые спутниковые данные имеют пропуски, вызванные облачностью, поэтому значения поверхностной температуры, полученные в двух расчетах по разным моделям, не совпадают.

Кривая изменчивости разности температур в слое 0–30 м (рис. 1, *b*) качественно близка к поведению температуры на поверхности. Отличие между ними состоит в появлении дополнительных пиков для периодов как с положительными, так и с отрицательными значениями разности температур в течение года. Размах колебаний существенно меняется от года к году. Максимальный размах колебаний для разности температур на поверхности и в верхнем 30-метровом слое достигает 1°C. Так же, как и на поверхности моря, максимальная разность в слое 0–30 м наблюдается в летний сезон, когда температура воды в этом слое выше по расчету P2. Этот факт подтверждается графиками климатических профилей температуры для августа (рис. 1, *e*), где летний термоклин, середина которого находится на глубине примерно 20 м, расположен глубже по расчету P2.

В слое 30–100 м характер распределения разности температур иной (рис. 1, *c*). Среднегодовые температуры в основном выше для расчета P1, за исключением нескольких лет. Максимальные отклонения для периодов с отрицательными значениями разности температур наблюдаются в начале года. В течение летнего сезона температура воды в этом слое в расчете P1 или выше, или близка к температуре из расчета P2. Известно, что холодный промежуточный слой (ХПС) в Черном море расположен в основном в слое 30–100 м, его воды обновляются на протяжении зимнего сезона [19, 20]. Согласно проведенному анализу, температура поверхностных вод в зимнее время ниже в расчете P2 и, следовательно, в ХПС в весеннее и летнее время для этого расчета температура будет ниже. В слое 100–200 м (рис. 1, *d*) температура воды в расчете P1 всегда ниже, чем в расчете P2.

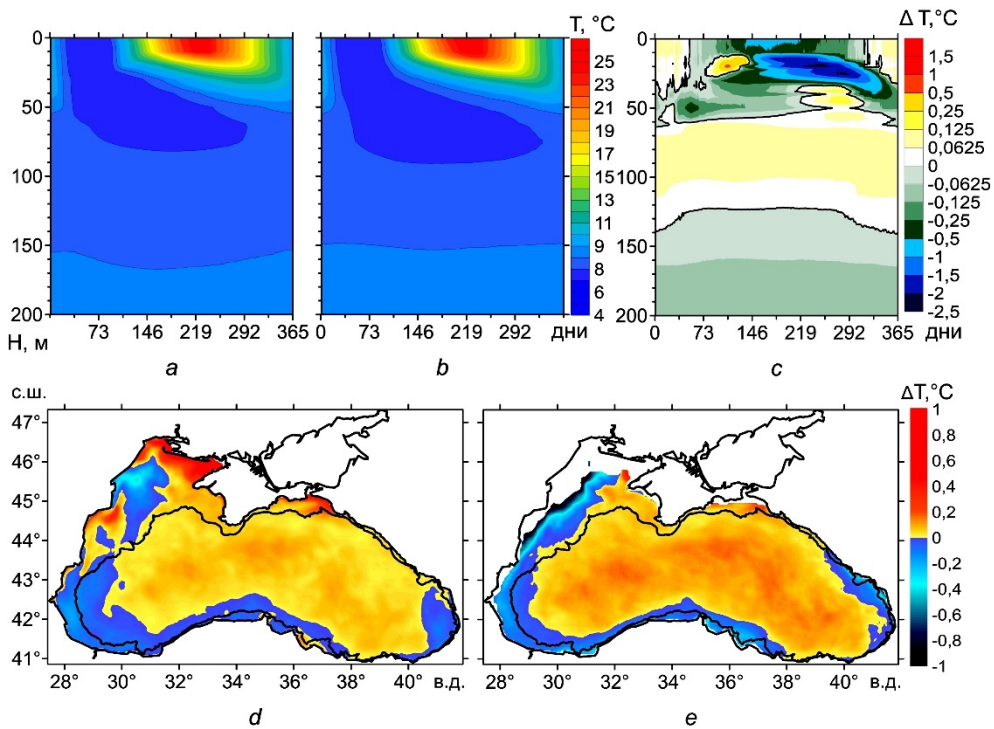
Согласно климатическим профилям (рис. 1, *e*), в феврале температура из расчета P2 ниже до глубины 40 м. Весной и летом, когда идет прогрев, температура воды у поверхности моря выше для расчета P2. Осенью и зимой, когда происходит остывание, температура воды у поверхности моря из расчета P1 выше. То есть процессы нагревания и охлаждения воды в верхнем слое моря происходят быстрее в расчете P2 в результате более интенсивных процессов вертикального перемешивания. Кроме того, в августе и ноябре сезонный термоклин из расчета P2 расположен ниже.



Р и с. 1. Эволюция осредненных по площади бассейна среднемесячных (сплошные линии) разностей температур (P1-P2) на поверхности моря и в слоях 0–30, 30–100, 100–200 м – a-d соответственно (штриховые линии – среднегодовые разности температур); климатические профили температуры для четырех месяцев (сплошные линии соответствуют расчету P1, штриховые – расчету P2) – e

Fig. 1. Evolution of the monthly average (solid lines) temperature differences (averaged over the basin area) (P1-P2) on the sea surface and in the layers 0–30, 30–100 and 100–200 m (a – d), respectively, (dash lines denote the annual average temperature differences); the temperature climatic profiles for four months (solid lines correspond to simulation P1 and dash lines – to simulation P2) (e)

Для более детальной иллюстрации сезонного хода температуры в верхнем 200-метровом слое рассмотрим построенные по результатам расчетов диаграммы распределений среднемесячной климатической температуры и их разности (рис. 2, *a – c*). На этих диаграммах видно, что в расчете P2 ядро ХПС выглядит мощнее, оно расположено глубже и сохраняется дольше по времени. На диаграмме разности это проявляется в том, что температура из расчета P2 на глубине, соответствующей ядру ХПС, ниже в течение всего года. Глубже 130 м она всегда выше. В верхнем 50-метровом слое в основном ниже температура воды из расчета P1. Максимальные значения отрицательных отклонений расположены на глубине 20–30 м в летне-осенний сезон. Как отмечалось выше, это связано с тем, что сезонный термоклин из расчета P2 расположен глубже.



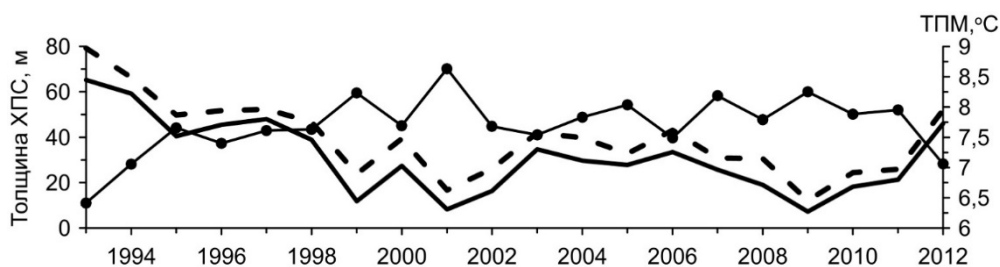
Р и с. 2. Временная эволюция осредненных по площади бассейна среднемесячных климатических значений температуры в верхнем 200-метровом слое по результатам реанализов P1 – *a* и P2 – *b*, а также их разности (P1-P2) – *c*; карты среднемесячных климатических распределений разности температур (P1-P2) на поверхности моря – *d* и в слое 0–30 м – *e* для февраля

F i g. 2. Temporal evolution of the averaged over the basin area monthly average temperature values in the upper 200 m layer based on the reanalyses P1 (*a*) and P2 (*b*), and their difference (P1-P2) (*c*); the charts of the monthly average climatic distributions of temperature difference (P1-P2) on the sea surface (*d*) and in the 0- 30 m layer (*e*) for February

Примеры карт пространственного распределения разности температур, полученных по результатам двух расчетов, приведены на рис. 2, *d, e*. На обоих горизонтах средняя по площади разность температур положительна, но на северо-западном шельфе в районе впадения р. Дунай температура из расчета

P1 ниже. Далее эта отрицательная аномалия распространяется вдоль всего западного и южного побережий Черного моря.

Выше предполагалось, что более высокая (в основном) температура в слое 30–100 м связана с менее мощным по расчету P1 ХПС. Количественной характеристикой ХПС может служить его средняя по площади толщина. На рис. 3 приведены среднегодовые значения толщины ХПС для двух расчетов. Толщина ХПС в каждой точке сетки рассчитывалась как расстояние между верхней и нижней изотермой 8°C. Если температура поверхности моря ниже 8°C (зимний сезон), то расстояние отсчитывалось от поверхности. Затем определялись средние по площади бассейна величины и на их основе – среднегодовые значения. Эти величины существенно меняются от года к году. Размах колебаний составляет почти 60 м для обоих расчетов. Среднегодовые значения толщины ХПС по расчету P2 больше для всех лет рассматриваемого периода, что подтверждает поведение температуры в слое 30–100 м (рис. 1, *c*). На графиках также хорошо прослеживается корреляция толщины ХПС с зимней температурой поверхности моря: чем ниже зимняя температура, тем толще ХПС и наоборот.



Р и с. 3. Среднегодовые значения толщины ХПС по результатам двух реанализов (сплошные линии соответствуют расчету P1, штриховые – расчету P2), а также средnezимняя ТПМ (линия с кружочками)

F i g. 3. Annual average values of the cold intermediate layer thickness based on the results of two reanalyses (solid lines correspond to simulation P1 and dash lines – to simulation P2), and winter-average sea surface temperature (line with circles)

Соленость. Структура полей солености в верхнем слое Черного моря формируется рядом факторов: потоком пресной воды через свободную поверхность и в местах стока рек, а также водообменом через проливы. Учитывая, что поля атмосферного воздействия и расходы рек в обоих рассматриваемых расчетах были одними и теми же, можно допустить, что в формировании полей солености при прочих равных условиях решающей является циркуляция – как горизонтальная, так и вертикальная.

Для анализа различий в полях солености рассмотрим, как и для полей температуры, осредненные за месяц и среднегодовые величины.

На поверхности, в слоях 0–30 и 30–100 м (рис. 4, *a – c*) среднегодовые значения солености из расчета P1 выше для всех лет, в то время как в слое 100–200 м они всегда ниже (рис. 4, *d*). Это говорит о том, что главный галоклин в расчете P2 получается более резким, чем в расчете P1. В сезонной изменчивости самая большая разница в приповерхностном слое (рис. 4, *a, b*) наблюда-

ется в начале года, когда среднее значение солёности из расчета P1 превышает соответствующее значение из расчета P2 на 0,1‰ и больше. В летний сезон поверхностная солёность в расчете P1 ниже, а во всем слое 0–30 м она, как правило, выше, причем разница достигает минимума. В слое 30–100 м максимум разности наблюдается в конце года, минимум – в весенний сезон. В слое 100–200 м сезонная изменчивость выражена слабо. Как видно на рис. 4, *e*, в верхнем 200-метровом слое солёность из расчета P1 выше для всех сезонов до глубины примерно 120 м, за исключением горизонта 50 м в феврале.

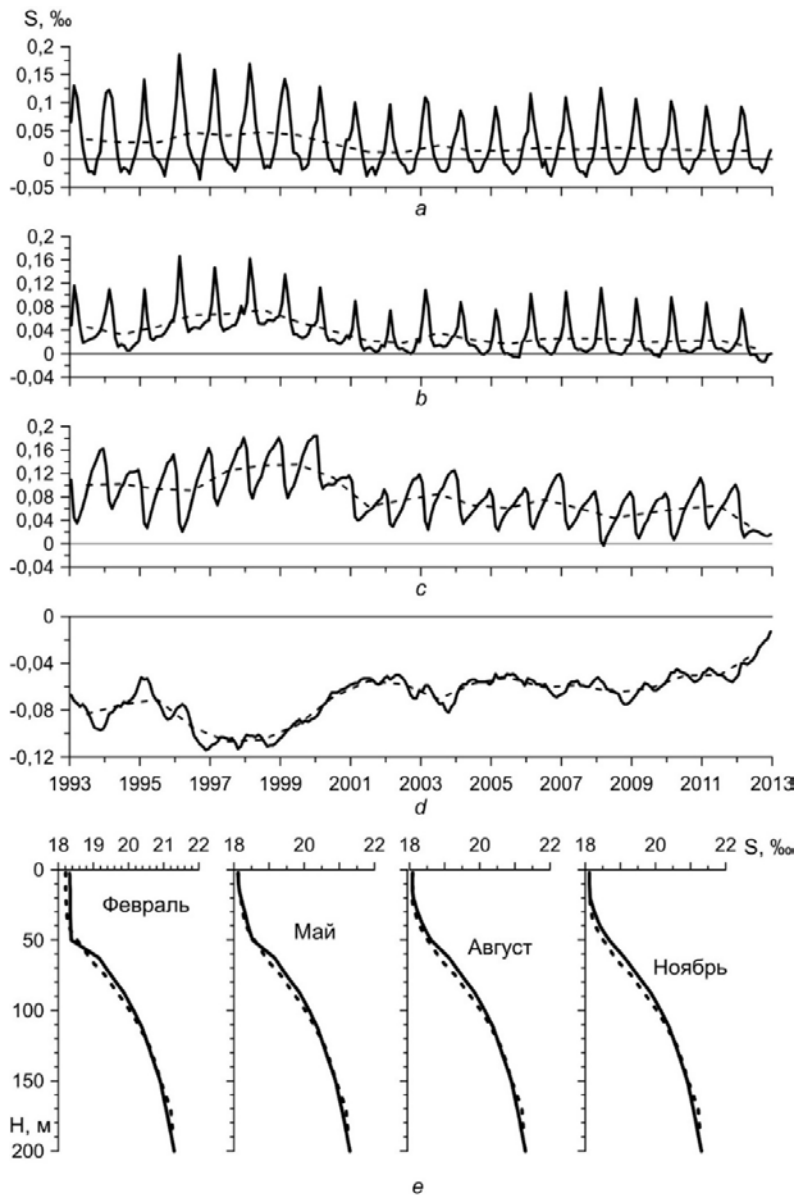
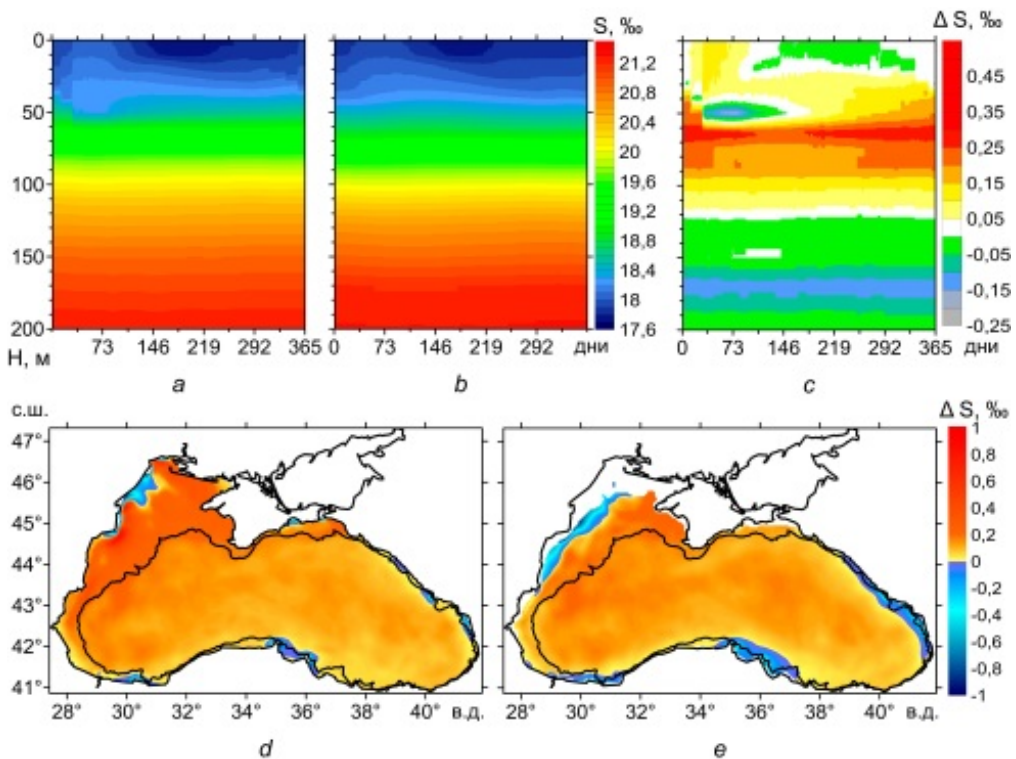


Рис. 4. То же, что на рис. 1, для солёности

Fig. 4. The same as on Fig. 1, for salinity

Другой иллюстрацией сезонной изменчивости в верхнем 200-метровом слое Черного моря являются временные диаграммы климатического сезонного хода солёности по данным реанализов P1 и P2, а также разность между ними (рис. 5, *a – c*). Минимальная солёность поверхностных вод наблюдается в начале лета после весеннего паводка рек, впадающих в бассейн Черного моря. После этого значения солёности начинают расти и достигают максимума в начале зимы, что соответствует общим представлениям о термохалинной структуре Черного моря. На диаграмме разности солёностей можно видеть, что на поверхности и глубине 0–20 м в летнее время солёность по расчету P2 выше. Отрицательные отклонения обнаруживаются также на глубине 50 м в зимний сезон. Далее до глубины примерно 125 м солёность по расчету P1 выше для всех сезонов. Максимальные положительные отклонения отмечаются в слое с центром на горизонте 65 м, соответствующем глубине залегания галоклина. Таким образом, определение положения галоклина существенно влияет на точность получаемых результатов.



Р и с. 5. То же, что на рис. 2, для солёности
Fig. 5. The same as on Fig. 2, for salinity

Пространственное распределение разности значений солёности на поверхности моря и на горизонте 30 м (рис. 5, *d, e*) показывает, что (кроме устьев рек) солёность выше по расчетам P1. Эти результаты согласуются с графиками на рис. 4, *a, b*.

Циркуляция. Главным элементом циркуляции в верхнем слое Черного моря является Основное Черноморское течение (ОЧТ). Оно опоясывает море вдоль свала глубин и формирует крупномасштабный циклонический круговорот. В зимнее время основной круговорот разбивается на два круговорота меньшего масштаба в западной и восточной частях бассейна [21–23]. Помимо основного течения в Черном море наблюдается интенсивная синоптическая изменчивость, искажающая простую структуру круговоротов: так, происходит интенсивное меандрирование ОЧТ, справа от струи возникают квазистационарные мезомасштабные антициклоны, в статистическом смысле являющиеся элементами сезонного цикла [24–26].

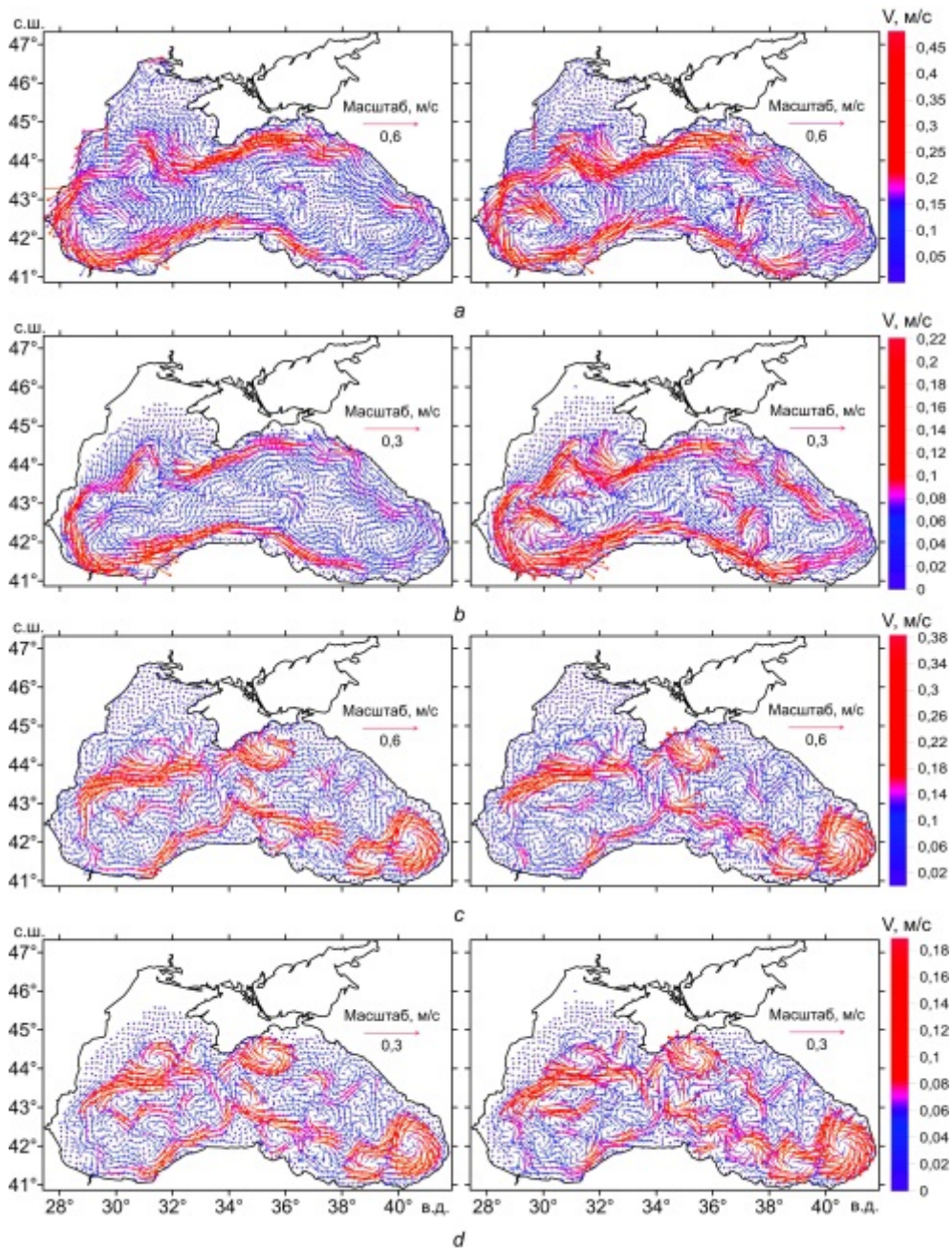
В качестве примеров двумерной циркуляции в верхнем слое моря на рис. 6 приведены карты течений для зимы и лета, полученные по результатам двух расчетов. На картах за 15 января 1995 г. (рис. 6, *a, b*) наблюдается более интенсивная циркуляция по модели P2 в обоих рассматриваемых слоях, когда отчетливо проявляются черты ОЧТ, а также вихревые структуры. В 30-метровом поверхностном слое значительные различия видны в северо-восточной и юго-западной частях Черного моря. Основное Черноморское течение сохраняется и в слое 30–100 м, согласно результатам двух моделей. Однако в этом слое различия еще заметнее, чем в верхнем слое. Течения по результатам P2 существенно интенсивнее.

Картина циркуляции за 15 июля 2011 г. (рис. 6, *c, d*) типична для лета – отсутствует выраженная струя ОЧТ, наблюдаются отдельные вихревые структуры, наиболее крупной из которых является Батумский антициклон. Как можно видеть, циркуляции в верхнем слое моря очень близки по обоим расчетам. В слое 30–100 м они тоже похожи, но циркуляция, полученная по расчету P2, существенно интенсивнее. Кроме того, в расчете P2 ярче проявляется цепочка антициклонов вдоль юго-восточного побережья Черного моря.

Циклонический характер циркуляции верхнего слоя Черного моря определяется в основном положительной величиной вертикальной компоненты завихренности поля ветра над регионом. Так как в обоих расчетах в качестве граничных условий на поверхности моря применялись одни и те же поля атмосферного воздействия (в том числе поле ветра) и ассимилировались одни и те же альтиметрические данные, то различия в циркуляции по результатам двух реанализов могут быть обусловлены лишь свойствами использованных моделей.

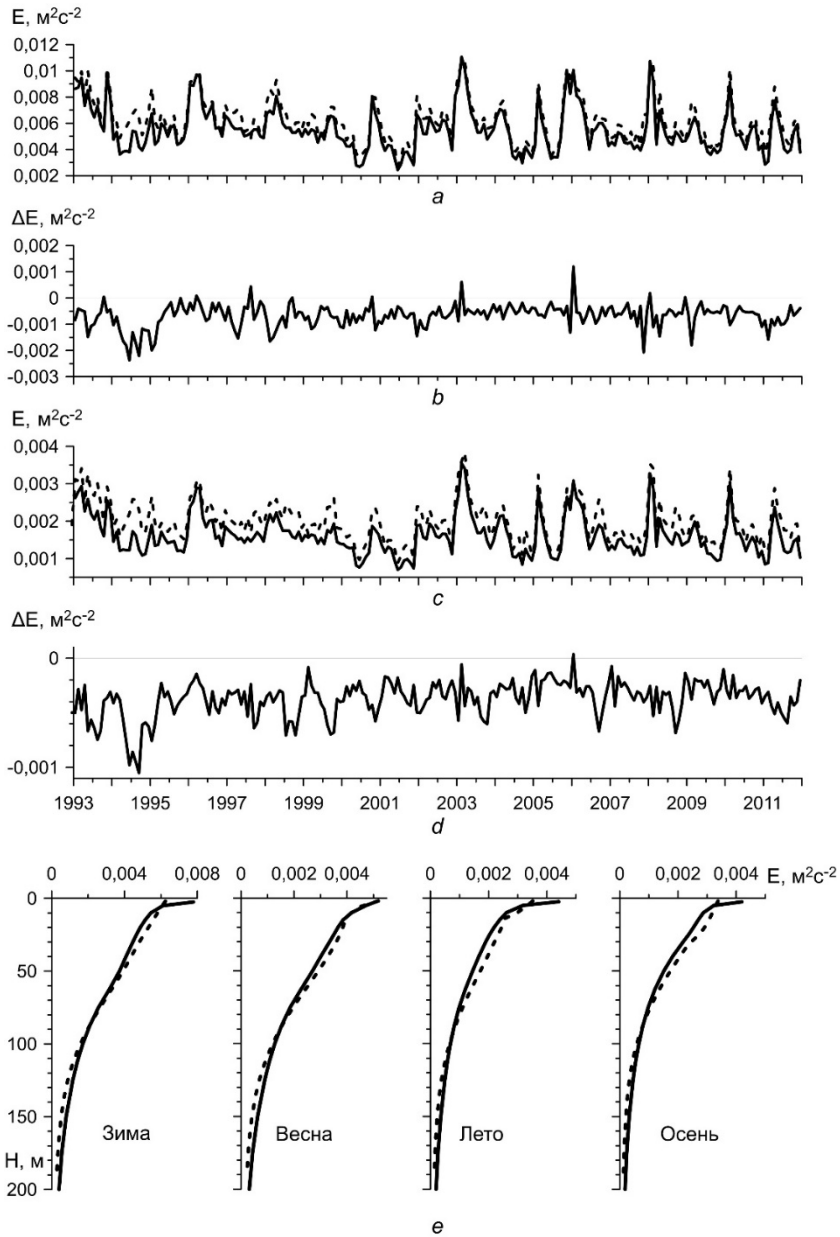
Для количественного сопоставления результатов по горизонтальной циркуляции рассмотрим поведение среднемесячной плотности кинетической энергии течений (осредненной по площади бассейна) в верхнем 30-метровом слое и в слое 30–100 м по двум реанализам, а также их разность.

На графиках рис. 7, *a – d* показана межгодовая и межсезонная изменчивость плотности кинетической энергии. Год от года размах колебаний может отличаться в разы. Максимальные значения наблюдаются в зимний сезон. Интенсивность течений в более глубоком слое ниже, чем в поверхностном. В верхнем поверхностном слое моря плотность кинетической энергии в основном выше по расчету P2. Исключение составляют зимы 2003 и 2006 гг. и лето 1997 г. В слое 30–100 м плотность кинетической энергии выше по реанализу P2 во все годы и все сезоны (кроме зимы 2006 г.).



Р и с. 6. Карты средних течений Черного моря в верхнем 30-метровом слое (a) и в слое 30–100 м (b) за 15 января 1995 г.; то же за 15 июля 2011 г. – c, d. Слева – по результатам реанализа P1, справа – по результатам реанализа P2

F i g. 6. Charts of the Black Sea mean currents in the upper 30 m layer (a) and in the 30 – 100 m layer (b) for January 15, 1995 and for July 15, 2011 (c), (d). To the left – the results of reanalysis P1, to the right – the results of reanalysis P2

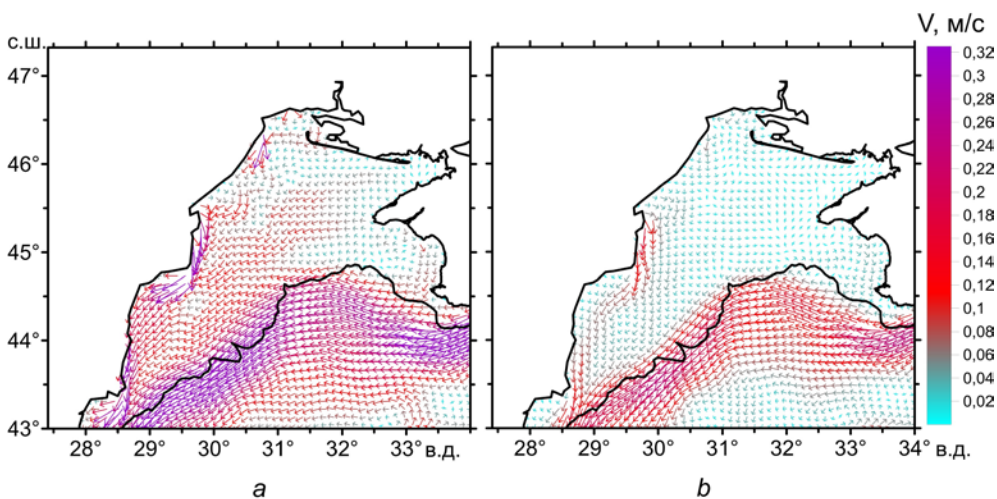


Р и с. 7. Эволюция осредненной по площади бассейна среднемесячной плотности кинетической энергии течений в слоях 0–30 м (a) и 30–100 м (c); разность плотности кинетической энергии течений (P1-P2) в слоях 0–30 м (b) и 30–100 м (d); климатические профили плотности кинетической энергии – e. Сплошные линии на фрагментах a, c, e соответствуют расчету P1, штриховые – расчету P2

F i g. 7. Evolution of the averaged over the basin area monthly average kinetic energy density of currents in the layers 0 – 30 m (a) and 30 – 100 m (c); difference between the kinetic energy densities of currents (P1-P2) in the layers 0 – 30 m (b) and 30 – 100 m (d); climatic profiles of the kinetic energy density (e). Solid lines on the fragments a, c and e correspond to simulation P1, and dash lines – to simulation P2

Для более подробного анализа зависимости интенсивности течений от глубины рассмотрим профили распределения плотности кинетической энергии для разных сезонов (рис. 7, *e*). Профили построены на основе среднемесячных климатических значений скорости путем осреднения по площади бассейна.

Согласно приведенным графикам, плотность кинетической энергии по результатам реанализа P1 существенно превосходит соответствующие значения для P2 в верхнем 10-метровом слое для всех сезонов, кроме весны. Вплоть до глубины примерно 100 м кинетическая энергия течений из расчета P2 больше (см. рис. 6). Глубже 100 м кинетическая энергия становится малой, при этом она выше по расчету P1. Таким образом, можно сказать, что в верхнем 100-метровом слое моря плотность кинетической энергии распределена более равномерно с глубиной в расчете P2. Как известно, кинетическая энергия течений генерируется главным образом ветром на поверхности моря. В расчете P1 ее значительная часть сконцентрирована в тонком 10-метровом слое, в то время как в расчете P2 она интенсивнее передается в нижние слои. Такая разница в изменении плотности кинетической энергии с глубиной для двух расчетов объясняется применявшимися моделями вертикального обмена. В расчете P2 за счет использования модели типа Меллора – Ямады поток импульса от поверхности моря в более глубокие слои сильнее, чем в расчете P1.



Р и с. 8. Карты климатических среднемесячных скоростей течений в верхнем слое Черного моря на северо-западном шельфе по результатам реанализов P1 (*a*) и P2 (*b*)

Fig. 8. Charts of climatic monthly average current velocities in the upper layer of the northwestern shelf in the Black Sea based on the reanalyses P1 (*a*) and P2 (*b*)

Более высокая плотность кинетической энергии в тонком поверхностном слое в расчете P1 сказывается на особенностях циркуляции на мелководье северо-западного шельфа (СЗШ). На рис. 8 приведены фрагменты среднемесячной климатической циркуляции на СЗШ в феврале для двух рассматриваемых расчетов. Струя ОЧТ на этих фрагментах мощнее в расчете P1. Кроме того, на СЗШ в этом расчете заметно поверхностное течение, направленное на юго-запад и формирующее довольно интенсивное вдольбереговое течение,

которое переносит воду с шельфа в глубоководную часть бассейна, где она подхватывается ОЧТ и переносится дальше. В расчете P2 это течение также наблюдается, но оно значительно слабее. Существование такого течения объясняет конфигурацию области отрицательной разности температур на рис. 2, *d, e*. Холодная поверхностная вода с шельфа интенсивнее распространяется вдоль западного и частично южного берега Черного моря в расчете P1. Этим же можно объяснить область отрицательных значений солёности на верхних горизонтах (рис. 5, *d, e*), хотя на распределение солёности в прибрежной зоне влияет также параметризация стока пресной воды в местах впадения рек, которая несколько отличается для этих расчетов.

Сравнение с данными наблюдений

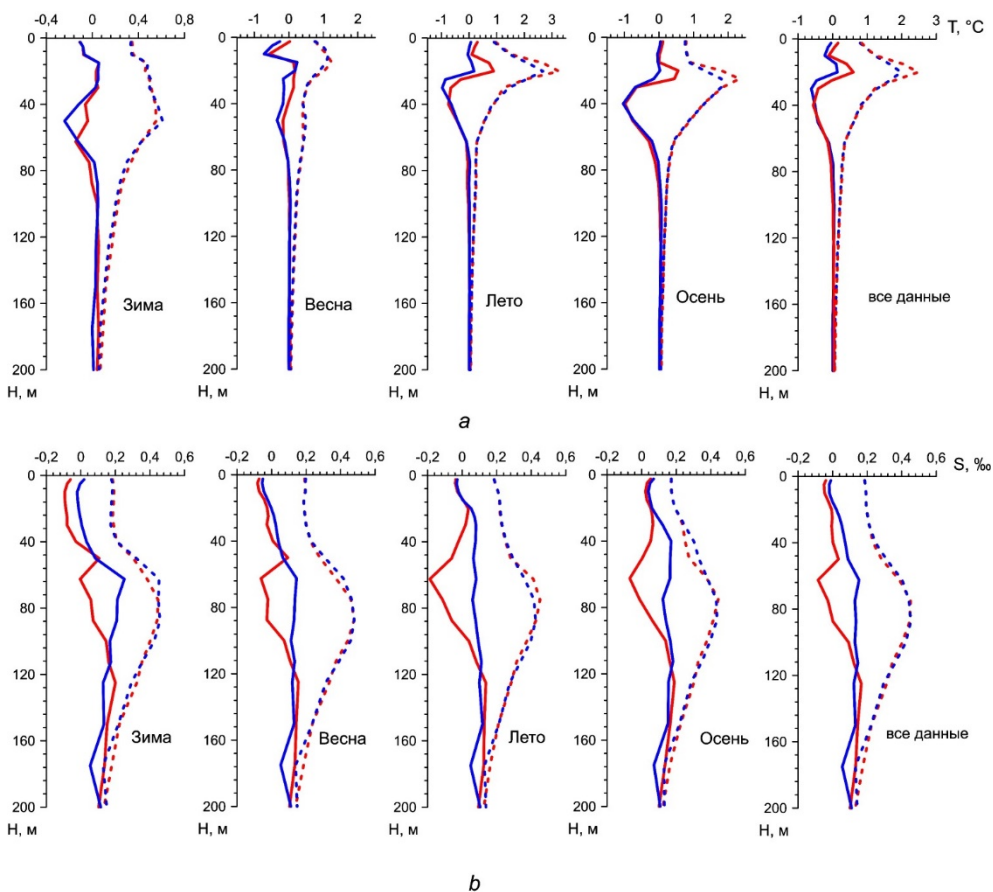
Данные гидрографических измерений позволяют провести валидацию результатов численного моделирования. Для оценки качества продуктов реанализа, полученных в [4], были использованы измерения температуры и солёности, выполненные в Черном море с 1993 г. В данной работе мы провели такую же валидацию результатов расчетов P2 и сравнили их с полученными ранее. Поля температуры и солёности по результатам моделирования интерполировались по пространству и времени в те точки и моменты времени, в которых имелись измеренные профили. После этого были построены средние для каждого сезона и для всего массива профили среднего и среднеквадратического отклонений результатов моделирования от измерений.

На рис. 9, *a* показаны профили отклонений модельных значений температуры от измеренных для обоих расчетов. В зимний сезон наибольшие отклонения наблюдаются на глубине примерно 50 м. Причем среднеквадратические отклонения одинаковы для обоих расчетов, а систематическая ошибка выше для расчета P2. Также разница между измеренными и модельными значениями заметна в поверхностном слое 0–10 м. Эта ошибка вызвана, по видимому, тем, что в зимний сезон вследствие облачности спутниковые измерения имеют много пропусков и соответственно влияние ассимиляции поверхностной температуры незначительно.

Летом и осенью наибольшие отклонения в обоих расчетах наблюдаются на глубинах 20–30 м, соответствующих положению сезонного термоклина. В этом месте отмечаются наибольшие градиенты температуры. Поэтому даже небольшая ошибка в определении глубины ведет к большой ошибке в величине температуры. Тем не менее расчет P2 дает меньшую как среднеквадратическую, так и систематическую ошибку, т. е. модель в этом случае точнее воспроизводит положение сезонного термоклина. Заметное отличие измеренной температуры от модельной прослеживается в эти сезоны также в слое 30–60 м, примерно соответствующем положению ХПС. Это говорит о том, что температура воды в ХПС по данным реанализов несколько выше, чем по результатам измерений.

Если рассматривать поведение профилей среднего и среднеквадратического отклонений, полученных по всему массиву данных, то можно сказать, что наибольшие отклонения наблюдаются на глубине 25 м, что соответствует положению летнего сезонного термоклина. Причем ошибка в определении температуры по расчету P2 меньше, чем по P1. По всей видимости, это про-

исходит за счет более высокого разрешения по вертикали в модели циркуляции и использования турбулентной модели для описания процессов вертикального обмена.



Р и с. 9. Средние (сплошные линии) и среднеквадратические (пунктирные линии) отклонения данных измерений от результатов реанализа P1 (красные кривые) и реанализа P2 (синие кривые) для температуры – *a* и солёности – *b*

Fig. 9. Average (solid lines) and root-mean-square (dash lines) deviations of the measurement data from the results of reanalyses P1 (red curves) and P2 (blue curves) for temperature (*a*) and salinity (*b*)

Максимальные среднеквадратические отклонения между измеренными и модельными полями солёности для обоих расчетов прослеживаются во все сезоны в пределах слоя 50–100 м, соответствующего глубине залегания галоклина, который является областью наиболее значительной естественной изменчивости поля солёности, так как здесь наблюдаются максимальные вертикальные градиенты (рис. 9, *b*). Максимальные среднеквадратические отклонения достигают 0,4‰. Вблизи поверхности моря среднеквадратические отклонения солёности для обоих расчетов составляют 0,2‰. Систематическая ошибка в расчете P2 незначительна и существенно ниже, чем в расчете P1, за исключением зимнего сезона, когда модельная солёность меньше из-

меренной, начиная с глубины примерно 50 м. В расчете P1 наибольшая систематическая ошибка отмечается на глубине примерно 65 м, соответствующей расположению центра главного галоклина. В целом значения солёности по расчету P2 лучше согласуются с данными наблюдений. Это свидетельствует о том, что модель P2 более точно описывает вертикальную структуру солёности вод Черного моря.

Заключение

В работе проведено сопоставление результатов двух реанализов гидрофизических полей Черного моря за период 1993–2012 гг., полученных с использованием различных вариантов модели циркуляции. При проведении расчетов в качестве граничных условий на поверхности моря были выбраны данные атмосферного реанализа *ERA-Interim*. Одинаковыми были данные усвоения и алгоритмы их ассимиляции, разными – способы параметризации процессов вертикального обмена и разрешение модели по вертикали. В расчете P1 применялась довольно простая параметризация с использованием постоянного коэффициента вертикальной турбулентной вязкости и коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в виде климатических профилей. В расчете P2 для параметризации процессов вертикального обмена использовалась модель турбулентности типа модели Меллора – Ямады. Таким образом, в работе исследовалось влияние выбора способа параметризации процессов вертикального обмена на полученные результаты реанализов гидрофизических полей Черного моря.

Сравнение с данными гидрографических измерений показало, что результаты по расчету P2 в целом лучше описывают термохалинную структуру вод Черного моря. В частности, они точнее воспроизводят структуру летнего сезонного термоклина, в котором отмечаются максимальные отклонения модельных значений температуры от *in-situ* измерений. Также лучше воспроизводится положение главного галоклина.

Температура в слое, где расположен ХПС, по результатам обоих расчетов несколько выше той, которая наблюдается по данным измерений. Вместе с тем средняя толщина ХПС больше по расчету P2, что согласуется с более высокой температурой поверхностного слоя моря по расчету P1 в зимний сезон, когда происходит обновление вод в ХПС.

Характер циркуляции поверхностных вод Черного моря для двух экспериментов имеет различия. Согласно картам течений, циркуляция по расчету P2 существенно интенсивнее как в зимнее, так и в летнее время, за исключением приповерхностного тонкого 10-метрового слоя. Этот факт отражается в поведении плотности кинетической энергии.

Таким образом, использование модели циркуляции с более высоким разрешением по вертикали и параметризацией процессов вертикального обмена с помощью турбулентной модели позволило точнее воспроизвести основные черты термохалинной структуры и картину циркуляции вод Черного моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тенденции в изменчивости термохалинных и динамических характеристик Черного моря, выявленные по результатам реанализа за период 1985–1994 гг. / В. В. Кныш [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Вып. 16. С. 279–290.
2. Сезонная и межгодовая изменчивость гидрофизических полей Черного моря, восстановленных на основе реанализа за период 1971–1993 гг. / В. В. Кныш [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 3. С. 433–446.
3. Усвоение гидрологических наблюдений для расчета течений в морях и океанах / В. В. Кныш [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 1. С. 67–85. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17312859> (дата обращения 15.12.2017).
4. *Dorofeev V. L., Sukhikh L. I.* Study of long-term variability of Black Sea dynamics on the basis of circulation model assimilation of remote measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. Vol. 53, no 2. P. 224–232. doi:10.1134/S0001433817020025
5. *Dorofeev V. L., Sukhikh L. I.* Analysis of variability of the Black Sea hydrophysical fields in 1993–2012 based on the reanalysis results // *Physical Oceanography*. 2016. No. 1. P. 33–47. doi:10.22449/1573-160X-2016-1-33-47
6. *Sukhikh L. I., Dorofeyev V. L.* The study of sensitivity of the Black Sea hydrophysical fields reanalysis results to the applied atmospheric forcing // *Physical Oceanography*. 2016. No. 5. P. 45–60. doi:10.22449/1573-160X-2016-5-45-60
7. Rim current and coastal eddy mechanisms in an eddy-resolving Black Sea general circulation model / J. V. Staneva [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2001. Vol. 31, iss. 1–3. P. 137–157. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(01\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(01)00050-1)
8. *Залесный В. Б., Гусев А. В., Мошонкин С. Н.* Численная модель гидродинамики Черного и Азовского морей с вариационной инициализацией температуры и солёности // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49, № 6. С. 699–716. doi:10.7868/S000235151306014X
9. *Залесный В. Б., Гусев А. В., Агошков В. И.* Моделирование циркуляции Черного моря с высоким разрешением прибрежной зоны // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52, № 3. С. 316–333. doi:10.7868/S0002351516030147
10. *Агошков В. И., Пармузин Е. И., Шутяев В. П.* Ассимиляция данных наблюдений в задаче циркуляции Черного моря и анализ чувствительности ее решения // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49, № 6. С. 643–654. doi:10.7868/S0002351513060023
11. Расчет течений и распространения загрязнения в прибрежных водах Большого Сочи / Н. А. Дианский [и др.] // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49, № 6. С. 664–675. doi:10.7868/S0002351513060047
12. *Кордзадзе А. А., Деметрашвили Д. И.* Краткосрочный прогноз гидрофизических полей в восточной части Черного моря // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49, № 6. С. 733–745. doi:10.7868/S0002351513060096
13. *Демьяшев С. Г., Коротаев Г. К.* Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке C // *Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане*. М. : ИВМ РАН, 1992. С. 163–231.
14. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system / G. K. Korotaev [et al.] // *Ocean Science*. 2011. Vol. 7, iss. 5. P. 629–649. <https://doi.org/10.5194/os-7-629-2011>
15. A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows / B. Galperin [et al.] // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1988. Vol. 45, no. 1. P. 55–62. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1988\)045<0055:AQETEM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1988)045<0055:AQETEM>2.0.CO;2)

16. *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Reviews of Geophysics and Space Physics*. 1982. Vol. 20, no. 4. P. 851–875. doi:10.1029/RG020i004p00851
17. *Dorofeyev V. L., Sukhikh L. I.* Modeling of long-term evolution of hydrophysical fields of the Black Sea // *Oceanology*. 2017. Vol. 57, iss. 6. P. 784–796. doi:10.1134/S0001437017060017
18. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee [et al.] // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. Vol. 137, iss. 656. P. 553–597. doi:10.1002/qj.828
19. *Овчинников И. М., Попов Ю. И.* К вопросу о формировании холодного промежуточного слоя в Черном море // *Доклады Академии наук СССР*. 1984. Т. 279, № 4. С. 986–989.
20. *Геррман И. Ф.* Термохалинная структура вод моря // *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана. СПб. : Гидрометеиздат, 1991. С. 146–195.
21. Комплексные океанографические исследования Черного моря. Киев : Наукова думка, 1980. С. 147–149.
22. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / Под ред. Б. А. Нелепо. Л. : Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
23. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана. СПб. : Гидрометеиздат, 1991. 429 с.
24. *Oguz T., Besiktepe S.* Observations on the Rim Current structure, CIW formation and transport in the western Black Sea // *Deep-Sea Research*. 1999. Vol. 46, no. 10. P. 1733–1754. doi:10.1016/S0967-0637(99)00028-X
25. Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data / G. Korotaev [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. 2003. Vol. 108, iss. C4, 3122. <https://doi.org/10.1029/2002JC001508>
26. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейферным данным / В. М. Журбас [и др.] // *Океанология*. 2004. Т. 44, № 1. С. 34–48. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17656354> (дата обращения 15.12.2017).

Об авторах:

Сухих Лариса Ивановна, младший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 6168-6090, ORCID: 0000-0002-8002-4891, ResearcherID: M-4381-2018**, l.sukhikh@gmail.com

Дорофеев Виктор Львович, старший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 7144-1950, ORCID: 0000-0001-7979-8235, ResearcherID: G-1050-2014**, viktor.dorofeev@mhi-ras.ru