

В.Л.Дорофеев, Л.И.Сухих

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь***НЕКОТОРЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ
ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЧЕРНОГО МОРЯ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕАНАЛИЗА**

На основе новых данных дистанционных измерений температуры поверхности моря и альтиметрии был выполнен физический реанализ полей Черного моря с 2011 по 2015 гг. В дополнение к предыдущей работе, получен непрерывный ряд протяженностью 23 года полей температуры, солёности и скоростей течений на регулярной сетке. Структура новых данных спутниковой альтиметрии отлична от той, которая использовалась до этого. Это потребовало модифицировать алгоритм их ассимиляции в модели циркуляции Черного моря. Полученные непрерывные ряды позволяют провести анализ долговременной изменчивости динамики Черного моря.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *физический реанализ, Черное море, ассимиляция данных, спутниковые измерения*

Вызванные климатическими процессами изменения параметров морской среды морей и океанов, в том числе их экосистем, являются актуальной задачей современной океанологии. Особенно чувствительны к изменениям климата внутренние моря, каковым является Черное море. Благодаря своей замкнутости и небольшим размерам, по сравнению с океанами, оно более чувствительно к изменениям атмосферных процессов. Для изучения изменчивости параметров морских систем широкое распространение получили методы математического моделирования, одним из которых является реанализ. Для Черного моря были выполнены несколько вариантов ретроспективного анализа гидрологических полей [1 – 3]. В этих работах использовались разные модели циркуляции Черного моря, в которые ассимилировались гидрологические измерения температуры и солёности. Например, в [2] для реанализа был выбран период с 1971 г. до начала 90-х гг., на который пришлось максимальное количество крупномасштабных гидрологических съёмок, выполненных в акватории Черного моря. Недостатком этих работ следует признать то, что ассимилировались осредненные за месяц данные, в результате чего полученные поля были сильно сглажены.

В [4] представлены некоторые результаты восстановления гидрофизических полей Черного моря и анализ их изменчивости за двадцатилетний период (с 1993 по 2012 гг.), выполненные на основе ассимиляции данных дистанционных измерений. В данной работе проводится реанализ гидрофизических полей Черного моря на основе ассимиляции спутниковых измерений температуры поверхности моря и аномалий возвышения свободной поверхности для периода с 2011 по 2015 гг. Таким образом, с учетом ранее проведенного реанализа, результаты которого описаны в [4], получен трехмерный массив гидрофизических полей Черного моря на регулярной сетке за период 1993 – 2015 гг. с дискретностью одни сутки. Выбор дистанционных измерений для ассимиляции объясняется тем фактом, что в рассматри-

ваемый период времени гидрологических съемок в Черном море проводилось мало и выполнялись они в основном в прибрежной области. В то же время имеется большой массив спутниковых измерений температуры поверхности и аномалий уровня моря, что позволяет использовать их для выполнения реанализа.

Материалы и метод исследования. Метод реанализа включает в себя следующие основные элементы: численная гидродинамическая модель, адаптированная для рассматриваемого бассейна, данные измерений и алгоритм их ассимиляции в модели. В качестве первого элемента использовалась модель циркуляции Черного моря, разработанная в Морском гидрофизическом институте. Был выбран вариант с пространственным шагом 4.8 км, что позволило адекватно описывать синоптические процессы, поскольку радиус деформации Россби для первой бароклинной моды в глубоководной части Черного моря равен примерно 25 км. По вертикали модель содержит 35 расчетных уровней, сгущающихся к морской поверхности [5].

Для уравнений модели циркуляции в качестве граничных условий на свободной поверхности использовались поля атмосферы, полученные по результатам атмосферного реанализа *ERA-Interim (ECMWF)*: приповерхностный ветер (каждые 6 часов), потоки тепла и пресной воды, солнечная радиация (каждые 12 часов). Для выполнения расчетов эти поля были интерполированы на сетку модели.

Важную роль при проведении реанализа играет ассимиляция данных измерений. Как отмечалось выше, в данной работе ассимилировались спутниковые измерения температуры поверхности моря (ТПМ) и аномалии высоты возвышения свободной поверхности. Эти данные брались из архива *OSI TAC*. Вкратце процедура ассимиляции спутниковых альтиметрических данных представляет собой следующий алгоритм [6]. Профили температуры и солености подправляются в каждой точке пропорционально разности между измеренной величиной возвышения свободной поверхности моря и модельной. Весовые коэффициенты, зависящие от глубины, вычисляются по кросскорреляционным функциям ошибок уровня и солености и/или температуры. Процедура ассимиляции температуры морской поверхности представлена в [7].

Альтиметрические данные, используемые для ассимиляции, представляют собой измерения аномалий возвышения свободной поверхности относительно средней топографии. Важным моментом процедуры ассимиляции является преобразование аномалий в высоту динамической топографии. Применявшиеся ранее альтиметрические данные были снесены на фиксированные подспутниковые треки. В новом наборе данных, использовавшихся в данной работе, результаты измерений с новых спутников расположены вдоль треков, положение которых меняются со временем. Поэтому для использования нового набора данных альтиметрии была модифицирована процедура ассимиляции. Измерения, выполненные со всех спутников, были помещены в один массив и расположены по возрастанию времени. В модели циркуляции средний по площади бассейна уровень моря равен нулю. В то же время, средний уровень Черного моря меняется в соответствии с водным балансом. Эта изменчивость среднего уровня входит в измеренные

значения аномалий возвышения свободной поверхности. Для того чтобы устранить из данных влияние изменчивости среднего уровня, при ассимиляции из данных вычиталось текущее скользящее среднее за месячный интервал (как показано в [8], сигнал уровня Черного моря, вызванный компонентами водного баланса, с большой точностью пространственно однороден). Полученные таким образом величины прибавлялись к средней динамической топографии в соответствующих точках, в результате чего получались возвышения свободной поверхности, которые усваивались в модели циркуляции. Средняя динамическая топография была получена на основе результатов реанализа 1993 – 2012 гг. путем осреднения.

Обсуждение результатов. На основе описанного алгоритма был выполнен реанализ гидрофизических полей Черного моря за период с 2011 по 2015 гг. 2011 г. использовался для сравнения с предыдущими расчетами. В результате был получен массив гидрофизических полей Черного моря на регулярной сетке, охватывающий временной отрезок с 1993 по 2015 гг.

Полученные за рассматриваемый период времени наборы данных показывают заметное потепление верхнего слоя Черного моря. Это можно видеть по поведению средней по площади бассейна температуры поверхности моря (ТПМ). На рис.1, а приведены среднегодовые и среднезимние значения ТПМ, полученные по результатам реанализа и непосредственно по данным спутниковых измерений. Причем количественно среднезимние значения ТПМ, полученные в результате реанализа, очень близки к спутниковым измерениям, а уровень среднегодовой поверхностной температуры из реанализа несколько ниже, чем по результатам спутниковых измерений. Во всех случаях четко виден линейный положительный тренд.

Подповерхностным индикатором потепления верхнего слоя моря может служить уменьшение мощности холодного промежуточного слоя (ХПС). На рис.1, б показана эволюция среднего за летний сезон значения объема ХПС Черного моря, который определяется, как водная масса, ограниченная по-

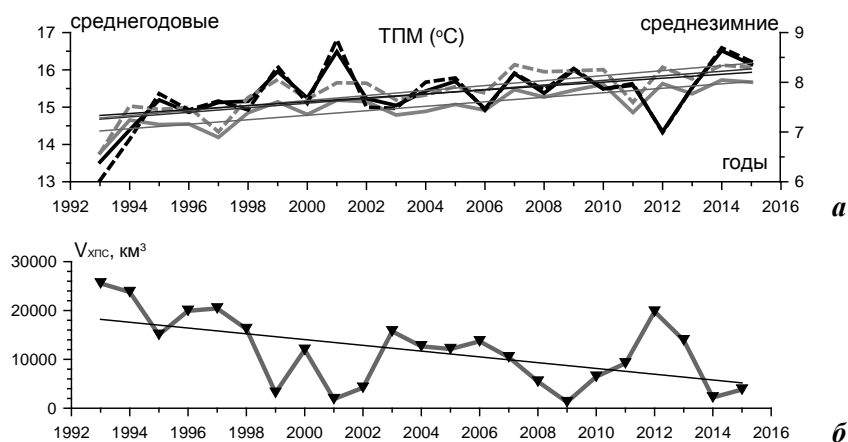
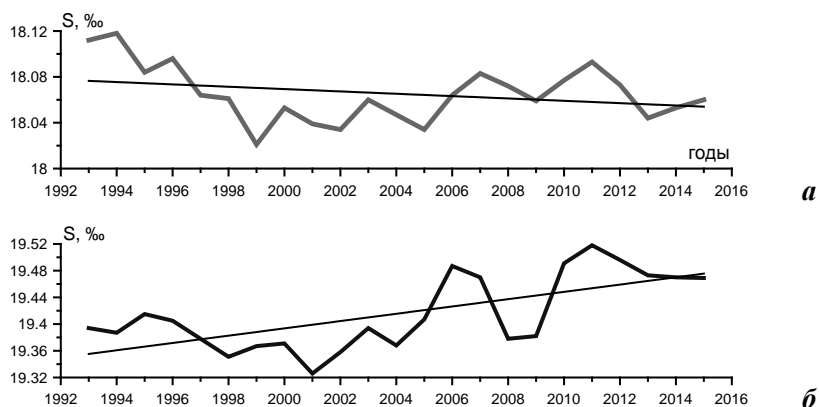


Рис. 1. Среднегодовые (серые линии) и среднезимние (черная линия) значения ТПМ, полученные по реанализу (сплошная линия) и по спутниковым измерениям (пунктирная линия) (а); средний за лето объем ХПС (б).

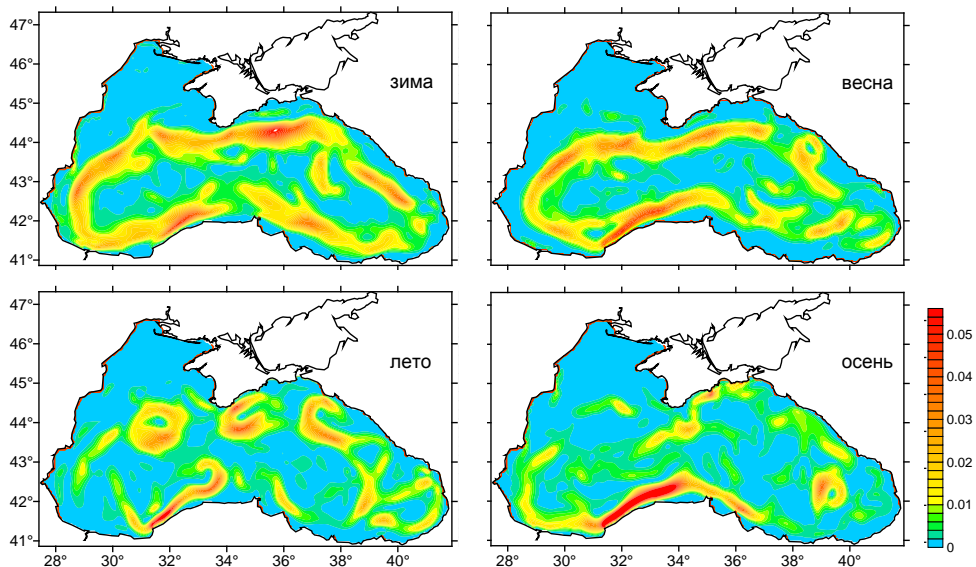
верхностями равной температуры 8 °С. На этом рисунке видно, что летний объем ХПС значительно меняется от года к году. Причем его низкие значения коррелируют с высокими зимними ТПМ на рис.1, а и наоборот. В целом же наблюдается отрицательный линейный тренд, что говорит о потеплении верхнего слоя Черного моря.

Другим параметром, характеризующим термохалинную структуру вод Черного моря, является соленость. На рис.2 представлены графики изменения средних значений солености в слое 0 – 40 и 40 – 100 м. Размах межгодовых колебаний средних значений солености достигает в верхнем слое около 0,1 ‰. При этом, в рассматриваемый период происходит распреснение вод, что видно по отрицательному линейному тренду. В слое 40 – 100 м, помимо межгодовых колебаний, хорошо виден положительный линейный тренд, что может говорить о продолжении формирования галинной стратификации за счет поступления соленых вод с нижнебосфорским течением. В [9], где анализируются изменения термохалинной структуры Черного моря за период около ста лет на основе данных гидрографических измерений, обнаружено увеличение солезапаса Черного моря. При этом наибольший рост наблюдается в слое главного галоклина. Автор объясняет этот процесс осолонения продолжающимся увеличением объема мраморноморских вод.

Для горизонтальной циркуляции в верхнем слое Черного моря наиболее выраженным элементом является Основное черноморское течение (ОЧТ), которое опоясывает Черное море по периметру и формирует крупномасштабный циклонический круговорот. Помимо основного течения наблюдается интенсивная синоптическая изменчивость, искажающая простую структуру круговоротов. В частности, происходит интенсивное меандрирование ОЧТ на свале глубин, справа от струи наблюдаются квазистационарные мезомасштабные антициклоны. Циркуляция верхнего слоя Черного моря в основном имеет циклонический характер, что определяется преобладанием положительных значений вертикальной компоненты завихренности поля ветра над регионом. Максимальная интенсивность горизонтальных течений наблюдается, как правило, в зимний сезон, когда максимальны интенсивность и завихренность поля ветра над регионом. В летний же сезон



Р и с . 2 . Среднегодовые значения солености в слое 0 – 40 м (а) и в слое 40 – 100 м (б).

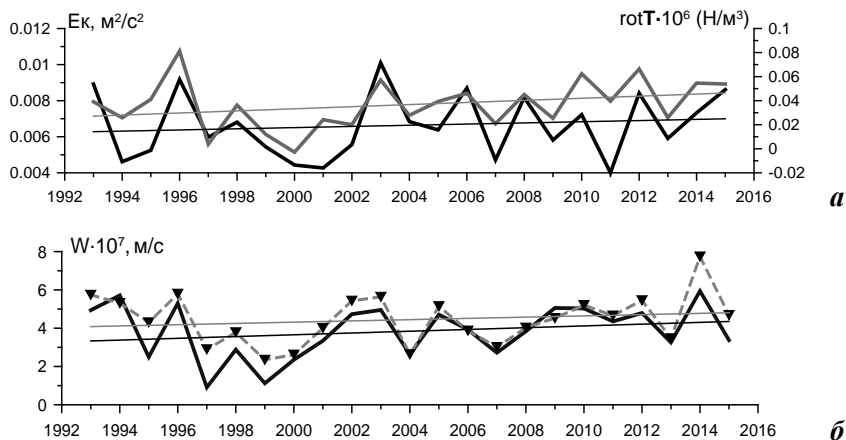


Р и с . 3 . Поля плотности кинетической энергии средних за сезон течений в верхнем 30-метровом слое Черного моря ($\text{м}^2\text{с}^{-2}$).

интенсивность горизонтальной циркуляции ослабевает, и она разбивается на ряд круговоротов.

В качестве иллюстрации описанной выше схемы циркуляции на рис.3 представлены карты плотности кинетической энергии средних за сезон течений в верхнем 30-метровом слое Черного моря (для примера взят 1993 г.). Видно, что в зимний и весенний сезоны основным элементом горизонтальной циркуляции является ОЧТ. Весной в общей картине сезонной циркуляции можно также видеть появление Батумского круговорота и антициклона у Кавказского побережья. Летом картина сезонной циркуляции представляет собой набор вихрей. Отсутствие явно выраженного ОЧТ наблюдается также в осенний сезон. При этом интенсивное струйное течение присутствует только у анатолийского побережья.

Пример межгодовой изменчивости интенсивности горизонтальной циркуляции показан на рис.4, а в виде графика поведения средней по площади бассейна плотности кинетической энергии для зимнего сезона. Именно в это время циркуляция верхнего слоя Черного моря наиболее интенсивна. Величина средней плотности кинетической энергии может меняться от года к году примерно в два раза. Линейный тренд, построенный по 23 годам, имеет положительное значение, т.е. интенсивность зимней циркуляции имеет тенденцию к увеличению. На этом же графике приведена эволюция средней по акватории моря величины вертикальной компоненты вихря поля напряжения трения ветра у поверхности моря в зимние сезоны. Здесь также наблюдается положительный линейный тренд. Кроме того, максимумы и минимумы двух кривых хорошо коррелируют. Это подтверждает тот факт, что завихренность поля ветра играет основную роль в формировании горизонтальной циркуляции в верхнем слое Черного моря.



Р и с . 4 . Осредненные по площади бассейна значения плотности кинетической энергии течений в зимний сезон (*черная линия*) и соответствующие значения вертикальной компоненты вихря напряжения трения ветра на поверхности моря (*серая линия*) (*а*); величины максимумов осредненных за год профилей вертикальной скорости (*черная линия*) и значения экмановской скорости (*треугольники*) (*б*).

Важную роль в циркуляции вод Черного моря играют также вертикальные движения. Значения вертикальной скорости на различных горизонтах, согласно расчетам, пространственно неоднородны. Области с вертикальной скоростью одного знака чередуются с областями другого знака. Такая изменчивость вызвана различного рода синоптическими процессами: вихрями, волнами Россби, а также неоднородностью и нестационарностью поля ветра. Тем не менее, в среднем вертикальная циркуляция в приповерхностном слое определяется общей положительной завихренностью течений в Черном море. В центре бассейна в его глубоководной части вода поднимается к поверхности, возле поверхности движется по направлению к берегу и затем опускается вниз.

В [10] были рассчитаны средние за период с 1993 по 2012 гг. профили вертикальной скорости для глубоководной части бассейна Черного моря (глубже 1000 м) и остальной частью, расположенной над континентальным склоном и шельфом, для горизонтов, начиная от свободной поверхности до 200 м. В глубоководной части моря вода, в среднем, поднимается, а в прибрежной части – опускается в соответствии со схемой, описанной выше. В глубоководной области средняя вертикальная скорость растет до глубины примерно 30 м, а затем падает практически до нуля на поверхности моря. Рост вертикальной скорости в слое до 30 м сопровождается притоком воды через боковую поверхность цилиндра, основание которого ограничено изобатой 1000 м, а в верхнем слое, в котором вертикальная скорость падает (от 30 до 0 м), вода вытекает через боковую границу этой области. Величина вертикальной скорости в максимуме характеризует интенсивность вертикальной циркуляции. На рис. 4, б в виде сплошной линии представлен график изменения этой характеристики, полученной на основе осредненных за

год полей. Значение максимума в профиле среднегодовой вертикальной скорости меняется от года к году существенно (максимальное значение примерно в шесть раз превышает минимальное). При этом наблюдается увеличение интенсивности вертикальной циркуляции – положительный линейный тренд за рассматриваемый период. На этом же графике приведены среднегодовые величины экмановской скорости для глубоководной части моря, определяемые по напряжению трения ветра по формуле $W_E = \text{rot}_z \tau / (\rho f)$, где τ – касательное напряжение трения ветра, f – параметр Кориолиса, ρ – плотность морской воды. Значения экмановской скорости очень близки к тем, которые получены из профилей вертикальной скорости по результатам моделирования.

Таким образом, результаты выполненного реанализа гидрофизических полей Черного моря за период с 1993 по 2015 гг. показали потепление верхнего слоя моря. Это проявляется как в повышении температуры приповерхностного слоя, так и в уменьшении объема вод ХПС. Вода в приповерхностном слое слегка распресняется, но в слое 40 – 100 м наблюдается увеличение солености, что, по-видимому, связано с увеличением объема мраморноморских вод. Интенсивность горизонтальной и вертикальной циркуляции в верхнем слое Черного моря также растет в течение рассматриваемого периода времени.

Работа выполнена в рамках научного проекта «Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий» (шифр «Оперативная океанография»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кныш В.В., Кубряков А.И., Моисеенко В.А., Белокопытов В.Н., Инюшина Н.В., Коротаев Г.К.* Тенденции в изменчивости термохалинных и динамических характеристик Черного моря, выявленные по результатам реанализа за период 1985 – 1994 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2008.– вып.16.– С.279-290.
2. *Кныш В.В., Коротаев Г.К., Моисеенко В.А., Кубряков А.И., Белокопытов В.Н., Инюшина Н.В.* Сезонная и межгодовая изменчивость гидрофизических полей Черного моря, восстановленных на основе реанализа за период 1971 – 1993 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.– 2011.– т.47, № 3.– С.433-446.
3. *Кныш В.В., Коротаев Г.К., Мизюк А.И., Саркисян А.С.* Усвоение гидрологических наблюдений для расчета течений в морях и океанах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.– 2012.– т.48, № 1.– С.67-85.
4. *Дорофеев В.Л., Сухих Л.И.* Изучение долговременной изменчивости динамики Черного моря на основе ассимиляции дистанционных измерений в модели циркуляции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.– 2017.– т.53, № 2.– С.1-11.
5. *Korotaev G.K., Oguz T., Dorofeyev V.L., Demyshev S.G., Kubryakov A.I., Ratner Yu.B.* Development of BlackSea nowcasting and forecasting system // OceanScience.– 2011.– v.7, № 5.– P.1-21.
6. *Дорофеев В. Л., Коротаев Г.К.* Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихререзающей модели циркуляции Черного моря // Морской гидрофизический журнал.– 2004.– № 1.– С.52-68.

7. *Дорофеев В.Л.* Ассимиляция спутниковых измерений поверхностной температуры Черного моря в модели циркуляции // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь, 2004.– вып.11.– С.24-30.
8. *Дорофеев В.Л.* Влияние стока рек на формирование уровня замкнутого моря // Морской гидрофизический журнал.– 1999.– № 2.– С.18-29.
9. *Белокопытов В.Н.* О климатической изменчивости термохалинной структуры Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2013.– вып.27.– С.226-230.
10. *Дорофеев В.Л., Сухих Л.И.* Анализ изменчивости гидрофизических полей Черного моря в период 1993 – 2012 годов на основе результатов выполненного реанализа // Морской гидрофизический журнал.– 2016.– № 1.– С.33-48.

Материал поступил в редакцию 30.01.2017 г.
После доработки 07.03.2017 г.

V.L.Dorofeyev, L.I.Sukhikh

SOME TRENDS IN THE LONG-TERM VARIABILITY OF THE BLACK SEA HYDROPHYSICAL FIELDS ON THE RESULTS OF THE REANALYSIS

Physical reanalysis of the Black Sea (2011 – 2015) was performed on the basis of a new remote sensing data of the sea surface temperature and altimetry. In addition to the previous work, it took opportunity to obtain a continuous series by 23 years duration of temperature, salinity and current velocity fields on a regular grid. The structure of the new satellite altimetry data differs from the one used before. This required modifying the assimilation algorithm. The continuous series obtained allowed analyzing the long-term variability of the Black Sea dynamics.

KEYWORDS: physical reanalysis, the Black Sea, data assimilation, satellite measurement