

# Реанализ гидрофизических полей Черного моря на основе ассимиляции спутниковых данных в модели циркуляции

Дорофеев В.Л., Сухих Л.И.

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

## Введение

В последнее время получило широкое распространение проведение ретроспективного анализа, как локальных систем - отдельных морей, так и глобальных систем - атмосферы Земли и мирового океана. Реанализ проводится на основе объективного синтеза информации, обеспечиваемой гидродинамической моделью и данными наблюдений. Наличие большого массива спутниковых данных делает перспективным для изучения динамики морской среды совместное использование дистанционных измерений с математическими моделями. В данной работе представлены результаты физического реанализа Черного моря за период с 1993 по 2015 год включительно. В этот период времени проводилось мало гидрологических съемок, и они носили в основном локальный характер. Этот недостаток компенсировался тем не менее появлением на регулярной основе спутниковых дистанционных измерений.

## 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 модели циркуляции Черного моря использовалась модель, разработанная в МГИ. Был выбран вариант модели с пространственным шагом 4.8 км, что позволило адекватно описывать синоптические процессы. По вертикали модель содержит 35 расчетных уровней, сгущающихся к морской поверхности. Для уравнений модели циркуляции в качестве граничных условий на свободной поверхности использовались поля атмосферы, полученные по результатам атмосферного реанализа ERA-Interim (ECMWF): приповерхностный ветер, потоки тепла и пресной воды, солнечная радиация.

Важным компонентом при выполнении реанализа является ассимиляция данных наблюдений. В предложенной работе ассимилировались спутниковые данные температуры поверхности моря и аномалии возвышения свободной. Значения температуры поверхности моря брались из архивов GHRSSST и NODC (1993 – 2009 гг.), а для последнего периода (2010 – 2012 гг.) – из архива OSI TAC. За период реанализа из архивов NASA, AVISO и SL TAC использовались все доступные спутниковые альтиметрические данные.

## Анализ результатов

Данные выполненного реанализа представляют собой трехмерные массивы полей скоростей течений, температуры и солёности на регулярной сетке, рассчитанных с дискретностью по времени в 1 сутки. Период расчета составлял 23 года (1993 – 2015 гг.). Полученные результаты показывают заметное потепление верхнего слоя Черного моря. Это можно видеть по поведению средней по площади бассейна температуры поверхности моря (ТПМ).

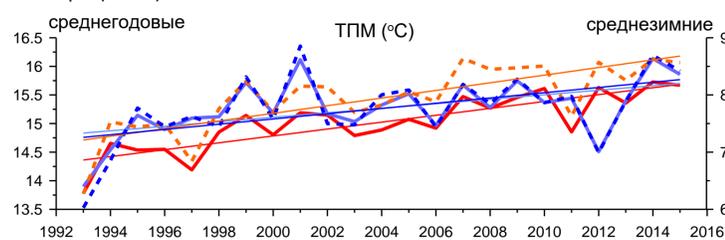


Рис.1 Эволюция средней по площади ТПМ: реанализ (сплошные линии) и спутниковые данные (пунктир). Красные линии – среднегодичные значения, синие – среднезимние.

Подповерхностным индикатором потепления верхнего слоя моря может служить уменьшение мощности холодного промежуточного слоя. На рис.2 показана эволюция среднего за летний сезон значения объема холодного промежуточного слоя Черного моря (ХПС), который определяется, как водная масса, ограниченная поверхностями равной температуры 8°C. 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, и наоборот. В целом же, наблюдается отрицательный линейный тренд, что говорит о потеплении верхнего слоя Черного моря. Эта тенденция заметна также на рис.3.

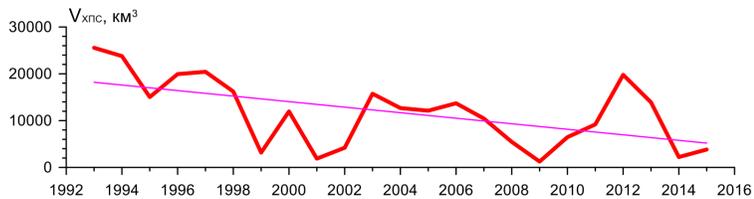


Рис.2 Средний за лето объем ХПС.

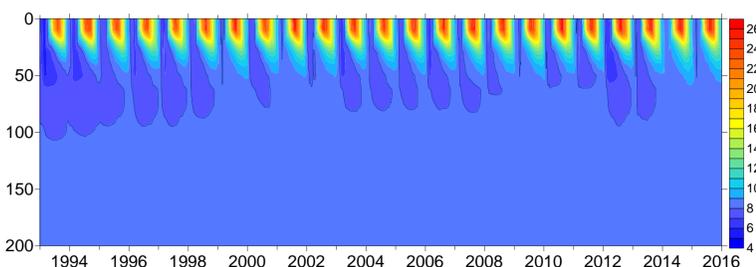


Рис.3 Поведение средней по площади температуры в верхнем 200м слое. Синей линией выделена область с температурой воды ниже 8°C.

Другим параметром, характеризующим термохалинную структуру вод Черного моря, является солёность. На рис.4 представлены графики изменения средних значений солёности в слое 0-40м и 40-100м. Размах межгодовых колебаний средних значений солёности достигает в приповерхностном слое около 0.1‰. При этом, в рассматриваемый период происходит распреснение вод, что видно по отрицательному линейному тренду. В слое же 40-100м солёность имеет четко выраженный положительный тренд, что говорит об увеличении объема мраморноморских вод в глубинных слоях Черного моря.

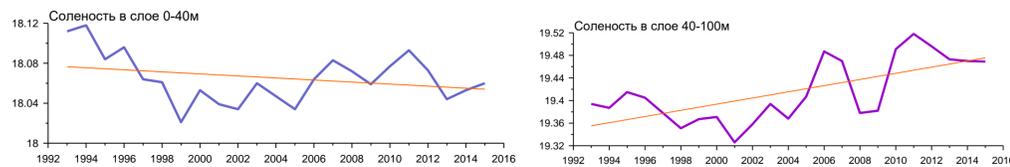


Рис.4 Поведение средних значений солёности в слоях 0-40м (слева) и 40-100м.

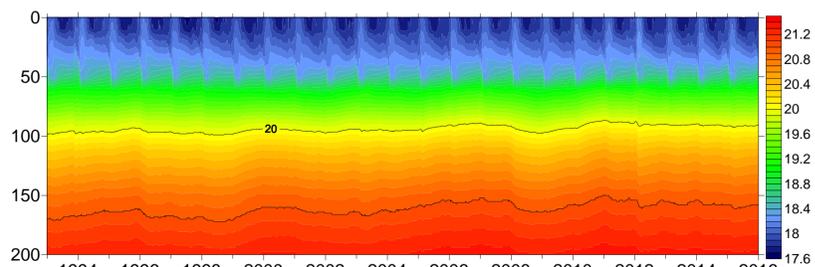


Рис.5 Поведение средней по площади солёности в верхнем 200м слое.

Циркуляция верхнего слоя Черного моря в основном имеет циклонический характер, что определяется преобладанием положительных значений вертикальной компоненты завихренности поля ветра над регионом. Наиболее выраженной особенностью циркуляции в верхнем слое является Основное Черноморское течение (ОЧТ). Оно опоясывает Черное море по периметру и формирует крупномасштабный циклонический круговорот. Таким образом, схема течений в зимнее время представляет собой два циклонических круговорота, образующих мощное струйное течение, проходящее в основном вдоль континентального склона. В летний сезон интенсивность течений ослабевает и циркуляция приобретает менее организованный характер, разбиваясь на ряд вихрей. Описанная схема циркуляции, разумеется, является упрощенной. Решающее влияние на изменчивость картины циркуляции в верхнем слое оказывают вариации поля ветра, точнее его вертикальной компоненты завихренности.

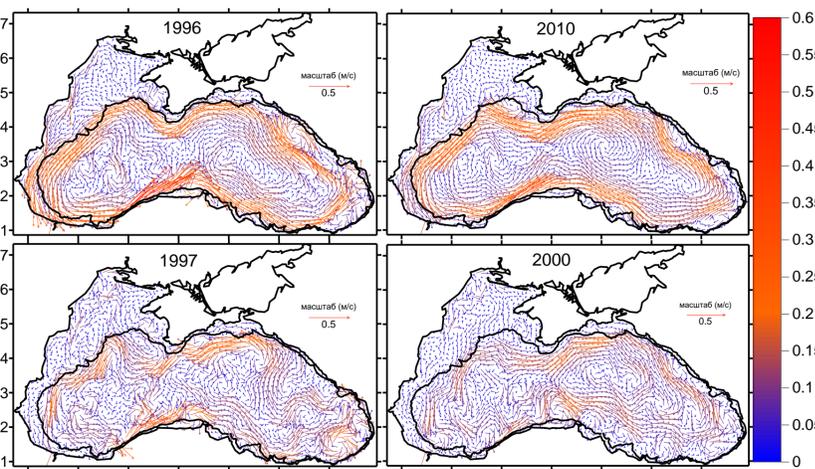


Рис.6 Карты средних за зимний сезон течений в верхнем 30-метровом слое Черного моря, полученные по результатам реанализа, (верхний ряд соответствует зимам с максимальными значениями завихренности поля ветра, нижний ряд – с минимальными)

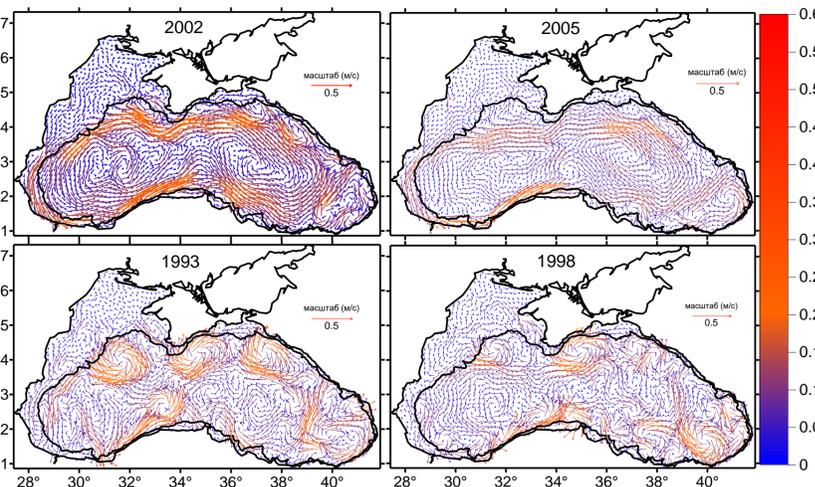


Рис.7 Карты средних за летний сезон течений в верхнем 30-метровом слое, полученные по результатам реанализа, (верхний ряд соответствует летним сезонам с максимальными значениями завихренности поля ветра, нижний ряд – с минимальными)

## Заключение

Результаты выполненного на основе ассимиляции спутниковых данных физического реанализа выявили межгодовые изменения в верхнем слое Черного моря. Температура моря увеличивается в течение рассматриваемого периода времени. Об этом свидетельствуют как положительные тренды в среднегодичных и среднезимних значениях температуры поверхности моря, так и тенденция к уменьшению объема ХПС. Вода в приповерхностном слое слегка распресняется, но в слое 40-100м наблюдается увеличение солёности, что, по видимому, связано с увеличением объема мраморноводных вод. Картина циркуляции, полученная по результатам реанализа, воспроизводит не только крупномасштабные черты, такие как основное черноморское течение, но и синоптические процессы, такие как вихри и меандры ОЧТ. В некоторые годы течения в приповерхностном слое Черного моря носят нетипичный для данного сезона характер. В частности, в зимний сезон наблюдается циркуляция в виде набора вихрей, а в летний сезон – в виде струйного течения. Эти аномальные картины циркуляции вызваны характеристиками ветра над регионом Черного моря.