Реанализ гидрофизических полей на основе ассимиляции данных ЦКП «ИКИ-Мониторинг» в модели гидротермодинамики Чёрного, Азовского и Мраморного морей

Н.Б. Захарова¹, Е.И. Пармузин^{1,2}, Н.Р. Лёзина¹, В.И. Агошков^{1,2}, Т.О. Шелопут^{1,3}, С.А. Лебедев^{1,4}, В.П. Шутяев^{1,3}, Б.С. Шевченко²

¹ Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН Москва, 119333, Россия E-mail: zakharova_nb@inm.ras.ru ² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Москва, 119991, Россия ³ Московский физико-технический институт (НИУ) Долгопрудный, 141701, Россия ⁴ Геофизический центр РАН, Москва, 119296, Россия

Настоящая работа посвящена реанализу гидрофизических полей на основе ассимиляции данных наблюдений дистанционного зондирования в численной модели гидротермодинамики Чёрного, Азовского и Мраморного морей с целью интеграции результатов расчётов в систему мониторинга состояния морских акваторий. Проведён анализ данных наблюдений о температуре поверхности моря, полученных из Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» со спутников Aqua, Terra, Sentinel и SNPP (англ. Suomi National Polarorbiting Partnership). Для обработки получаемых данных наблюдений, выявления и исключения ошибочных значений применяются статистический метод нахождения аномальных значений и правило трёх сигм. Реализован алгоритм вариационной ассимиляции спутниковых данных. В работе используется математическая модель морской циркуляции INMOM (англ. Institute of Numerical Mathematics Ocean Model), основанная на полных уравнениях морской гидротермодинамики. В результате моделирования с применением процедуры вариационной ассимиляции данных наблюдений построены поля основных гидрофизических параметров (температура, солёность, поле скоростей, уровень моря) для исследуемых акваторий. Рассчитанные поля интегрированы в спутниковый сервис See the Sea для решения междисциплинарных задач исследования морских акваторий. Трёхмерные поля реанализа, переданные в сервис, добавляют пользователям возможность исследования процессов, происходящих на глубине.

Ключевые слова: температура поверхности моря, вариационная ассимиляция, обработка данных, данные наблюдений со спутников, дистанционное зондирование, центр коллективного пользования, реанализ

Одобрена к печати: 21.11.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-63-75

Введение

Решение задачи моделирования и мониторинга состояния океанов и морей во многом зависит от развития наблюдательных систем, гидротермодинамических моделей и соответствующих вычислительных технологий, обеспечивающих получение оценок основных гидрофизических полей (Думанская и др., 2019). Для исследования морских систем активно используется реанализ гидрофизических полей, который позволяет проводить глубокий анализ состояния морских акваторий и процессов, происходящих в исследуемой среде (Гинзбург и др., 2021; Мизюк, 2014; Belokopytov, 2011). Ещё одним актуальным направлением исследований стало развитие систем оперативной океанографии, основанных на ассимиляции доступных данных наблюдений в моделях гидротермодинамики морских акваторий (Думанская и др., 2019). Данное направление также выступает практически значимым: результаты моделирования используются в судоходстве, при оценке рисков морских катастроф и во многих других приложениях. Следует отметить необходимость оперативного получения, анализа и обработки данных со спутников при решении задач оперативной океанографии. Это подчёркивает важность проводимого исследования.

В настоящее время в задачах моделирования морских акваторий развивают разные математические модели и методы ассимиляции данных наблюдений (Зеленько и др., 2016; Кныш и др., 2011; Яковлев и др., 2016; Sarkisyan et al., 2010). В Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН (ИВМ РАН) разработана и активно развивается система вариационной ассимиляции данных наблюдений (Агошков и др., 2016) с целью моделирования циркуляции морей, которая позволяет посредством специальных процедур ассимиляции данных усваивать в численной модели гидротермодинамики INMOM (*анел.* Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) (Zalesny et al., 2012) данные наблюдений, в том числе данные дистанционного зондирования. Использование мгновенных данных наблюдений в численной модели гидротермодинамики позволяет существенно повысить точность прогностических расчётов и реанализа основных гидрофизических полей. В настоящей работе используются данные наблюдений из Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг», предназначенного для мониторинга природной среды, обеспечения доступа к многолетним архивам спутниковых данных, позволяющим проводить их анализ и обработку (Лупян и др., 2015).

Однако актуальной проблемой остаётся верификация и фильтрация спутниковых данных наблюдений, их дополнительная обработка (Petrenko et al., 2022) с целью использования в системах мониторинга состояния морей и океанов.

Несмотря на то что температура поверхности моря (ТПМ) считается одним из параметров, наиболее точно определяемых дистанционными методами, погрешность её восстановления остаётся значительной. Спутники принимают тепловое излучение водной поверхности, а точнее холодного скин-слоя (Федоров, 1981; Хунджуа и др., 1977; Saunders, 1967; Wu, 1985), ниже которого располагается тёплый турбулентный, однородный по температуре слой. Толщина скин-слоя не превышает 5–8 мм (Гинзбург, Федоров, 1978; Гинзбург и др., 1977).

Лабораторные и натурные эксперименты по исследованию термической структуры этого слоя (Лаворко, 1970; Хунджуа, Андреев, 1974; McAlister, McLeish, 1969) показали, что перепад температуры 0,4-2 °C сосредоточен в пределах 1 мм. Это приводит к ошибке определения ТПМ по данным инфракрасной (ИК) радиометрии. В настоящий момент она составляет не менее 0,5-1 °C (Donlon et al., 2007). Это обусловлено тем фактом, что измеренное тепловое излучение, интенсивность которого зафиксирована сенсором, отличается от того, что было излучено морем. Основные факторы, влияющие на искажение ИК-радиации, излучённой морской поверхностью, следующие: поглощение и собственное тепловое излучение атмосферными газами; отличие от единицы излучательной способности поверхности, т. е. отражение атмосферой радиации (Акимов и др., 2014). Скорость ветра влияет на характеристики турбулентности в верхнем слое океана, поэтому ветер входит в число факторов, влияющих на величину скачка температуры в скин-слое (Лебедев и др., 1994). Ливневые осадки над морем также снижают температуру скин-слоя до 1,5 °C в области от 1 до 10 км (Федоров, 1981).

Сравнение ТПМ Чёрного моря, рассчитанной по данным радиометра видимого инфракрасного диапазона VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), с *in situ* измерениями термопрофилирующих дрейфующих буёв за период 2005–2013 гг. показало, что среднеквадратичное отклонение разницы между величинами составило 0,57 °C. В тёплый период года (температура воздуха от +18 °C), когда полный поток тепла направлен из атмосферы в море и происходит прогрев приповерхностного слоя, разница между ТПМ, рассчитанной по данным дистанционного зондирования, и измерениями буёв принимает отрицательные значения -0,8...-0,9 °C. В холодный период года, когда происходит остывание вод приповерхностного слоя, полный поток тепла направлен из моря в атмосферу, эта разница принимает положительные значения +0,4...+0,7 °C. Максимальные по модулю отрицательные значения разницы ТПМ -0,15...-0,05 °C приходятся на вторую половину суток, когда дневной прогрев достигает наибольшей интенсивности и скин-слой наиболее развит. В утренние часы абсолютные значения разницы ТПМ минимальны, что связано с разрушением скин-слоя вследствие ночной конвекции и действия ветра (Рубакина и др., 2021).

Кроме этого, к измерениям ТПМ различными сенсорами добавляется ошибка самого прибора. Так, в работе (Liang, Ignatov, 2013) указывается, что для сканирующего спектрорадиометра среднего разрешения MODIS (*анел*. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), размещённого на спутниках Тегга и Aqua в канале 3,79 мкм, наблюдается разница в яркостной температуре до 0,3 K, что приводит к разнице в расчётах ТПМ. Алгоритм расчёта ТПМ по данным радиометра видимого инфракрасного диапазона VIIRS даёт яркостную температуру в канале 3,70 мкм, на 0,14 K отличающуюся от данных MODIS спутника Aqua (Liang, Ignatov, 2013).

Ошибки, выявляемые в результатах наблюдений, требуют дополнительной обработки данных с целью дальнейшего использования в процедурах вариационной ассимиляции.

Данные наблюдений и их обработка

В настоящей работе используются данные о температуре поверхности Чёрного, Азовского и Мраморного морей за 2015–2021 гг., предоставленные ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Данные наблюдений о ТПМ получены с различных спутников (Aqua, Terra, SNPP (*англ*. Suomi National Polar-orbiting Partnership), Sentinel) и приборов (MODIS, VIIRS), поступают нерегулярно и зачастую покрывают только часть исследуемой акватории в силу погодных условий, особенностей измерительных приборов и траекторий спутников.

В данных наблюдений в рамках настоящей работы был выявлен ряд ошибок. Так, на *puc. 1a* представлено для примера поле данных о ТПМ (на 11:42 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time, всемирное координированное время) 5 июня 2018 г.), значительная часть которого заполнена нулевыми значениями (акватория Азовского моря и северная часть Чёрного моря). При численном моделировании нулевое поле в общем случае не считается ошибочным, поскольку нулевые значения могут присутствовать в поле температуры в зимний период. Однако ассимиляция такого рода полей неминуемо приведёт к неверным расчётам, поэтому необходимо вводить дополнительные процедуры фильтрации данных для исключения ошибочных значений. Для корректной работы вариационной ассимиляции была проведена предварительная обработка данных наблюдений с целью выявления и исключения ошибок. Результаты работы реализованной процедуры для поля ТПМ с *рис. 1a* представлены на *рис. 16*.



Рис. 1. Данные наблюдения ТПМ 05.06.2018 в 11:42 UTC (спутник SNPP): *а* — до предварительной обработки, *б* — после предварительной обработки, °C

Также были найдены поля ТПМ с аномальными значениями температуры в некоторых точках рассматриваемой акватории. Так, например, на *рис. 2a* (см. с. 66) представлено поле

ТПМ, где значения температуры в соседних точках расчётной сетки различаются более чем на 10 °C. Для исключения аномальных значений использовались статистический метод нахождения аномальных значений (Rosner, 1975) и правило трёх сигм (Гмурман, 2003). Анализ получаемых данных выявил, что ошибки такого рода появляются на границе областей с данными, из чего можно сделать предположение, что природа ошибок заключается в особенностях измерительных приборов и погрешности измерений на границе облаков. Результат работы алгоритмов представлен на *рис. 2б*.



Рис. 2. Данные наблюдения ТПМ 27.07.2018 в 07:47 UTC (спутник Sentinel); *а* — до предварительной обработки, *б* — после предварительной обработки, °C

Ассимиляция данных наблюдений без предварительной обработки может приводить к ошибочным расчётам.

Вариационная ассимиляция данных и результаты численных расчётов

В настоящей работе рассматривается вариационная ассимиляция данных, основанная на теории обратных задач и сопряжённых уравнений (Agoshkov et al., 2019). Вводится функционал стоимости, характеризующий отклонение решения математической модели от данных наблюдений. Ставится задача поиска решения, при котором минимизируется данный функционал. Один из методов решения поставленной задачи заключается в сведении её к системе оптимальности, состоящей из уравнения модели, сопряжённого уравнения и уравнения для управления. В данном случае управлением становится функция потока тепла на поверхности моря. Для учёта ошибок наблюдений в функционал вводятся ковариационные матрицы ошибок данных (Agoshkov et al., 2018), рассчитанные на основе статистических свойств данных наблюдений (SST_BS_sst_L4_rep_observations_010_022_a) за 1982–2017 гг. (Pisano et al., 2016), полученных с портала системы Европейских центров морских прогнозов Сорегпісus (Copernicus Marine Environment Monitoring Service — CMEMS, http://marine.copernicus.eu/).



Puc. 3. ТПМ Чёрного, Азовского и Мраморного морей, рассчитанная на 12:00 UTC 05.06.2018: *a* — с использованием ассимиляции исходных данных наблюдений, *б* — с применением ассимиляции данных наблюдений после предварительной обработки, *в* — по модели без ассимиляции данных наблюдений, °C

В работе используется численная модель гидротермодинамики INMOM (Zalesny et al., 2012), которая основана на системе уравнений, записанных в приближении Буссинеска и гидростатики в обобщённой σ -системе координат на сфере. В качестве объекта моделирования рассматривались акватории Чёрного, Азовского и Мраморного морей. Нижняя левая точка расчётной сетки типа «С» имеет координаты 26,65° в.д. и 40,15° с.ш., а верхняя правая — 41,9° в.д. и 47,31° с.ш. Шаг сетки по пространственным переменным *x*, *y* составляет 0,05 и 0,036° соответственно, а шаг по времени выбирался равным 2 мин 30 с. В работе проведены расчёты с ассимиляцией мгновенных данных наблюдений со спутников Aqua, Terra, Sentinel и SNPP за 2015–2021 гг. В качестве начальных условий принимались климатические данные.

Приведём результаты двух расчётов на 2018 г. В первом эксперименте использовались оригинальные данные наблюдений, а во втором — прошедшие предварительную обработку, описанную в предыдущем параграфе. На *рис. 3* (см. с. 67) представлены результаты численного расчёта температуры на 12:00 UTC 5 июня 2018 г. в исследуемой акватории.



Рис. 4. Разность в ТПМ при расчёте с ассимиляцией и без ассимиляции на 12:00 UTC 05.06.2018: *а* — ассимиляция исходных данных наблюдений, *б* — ассимиляция данных наблюдений после предварительной обработки, °C

На *рис. За* показано поле температуры, рассчитанное с применением процедуры ассимиляции оригинальных данных, которые не проходили предварительную обработку. На *рис. Зб* представлены результаты расчёта ТПМ с ассимиляцией обработанных данных. Поле ТПМ, рассчитанное по численной модели без процедуры ассимиляции данных на тот же момент времени, показано на *рис. 36*. На *рис. 46* (см. с. 68) представлена разность в ТПМ при расчёте по модели с ассимиляцией оригинальных данных и без процедур ассимиляции, разность в ТПМ при расчёте по модели с ассимиляцией предварительно обработанных данных и без ассимиляции показана на *рис. 46*.

Как видно из *рис. 3* и *4*, в оригинальном наборе данных присутствовали поля с ошибками, которые не позволяли адекватно воспроизводить температуру. Замечено, что влияние ассимиляции ошибочных данных в расчёте сохраняется на интервале времени, большем чем 2 сут. Предварительная обработка данных позволила устранить влияние ошибок на результаты моделирования.

Интеграция реанализа в ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

На основе получаемых данных и используемой численной модели гидротермодинамики Чёрного, Азовского и Мраморного морей построен реанализ гидрофизических полей за 2015—2021 гг. В целях автоматизации процесса построения реанализа по модели гидротермодинамики был разработан комплекс программ, реализующих следующие операции:

- 1. Обработка входных параметров программы (даты, на которые проводится расчёт).
- 2. Запуск блока скачивания данных дистанционного зондирования с удалённого сервера.
- 3. Запуск блока обработки данных.
- Создание вспомогательных файлов, необходимых для задания периодов ассимиляции данных дистанционного зондирования в модели гидротермодинамики Чёрного, Азовского и Мраморного морей. Другие вспомогательные операции, необходимые для запуска расчёта.
- 5. Запуск расчёта. Ожидание завершения расчёта.
- 6. Загрузка полученного реанализа в систему хранения данных (СХД).
- 7. Удаление всех временных файлов. Создание отчёта об ошибках работы программы.

Данная работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (МГУ) (Voevodin, 2019). СХД центра хранения больших данных МГУ используется как промежуточное хранилище данных наблюдений и результатов расчётов информационно-вычислительной системы «ИВМ РАН – Чёрное море», — это позволяет обеспечить надежное хранение данных благодаря настроенной репликации данных.

Полученные в результате численных расчётов трёхмерные поля температуры, солёности, скорости течений подготовлены и переданы в систему See the Sea (http://ocean.smislab.ru/) для дальнейшего использования.

Спутниковый сервис See the Sea — это информационная система, ориентированная на работу со спутниковыми, метеорологическими и другими данными, накопленными в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» с целью решения междисциплинарных задач исследования Мирового океана (Лупян и др., 2012). Система обеспечивает доступ не только к многолетним, постоянно пополняющимся архивам данных, но и к инструментам для их онлайн-анализа.

Реанализ гидрофизических полей, переданный в систему, позволил добавить в сервис возможность визуализации трёхмерных полей: отображения изолинейных карт для заданного гидрофизического параметра на определённой глубине в выбранное время, вертикальных профилей в произвольной точке и разрезов. Пользователи могут строить произвольные разрезы и выводить графики изменения основных гидрофизических параметров вдоль разреза. На *рис. 5* и *6* (см. с. 70) представлена визуализация в системе See the Sea — поле ТПМ с линией разреза вдоль акватории (см *рис. 5*) и значения температуры и солёности вдоль указанного разреза (см. *рис. 6*). В настоящее время в демонстрационном режиме в системе See the Sea пользователю доступны результаты расчёта трёхмерных полей температуры, солёности и поля скоростей в акватории Чёрного, Азовского и Мраморного морей за 2019 г., полученные в рамках данной работы.



Рис. 5. Поле ТПМ в акватории Чёрного, Азовского и Мраморного морей, °С; визуализация в системе See the Sea



Рис. 6. График температуры и солёности вдоль разреза; визуализация в системе See the Sea

Интеграция реанализа гидрофизических полей в сервис See the Sea позволяет специалистам, работающим в области исследования Мирового океана, проводить комплексный анализ состояния морских акваторий, получать более качественную интерпретацию процессов и явлений, происходящих в океане и приповерхностном слое атмосферы, таких как вихревые процессы, течения, в том числе глубинные, сток рек и пр.

Заключение

В работе представлены результаты применения данных дистанционного зондирования ЦКП «ИКИ-Мониторинг» о ТПМ Чёрного, Азовского и Мраморного морей в задаче вариационной ассимиляции данных в математической модели гидротермодинамики морских акваторий. Рассмотрены особенности получаемой информации, предложены алгоритмы дополнительной обработки данных. Проведены расчёты с использованием численной модели гидротермодинамики с ассимиляцией данных наблюдений о ТПМ за 2015–2021 гг.

Полученные в результате выполнения настоящей работы трёхмерные поля основных гидрофизических параметров (реанализ) интегрированы в информационную систему See the Sea, что позволит широкому кругу пользователей проводить дополнительные исследования и интерпретировать процессы, происходящие не только на поверхности, но и на глубине.

По результатам работы были обнаружены ошибки в данных и разница в значениях ТПМ, измеренных разными приборами и спутниками. Наличие ошибок, вносимых измерительными приборами и возникающих при пересчёте измеренных параметров, выявляет необходимость в дальнейшей разработке алгоритмов уточнения величины температуры, рассчитанной по данным различных приборов, и приведении её к «единой» системе.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-71-20035 «Информационно-вычислительная система вариационной ассимиляции данных наблюдений «ИВМ РАН — Чёрное море» и её интеграция с программно-аппаратным комплексом ЦКП «ИКИ-Мониторинг»).

Литература

- 1. Агошков В.И., Асеев Н.А., Гиниатулин С.В., Залесный В.Б., Захарова Н.Б., Пармузин Е.И. Информационно-вычислительная система «ИВМ РАН – Черное море». М.: ИВМ РАН, 2016. 137 с.
- 2. Акимов Е.А., Станичный С.В., Полонский А.Б. Использование данных сканера SEVIRI для оценки температуры поверхностного слоя Черного моря // Морской гидрофиз. журн. 2014. № 6. С. 37–46.
- Гинзбург А. И., Федоров К. Н. Термическое состояние пограничного слоя охлаждающейся воды при переходе от свободной конвекции к вынужденной // Изв. Акад. наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14. С. 778–785.
- 4. *Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Федоров К.Н.* Тонкая структура термического пограничного слоя в воде у поверхности раздела вода – воздух // Изв. Акад. наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 13. № 12. С. 1268–1277.
- 5. *Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Серых И.В., Лебедев С.А.* Климатические изменения гидрометеорологических параметров Черного и Азовского морей (1980–2020 гг.) // Океанология. 2021. Т. 61. № 6. С. 900–912. DOI: 10.1134/S0001437021060060.
- 6. *Гмурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. 9-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2003. 479 с.
- 7. Думанская И.О., Зеленько А.А., Мысленков С.А., Нестеров Е.С., Попов С.К., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С. Морские гидрологические прогнозы и оперативная океанология в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исслед. и прогнозы. 2019. Т. 374. № 4. С. 149–183.
- 8. Зеленько А.А., Вильфанд Р.М., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Цырульников М.Д., Свиренко П.И. Система усвоения океанографических данных и ретроспективный анализ гидрофизических полей Мирового океана // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 4. С. 501–513. DOI: 10.7868/S0002351516040143.
- 9. Кныш В.В., Демышев С.Г., Кубряков А.И., Моисеенко В.А., Мизюк А.И., Инюшина Н.В., Мартынов М.В., Коротаев Г.К. Сопоставление результатов реанализа гидрофизических полей Черного моря, выполненного по моделям в о- и z-координатах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. Вып. 24. С. 19–37.
- 10. *Лаворко В.С.* О турбулентном обмене и потоках тепла в воде вблизи поверхности моря // Изв. Акад. наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1970. Т. 6. № 9. С. 970–972.

- 11. Лебедев Н. Е., Савоськин В. М., Станичный С. В. Определение поверхностной температуры и перепада температуры в скин-слое с борта движущегося судна по данным ИК-измерений // Морской гидрофиз. журн. 1994. № 2. С. 83–88.
- 12. Лупян Е.А., Матвеев А.А., Уваров И.А., Бочарова Т.Ю., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Спутниковый сервис See the Sea — инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–261.
- 13. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
- 14. *Мизюк А. И.* Реанализ гидрофизических полей Черного моря на основе ассимиляции данных измерений температуры и солености в z-координатной модели // Морской гидрофиз. журн. 2014. № 3. С. 30–47.
- 15. Рубакина В.А., Кубряков А.А., Станичный С.В. Сезонная и суточная изменчивость характеристик термического скин-слоя на основе сопоставления спутниковых измерений SEVIRI и данных термопрофилирующих буев // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 3. С. 30–44. DOI: 10.31857/ S020596142102007X.
- 16. *Федоров К. Н.* О физической структуре приповерхностного слоя океана // Метеорология и гидрология. 1981. № 10. С. 58–66.
- 17. *Хунджуа Г. Г., Андреев Е. Г.* Экспериментальные исследования теплообмена между морем и атмосферой при мелкомасштабном взаимодействии // Изв. Акад. наук. СССР. Физика атмосферы и океана. 1974. Т. 10. № 10. С. 1110–1112.
- 18. *Хунджуа Г. Г., Гусев А. М., Андреев Е. Г., Скорохватов Н.А., Гуров В. В.* О структуре поверхностной холодной пленки океана и о теплообмене океана с атмосферой // Изв. Акад. наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 13. № 7. С. 753–758.
- 19. *Яковлев Н.Г., Володин Е.М., Грицун А.С.* Воспроизведение уровня Мирового океана и его естественной изменчивости в климатической модели ИВМ РАН // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 4. С. 376–385. DOI: 10.7868/S000235151604012X.
- Agoshkov V. I., Parmuzin E. I., Zakharova N. B., Shutyaev V. P. Variational assimilation with covariance matrices of observation data errors for the model of the Baltic Sea dynamics // Russian J. Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2018. V. 33. No. 3. P. 149–160. DOI: 10.1515/rnam-2018-0013.
- Agoshkov V. I., Shutyaev V. P., Parmuzin E. I., Zakharova N. B., Sheloput T. O., Lezina N. R. Variational Data Assimilation in the Mathematical Model of the Black Sea Dynamics // Physical Oceanography. 2019. V. 26. No. 6. P. 515–527. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-6-515-527.
- 22. *Belokopytov V. N.* Interannual variations of the renewal of waters of the cold intermediate layer in the Black Sea for the last decades // Physical Oceanography. 2011. V. 20. No. 5. P. 347–355. DOI: 10.1007/s11110-011-9090-x.
- Donlon C., Robinson I., Casey K.S., Vazquez-Cuervo J., Armstrong E., Arino O., Gentemann C., May D., LeBorgne P., Piollé J., Barton I., Beggs H., Poulter D.J.S., Merchan C.J., Bingham A., Heinz S., Harris A., Wick G., Emery B., Minnett P., Evans R., Llewellyn-Jones D., Mutlow C., Reynolds R.W., Kawamura H., Rayner N. The global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature pilot project // Bull. American Meteorological Society. 2007. V. 88. No. 8. P. 1197–1214. DOI: 10.1175/ BAMS-88-8-1197.
- 24. *Liang X. M., Ignatov A.* AVHRR, MODIS, and VIIRS radiometric stability and consistency in SST bands // J. Geophysical Research: Oceans. 2013. V. 118. No. 6. P. 3161–3171. DOI: 10.1002/jgrc.20205.
- 25. *McAlister E. D., McLeish W.* Heat transfer in the top millimeter of the ocean // J. Geophysical Research. 1969. V. 74. No. 13. P. 3408–3414. DOI: 10.1029/JC074i013p03408.
- 26. Petrenko B., Pryamitsyn V., Ignatov A., Jonasson O., Kihai Y. AVHRR GAC Sea Surface Temperature Reanalysis Version 2 // Remote Sensing. 2022. V. 14. Art. No. 3165. DOI: 10.3390/rs14133165.
- 27. *Pisano A., Nardelli B. Buongiorno, Tronconi C., Santoleri R.* The new Mediterranean optimally interpolated pathfinder AVHRR SST Dataset (1982–2012) // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 176. P. 107–116. DOI: 10.1016/j.rse.2016.01.019.
- 28. *Rosner B*. On the detection of many outliers // Technometrics. 1975. V. 17. No. 2. P. 221–227. DOI: 10.1080/00401706.1975.10489305.
- Sarkisyan A. S., Ibrayev R. A., Iakovlev N. G. High resolution and four-dimensional analysis as a prospect for ocean // Russian J. Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2010. V. 25. No. 5. P. 477–496. DOI: 10.1515/RJNAMM.2010.030.
- 30. *Saunders P. M.* Aerial measurement of sea surface temperature in the infrared // J. Geophysical Research. 1967. V. 72. No. 16. P. 4109–4117. DOI: 10.1029/JZ072i016p04109.

- Voevodin V.I., Antonov A., Nikitenko D., Shvets P., Sobolev S., Sidorov I., Stefanov K., Voevodin Vad., Zhumatiy S. Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2019. V. 6. No. 2. P. 4–11. DOI: 10.14529/ jsfi190201.
- 32. *Wu J*. On the cool skin of the ocean // Boundary-Layer Meteorology. 1985. V. 31. No. 2. P. 203–207. DOI: 10.1007/BF00121179.
- Zalesny V. B., Diansky N.A., Fomin V. V., Moshonkin S. N., Demyshev S. G. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // Russian J. Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2012. V. 27. No. 1. P. 95–111. DOI: 10.1515/rnam-2012-0006.

Reanalysis of hydrophysical fields based on assimilation of data from the IKI-Monitoring Center for Collective Use in the hydrothermodynamics model of the Black, Azov and Marmara seas

N. B. Zakharova¹, E. I. Parmuzin^{1,2}, N. R. Lezina¹, V. I. Agoshkov^{1,2}, T. O. Sheloput^{1,3}, S. A. Lebedev^{1,4}, V. P. Shutyaev^{1,3}, B. S. Shevchenko²

¹ Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAN, Moscow 119333, Russia E-mail: zakharova_nb@inm.ras.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
³ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny 141701, Russia
⁴ Geophysical Center RAS, Moscow 119296, Russia

This work is devoted to the reanalysis of hydrophysical fields based on the assimilation of remote sensing observational data in a numerical model of the hydrothermodynamics of the Black, Azov and Marmara seas in order to integrate the calculation results into the system for monitoring the state of marine areas. The analysis of Aqua, Terra, Sentinel and SNPP satellite data on the sea surface temperature received from the IKI-Monitoring Center for Collective Use was carried out. To process the obtained observational data, to identify and eliminate erroneous values, the statistical method for finding anomalous values and the three-sigma rule were used. An algorithm for variational assimilation of satellite data was implemented. The work uses the INMOM marine circulation mathematical model based on the complete equations of marine hydrothermodynamics. As a result of modeling using the procedure of variational assimilation of observational data, the fields of the main hydrophysical parameters (temperature, salinity, velocity field, sea level) were constructed for the studied water areas. The calculated fields were integrated into the See the Sea satellite service for solving interdisciplinary problems of marine research. The three-dimensional reanalysis fields transferred to the service add the possibility for users to study processes in the water column.

Keywords: sea surface temperature, data assimilation, data processing, satellite data, collective use center, reanalysis

Accepted: 21.11.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-63-75

References

- 1. Agoshkov V. I., Aseev N. A., Giniatulin S. V., Zalesnyi V. B., Zakharova N. B., Parmuzin E. I., *Informational computational system "INM RAS Black Sea"*, Moscow: INM RAS, 2016, 137 p. (in Russian).
- 2. Akimov E. A., Stanichnyi S. V., Polonskii A. B., Using SEVIRI scanner data to estimate the temperature of the surface layer of the Black Sea, *Marine Hydrophysical J.*, 2014, No. 6, pp. 37–46 (in Russian).
- 3. Ginzburg A. I., Fedorov K. N., Thermal state of the boundary layer of cooling water during the transition from free convection to forced convection, *Izvestiya Akademii nauk SSSR*, *Fizika atmosphery i okeana*, 1978, Vol. 14, pp. 778–785 (in Russian).

- 4. Ginzburg A. I., Zatsepin A. G., Fedorov K. N., Thin structure of the thermal boundary layer in water at the water-air interface, *Izvestiya Akademii nauk SSSR*, *Fizika atmosphery i okeana*, 1977, Vol. 13, No. 12, pp. 1268–1277 (in Russian).
- Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Serykh I. V., Lebedev S. A., Climate Change in the Hydrometeorological Parameters of the Black and Azov Seas (1980–2020), *Oceanology*, 2021, Vol. 61, No. 6, pp. 745–756, DOI: 10.1134/S0001437021060060.
- 6. Gmurman V. E., *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika, uchebnoe posobie dlya vuzov* (Probability theory and mathematical statistics), 9th ed., Moscow: Vysshaya shkola, 2003, 479 p. (in Russian).
- 7. Dumanskaya I.O., Zelenko A.A., Myslenkov S.A., Nesterov E.S., Popov S.K., Resnyanskii Yu.D., Strukov B.S., Marine hydrological forecasts and operational oceanology in the Hydrometeorological Center of Russia, *Hydrometeorological Research and Forecasting*, 2019, Vol. 374, No. 4, pp. 149–183 (in Russian).
- 8. Zelenko A.A., Vil'fand R.M., Resnyanskii Yu.D., Strukov B.S., Tsyrulnikov M.D., Svirenko P.I., An ocean data assimilation system and reanalysis of the World Ocean hydrophysical fields, *Izvestiya*, *Atmospheric and Ocean Physics*, 2016, Vol. 52, No. 4, pp. 443–454, DOI: 10.1134/S0001433816040149.
- Knysh V.V., Demyshev S.G., Kubryakov A.I., Moiseenko V.A., Mizyuk A.I., Inyushina N.V., Martynov M.V., Korotaev G.K., Comparison of results of Black Sea hydrophysical fields reanalysis performed by models in σ- and z-coordinates, In: *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon morya*, Sevastopol: MGI NAN Ukrainy, 2011, Vol. 24, pp. 19–37 (in Russian).
- 10. Lavorko V.S., On turbulent exchange and heat fluxes in water near sea surface, *Izvestiya Akademii nauk SSSR*, *Fizika atmosphery i okeana*, 1970, Vol. 6, No. 9, pp. 970–972 (in Russian).
- 11. Lebedev N.E., Savoskin V.M., Stanichnyi S.V., Determination of surface temperature and temperature difference in the skin layer from the side of a moving vessel according to IR measurements, *Marine Hydrophysical J.*, 1994, No. 2, pp. 83–88 (in Russian).
- 12. Loupian E. A., Matveev A. A., Uvarov I. A., Bocharova T. Yu., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., The satellite service See the Sea — a tool for the study of oceanic phenomena and processes, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 251–261 (in Russian).
- 13. Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskiy A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
- 14. Mizyuk A. I., Re-analysis of Black Sea hydrophysical fields based on assimilation of temperature and salinity measurements in the z-coordinate model, *Marine Hydrophysical J.*, 2014, No. 3, pp. 30–47 (in Russian).
- 15. Rubakina V.A., Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Seasonal and diurnal variability of the thermal skin layer characteristics based on a comparison of satellite measurements by SEVIRI and data from temperature-profiling drifters, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, No. 9, pp. 950–961, DOI: 10.1134/S0001433821090607.
- 16. Fedorov K. N., Physical structure of the subsurface layer of the ocean, *Meteorologiya i gidrologiya*, 1981, No. 10, pp. 45–51 (in Russian).
- 17. Khundzhua G. G., Andreev E. G., An experimental study of heat exchange between the ocean and the atmosphere in small-scale interaction, *Izvestiya Akademii nauk SSSR*, *Fizika atmosphery i okeana*, 1974, Vol. 10, pp. 685–687 (in Russian),
- 18. Khundzhua G. G., Gusev A. M., Andreev E. G., Gurov V.V., Skorokhvatov N.A., On the Structure of the Ocean Surface Cold Film and On the Heat Exchange of the Ocean with the Atmosphere, *Izvestiya Akademii nauk SSSR, Fizika atmosphery i okeana*, 1977, Vol. 13, No. 7, pp. 753–758 (in Russian).
- 19. Yakovlev N. G., Volodin E. M., Gritsun A. S., Simulation of the Spatiotemporal Variability of the World Ocean Sea Surface Hight by the INM Climate Model, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, No. 4, pp. 376–385, DOI: 10.1134/S0001433816040125.
- 20. Agoshkov V. I., Parmuzin E. I., Zakharova N. B., Shutyaev V. P., Variational assimilation with covariance matrices of observation data errors for the model of the Baltic Sea dynamics, *Russian J. Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, 2018, Vol. 33, No. 3, pp. 149–160, DOI: 10.1515/rnam-2018-0013.
- 21. Agoshkov V. I., Shutyaev V. P., Parmuzin E. I., Zakharova N. B., Sheloput T. O., Lezina N. R., Variational Data Assimilation in the Mathematical Model of the Black Sea Dynamics, *Physical Oceanography*, 2019, Vol. 26, No. 6, pp. 515–527, DOI: 10.22449/1573-160X-2019-6-515-527.
- 22. Belokopytov V. N., Interannual variations of the renewal of waters of the cold intermediate layer in the Black Sea for the last decades, *Physical Oceanography*, 2011, Vol. 20, No. 5, pp. 347–355, DOI: 10.1007/s11110-011-9090-x.
- Donlon C., Robinson I., Casey K.S., Vazquez-Cuervo J., Armstrong E., Arino O., Gentemann C., May D., LeBorgne P., Piollé J., Barton I., Beggs H., Poulter D.J.S., Merchant C.J., Bingham A., Heinz S., Harris A., Wick G., Emery B., Minnett P., Evans R., Llewellyn-Jones D., Mutlow C., Reynolds R.W., Kawamura H.,

Rayner N., The global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature pilot project, *Bull. American Meteorological Society*, 2007, Vol. 88, No. 8, pp. 1197–1214, DOI: 10.1175/BAMS-88-8-1197.

- 24. Liang X. M., Ignatov A., AVHRR, MODIS, and VIIRS radiometric stability and consistency in SST bands, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2013, Vol. 118, No. 6, pp. 3161–3171, DOI: 10.1002/jgrc.20205.
- 25. McAlister E. D., McLeish W., Heat transfer in the top millimeter of the ocean, *J. Geophysical Research*, 1969, Vol. 74, No. 13, pp. 3408–3414, DOI: 10.1029/JC074i013p03408.
- 26. Petrenko B., Pryamitsyn V., Ignatov A., Jonasson O., Kihai Y., AVHRR GAC Sea Surface Temperature Reanalysis Version 2, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Art. No. 3165, DOI: 10.3390/rs14133165.
- Pisano A., Nardelli B. Buongiorno, Tronconi C., Santoleri R., The new Mediterranean optimally interpolated pathfinder AVHRR SST Dataset (1982–2012), *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 176, pp. 107–116, DOI: 10.1016/j.rse.2016.01.019.
- 28. Rosner B., On the detection of many outliers, *Technometrics*, 1975, Vol. 17, No. 2, pp. 221–227, DOI: 10.1080/00401706.1975.10489305.
- 29. Sarkisyan A. S., Ibrayev R. A., Iakovlev N. G., High resolution and four-dimensional analysis as a prospect for ocean, *Russian J. Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, 2010, Vol. 25, No. 5, pp. 477–496, DOI: 10.1515/RJNAMM.2010.030.
- 30. Saunders P. M., Aerial measurement of sea surface temperature in the infrared, *J. Geophysical Research*, 1967, Vol. 72, No. 16, pp. 4109–4117, DOI: 10.1029/JZ072i016p04109.
- Voevodin V.I., Antonov A., Nikitenko D., Shvets P., Sobolev S., Sidorov I., Stefanov K., Voevodin Vad., Zhumatiy S., Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community, *Supercomputing Frontiers and Innovations*, 2019, Vol. 6, No. 2, pp. 4–11, DOI: 10.14529/ jsfi190201.
- 32. Wu J., On the cool skin of the ocean, *Boundary-Layer Meteorology*, 1985, Vol. 31, No. 2, pp. 203–207, DOI: 10.1007/BF00121179.
- Zalesny V. B., Diansky N. A., Fomin V. V., Moshonkin S. N., Demyshev S. G., Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov, *Russian J. Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, 2012, Vol. 27, No. 1, pp. 95–111, DOI: 10.1515/rnam-2012-0006.