

**Н. Б. Захарова¹, Е. И. Пармузин¹, Т. О. Шелопут^{1,3},
В. И. Агошков^{1,2}, Н. Р. Лёзина¹**

¹Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской академии наук,
Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский
университет), Долгопрудный, Россия
e-mail: n.zakharova@inm.ras.ru

ИНТЕГРАЦИЯ ИВС «ИВМ РАН – ЧЕРНОЕ МОРЕ» С ЦКП «ИКИ – МОНИТОРИНГ»

Аннотация. Настоящая работа посвящена интеграции двух систем с целью моделирования и мониторинга состояния морских акваторий. В работе используются данные наблюдений со спутников о состоянии Черного и Азовского морей, предоставляемые Центром коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ – Мониторинг». Информационно-вычислительная система (ИВС) вариационной ассимиляции данных наблюдений «ИВМ РАН – Чёрное море» создана в ИВМ РАН с возможностью ассимиляции данных наблюдений о температуре поверхности моря и позволяет рассчитывать основные гидрофизические параметры исследуемых сред. В ИВС реализован алгоритм вариационной ассимиляции данных наблюдений о температуре поверхности моря с различных спутников, учитывающий специфику получаемых данных. По модели гидротермодинамики Черного и Азовского морей с использованием процедуры вариационной ассимиляции данных построен реанализ. Трёхмерные поля температуры, солёности и скорости течений передаются в информационную систему *See the Sea*, позволяющую визуализировать и анализировать полученные данные для их дальнейшего использования.

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

Введение. Целью работы является интеграция системы моделирования термодинамики морских акваторий, включающей процедуры ассимиляции данных, с данными наблюдений о состоянии морских акваторий, имеющимися в центре коллективного пользования. Система вариационной ассимиляции данных позволяет учитывать реальные данные наблюдений при моделировании и прогнозировании состояния исследуемых сред. Учет данных наблюдений при математическом моделировании может существенно улучшить точность реанализа, что делает задачу ассимиляции данных важным шагом в задачах численного моделирования.

Информационно-вычислительная система вариационной ассимиляции данных «ИВМ РАН – Черное море» основана на модели

термодинамики Черного и Азовского морей *Institute of Numerical Mathematics Ocean Model (INMOM)* [1], процедурах ассимиляции данных наблюдений [2] и включает блок обработки данных наблюдений, а также пользовательский интерфейс для запуска расчётов [3]. В численной модели термодинамики реализован метод расщепления по направлениям и физическим процессам, сигма-система координат по вертикальной переменной. С помощью модели можно проводить расчёты основных гидрофизических параметров (температура, солёность, уровень, скорости течений), а также получать производные от них (вертикальные скорости, плотность, давление и т. д.). В качестве входящих параметров модели используются внешнее атмосферное воздействие и граничные условия (скорость ветра, солнечная радиация, температура приповерхностного слоя атмосферы, осадки и стоки рек).

В работе используются данные о температуре поверхности Черного и Азовского морей за 2015–2022 гг. для ассимиляции в численной модели термодинамики морей. Данные получены из Центра коллективного пользования «ИКИ – Мониторинг», крупного объекта научной инфраструктуры, созданного для мониторинга природной среды, обеспечения доступа к многолетним архивам спутниковых данных, позволяющим проводить их анализ и обработку [4].

В работе реализованы алгоритмы вариационной ассимиляции и обработки данных, учитывающие специфику получаемых данных наблюдений. Проведены расчеты реанализа по численной модели термодинамики Черного и Азовского морей. Рассчитанные поля основных гидрофизических параметров переданы в систему хранения и визуализации данных *See the Sea* для последующих исследований.

Алгоритмы и методы. Данные наблюдений о температуре поверхности моря, полученные с различных спутников (*Aqua, Terra, SNPP*) и приборов (*MODIS, VIIRS*), поступают нерегулярно и зачастую покрывают только часть исследуемой акватории в силу погодных условий, особенностей измерительных приборов и траекторий спутников. На основе анализа данных и ошибок данных реализован алгоритм, основанный на определении весовых коэффициентов, характеризующих близость данных наблюдений к известным проверенным и (или) принятым «эталонными» значениям [5]. На основании полученных полей данных дистанционного зондирования и дополнительного набора среднесуточных данных с европейского портала «Коперникус» (www.marine.copernicus.eu) с помощью предложенного метода построены весовые коэффициенты. Вычисленная матрица весовых коэффициентов используется в алгоритме вариационной ассимиляции данных наблюдений в численной модели термодинамики Черного и Азовского морей.

В настоящей работе рассматривается вариационная ассимиляция данных, основанная на теории обратных задач и сопряженных уравнений. В задаче вводится функционал стоимости, характеризующий «близость» решения математической модели к данным наблюдений. Ставится задача

поиска решения, минимизирующего данный функционал. Одним из методов решения поставленной задачи является сведение ее к системе оптимальности, состоящей из уравнения модели, сопряженного уравнения и уравнения для управления. В данном случае управлением является функция потока тепла на поверхности моря. Для учета ошибок наблюдений в функционал вводятся ковариационные матрицы ошибок данных, посчитанные на основе статистических свойств данных наблюдений за 1982–2017 гг.

Результаты. На основе получаемых данных и используемой численной модели термодинамики Черного и Азовского морей построен реанализ за 2019 г. Полученные в результате численных расчетов трехмерные поля температуры, солености, скорости течений подготовлены и переданы в систему *See the Sea* для дальнейшего использования. Спутниковый сервис *See the Sea* – это информационная система, ориентированная на работу с данными спутниковых наблюдений для решения междисциплинарных задач исследования Мирового океана [6]. Для данных, переданных в систему, реализована возможность их визуализации, отображения изолинейных карт для заданного гидрофизического параметра на определенной глубине в выбранное время, вертикальных профилей и разрезов.

В настоящее время в демонстрационном режиме в системе *See the Sea* любому пользователю доступны результаты расчета трехмерного поля температуры Черного, Азовского и Мраморного морей за 2019 г., полученные в рамках данной работы.

Заключение. В работе представлена интеграция системы ассимиляции данных наблюдений в численной модели гидротермодинамики Черного и Азовского морей и центра коллективного пользования «ИКИ – Мониторинг», обеспечивающего доступ к многолетним архивам спутниковых данных. Проведены расчеты численной модели с процедурами вариационной ассимиляции получаемых данных, построены поля основных гидрофизических параметров исследуемых акваторий. Построенный реанализ передан в систему *See the Sea* с целью мониторинга и анализа состояния морских сред.

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

Список литературы

1. Zalesny V. B., Diansky N. A., Fomin V. V. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2012. Vol. 27. No. 1. P. 95–111.
2. Agoshkov V. I. et al. Variational Data Assimilation in the Mathematical Model of the Black Sea Dynamics // Physical Oceanography. 2019. Vol. 26. No. 6. P. 515–527.

3. Агошков В. И. и др. Информационно-вычислительная система «ИВМ РАН – Черное море». Москва, ИВМ РАН, 2016.
4. Лупян Е. А. и др. 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.
5. Zakharova N. B., Parmuzin E. I. Data analysis for variational assimilation of the surface temperature of the Black and Azov Seas // Russian Journal of Earth Sciences. 2021. Vol. 21, ES6002.
6. Лупян Е. А. и др. 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.

N. B. Zakharova¹, E. I. Parmuzin², T. O. Sheloput²,
V. I. Agoshkov², N. R. Lezina²

¹Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

e-mail: n.zakharova@inm.ras.ru

INFORMATIONAL COMPUTATIONAL SYSTEM «INM RAS – BLACK SEA» AND CENTER FOR COLLECTIVE USE «IKI – MONITORING» INTEGRATION

This work is devoted to the integration of two systems for the purpose of modeling and monitoring the state of marine waters. Authors uses satellite observation data on the state of the Black and Azov Seas, provided by the Center for Collective Use «IKI – Monitoring». The information and Computing system (ICS) of variational assimilation of observational data «INM RAS – Black Sea» was created at the INM RAS with the possibility of assimilation of observation data on sea surface temperature and allows calculating the main hydrophysical parameters of the water area. The ICS implements variational assimilation of observation data on the sea surface temperature from various satellites. The assimilation algorithm is implemented, which allows taking into account the specifics of the data obtained. According to the model of hydrothermodynamics of the Black and Azov Seas, a reanalysis was constructed using the procedure of variational data assimilation. Three-dimensional fields of temperature, salinity and current velocity are transmitted to the «See the Sea» information system, which allows visualizing and analyzing the data obtained for their further use.

The work is supported by the Russian Science Foundation (project №19-71-20035).

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